

**X
X
V
I
I

S
I
M
P
O
Z
I
J
U
M
DZZ
SCG**

**XXVII SIMPOZIJUM
DRUŠTVA ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA
SRBIJE I CRNE GORE**



**DRUŠTVO ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA
SRBIJE I CRNE GORE**

ZBORNİK RADOVA

**XXVII SIMPOZIJUM DZZ SCG
Vrnjačka Banja
2-4. oktobar 2013.**

**Beograd
2013.god.**

ZBORNİK RADOVA
XXVII SIMPOZIJUM DZZ SCG
2.10-4.10.2013.

Izdavači:

Institut za nuklearne nauke „Vinča“

Društvo za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore

Za izvršnog izdavača:

Dr Bojan Radak

Urednici:

Dr Olivera Ciraj-Bjelac

Dr Gordana Pantelić

ISBN 978-86-7306-115-3

© Institut za nuklearne nauke „Vinča“

Tehnička obrada: Arts Design

Štampa: Arts Design

Tiraž: 150 primeraka

Štampa završena septembra 2013.

XXVII SIMPOZIJUM DRUŠTVA
ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA
SRBIJE I CRNE GORE
Vrnjačka Banja, od 2.10. do 4.10.2013. god.

Organizatori:

DRUŠTVO ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA SRBIJE I CRNE GORE

INSTITUT ZA NUKLEARNE NAUKE „VINČA“

Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine „Zaštita“

Organizacioni odbor

Predsednik: Olivera Ciraj-Bjelac

Članovi:

Milojko Kovačević

Maja Eremić-Savković

Vladimir Udovičić

Ištvan Bikit

Nevenka Antović

Dragoslav Nikezić

Vera Spasojević-Tišma

Snežana Dragović

Danijela Arandić

Đorđe Lazarević

Jelena Stanković

Predrag Božović

Redakcioni odbor:

Vladimir Udovičić

Vera Spasojević-Tišma

Goran Ristić

Gordana Joksić

Gordana Pantelić

Dragana Todorović

Dušan Mrđa

Ilija Plečaš

Ivana Vukanac

Marko Ninković

Miodrag Krmar

Nataša Lazarević

Olivera Ciraj Bjelac

Srboljub Stanković

Organizaciju su pomogli:

Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije

Institut za nuklearne nauke Vinča, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine

Institut za nuklearne nauke Vinča, Spoljnotrgovinski promet

Knauf Zemun d.o.o.

Ovaj Zbornik je zbirka radova saopštenih na XXVII Simpozijumu Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore koji je održan od 2.10. do 4.10.2013. godine u Vrnjčkoj Banji. Radovi su razvrstani po sekcijama. Iako su svi radovi u Zborniku recenzirani od strane Redakcionog odbora, za sve iznesene tvrdnje i rezultate odgovorni su sami autori.

Jugoslovensko društvo za zaštitu od zračenja osnovano je 1963. godine u Portorožu. Ovogodišnji Simpozijum je posebno značajan usled činjenice da Društvo obeležava izuzetan jubilej - 50 godina organizovane zaštite od zračenja na prostoru bivše Jugoslavije i ovom jubileju posvećujemo zasluženu pažnju tokom XXVII Simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore. Simpozijum je nastavak pet decenija duge tradicije Društva za zaštitu od zračenja i mesto na kome kroz stručni program predočavamo svaki napredak u oblasti zaštite od zračenja, analiziramo dosadašnje rezultate i aktuelna dešavanja, razmenjujemo iskustva sa kolegama iz zemlje i regiona, ali i srećemo stare i upoznajemo nove prijatelje.

Organizacioni odbor se zahvaljuje autorima i koautorima naučnih i stručnih radova na doprinosu i uloženom trudu. Posebno se zahvaljujemo sponzorima koji su pomogli održavanje Simpozijuma i štampanje Zbornika.

Organizacioni odbor

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

502:504.5]:539.16(082)

614.875/.876(082)

539.16.04(082)

539.1.074/.08(082)

577.1:539.1(082)

ДРУШТВО за заштиту од зрачења Србије и Црне
Горе (Београд). Симпозијум (27 ; 2013 ;
Врњачка Бања)

Zbornik radova / XXVII simpozijum DZZ SCG
[Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne
Gore], Vrnjačka Banja, 2-4. oktobar 2013. ;
[organizatori] Društvo za zaštitu od zračenja
Srbije i Crne Gore [i] [Institut za nuklearne
nauke Vinča, Laboratorija za zaštitu od
zračenja i zaštitu životne sredine "Zaštita"]
; [urednik Olivera Ciraj-Bjelac, Gordana
Pantelić]. - Beograd : Institut za nuklearne
nauke "Vinča" : Društvo za zaštitu od
zračenja Srbije i Crne Gore, 2013 (Beograd :
Arts design). - 472, 4 str. : ilustr. ; 24 cm

Radovi na srp. i engl. jeziku. - Tekst ćir. i
lat. - Tiraž 150. - Bibliografija uz svaki
rad. - Abstracts. - Registar.

ISBN 978-86-7306-115-3

1. Друштво за заштиту од зрачења Србије и
Црне Горе (Београд)

a) Заштита од јонизујућег зрачења -
Зборници b) Животна средина - Загађење
радиоактивним материјама - Зборници c)
Радиоактивно зрачење - Штетно дејство -
Зборници d) Нејонизујуће зрачење - Штетно
дејство - Зборници e) Радиобиологија -
Зборници f) Дозиметри - Зборници
COBISS.SR-ID 201298188

50 GODINA ZAŠTITE OD ZRAČENJA

ЗАШТИТА ОД ЗРАЧЕЊА ЗНАЧАЈНИ ДАТУМИ И ДОГАЂАЈИ

Предавање по позиву

Марко М. НИНКОВИЋ

Институт за нуклеарне науке – Винча, Лабораторија за заштиту од зрачења и заштиту животне средине, Београд, Србија, markon@vinca.rs

САДРЖАЈ

Штетно деловање јонизујућег зрачења и потреба за заштитом уочени су непосредно по открићу X-зрачења и радиоактивности. Препознавање заштите од зрачења као професионалне области везано је за градњу првог нуклеарног реактора у свету. Катастрофалне последице експлозија атомских бомби над Хирошимом и Нагасакијем драматично су подстакле развој ове области. Изградња великог броја нуклеарних електрана у другој половини прошлог века, као и први акциденти на њима, посебно у Чернобилу и недавно Фукушими, поставили су нове веома строге захтеве за унапређење заштите. Употреба зрна од осиромашеног уранијума у ратне сврхе, од краја прошлог века, побудила је посебну пажњу истраживача у области заштите од зрачења у свету. Почетак професионалног рада на заштити од зрачења код нас везан је за градњу нуклеарних реактора у Винчи. Акцидент на реактору РБ 1958. године био је озбиљно упозорење да се заштити од зрачења мора посветити знатно већа пажња. Већ 1959. године уследило је оснивање посебне Лабораторије у Винчи под називом "Радиолошка заштита" са задатком да се професионално бави истраживањима, развојем и рутинским пословима у овој области. Слично се поступило и на другим местима у земљи. Резултати ових активности налазили су директну примену у заштити од зрачења у процесима коришћења снопова зрачења и радиоактивних извора у медицини, енергетици, науци, образовању и др.

1. Увод

Штетно деловање јонизујућег зрачења и потреба за заштитом препознати су веома рано, практично непосредно по открићу X – зрачења и радиоактивности [1]. Занимљиво је истаћи да је наш Никола Тесла први у свету дефинисао један од основних принципа заштите од продорних зрачења – заштиту растојањем. Он је то учинио јуна месеца 1896. године кроз упозорење: «*Experimentaters should not get too close to the X – ray tube*» [2]. Неколико месеци касније, 12 децембра 1896. године, у америчком часопису «*Western Electrician*» појавио се чланак Wolfram Fushs-a [3] у коме су дате препоруке како да се умањи ефекат штетног деловања зрачења, које гласе: а) *скратити време излагања зрачењу што је могуће више*; б) *не приносити рендгенску цев телу ближе од 12 инча*, и в) *истрљати кожу нежно вазелином на делу који ће бити изложен зрачењу*. Не зна се да ли је Wolfram Fushs-у било познато упозорење Николе Тесле при дефиницији друге препоруке. Међутим, чињеница је да од ове три препоруке, исказане само годину дана по открићу X – зрачења, прве две и данас претстављају основне принципе заштите од зрачења.

Поред наведеног постојали су и многи други примери указивања на потребу заштите од зрачења. Ипак, у првих тридесетак година коришћења зрачења из рендгенских уређаја и радијума, заштита од зрачења била је препуштена, практично, само онима који су користили зрачење у свакодневној пракси. Другим речима, била је норганизована. Организовани приступ заштити на међународном нивоу, везан је за оснивање Међународне комисије за заштиту од зрачења, односно њеног претходника.

2. Међународна комисија за заштиту од зрачења - ICRP

У појединим развијенијим земљама света чињени су покушаји регулисања заштите од зрачења на различите начине и то почев од првих година прошлог века. Међународни приступ овом проблему везан је за 1925. годину, односно Први конгрес радиолога одржан у Лондону те године. На овом Конгресу основано је најпре тело са називом "Међународни комитет за јединицу X-зрачења", које је касније преименовано у "Међународна комисија за радијационе јединице и мерења" (International Commission on Radiation Units and Measurements - ICRU). У исто време родила се идеја да се формира и друго међународно тело које би се бринуло о заштити од зрачења. Ова идеја реализована је на следећем Конгресу радиолога, одржаном у Стокхолму три године касније - 1928. Та година се сматра годином оснивања "Међународне комисије за заштиту од зрачења" (*International Commission on Radiological Protection - ICRP*) иако је заправо тада основан њен директни претходник под називом "Међународни комитет за заштиту од X-зрачења и радијума". Оснивање ове Комисије побудило је мање интересовања од оснивања Комисије за јединице, што се може закључити по броју чланова само 7, према 24. Иако је идејни творац Комисије био Dr G.W.C. Kaye, из Британске националне физичке лабораторије, за првог председника Комисије изабран је 32-годишњи Швеђанин Rolf Sievert, из обзира према земљи домаћину Конгреса. Поред два поменута научника трећи главни покретач активности новоосноване Комисије био је Lauriston Taylor из Америчког националног бироа за стандарде.

Један од првих резултата рада Комисије (Комитета) била је препорука подношљивог - толерантног нивоа излагања зрачењу од око 0,2 R/d, што би данас одговарало око 0,6 Sv/a. Комисија је ову препоруку усвојила на трећем састанку одржаном у Цириху 1934. Била је то вредност за око 10 пута нижа од до тада коришћене - 6 Sv/a, коју су независно препоручили Американац A. Matcheler 1924. и R. Sievert 1925. Оригиналне препоруке Matcheller-a и Sievert-a формулисане су на основу прага дозе за појаву црвенила коже при излагању зрачењу, названог Skin Erythema Dose (SED). Комисија се састала још једном пре Другог светског рата, 1937. године у Чикагу.

Комисија се поново састаје тек 1950. у Лондону, када је добила своје данашње име. Истовремено усваја нову препоруку под називом "максимално дозвољена доза" од 0,3 R/sem., уместо старе *толерантне дозе* од 0,2 R/d из 1934. Дакле, препоручује се нов назив и око три пута мања вредност допуштеног излагања за професионалце, што у новим јединицама износи 150 mSv/a.

У првој половини педесетих година у развијеним земљама света интензивно се трага за новим штетним ефектима зрачења. Нагласак је стављен посебно, на деловање зрачења на гонаде уз наговештаје да за то дејство нема прага. Имајући у виду и тај, мада још увек неразјашњен ефекат, ICRP на састанку у Женеви 1956. године предлаже даље снижавање *максимално дозвољене дозе* за професионалце, са 0,3 на 0,1 rem/sem. Истовремено, подстакнута истим разлозима, ICRP први пут предлаже и *максимално дозвољену дозу за становништво* (непрофесионално излагање) у висини од 1/10 вредности за професионалце, што значи 0,05 rem/sem. односно, 0,5 rem/a. У другој половини педесетих година на међународној сцени појављују се нова тела и институције, основана под окриљем Уједињених нација, као што су "Научни комитет Уједињених нација за ефекте атомских зрачења" (UNSCEAR, 1956) и Међународна агенција за атомску енергију (IAEA, 1957), чији су програми активности, у потпуности или значајним делом, усмерени на ефекте зрачења и заштиту од зрачења. Те две новонастале светске институције постале су од самог почетка значајан ослонац за даљи успешан рад једне већ афирмисане светске невладине организације, каква је од оснивања била ICRP. Овакав знатно шири приступ проблему заштите од зрачења на међународном нивоу, до кога је дошло после рата и нарочито у другој половини педесетих, била је директна последица сазревања свести о све већој распрострањености зрачења као специфичног штетног агенса. У време оснивања ICRP коришћена су у пракси само два извора зрачења - радијум и рендгенски уређаји. Међутим, до друге половине педесетих већ су се десиле Хиросима и

Нагасаки, велики број пробних експлозија атомских и водородних бомби у ваздуху, изграђени су бројни нуклеарни реактори. Одиграла су се и прва два већа акцидента на нуклеарним постројењима у Виндскејлу (Енглеска) и Киштому код Чељабинска (СССР), при којима је дошло до значајне контаминације околине.

У наведеним условима значај ICRP непрестано је растао. Њене научне активности су биле олакшане захваљујући помоћи UNSCEAR-а, у прикупљању и систематизацији података о изворима и ефектима зрачења са једне стране, и IAEA кроз разраду и спровођење у пракси, широм света, њених препорука, са друге стране. У непрекидном раду ICRP, ипак, нарочито се истичу године 1977., 1990. и 2007., када су издате нове кључне - збирне препоруке, којима су посвећени посебни параграфи овог текста.

У свом трајању ICRP је 1998. године прославила *седамдесетогодишњицу* на истом месту где је и основана у Стокхолму. *Lars Eric Holm*, директор Шведског института за заштиту од зрачења и тада члан ICRP и актуелни председник UNSCEAR, а потом председник ICRP, изјавио је да *очекује да ће ICRP наставити да игра значајну улогу у заштити од зрачења и у 21-ом веку* [4]. Током 2008. године ICRP је прославила *осадамдесетогодишњицу* на 12. Конгресу у Аргентини.

3. Професионализација заштите од зрачења

Већина почетних активности на пољу контроле нивоа зрачења и заштите од зрачења одвијале су се на добровољној бази, без регулисаног приступа условљеног прописима. На томе се радило успут, као секундарна активност оних који су радили на изучавању карактеристика и ефеката зрачења, или су користили зрачење у некој од практичних примена, као што је медицинска дијагностика, на пример. На тој основи, проблемима који се данас могу разврстати у заштиту од зрачења, бавио се велики број у свету познатих научника. Међутим, прва група људи која се почела бавити заштитом од зрачења као искључивим послом, тј. професионално, формирана је на Универзитету у Чикагу 1942.године [5]. Учинио је то амерички научник италијанског порекла Enrico Fermi у склопу чувеног Manhattan пројекта, односно током припрема за пуштање у рад првог нуклеарног реактора. Свестан опасности коју може произвести један динамички извор зрачења, каква је ланчана реакција у нуклеарном реактору, Fermi је у лето 1942 свом сараднику физичару E.O.Wollan-у, који се до тада бавио космичким зрачењем, дао задатак да оформи Групу која ће се искључиво бавити изучавањем и контролом опасности од зрачења – заштитом. Wollan је непосредно за своје сараднике изабрао C.G.Gamerertswelder-a и H.M.Parker-a, а нешто касније средином 1943, још шест нових сарадника: K.Z.Morgan, J.C.Hart, R.R.Coveyou, O.G.Landsverk, L.A.Pardue J.E.Rose. Тако су поменути научници почели да се баве искључиво односно, професионално заштитом од зрачења. Почев од ове мале групе научника у Чикагу, заштита од зрачења, као специфична научна и практична област, почела је да професионално јача, најпре широм Америке, а потом и целог света. На том путу јуна месеца 1955.године, на Охајо државном Универзитету, оснива се као прво у свету Америчко друштво за заштиту од зрачења под називом "Health Physics Society". Слична друштва се потом оснивају широм света да би коначно, у Паризу крајем новембра и почетком децембра 1964.године, било основано и Међународно удружење за заштиту од зрачења (*International Radiation Protection Association - IRPA*). Тиме је коначно на светском нивоу била достигнута потпуна професионализација заштите од зрачења.

Занимљиво је на крају навести и прву дефиницију заштите од зрачења, односно "Health Physics-a", коју је усвојило Америчко друштво за заштиту 1959.године [5]: *"Заштита од зрачења (Health Physics) је професија посвећена заштити човека и његове околине од непожељног излагања зрачењу. Професионалац заштите од зрачења (health physicist, у оригиналу) је лице ангажовано на изучавању проблема и развоју метода, поступака и техника за обезбеђивање заштите од зрачења у пракси. Он ради на тумачењу механизма радијационих повреда, развоју метода за процену радијационе опасности и обезбеђивању заштите човека и његове околине од штетног излагања зрачењу."*

4. Акцидент у Винчи

Развој заштите од зрачења, или ближе речено организовани приступ овом проблему у нашој земљи, тесно је везан за изградњу нуклеарних реактора. *Први нуклеарни реактор* у бившој Југославији, реактор "нулте" снаге под називом реактор РБ, изграђен је у *Институту за нуклеарне науке - Винча* и пуштен у рад маја месеца 1958.године [6]. Нажалост, само после шест месеци рада на овом реактору десио се акцидент на дан 15.октобра 1958 [7]. Акцидент је убрзо у светској литератури регистрован као "Винча акцидент". У овом акциденту *озрачено је шест младих људи*, студената и техничара, и то дозама од *око 2 до око 4,5 Gy*, које су накнадно процењене. Један од њих *Живота Вранић*, апсолвент физике на Природно-математичком факултету Универзитета у Београду, који је управо изводио експеримент на реактору у склопу свог дипломског рада, *умро је месец дана по акциденту у болници у Паризу*, након трансплатације коштане сржи, у *процесу лечења*. Не улазећи у анализу техничких узрока акцидента, који се иначе могу наћи у литератури [8], један од разлога за тешке последице акцидента сигурно је и недовољна пажња посвећена заштити од зрачења код реактора у том тренутку. Иначе, не представља никакву посебну мудрост данас, исказати следећу тврдњу: да је одговорнима за руковање са реактором био познат приступ заштити од зрачења Ерика Фермија из 1942, акцидент на РБ-у вероватно не би био избегнут, али високо озрачивање учесника у експерименту, са једним фаталним исходом, сигурно, би.

5. Заштита од зрачења у Институту – ВИНЧА

Рад са изворима зрачења у Институту за нуклеарне науке - Винча, датира неколико месеци пре него што је Институт званично и основан, односно од краја 1947.године [9]. Основни извор зрачења био је радијум и његови потомци као и на њима засновани неутронски извори. Нешто касније, у периоду 1952-1954, изграђени су линеарни акцелератори. Иначе, у Србији и бившој Југославији рад са изворима зрачења датира од пре II светског рата, а заснивао се на коришћењу рендгенских уређаја и радијума у медицини. Потреба за заштитом од зрачења, на основу праћења светских искустава, била је препозната и код нас. Међутим, у то прво време, пре и после рата, и у самом Институту све до акцидента радило се непрофесионално.

Акцидент на реактору РБ указао је руководству Института да се према заштити не може односити као према успутном послу. Само шест месеци после овог догађаја, крајем априла 1959.године [9], Управа Института доноси одлуку да издвоји једну групу млађих истраживача, из Физичке, Хемијске и других лабораторија Института, коју су сачињавали: *Т.Тасовац, П.С.Бојовић, Б.Пендић, П.Мирић, А.Матијашић* и други, и даде им задатак да почну да се баве заштитом од зрачења као искључивим послом. Од те групе истраживача и њихових сарадника формира се нова Лабораторија у Институту под називом "Радиолошка заштита". Поред акцидента разлог за овакве кључне потезе управе Института била је и чињеница да су привођене крају припреме за пуштање у рад новог истраживачког реактора (реактора РА), снаге 6,5 MW. Поред овог догађаја у Институту, и Југословенска влада је реаговала тиме што је по убрзаном поступку донела посебан закон, *Закон о заштити од јонизујућих зрачења* [10]. Тако је спровођење мера заштите на професионалном нивоу постала и законска обавеза.

На овом месту осећам потребу да укажем на значај и *неопходност професионалног приступа проблематици заштите од зрачења*. Такав приступ, по мом мишљењу, не би требало да буде ограничен само на заштиту од зрачења, већ да се односи на *заштиту од свих врста штетних агенаса*, чије присуство људска чула нису у стању да открију, или на њих реагују исувише касно. *Професионалност у заштити од штетних агенаса подразумева да они који се њоме баве морају бити изван технолошких процеса чији су производ агенси од којих се треба штитити*. Тај први захтев професионалности се, нажалост, још увек нарушава чак и у области саме заштите од зрачења. *То су случајеви када се "професионалци" заштите од зрачења почињу бавити технологијама заснованим на изворима зрачења, обично из комерцијалних разлога. При томе се проблеми заштите, најчешће због профита, потискују у други план.*

Професионални приступ заштити од зрачења није довољно заступљен у неким областима делатности са изворима зрачења, као што је медицинска, и то не само код нас. То је врло често случај чак и у оним медицинским установама (клинички центри, већи болнички комплекси и др.) у којима се интензивно користе бројни извори зрачења. Заштитом од зрачења у овим установама се обично баве радиолошки физичари или лекари радиолози, али као секундарном делатношћу. У Лабораторији за заштиту од зрачења Института Винча од њеног оснивања, пре више од *50 година*, започео је свеобухватни професионални приступ проблемима заштите кроз истраживачке, развојне и свакодневне рутинске активности на овом пољу. У наредном тексту указаћемо само на неке, по сопственом избору, од кључних догађаја значајних за развој заштите од зрачења код нас и у свету, као што су: Међународни дозиметријски експеримент на реактору РБ у Винчи; Први симпозијум и оснивање Југословенског друштва за заштиту од зрачења; Француско-југословенски колоквијум о заштити од зрачења; Међународне летње школе заштите од зрачења у бившој Југославији; Међународна интеркомпарација акциденталних дозиметара на реактору РБ; ICRP - препоруке за заштиту од зрачења из 1977.године; Акциденти на Острву три миље и Чернобиљу; Тридесет година заштите од зрачења у Винчи и Међународни симпозијум у Дубровнику; Даљи развој концепција заштите од зрачења и ICRP - препоруке из 1990; Употреба муниције од осиромашеног уранијума у ратне сврхе; Најновије препоруке заштите од зрачења усвојене 21. марта 2007. године у немачком граду Есену и коначно, катастрофални акцидент на електрани Фукушима Даи-ичи у Јапану, марта 2011.

6. Међународни дозиметријски експеримент на реактору РБ у Винчи

Акцидент на реактору РБ, као што је већ речено, побудио је интересовање научника у области заштите од зрачења из целог света. Кључни проблем који се поставио после акцидента била је процена појединачних доза озрачених. У ту сврху под окриљем Међународне агенције за атомску енергију (IAEA) формиран је дозиметријски пројекат и испланиран експеримент на реактору РБ.

Дозиметријски експеримент је изведен крајем априла 1960.године у организацији IAEA уз ангажовање научника из Француске, Сједињених Америчких Држава, Велике Британије и бивше Југославије (Винча). Уговор о експерименту потписан је у Бечу 2. фебруара 1960.године, између IAEA и Комисије за нуклеарну енергију бивше Југославије. Влада бивше Југославије, преко Института Винча, обавезала се да Међународној агенцији стави на располагање комплетан реактор, расположиву лабораторијску опрему и простор, услуге и научни, стручни и помоћни персонал. Комисија за нуклеарну енергију Француске, преузела је обавезу да реконструише и догради систем за управљање и контролу рада реактора и да поново пусти реактор РБ у рад и обезбеди његово регуларно функционисање током експеримента. Управа Велике Британије за атомску енергију, преузела је обавезу да испоручи 6,5 тона тешке воде и пружи потребну научну помоћ. Сједињене Америчке Државе прихватиле су да организују тим научника и стручњака са задатком да изведу планирани експеримент, коришћењем сопствене специјалне опреме, и потом обаве анализу и обраду добијених резултата.

У табели 1, репродуктовани су коначни резултати овог експеримента у облику парцијалних и укупних доза зрачења којима је у акциденту, по процени, било изложено шест младих сарадника. Подаци су дати са укупном грешком од $\pm 15\%$.

Био је ово један од првих међународних дозиметријских експеримената у којима је бивша Југославија имала, стицајем случајних околности, значајну улогу. Била је то истовремено прва прилика за очигледну афирмацију IAEA на пољу заштите од зрачења у почетним годинама њеног постојања. Међу иностранним научницима и стручњацима, учесницима у овом експерименту, кључну улогу је имао Karl Z. Morgan, као руководилац америчког дозиметријског тима. Од тог тренутка па у следећих 20 година, до краја свог активног радног века, професор Morgan ће бити несребично спреман да помогне својим југословенским колегама кад год би му се обратили. Био је

веома поштован и високо цењен научник и стручњак у целом свету. Умро је у дубокој старости јуна 1999.

Табела 1. Појединачне дозе у Винча акциденту, изражене у Gy [11]

Озрачени	Неутронска доза		Дозе спољ. гама зрачења	"Укупна доза"***
	(n,p)	(n,γ)		
В*	0,89	1,33	2,14	4,36
М	0,87	1,30	2,09	4,26
Д	0,91	1,36	1,92	4,19
Г	0,90	1,35	1,89	4,14
Х	0,66	0,99	1,58	3,23
Б	0,45	0,67	0,95	2,07

*Почетно слово презимена

****Коментар:** Дата је укупна апсорбована доза као прост збир неутронске и гама дозе, мада ове величине нису адитивне. Зато је укупна доза стављена под знак навода. Превођење апсорбованих доза у еквивалентне па потом њихово сабирање било би исправније. Међутим, аутори то нису урадили, јер неутронски тежински фактори за акутно озрачивање нису тада, а ни данас, били довољно познати. Иначе, цени се да су мањи неколико пута од истих за хронично озрачивање.

7. Први југословенски симпозијум и оснивање друштва за заштиту од зрачења

Активности на пољу заштите од зрачења у бившој Југославији почетком шездесетих година биле су веома разгранате. Први скуп стручњака и научника из ове области – Симпозијум, одржан је у јесен 1963. Какав се значај придавао овом актуелном проблему сведочи чињеница да су се међу организаторима Симпозијума појавиле и све три тада постојеће академије наука – Југословенска, Словенска и Српска. Симпозијум је одржан у Порторожу од 8 до 12 октобра 1963. године. На њему су саопштена 163 реферата [15]. Било је присутно 315 учесника [16]. Оваква масовност проистекла је из веома раширеног интересовања за проблеме заштите од зрачења у то време, оптерећено могућим атомским сукобом Истока и Запада. Зборник радова са Симпозијума није штампан, већ само кратки садржаји саопштења [17]. На крају Симпозијума, 12. октобра 1963. године, основано је Југословенско друштво за заштиту од зрачења. Истовремено је изабрана привремена управа у коју су из Србије, између осталих, ушли: *Тома Тасовац*, *Зоран Ђукић*, *Милован Видмар*, *Петар Мирић* и *Душан Стојановић*. Сви они остали су у области заштите од зрачења до краја свог радног или животног века. Друштво за заштиту од зрачења бивше Југославије основано је нешто више од годину дана пре оснивања Међународног удружења за заштиту од зрачења – IРРА. Захваљујући томе оно је било једно од петнаест националних Друштava која су учествовала на оснивачкој Скупштини IРРА-е одржаној у Паризу, као што се може видети у табели 2.

Табела 2. Списак националних Друштва, број чланова и имена делегата који су учествовали на оснивачкој Скупштини Међународног удружења за заштиту од зрачења (IRPA), одржаној у Паризу од 30. новембра до 3. децембра 1964. године [18].

Organization	Members	Delegates
Belgium Radioprotection Association	182	Halter, ^{A§:P} Boulenger, Hublet and Recht ^{Az}
Central European Section of the Health Physics Society (Austria, Germany, Switzerland)	20	Becker ^P and Mchl [*]
European Society for Radiation Protection	148	Courvoisier ^{A§:P} and Maushart ^{A§:zP}
French Health Physics Society (amalgamated)	425	Dubamel, ^{A§:P} Jammet, ^{A§:zP} Pellerin, ^z Gras, ^z Bonet-Maury, ^{A§:zP} Chassende-Baroz ^A
Health Physics Society (Canada)	29	Marko ^{zP}
Health Physics Society (United States)	2302	Andrews, Terrill, Abec, ^{zP} Morgan, ^{A§:zP} Ham ^{A§:zP}
Israeli Section of the Health Physics Society	12	Feige ^{AP} and Donagi
Italian Health Physics Association	125	Argiero, Todisco and Benco ^{A§:zP}
Japanese Health Physics Society	209	Yamaoka and Nishiwaki ^{zP}
Luxembourg	29	Kaysers ^A and Rischard
Mexican Society of Radiation Protection and Hospital Physicists	50	Halvas ^A
Netherlands Society for Radiation Hygiene	117	Spaander ^P
Nordic Society for Radiation Protection (Denmark, Finland, Norway, Sweden, Iceland)	201	Sievert, ^{AzP} Grande, Salimaki, ^A Koren, ^P Lindell
United Kingdom Section of the Health Physics Society	127	Marley ^{A§:zP} and Lister ^{A§:zP}
Yugoslav Health Physics Society	~200	Tasovac

8. Француско – Југословенски колоквијум у Херцег Новом

Један од првих међународних скупова на пољу заштите од зрачења у бившој Југославији био је Француско-југословенски колоквијум одржан у Херцег Новом од 10 до 12. октобра 1966. године [19]. Циљ скупа је био да се размене искуства из ра да на пољу заштите од зрачења, дефинишу подручја истраживања и сарадње која су могућа и предложе облици и садржаји конкретне сарадње. Као лични допринос и основу за могућу сарадњу изложио сам, у групи за дозиметрију, елементе модела, односно заокружену методологију за ефикасну контролу интерног индивидуалног излагања при раду у атмосфери потенцијално контаминираној трицијумом [20].

9. Међународне летње школе заштите од зрачења у бившој Југославији

Средином шездесетих година у многим областима наука па и у заштити од зрачења појавиле су се жеље за што интензивнијом, бржом и ефикаснијом разменом знања на међународном нивоу, посебно путем живе речи. У том циљу посебно место и улогу имали су скупови који су организовани под називом "летње школе". Ношени том идејом, група учесника поменутог Колоквијума у Херцег Новом (Љубомир Барбарић, Предраг С. Бојовић и аутор овог рада) покренула је идеју организовања међународних летњих школа у бившој Југославији на тему заштите од зрачења. Идеја није била одмах прихваћена, када је изложена први пут на Колегијуму Лабораторије за заштиту од зрачења Института Винча. Сматрало се да Лабораторија није још увек довољно афирмисана, нити кадровски способна да прихвати и успешно изврши један такав задатак. И покретачи идеје били су сагласни са таквом тврдњом. Међутим, ипак нису одустали јер су имали на уму елементарну животну истину: *да се значајна остварења не могу постићи ако се избегава прихва тање задатака који у датом тренутку изгледају неоствариви..* И, Винчина

Лабораторија за заштиту од зрачења организовала је у периоду од 1970. до 1979. године четири летње школе са следећим основним темама: *Дозиметрија зрачења*, у Цавтату 1970 [21]; *Заштита околине нуклеарних постројења*, у Херцег Новом 1973 (Зборник није штампан.); *Актуелни проблеми и преокупације здравствених физичара*, у Херцег Новом 1976 [22], и *Одлагање отпада и други радијациони проблеми у нуклеарној индустрији*, у Дубровнику 1979 [23]. Предавања на овим школама држали су у то време најистакнутији светски научници у области заштите од зрачења, од којих помињемо само неколико: K.Z.Morgan, W.S.Snyder, Н.Г.Гусев, Во Lindel, Н.Jammet, D.Beninson и многи други. Учесници школа имали су прилику да чују исцрпна тумачења најновијих сазнања из области заштите од зрачења из уста најпознатијих светских научника и стручњака. Као пример наведимо детаљ, да је K.Z.Morgan на I школи 1970. године говорио о размишљањима у вези са снижавањем максимално дозвољене дозе за професионалце, помињући при томе цифру од 2 R/a, као могућу нову вредност. Управо та вредност је и усвојена на међународном нивоу, 20 година касније

10. Међународна интеркомпарација нуклеарних акциденталних дозиметара

Међународна агенција за атомску енергију (IAEA), у оквирима својих активности на пољу заштите од зрачења, започела је током 1969. године реализацију међународно координираног програма истраживања на подручју нуклеарне акциденталне дозиметрије. У склопу овог програма организована су четири међународна мултилабораторијска експеримента. Трећи експеримент IAEA је организовала, на основу уговора са Владом бивше Југославије, на реактору РБ у Винчи у времену од 14 до 25. маја 1973 [24]. Избор реактора РБ није био случајан, било је то подсећање на "Винча акцидент" и претходни дозиметријски експеримент из 1960.

Да би се овај експеримент могао извести, било је неопходно урадити неколико крупнијих интервенција на реактору и његовим системима. Што се тиче заштите од зрачења, било је потребно појачати екранизацију према контролној соби, уградити посебан дозиметријски мерни канал и обавити претходна дозиметријска мерења ради карактеризације поља зрачења, односно одређивања очекиваних доза гама зрачења и доза и спектра неутрона. Све ове интервенције извели су сарадници Лабораторија Института за Нуклеарну енергетику и Заштиту од зрачења, без помоћи споља изузев мерења неутрона. У делу стандардизације поља неутрона затражена је и добијена помоћ од француских колега [25].

Експеримент интеркомпарације, у коме је учествовало око 40 експериментатора из 12 земаља, подељених у 18 екипа, успешно је изведен. Извршена су два посебна озрачивања дозиметара на декларисаним снагама реактора од 1,05 и 6,7 kW, у трајању од по 30 мин. Обрада и анализа укупних резултата експеримента приказана је у референци [24], те се тиме овде нећемо бавити.

Експеримент у целини протекао је без проблема са становишта заштите од зрачења. Међутим, *накнадном анализом* корелације између декларисане снаге реактора и измерених интегралних доза гама зрачења и неутрона, *несумњиво је показано да су стварне снаге на којима је реактор радио у експерименту биле веће за око 2,5 пута* [26]. Та чињеница није била значајна за сам експеримент, јер његов циљ није био да се успостави корелација снаге и доза. Она такође није имала значаја ни са становишта заштите од зрачења, јер су све мере заштите предузимане сагласно мереном интензитету доза а не снази реактора. *Међутим, овај детаљ показује да је и поред веома обимних припрема и прилагођавања свих система реактора за рад на већим снагама ипак учињен не мали пропуст. Грешка је била у неадекватној калибрацији дела контролно-регулационог система који прати снагу реактора.* Изузимајући овај "детаљ", све остало у погону реактора током експеримента било је уреду.

11. Нове концепције заштите од зрачења из 1977. године

Кључни догађаји у еволуцији основних концепција заштите од зрачења представљају препоруке ICRP сумиране у Публикацији 26 [27], која се појавила 1977. године. Препоруке су дошле као резултат интензивних активности на пољу заштите од зрачења током шездесетих и прве половине седамдесетих година, које су се под окриљем IAEA, UNSCEAR и ICRP одвијале на међународном нивоу. Несумњив значај, за њихово релативно убрзано доношење, имао је *нагли развој нуклеарне енергетике*, који се одигравао у истом периоду.

Нове препоруке, засноване на претпоставци: *о линеарној, без прага, зависности ефеката зрачења од дозе (LNT-хипотеза)*, унеле су многе нове појмове и комплетне приступе заштити од зрачења. Уведен је термин *"радијациона здравствена штетност"* као основа за процену односа цена-корист, у процесу оптимизације заштите. Јединица еквивалентне дозе "rem" замењена је новом "sivert". Уместо термина *"максимално дозвољена доза"* уведен је нов израз *"граница дозе"*, иако је при томе задржана стара вредност за ову величину од *50 mSv/a*, за професионално излагање. Експлицитно су дефинисана три основна полазна става нових концепција, као: *оправдање праксе* (глобална оптимизација); *оптимизација заштите* (детаљна, уз примену ALARA-принципа), и *ограничавање индивидуалних доза*.

Не улазећи у детаље ових препорука указаћемо на, по нашем мишљењу, два битна елемента која су имала најзначајнији утицај на текућу праксу, а то су: *нови референтни ниво контроле зрачења* и *ALARA-принцип*. Чињеница, која можда није на први поглед уочљива, јесте да је по новим концепцијама *референтни ниво* за спровођење мера заштите у пракси постао *природни фон*, уместо *максимално дозвољеног нивоа* по старим концепцијама. Нови референтни ниво унео је многе практичне проблеме, не само због тога што није једнозначно дефинисан, већ и што је толико низак да је био на прагу или испод граница осетљивости расположиве мерне дозиметријске и радијационе инструментације. На пример, доња граница осетљивости комерцијалних филм-дозиметара, који су до тада били најчешће коришћени као стандардни легални лични дозиметри, била је за око два до три пута изнад природног или модификованог природног фона [28]. *ALARA – принцип*, који је овим препорукама општеприхваћен на међународном нивоу, одиграо је веома значајну улогу у снижавању нивоа излагања зрачењу, самим његовим прихватањем и разумевањем.

12. Први акциденти на нуклеарно – енергетским постројењима у свету са значајном контаминацијом околине

Убрзана градња нуклеарно-енергетских објеката током седамдесетих година, као директна последица нафтне кризе почетком седамдесетих, била је снажно уздрмана првим озбиљнијим нуклеарним акцидентом на електрани *"Острво три миље"* у САД [29]. Акцидент је најпре покренуо општу антинулеарну кампању у Америци и свету. Он је, такође, веома озбиљно уздрмао и изазвао оштре нападе на тада важеће основне концепте сигурности и заштите од акцидентата на нуклеарним постројењима, заснованим на ризику и вероватноћи. Ти концепти су први пут у потпуности формулисани у чувеном *Расмусеновом извештају* [30], и прихваћени у целом свету као основни *пројектни критеријуми*. Њихова суштина састојала се у следећој тврдњи: *да су сви акциденти на нуклеарним постројењима* (разврстани по тежини у 10 категорија) *прихватљиви*, с тим што се техничким и другим мерама сигурности и заштите *вероватноћа њихове појаве мора смањити пропорционално тежини очекиваних последица*.

Следећи акцидент, неупоредиво тежи него на Острву три миље, одиграо се 26. априла 1996. у *Чернобиљу* [31]. Овај акцидент, по свом карактеру, обиму и тежини последица, неупоредиво је превазишао све до тада теоријски прогнозиране акциденте најтежих категорија на овим постројењима [32]. Био је то, нажалост, *непланирани "експеримент"* који је, не само уздрмао већ *порушио основе теорије сигурности на којој је до тог тренутка било изграђено на стотине нуклеарних постројења широм света*. Сагласно тада важећим теоријским претпоставкама,

оčekивало се да при најтежим акцидентима угрожено може бити само подручје околине реактора до максималних растојања од око 100 km. На основу те претпоставке су биле пројектима предвиђене и планиране све мере заштите становништва. Међутим, *Чернобиљ је угрозио - контаминирао целу северну хемисферу*. О акциденту у Чернобиљу и његовим последицама написане су хиљаде и хиљаде страница. Свакако највише и најпотпуније у Зборнику радова са Симпозијума одржаног у Бечу, поводом десетогодишњице [33] као и симпозијума одржаних 2006. године у Кијеву и Минску, поводом двадесетогодишњице акцидента. Овај акцидент ће сигурно побуђивати интересовање научника из области заштите од зрачења у педесетак и више наредних година. По томе се он вероватно може поредити са Хирошимом и Нагасакијем. Оно што овде желимо посебно да нагласимо је чињеница *да је са Чернобиљем неповратно завршена*, назовимо је тако, *класична фаза нуклеарне енергетике*. Све најразвијеније земље света, изумимајући далекоисточне, престале су са планирањем и градњом планираних а незапочетих постројења. Неке су чак донеле или су у фази доношења одлука о обустави рада постројења која су већ у погону.

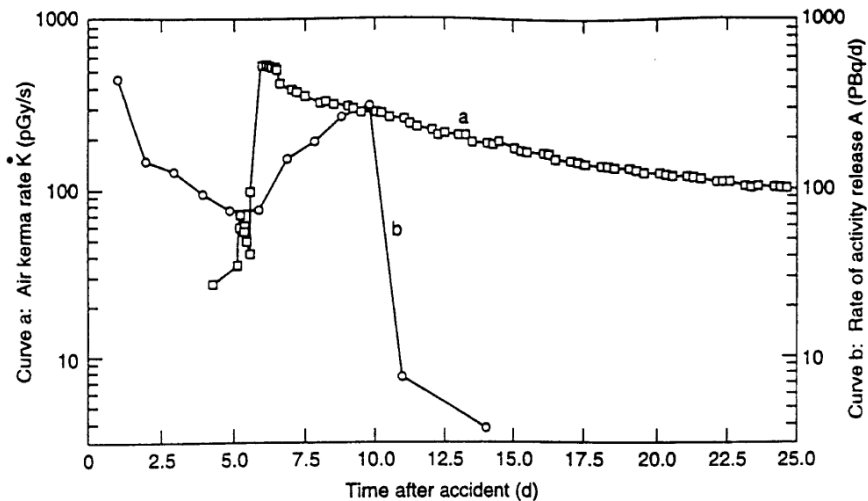
Нова ера нуклеарне енергетике, за коју се данас боре само тзв. нуклеарни лобији, још увек није на видику, али по тврђењу многих умних људи у свету [34] *она је неизбежна, да би будући развој цивилизације могао бити усаглашен са природом на земљи*. Ако се то у будућности и догоди, онда ће нова нуклеарна постројења бити грађена на новим, *детерминистички заснованим концептима сигурности*. Реактори будућности морају бити инхерентно сигурни и "интелигентни" [35].

Хаотично стање које је настало у свету после акцидента у Чернобиљу није мимоишли ни бившу Југославију. Ипак, и поред свих тешкоћа у Институту Винча се успело да се континуалним мерењима, јачине дозе у ваздуху, пропрати еволуција глобалне радијационе ситуације код Београда током активне фазе акцидента и после њега. Резултати ових мерења приказани су у табели 3 и на слици 1 [36].

Табела 3. Развој радијационе ситуације код Београда (Винча) током акцидента у Чернобиљу

Датум	Време	Опис стања	Јачина дозе (nGy/h)
<u>26.04.1986.</u>	01.23	Акцидент	-
<u>28.04.</u>	ујутру	Прва регистрација ван СССР-а, у Шведској	-
<u>29.04.</u>	21.00	Регистрација наиласка облака изнад бивше Југ., Жир. Врх, Словенија	-
<u>30.04.</u>	08.00	Почетак мерења у Београду, код Института "Винча".	77*
<u>01.05.</u>	ујутру	Пораст нивоа зрачења, наилазак облака	201
	10.30	<u>Први максим.</u> нивоа зрачења и потом смањење	-
	17.40	Измерен <u>мин. ниво</u> зрачења и по том пораст	120
<u>02.05.</u>	11.00	<u>Други максим.</u> а потом стагнација	1546

* Вредност која је измерена на истом месту са истим инструментом и пре десет година.



Слика 1. Резултати мерења јачине керме у ваздуху код Института у Винчи током активне фазе акцидента у Чернобилу (крива а) [35]. На слици је упоредо дат и интензитет дневне емисије радиоактивности у околину током акцидента (крива б) [30].

Детаљном анализом података које садрже табела 2 и слика 1, може се сагледати сва драматика развоја радијационе ситуације у данима непосредно по акциденту. *Ови подаци су били од огромног значаја у тим тренуцима.* Они су послужили као једна од битних подлога Савезној комисији за заштиту од зрачења (чији је активни члан био и аутор овог рада), која је тих дана непрекидно заседала, за доношење исправних оперативних препорука и мера

13. Међународни симпозијум заштите од зрачења поводом 30 година заштите у Институту ВИНЧА

Ослањајући се на традицију летњих школа, руководство Лабораторије за заштиту од зрачења у Институту Винча прихватило је, на предлог аутора овог рада, да поводом 30 година од оснивања Лабораторије организује међународни Симпозијум на тему: "Radiation Protection - Selected Topics" [37]. Припреме за Симпозијум започете су три године пре одржавања, јер је био циљ да се као позвани предавачи доведу у том тренутку у свету еминентна имена. У томе се највећим делом и успело. Симпозијум је одржан октобра 1989. у Дубровнику. На њему се окупило око 150 учесника. Аутори 10 уводних предавања били су странци и то: P.Christensen i L.Botter-Jansen из Данске; H.Krause и J.Erhardt из Западне Немачке; W.Kraus и V.Dorschel из Источне Немачке; J.A.Bond из Канаде; M.Delpla из Француске и И.Иванов и А.А.Биков из СССР-а.

Упоредо са Симпозијумом организована је и *Међународна изложба дозиметријске и радијационе опреме* на којој је, поред домаћих, учествовало десетак најпознатијих произвођача из Европе и Северне Америке. Била је то највећа изложба опреме ове врсте одржана у бившој Југославији

14. Снижавање граница доза зрачења и даља еволуција основних концепција заштите од зрачења

После објављивања препорука резимираних у Публикацији 26, Међународна комисија за заштиту од зрачења наставила је интензивно да ради на њиховој имплементацији у пракси, ослањајући се на међународне и регионалне организације (IAEA, WHO, FAO, ILO, OECD/NEA и др.). Посебна пажња у прво време поклоњена је разради новоуведеног принципа оптимизације заштите на основу ALARA концепта. Процес оптимизације захтевао је усвајање новчане цене јединице колективне дозе. То је индиректно значило да је било потребно одредити цену коју треба платити да би се спасао људски живот (у статистичком смислу). Ова чињеница побудила је интересовање са етичке тачке гледишта. Међу првима реаговао је Ватикан, постављајући питање моралне оправданости новчаног вредновања људског живота. Да би се разрешио овај проблем, морала је да буде формирана посебна експертска група, која је у свом извештају недвосмислено закључила: *"Да не може бити неморално улагање у заштиту ради снижавања излагања испод граница доза и тиме спасавања људских живота"*, што је био основни циљ оптимизације где је коришћена величина "цена јединице колективне дозе", односно са друге стране, цена људског живота.

ICRP такође, први пут осамдесетих година, посвећује пажњу радону дефинишући прве препоруке[38]. Иначе, прва мерења радона са становишта заштите од зрачења вршена су у Шведској још 1956. године[39]. Овај проблем отвара се поново, опет у Шведској, почетком седамдесетих година везано са нафтном кризом. Због потребе штедње енергије била је препоручена редукација природне вентилације станова. Директна последица примене ове препоруке био је пораст концентрације радона у становима. Да би се тај проблем разрешио, влада Шведске формира Комисију експерата са задатком да дефинише акционе нивое за радон. У свом извештају Комисија указује на чињеницу да проблем радона постоји и у другим земљама. На то је одмах реаговао UNSCEAR, који, први пут у својим редовним периодичним извештајима, значајну пажњу посвећује излагању становништва радону, са нагласком на излагање у затвореном простору. Из тих разлога просечна годишња доза, од излагања у природним и модификованим природним условима реферисана у UNSCEAR извештају из 1982. је двоструко већа, око 2 уместо 1 mSv, како је то било реферисано у претходном извештају из 1977. године.

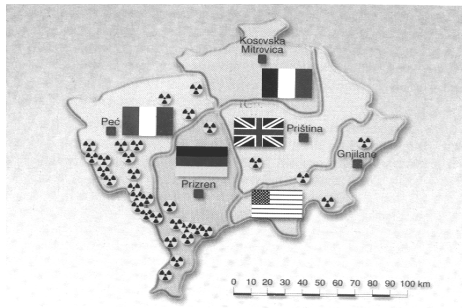
У склопу свих тих активности ICRP, на састанку одржаном 1987, закључује да је време да се припреме нове препоруке као замена претходних из 1977. Као резултат тог одређења Комисија усваја 1990. и публикује 1991. нове препоруке у форми ICRP публикације - 60 [40]. Ове препоруке садрже неколико битних измена у односу на претходне. Снижава се граница годишње дозе за професионалце *са 50 на 20 mSv, усредњено на пет година са допуштеном могућношћу максималне вредности до 50 mSv током једне године*. Као граница за озрачивање појединаца из становништва даје се вредност од 1 mSv годишње са изузетним максималним излагањем до 5 mSv током једне године, под условом да се не прекорачи средња годишња вредност од 1 mSv током пет узастопних година. Даје се нагласак на повећану контролу озрачивања у природним и модификованим природним условима и уводи појам *ризика од потенцијалног озрачивања*. У препорукама се, даље, уводе *"радијациони тежински фактори"* уместо ранијих "средњих фактора квалитета зрачења". Дозиметријска величина "ефективни дозни еквивалент" замењује се новом величином *"ефективна доза"* итд. Ипак, *најзначајнијом изменом* у новим препорукама се може сматрати чињеница *да се за основ процеса нормирања узима ризик, а не доза зрачења*. Коначно, потребно је истаћи да се у овим препорукама инсистира на *заштити појединца* [41], који директно *трпи последице*.

15. Употреба осиромашеног уранијума у ратне сврхе

Као што је познато [42], деведесетих година прошлог века Сједињене Америчке Државе и НАТО у нападима на територије Ирака и бивше Југославије употребили су, поред класичне муниције и зрна од осиромашеног урана (Depleted Uranium – DU). Било је то други пут, после бацања атомских бомби на Хирошиму и Нагасаки, од стране исте земље и њених савезника, да се у двадесетом веку у ратне сврхе користи и неконтролисано растура по животној средини радиоактивно опасни материјал. Тај догађај је побудио посебну пажњу, широм света, међу онима који се професионално баве заштитом од зрачења. На слици 2 (а) и (б) приказани су изгледи зрна и места на карти Косова и Метохије која су гађана зрнима од DU



(а)



(б)

Слика 2. Изглед зрна од осиромашеног уранијума (а) и места на територији Косова и Метохије, обележена знаком радиоактивности, која су била мете НАТО - бомбардовања (б)[43].

Муниција од осиромашеног урана развијана је у свету шездесетих година прошлог века, са циљем да се употреби првенствено, за гађање оклопних возила у рату. У то време њена употреба није била неприхватљива са становишта актуелних концепција заштите од зрачења, заснованих на моделу *максимално дозвољених доза*. Међутим, од 1977. године, када су усвојене нове концепције заштите од зрачења, засноване на *LNT – хипотези* и *ALARA – принципу*, такав вид неконтролисаног коришћења опасног радиоактивног материјала постао је апсолутно неприхватљив, те се може окарактерисати само као злочин према природи.

Основне карактеристике осиромашеног уранијума. Осиромашени уранијум настаје као споредни производ (остатак) у процесу прераде природног уранијума, ради коришћења у облику горива у нуклеарним реакторима или компоненти нуклеарног оружја. Природни уранијум у облику метала је сребрнасто-бео, сјајан, густ и слабо радиоактиван хемијски елемент. Присутан је у природној средини, различитим али малим концентрацијама, у стенама, тлу, води, ваздуху, биљкама и свим живим бићима. Средње узев, људско тело садржи око 90 μg уранијума, који у њега доспева са водом, храном и ваздухом. Од тога око 66% се сакупља у скелету, 16% у јетри, 8% у бубрезима и 10% у осталим ткивима [44]. Уранијум садржи три изотопа: ^{238}U (99,27% масених), ^{235}U (0,72%) и ^{234}U (0,0055%). Међу њима ^{235}U има највећи пресек за фисију при апсорпцији термичких неутрона и зато је најпогоднији за нуклеарне примене. За коришћење у нуклеарним реакторима садржај ^{235}U се повећава са 0,72% на 1,5-3%, ређе до 80% или чак 90%. У нуклеарном експлозиву садржај ^{235}U се креће до 100%. Уранијум преостало из процеса обогаћивања садржи око 99,8% ^{238}U , 0,2% ^{235}U и 0,001% ^{234}U по маси и назива се *осиромашени уранијум (DU)*. Према томе

основна разлика између DU и природног уранијума је у томе што садржи око три пута мање изотопа ^{235}U . Специфична активност природног уранијума износи око $2,5 \cdot 10^4 \text{ Bq/g}$, док је специфична активност DU око два пута мања и износи $1,3 \cdot 10^4 \text{ Bq/g}$. Услед мање специфичне радиоактивности, доза зрачења која потиче од DU, када се унесе у организам, чини око 60% дозе која потиче од исте масе природног уранијума.

Понашање DU у организму је идентично понашању природног уранијума. Око 98% уранијума унетог у организам ингестијом, не апсорбује се већ се излучује са изметом. Ако се уранијум унесе у облику нерастворљивог једињења у организму се апсорбује још мање, свега око 0,2%. Од уранијума који доспе у крвоток приближно 70% бива филтрирано у бубрезима и излучено преко мокраће, током 24 h.

На подручјима гађаним осиромашеним уранијумом, присуство DU у храни и води изнад просечног природног налажења уранијума, може бити регистровано и након дужег временског периода. Из тих разлога мора се вршити контрола присуства повећаних концентрација DU у храни и води где год за то постоје основане сумње. *Мала деца*, због честог стављања запрљаних руку у уста, при игри на потенцијално контаминираним теренима, посебно су угрожена. Зато она претстављају *критичну групу становништва*, у односу на коју се дефинишу потребне мере контроле и заштите од осиромашеног уранијума.

16. Најновије препоруке Међународне Комисије за заштиту од зрачења - ICRP-103

Међународна комисија за заштиту од зрачења, на састанку одржаном 21. марта 2007., у немачком граду Есену, усвојила је своје најновије препоруке [45]. Циљ нових препорука је био да се поједностави систем граница излагања и дограде постојеће препоруке на основу нових сазнања из области заштите. У томе се и успело, јер се од постојећих *тридесетак граница* дошло до четири основне границе *максимално прихватљивог излагања* појединаца током године, као што се може видети у табели 4.

Препоручене су, поред осталог, нове вредности за неке од радијационих и ткивних тежинских фактора и указано је, по први пут, на потребу *заштите, не само хуманих, већ и нехуманих јединки и групација у природи*.

Табела 4. Максималне границе годишњег излагања зрачењу

Макс. граница дозе /mSv/a/	Примери примене у пракси
100	Постоји само <i>општа</i> али не и појединачна <i>корист</i> , као што је случај у <i>акцидентима</i> .
20	Директна или идиректна <i>корист</i> за <i>појединца</i> , као у <i>професионалном излагање зрачењу</i> .
1	<i>Општа</i> , али не и појединачна <i>корист</i> . Додатно излагање појединаца из становништва у случајевима <i>корисне примене зрачења</i> (наука, мед ицина, индустрија)
0,01	<i>Најмања вредност</i> било каквог <i>ограничавања</i>

17. Фукушима Даи-ичи акцидент

Из претходног излагања несумњиво следи закључак да је пресудни утицај на развој заштите од зрачења имао развој и ширење примене нуклеарне енергије, посебно у области производње електричне енергије. Међутим, први акциденти на енергетским нуклеарним реакторима, као што су били на Острву Три Миље и посебно, Чернобилу у недавној прошлости, значајно су успорили ширење примене нуклеарне енергије. И управо када су се почели назирати обриси ренесансе нуклеарне енергије [46], крајем прве деценије овог века, дошло је до Фукушима Даи-ичи акцидента у Јапану. Овај акцидент по неким својим ефектима је упоредив са катастрофалним Чернобилем. На срећу у погледу обима и нивоа озрачивања професионалног особља и становништва то се не може рећи. У табелама 4 и 5 дати су, неки од ових података ради поређења. Подаци за Чернобил се могу сматрати потпунијим.

Како се може видети у табели 4, током санације акцидента у Чернобилу у почетној фази високо су озрачена 134 интервентна радника и то дозама од 0,8 Gy до 16 Gy. Њих укупно 50 до сада је подлегло последицама озрачивања и то 28 непосредно и 22 у каснијем периоду до 20 година по акциденту, за који су обрађени и штампани подаци [48].

Табела 4. Високоозрачени интервентни радници оболели од радијационе болести током санације акцидента у Чернобилу [47, 48].

Интервал дозе (Gy)	Број радника	Умрло непосредно
0,8 – 4,1	41	0
2,2 – 4,1	50	1
4,2 – 6,4	22	7
6,5 - 16	21	20
Укупно	134	28

Напомена: До 2005. године умрла су још 22 од високоозрачених радника

Након акцидента у Фукушими Регулаторно тело за заштиту од зрачења Јапана ограничило је излагање интервентних радника на интегралну дозу од 250 mSv. У томе се, како се може видети у табели 5, и успело са изузетком само 6 случајева.

Максимална индивидуална доза у овој групи «високо - озрачених» била је мања од 0,7 Gy. Накнадном анализом је утврђено да је основни разлог за прекорачење усвојене границе дозе у ових шест случајева био *тривијалан* – непотпуно заптивање маски за лице због лошег налегања код радника са наочарима

17. Уместо закључка

На основу изложеног и опште прихваћене чињенице да је заштита појединца примарна [50], основни задатак савремене заштите од зрачења је да се поуздано одреди ниво стварног ризика коме се појединац – професионалац, излаже током рада у пољима зрачења. То је могуће остварити само ако се доследно и поуздано мере и процењују личне дозе зрачења. Нажалост, физичке методе које се користе за ту сврху не могу, по својој природи, дати дефинитивни одговор на то питање, у свим случајевима. Подаци о нивоима спољашњег и унутрашњег озрачивања, који се добијају помоћу ових метода мерења, могу да одступају од стварних нивоа излагања, зависно од услова озрачивања и врсте и својстава зрачења коме је појединац био изложен

Табела 5. Интервентни радници изложени дозама већим од 250 mSv током санације акцидента у Фукушими[49].

Радник	Доза (mSv)		
	Интерна	Спољна	Укупна
1	590	89	679
2	540	106	646
3	433	44	477
4	328	33	361
5	242	110	352
6	260	51	311

Поузданији одговор на ово питање могао би се добити једино на основу биолошких индикатора - биомаркера и биолошких дозиметара. Међутим, још увек нису откривени биолошки дозиметри који су у стању да поуздано региструју мале дозе или интензитета доза, које су од интереса за заштиту од зрачења. Управо то и јесте један од кључних проблема који се поставља пред савремену заштиту од зрачења.

Такође, остаје задатак истраживачима да развијају нове осетљивије, мерне методе за основне дозиметријске и радијационе величине [51, 52]. На пример, данас је актуелна потреба развоја дозиметра за неутроне виших енергија од неколико десетина MeV до неколико GeV [53, 54, 55]. Ту се може поменути и актуелна потреба развоја одговарајућих личних дозиметара и комплетне методологије за ефикаснију контролу нивоа излагања очних сочива, код појединих група професионалаца. Овај проблем је искрсао пошто је недавно ICRP, била принуђена да на основу најновијих епидемиолошких података, вишеструко снизи годишњу границу за овај орган [56].

18. Литература

- [1] Во.Lindel, *Radiation Protection 93*, European Commission Publication, European Communiities (1997).
- [2] J.E. Weaver, A brief chronology of radiation and protection , 1995.
<http://www.physicus.isu.edu/radinf/chrono.htm>
- [3] W.Fush, *American Journal "Western Electrician"*, **12** (December 1896).
- [4] L.E.Holm, *SSI news*, (6) 2 (November 1998) 10
- [5] K.Z.Morgan, J.E.Turner (eds.), *Principles of Radiation Protection*, p.62, John Wiley and Sons, New York (1967).
- [6] D.Popović, *Pocceedings of the 2nd UN International Conference, IAEA; 15/P/491;12*, p.392-394, Geneva, Switzerland (September 1958).
- [7] P. Savić, *Bulletin of the Boris Kidrič Institute -Vinča*, **9** (167) (1959) 1
- [8] C.R.Russell, *Reactor Safeguards*, p.308-309, Pergamon Press Oxford (1962).
- [9] Т.Тасовац, "Пола века Института Винча (1948-1998)", стр.192-204, Институт за нуклеарне науке "Винча" и Завод за уџбенике и наставна средства, Београд(2000).
- [10] Закон о заштити од јонизујућих зрачења, *Службени лист СФРЈ*, бр. 16/59, Београд (1959).
- [11] IAEA 1962, The Vinca Dosimetry Experiment, *Technical Reports Series, No.6, International Atomic Energy Agency, Vienna* (1962).
- [12] UNSCEAR 1982 Report, *Ionizing Radiation: Sources and Biology Effects*, p.392, United Nations, New York (1982).

- [13] B.J.Kovach, J.A.Auxier and F.W.Sanders, *Radiation Protection Management*, 14(4), (July/August 1997) 28
- [14] T.J.Thomson, J.G.Beckerly (eds.), *The Technology of Nuclear Reactor Safety, Vol.1: Reactor Physics and Control*, The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts (1964).
- [15] *Програм Првог југословенског симпозијума о радиолошкој заштити*, Порторож, 8-12 октобар, 1963.
- [16] *Десет година рада Југословенског друштва за заштиту од зрачења 1963/1973*, Брошура у издању Југословенског друштва за заштиту од зрачења, Београд (октобар, 1973).
- [17] *Кратки садржаји саопштења Првог југословенског симпозијума о радиолошкој заштити*, Порторож, 8-12 октобра, 1963. (Брошура у издању Института за медицинска истраживања и медицину рада, Загреб, јула 1963.)
- [18] K.Z.Morgan, Development of Health Physics as a profession, First International Congress of IRPA, Rome, Italy, September 5-10, 1966.
- [19] *Compte rendu commun de colloque Franco – Yougoslave sur la radioprotection*, Herceg Novi, Yougoslavie, du 10 au 12 octobre 1966.
- [20] M.M.Ninković, Dosage du Tritium, *Compte rendu commun du Colloque Franco – Yougoslave sur la radioprotection*, Herceg Novi, 10-12 octobre, 1966.
- [21] I.Miric (ed.), *Radiation Dosimetry Vols.1 and 2*, Proceedings of the International Summer School on Radiation Protection, Cavtat, Yugoslavia, September 21-30, 1970.
- [22] P.D.Marković (ed.), *Current Problems and Concerns of the Health Physicist*, Proceedings of the Third International Summer School on Radiation Protection, Herceg Novi, Yugoslavia, August 24 - September 3, 1976.
- [23] Ž.Vuković (ed.), *Waste Disposal and other Problems in Nuclear Industry*, Proceedings of the Fourth International Summer School on Radiation Protection, Dubrovnik, Yugoslavia, August 21-September 1, 1979.
- [24] IAEA 1977, *Third Research Coordination Meeting on Nuclear Accident Dosimetry*, Vinca, Belgrade, Yugoslavia, 14-25 May, 1973 (IAEA), Document MG – 140, Vienna, (March 1977).
- [25] I.Mirić, P.Mirić, M.M.Ninković, M.Mourgues, L.Portheos, M.Bricka, *Internal Publ. SESR-CI, 73/129*, Cadarache, France, (August 1973).
- [26] M.P.Pešić, M.M.Ninković, *Health Physics*, **77 (3)** (1999)276
- [27] ICRP Publication 26, *Annals of the ICRP*, **1, 3** (1977).
- [28] M.M.Ninković, *Kernenergie*, **26 (9)** (1983)349.
- [29] J.G.Kemeny et al., *Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island*, Pergamon Press, New York (October 1979).
- [30] Rasmussen Report, *WASH 1400, NUREG-75/045* (October 19, 1975).
- [31] P.H.Gudiksen, T.F.Harrey, R.Lange, *Proceedings of the Seminar on Comparative Assessment of the Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl*, Vol.I, p.93 -112, Luxembourg, 1-5 October, 1990.
- [32] M.M.Ninković, *Зборник радова Саветовања: Чернобил, 10 година после*, стр. 17- 25, Будва, 4 - 7 јун, 1996.
- [33] *Proceedings of the International Conference: One Decade after Chernobyl*, Austria Center Vienna, Austria, 8-12 April 1996.
- [34] H.Blix, *Transactions, Vol.1, p.7, of the World Nuclear Congress*, Nice, France, October 25-28, 1998.
- [35] M.L.Corradini, *Health Physics*, **93(5)** (2007) 547
- [36] M.M.Ninkovic, J.Raičević, S.Pavlovic, *Nuclear Safety*, **38 (1)** (1997)69
- [37] M.M.Ninkovic, R.S.Pavlovic, J.J.Raicevic, (eds.), *Proceedings of the 30th Anniversary Symposium. . .*, Dubrovnik, Yugoslavia, October 2-6, 1989.
- [38] ICRP Publication 39, *Annals of the ICRP*, **14 (1)** (1983).
- [39] B.Hultqvist, K. Svenska Vetensk Akad. Handl.**6 (3)**, Almquist U. Wiksells Boktryckeri, Stockholm (1956).

- [40] ICRP Publication 60, *Pergamon Press*, Oxford (1991).
- [41] R.H.Clarke, *J. Radioil. Prot.* **19** (2) (1999)107
- [42] M.M.Ninkovic, R.Glisic, *Nuclear Technology & Radiation Protection*, **XX**, **1**(2005) 86.
- [43] Federal Ministry of Foreign Affairs of the FR Yugoslavia, *Facts on consequences of the use of depleted uranium in the NATO aggression against the FR Yugoslavia in 1999*, Belgrade, August 2000.
- [44] WHO, World Health Organization, *Fact Sheet N°257*, Revised January (2003)].
- [45] ICRP Publication 103, *Anal. of the ICRP*, **37(2-3)**, (2007)
- [46] М.М.Нинковић, Заштита од зрачења и ренесанса нуклеарне енергије, *Зборник радова 54. Конференције ЕТРАН-а*, Доњи Милановац, 7-11. јуна 2010.
- [47] UNSCEAR 2008, Vol. II, Scientific Annexes C, D and E, United Nation, New York, 2011
- [48] A. Boulville, Increased occupational exposures: Nuclear industry workers, 49th NCRP Ann. Meet., Bethesda, March 11-12, 2013 .
- [49] K.Sugai; *Jpn. J. Health Phys.*, 47(1),25-29 (2012)
- [50] R.H.Clarke, *Rad. Prot. Dos.*, **105 (1-4)** (2003) 25.
- [51] Y.Garcier, G.Cordier, C.Pauron and J.Fazilebasse, *Rad. Prot. Dos.*, doi: 10.1093/rpd/ncm144, Advanced Access published 12 February (2007) 1.
- [52] P.J.Gilvin et al., *Rad. Prot. Dos.*, doi: 10.1093/rpd/ncm239, Advanced Access, Published May 17(2007)1
- [53] R.H.Olsher et al., *Health. Phys.*, **79** (2000)170.
- [54] М.М.Нинковић, *Зборник радова, Свеска 4, стр.62-65, XLVI Конференције ЕТРАН-а*, Бања Врућица – Теслић, 3– 6 јуна, 2002.
- [55] R.J.Tanner et al., *Rad. Prot. Dos.*, doi:10.1093/rpd/ncm160 (2007)1.
- [56] ICRP, 2011, Statement on Tissue Reaction, ICRP ref 4825-3093-1464, April 21, 2011.

ON THE OCCASION OF THE 50th ANNIVERSARY OF ORGANISED RADIATION PROTECTION

Olivera CIRAJ-BJELAC, Gordana PANTELIĆ and Milojko KOVAČEVIĆ

Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia

ociraj@vinca.rs

1. INTRODUCTION

Radioactivity and radiation are parts of our natural environment that existed on Earth before any signs of life. When humans learned how to use radiation, these phenomena have become a part of our life that contributes greatly to the quality of life and the development of science, industry and medicine. Nuclear and isotopic techniques present a wide range of human activities. For more than a decade, they have been applied in different areas of human activities, which include nuclear energy, agriculture and biotechnology, in the management of water and marine resources, industry, science and research, archaeology, history and medicine. Different nuclear technologies bring on daily basis immense benefits in diagnosis and treatment of diseases, in control of industrial processes, as well as for development of science and power generation. In parallel with the expansion of application of radioisotopes and nuclear methods, awareness about the harmful effects of ionizing radiation has increased. The new findings resulted in the development of new scientific and professional discipline that is now known as the Radiation Protection. This discipline pervades all applications of radiation sources and nuclear methods with an aim to protect people and the environment from unnecessary and excessive exposure to ionizing radiation, seeking to maximize the benefit and minimize the risk in any practice that is associated with radiation.

Radiation protection, both as a multidisciplinary scientific discipline and as an attitude, has largely contributed to the protection of man and the environment against the potential harm of ionizing radiation, allowing their beneficial and safe use. It covers a wide range of domains and applications related to the development and operation of nuclear and radiation related technologies. Over the past decades, almost a century, professionals active in the domain of radiation protection have immensely contributed to the development of legislation and regulations, to monitoring and control, to prediction of consequences and to the assessment of risks.

Harmful effects of radiation and call for protection against it were recognized rather early, practically immediately upon the discovery of x-rays. In June 1896, Nikola Tesla, a scientist of the Yugoslav origin who worked in the USA, provided one of the earliest and, at the same time, one of the most fundamental principles of radiation protection: "Experimenters should not get too close to the x-ray tube" [1]. There were also many other examples pointing out the need for radiation protection. Still, in the first thirty years of use of radiation, radiation protection was the task performed by those dealing with it in their everyday practice only - in other words, it was not regulated. Radiation protection regulation, at international level, was related to the foundation of the International Commission on Radiological Protection. In the same period many national societies were established, bringing us in position to celebrate 50th anniversary of organized radiation protection, both on national and international scale.

Fifty years of organized professional activities in the area of radiation protection is certainly an excellent occasion to summarize evolution and achievements of the radiation protection professionals in the region known as former Yugoslavia.

2. FOUNDATION OF YUGOSLAV RADIATION PROTECTION ASSOCIATION

Activities in the radiation protection field in Yugoslavia diversified greatly in the beginning of the 60s of the 20th centuries. Only some four years after the adoption of the protection policy its first professional conditions were fulfilled for the organization of an expert meeting – a symposium. The Symposium was held in Portorož (Slovenia) on October 8 – 12, 1963. The program of the Symposium included plenary sessions with general topics and three parallel sessions on Radiation Protection in Medicine and Biology, Technical Radiation Protection, and Environmental Radiation. Short summaries of the presented papers were published in the Book of Abstracts was (Figure 1) [1-4].

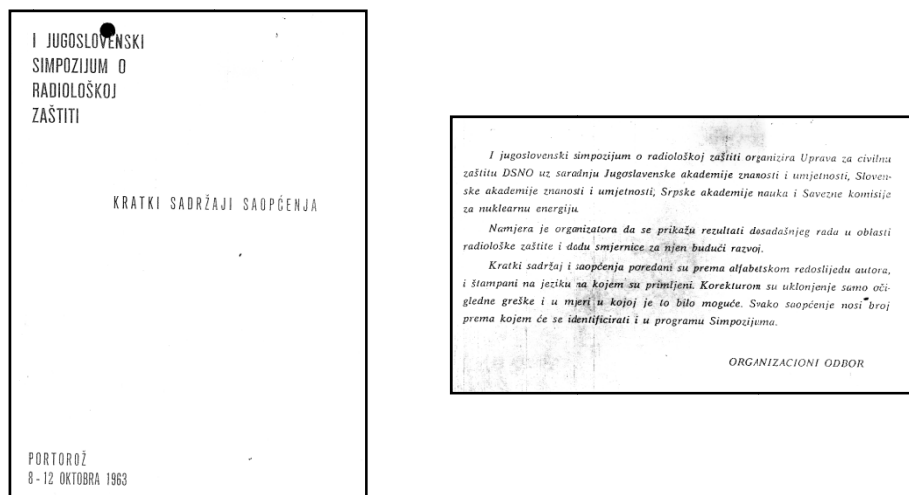


Figure 1. Cover page of the Book of abstracts from the First Radiation Protection Symposium held in Portorož, 8-12 October 1963.

Although the first in a series, it was the most attended meeting as 315 participants took part at that time. It was also a great confirmation that a large and already successful radiation protection professional community existed at that time. Established international cooperation and participation international meetings made professionals aware that national radiation professional societies had been already established in other countries.

Besides the outstanding program and number of participants, the Symposium was an occasion during which the Yugoslav Radiation Protection Association (YRPA) was founded. At the inaugural meeting, the temporary management had been elected, consisting of: Grujica Žarković, president, Andrija Muhek, vice-president, Ljubomir Barberić, vice-president, Vladeta Gajić, general secretary, Zdenko Milavc, secretary, Milovan Vidmar, secretary, Dušan Srdoč, secretary, and members: Milan Babšek, Kazimir Baryla, Zdravko Buzančić, Borivoje Damjanović, Zoran Djukić, Aleksandar Gal, Dragutin Grozdanović, Srdjan Hajduković, Alenka Jeršič, Milica Kačarević, Dušan Kanazir, Miloš Kilibarda, Krista Kostijal, Branimir Miletić, Zoran Popović, Petar Mirić, Živana Petrović, Velimir Popović, Ante Spozna, Dušan Stojanović, Toma Tasovac, Velimir Vouk and Selimir Vrbčić. At the meeting, held on 23 October 1963, the executive council was also established, consisting of: Grujica Žarković, the president, Andrija Muhek and Ljubomir Barberić, vice-presidents, Vladeta Gajić, general secretary, Predrag

Bojović, Dušan Srdoč and Janez Kristan, secretaries, and members: Zdravko Buzančić, Zoran Djukić, Živana Petrović, Velimir Popović, Toma Tasovac and Gligor Tofoski.

During its foundation, it was underlined that Association should be the link between all professionals and organizations interested in radiation protection. All relevant organizations gave their support to the society foundation. It should help the scientific and professional work to be improved and safely applied in practice. The main task would be organizing the scientific meetings and conferences on the radiation protection topic.

The main tasks and aims of the YRPA were at that time:

- organized activities on the continual environmental quality improvement and protection of the environment, human and animal population from the harmful effects of the radiation;
- organized initiation and support of scientific research in all fields where the radiation sources are used for peaceful purposes;
- continuous training of the workers and continual application of radiation protection principles;
- care for adequate social position of professionals dealing with radiation sources and working in radiation protection departments;
- promotion of professional and ethical principles application in the radiation sources use;
- organized efforts and requirements for continuous public education and information about radiation and radiation protection;
- collaboration with radiation protection associations and societies from other countries and international organizations and professional and scientific experience exchange;
- reviewing and following the radiation protection system organization and suggesting improvements;
- training of the professionals who work with radiation sources and in radiation protection services, for efficient work in accidental conditions;
- organization of symposia, conferences and other scientific meetings;
- active cooperation with International Radiation Protection Association (IRPA) and other international organizations and associations of radiation protection and participation in international professional and scientific conferences and meetings;
- cooperation with other associations professionally interested in radiation protection.

The goals of YRPA were outlined in the statute. The statute cover page and membership card are shown in Figure 2 [4]. The statute of the YRPA has been recommended by IRPA as an example of well designed statutes to other national societies during their foundations [3].

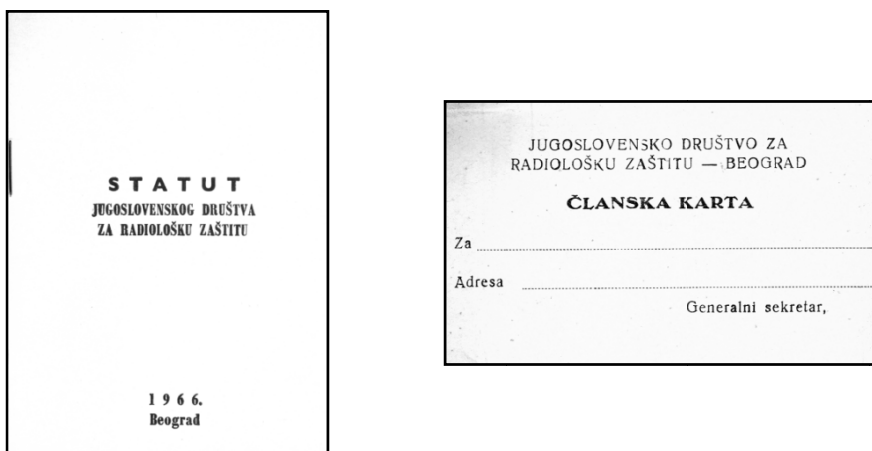


Figure 2. Cover page of the Statute and membership card of the YRPA

In the period 1963-1970 the name of the society was Yugoslav Society for Radiological Protection (*Jugoslovensko društvo za radiološku zaštitu*), in the period 1972-2003 it was Yugoslav Radiation Protection Association (*Jugoslovensko društvo za zaštitu od zračenja*), and in 2005 it became Radiation Protection Association of Serbia and Montenegro (*Društvo za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*), which remained till present.

It must be noted that first days of the YRPA were also associated with certain difficulties related to the technical and financial problems. However, these difficulties were overcome thanks to the enthusiasm of the members who contributed to the organization of the society, so activities of the YRPA became normal in 1966. In the period 1979 – 1981, all republics and provinces of former Yugoslavia established their own radiation protection societies and these societies became collective members of YRPA [4]. Some of them, as the Croatian and Slovenian national associations are presently/nowadays active professional societies and members of the IRPA. General assembly of YRPA was organized regularly, during symposia of YRPA, in particular in Banja Luka in 1967, Baško Polje in 1969, Bled in 1970, Ohrid in 1972, Kaštel Stari in 1973, Herceg Novi in 1975, Jajce in 1977, etc.

From the foundation of the YRPA, the executive board played an important role. It was a coordinator, initiator and executive body for all society's activities. During years the executive board has a number of successful meetings, and number of minutes from these meetings are sort of proof of this success. Reports from these meetings were also published in the bulletins and become available to the members of the YRPA. Under certain circumstances, when there was a need the executive board established committees consisting of experts in the particular field of radiation protection.

3. MEMBERSHIP IN THE INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION (IRPA)

Since foundation of YRPA, efforts had been made to contact and cooperate with similar organizations in country and abroad. YRPA representatives participated at the International Radiation Protection Association (IRPA) foundation meeting, held at Paris in 1964 (Figure 3), and its First annual meeting and Congress in Rome, in 1966. Yugoslav Radiation Protection Association became a full member of IRPA in 1969 [2,4].

OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY
OPERATED BY
UNION CARBIDE NUCLEAR COMPANY

POST OFFICE BOX 1
AS NEW YORK, NEW YORK
October 21, 1963

Tasovic #1
Adverse positive
11.2.64. R

Mr. Tomo Tasovic
Head, Health Physics Department
Boris Kidrich Institute of Nuclear Sciences
P. O. Box 592
Belgrade, Yugoslavia

On August 5, 1963, I sent a letter to a number of persons whom I thought might have direct interest in the formation of a single international Health Physics or Radiation Protection Society but by some oversight, I failed to send you a copy. I regret this very much and apologize for my mistake, which I remedy now by sending you a copy with the request that you forgive this delay and return the completed questionnaire at your earliest convenience.

I have not as yet had replies from all those to whom this letter was sent but a large number have replied and, with one exception, all are in favor of this international society. Therefore, it appears that the formation of this Ad Hoc Committee on the International Status of the Society is timely and I hope to form this ad hoc committee as soon as I have replies from you and some of the others to whom I have written. If you know of others to whom I should send a copy of this letter, please let me know and I will act accordingly. My present plan is to form a large committee consisting essentially of all those to whom I wrote that indicate willingness to serve on the committee and to form a small executive committee that will get to work on details of the problem. Because of your many years of interest in radiation protection at the international level, I hope you will be willing to assist me in this task.

Sincerely,
John G. Mearns
John G. Mearns, Division
Health Physics Division

KEM:jc
Enclosures

CONSTITUTION
of the
INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION

as adopted unanimously by the *pre-impove* General Assembly of health physics and/or radiation protection societies consisting of the following:

Organizations	Delegates
Belgium Radioprotection Association	S. HAUTRY, R. R. BOULENGER, P. HUBLEY and P. REYER
Central European Section of the Health Physics Society (Austria, Germany, Switzerland)	K. BREUER and J. G. Mearns
European Society for Radiation Protection	P. CONTOURNEAU and R. MAINGIARD
French Section of the Health Physics Society (France)	F. DUMAZEL, H. JAMMET, P. PELLERIN, M. CRAU, P. BOUQUENON and N. LOUARD-BAUDY
Health Physics Society (Canada)	A. M. MARSH
Health Physics Society (United States)	H. L. ANGLADE, J. G. TARBELL, H. H. ABRAHAM, K. Z. MORSE and W. T. HAM, JR.
Israeli Section of the Health Physics Society	Y. FISHER and A. DORON
Italian Health Physics Association	L. ARABINO, S. TOSCANO and A. BENCO
Japanese Section of the Health Physics Society	Y. YAMAKURA and Y. NISHIOKAWA
Luxembourg	P. KEYSER and C. REICHSBERG
Mexican Society of Radiation Protection and Hospital Physics	J. HELVAZ
Netherlands Society for Radiation Hygiene	P. SPANDEER
Nordic Society for Radiation Protection (Denmark, Finland, Norway, Sweden)	R. SVENST, P. GRANNE, K. E. SALERMARK, K. KERNAN and B. LONNELL
United Kingdom Section of the Health Physics Society	W. G. MARLEY and B. A. J. LITTLE
Yugoslav Health Physics Society	T. TASOVIC

* Also as IAEA observer
National delegates not representing specific organizations
L. BELAVENTIS (Greece), H. PARAMANPOUR (Iran), O. FIDORE (Morocco), E. RAMOS (Spain), J. BAARLI (Switzerland) and D. BRANSON (Argentina).

Adopted December 3, 1964
Paris, France

Figure 3. Constitution of the IRPA in Paris 1964 and participation of the YRPA representative

4. SYMPOSIA, BULLETINS AND OTHER ACTIVITIES

In the period 1963-1991 Yugoslav Radiation Protection Association organized number of symposia, few international and regional meetings, and number of specialized meetings related to the particular radiation protection topic. The symposia were the most important activity of the YRPA, both in terms of topics covered and in terms of number of participants, as presented in Table 1. Symposia were held regularly in biannual intervals in the period 1963 – 2013.

During 50 years history of radiological protection, 26 regular symposia were held with 2581 scientific presentations and more than 4000 participants. In spite of all difficulties, the YRPA held traditions in publishing proceedings from the symposia. Unfortunately, some of them, in particular those from the early period of the YRPA, were not preserved either in the archive of the society or in public libraries. Also, a very nice tradition to publish selected number of contributions in the peer reviewed journals such as Health Physics was not kept, which increased likelihood that some of the activities of the members of the society will be irreversibly lost.

Based on the topics of the papers published in the proceedings, it is obvious that society kept a tradition of a multidisciplinary approach in radiation protection. Papers covered both fundamental and applied aspect of radiological protection. In many cases actual topics, related to the nuclear accidents or similar events related to radiation protection were also presented. Overall, the largest number of papers has been related to the problems in radioecology, followed by topics in radiobiology, dosimetry, radiation measurements and many others.

Table 1. Symposia on radiation protection held in the period 1963 – 2013

No	Year	Venue	Number of participants	Number of papers
I	1963	Portorož	310	162
II	1965	Mostar	250	48
III	1967	Banja Luka	210	88
IV	1969	Baško Polje	250	151
V	1970	Bled	200	110
VI	1972	Ohrid	160	96
VII	1973	Kaštel Stari	150	92
VIII	1975	Herceg Novi	150	83
IX	1977	Jajce	150	109
X	1979	Arandelovac	120	88
XI	1981	Porotrož	150	116
XII	1983	Ohrid	200	139
XIII	1985	Pula	250	182
XIV	1987	Novi Sad	250	117
XV	1989	Priština	150	119
XVI	1991	Neum	130	108
XVII	1993	Beograd	120	74
XVIII	1995	Bečići	106	86
XIX	1997	Golubac	95	75
XX	1999	Tara	105	90
XXI	2001	Kladovo	94	82
XXII	2003	Petrovac	100	80
XXIII	2005	Donji Milanovac	80	69
XXIV	2007	Zlatibor	95	75
XXV	2009	Kopaonik	74	64
XXVI	2011	Tara	82	78
XXVII	2013	Vrnjačka Banja	-	-

As, mentioned above, besides regular biannual symposia, thematic meetings and conferences were organized occasionally. Some of them, followed by published proceedings, were:

- Population exposure from external radiation due to non-medical uses of radiation sources, Arandelovac, 20 – 21 May, 1976;
- Health surveillance of workers in medicine, Cavtat, 13 – 15 October, 1988;
- Natural sources of radiation, Belgrade, 1995 (ed. M Kovačević);
- Chernobyl, 10 years after the accident, Budva, 4 – 7 June, 1996.

Starting from the 1960-ties till the end of 1980-ties, YRPA regularly published bulletins, 3 – 4 times per year, bringing important information related to the activities of the society, its executive board, actual topics in the radiation protection, interactions with other similar professional societies, reports from

relevant organizations working in the field of radiation protection, news from IRPA and latest literature. The first issue of the bulletin was published in 1965 [2,4]. According to the information provided in the bulletins, it was interesting to see that YRPA had an important liaison role between professional organizations in radiation protection, providing instructions how to implement new approaches, methodologies or how to unify the reports of measurements. It was interesting to note that members of the YRPA also provided educational material for public related to radiological protection. Unfortunately, due to lack of adequate support, the material has never been published.

Although YRPA was not a direct organizer, many distinguished members of the society contributed to the establishment of the "Summer schools" in radiation protection during 1960-ties, with an idea to establish more intensive cooperation at the international level. Events known as "summer schools" played a very important role. A group of participants in the International Radiation Protection Colloquium held in Herceg Novi (Yugoslavia) in 1966: Ljubomir Barbarić, Predrag S. Bojović and Marko Ninković decided to initiate organization of international radiation protection schools in Yugoslavia. Eventually, four schools were organized in the period from 1970 to 1979, in particular:

- Radiation Dosimetry, Cavtat, 1970;
- Protection of Nuclear Facilities Surroundings, Herceg Novi, 1973;
- Current Problems and Concerns of Health Physicists, Herceg Novi, 1976; and
- Waste Disposal and other Problems in the Nuclear Industry, Dubrovnik, 1979 [1,4].

The most eminent radiation protection scientists (ten or more of them at each school) as K.Z. Morgan, W.S. Snyder, N.G. Gusev, Bo Lindel, H. Jammet, D. Beninson, and others, took part as lecturers, immensely contributing to the overall success of the Schools. It is interesting to note that already in 1976, during the third school, D.H. Sliney and R.T. Ham, from the USA, gave lectures on the danger and protection against non-ionizing radiation.

5. CURRENT SITUATION

Long tradition of radiological protection was a very good basis for the national societies currently existing in the region. At present, active societies are Croatian Radiation Protection Association (CRPA), Radiation Protection Association of Serbia and Montenegro and Radiation Protection Association of Slovenia. All three organizations are members of the IRPA. Croatian and Serbian societies regularly organize biannual national symposia attracting a number of experts and professionals in radiation protection from the country and from the region. For many years, there is a formal cooperation between the two societies consisting of regular exchange of delegates and participation of scientists from one country at the national symposia in the other country.

At present, Radiation Protection Association of Serbia and Montenegro has approximately 80 active members and acts as a professional and non-profitable organisation oriented towards improvement of protection of people and environment from harmful effects of radiation. Basic activity of the association is to encourage organized research in all fields of application and use of radiation sources and to stimulate and monitor the professional and ethical principles during use of radiation sources. The association actively participates in the drafting and reviewing the national regulation in the area of radiation protection, cooperates with other professional societies and radiation protection associations from other countries, as well as with international organizations and associations. Together with the Serbian Nuclear Society, Radiation Protection Association of Serbia and Montenegro is a co-founder of a scientific journal *Nuclear Technology and Radiation Protection*. It is an international peer reviewed scientific journal covering the wide range of disciplines involved in nuclear science and technology as well as in the field of radiation protection. The journal is included in ISI Web of Knowledge – Web of Science, Science citation index expanded – SCI, and Journal Citation Reports/Science Edition. With current impact factor of 1.159, it is available for full download at the National Library of Serbia – doiSerbia [5], Directory of open access journals – DOAJ, and Portal of open access e-journals – Open J-Gate.

6. REFERENCES

- [1] Ninkovic M.M. Radiation protection in the world and in former Yugoslavia and Serbia and Montenegro since discovering of the x-rays to nowadays; FACTA UNIVERSITATIS. Series: Physics, Chemistry and Technology Vol. 4, No 1, 2006, pp. 121 – 132.
- [2] Yugoslav Radiation Protection Association. Twenty years of YRPA, 1963-1983, Bulletin, Year XIV, January-April 1983, No 1, 1983. ed Ljiljana Knezevic
- [3] Yugoslav Radiation Protection Association. Thirty years of YRPA. Bibliography, 1963-1993, YRPA, 1995, ed R. Kljajic
- [4] Archive of the YRPA
- [5] <http://www.doiserbia.nb.rs/> and <http://www.doiserbia.nb.rs/journal.aspx?issn=1451-3994>

ON THE OCCASION OF THE 50th ANNIVERSARY OF ORGANISED RADIATION PROTECTION

Olivera CIRAJ-BJELAC, Gordana PANTELIĆ and Miloško KOVAČEVIĆ

Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia

ociraj@vinca.rs

Radiation protection, both as a multidisciplinary scientific discipline and as an attitude, has largely contributed to the protection of man and the environment against the potential harm of ionizing radiation, allowing its beneficial and safe use. Over the past decades, almost a century, professionals active in the domain of radiation protection have immensely contributed to the development of legislation and regulations, to monitoring and control, to prediction of consequences and to the assessment of risks. This paper summarizes evolution and achievements of the radiation protection professionals in the region known as former Yugoslavia the occasion of the fifty years of organized professional activities in the area of radiation protection. The paper covers activities related to the early days of the radiation protection association brings the information about relevant activities as organization of symposia and other meetings, participation in international organizations and publishing activities of the society.

50 GODINA ZAŠTITE OD ZRAČENJA I HRVATSKO DRUŠTVO ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA

Ines KRAJCAR BRONIĆ, Saveta MILJANIĆ i Mária RANOGAJEC-KOMOR

Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska, krajcar@irb.hr

SADRŽAJ

Povodom obilježavanja 50. obljetnice organizirane zaštite od zračenja na području "bivše Jugoslavije" u ovome radu prikazane su aktivnosti i dostignuća Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja (HDZZ). HDZZ je osnovan 1979. godine, a od 1992. je član International Radiation Protection Association (IRPA). Među aktivnostima se ističe organizacija nacionalnih simpozija s međunarodnim sudjelovanjem – od 1991. do 2013. organizirano je 9 simpozija i uz svaki je izdan zbornik radova. HDZZ je sudjelovao i u organizaciji IRPA regionalnih i svjetskih kongresa. HDZZ sudjeluje u radu europskih društava za zaštitu od zračenja od početka neformalnih sastanaka 2004. godine, a šesti sastanak organiziran je u Zagrebu 2009. godine. Kao stručno društvo nove zemlje članice EU, HDZZ će i dalje jačati suradnju sa svim europskim društvima za zaštitu od zračenja, s posebnim naglaskom na društva u regiji.

1. Uvod

Osnivanjem Jugoslavenskog društva za zaštitu od zračenja (JDZZ) u Portorožu 1963. godine počinje organizirana zaštita od zračenja na području bivše SFRJ. Ove 2013. godine obilježavamo 50 godina organizirane zaštite od zračenja u regiji, a toj je temi bio posvećen i Okrugli stol na 9. Simpoziju Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja [1,2,3]. U ovom radu osvrnut ćemo se na to razdoblje iz perspektive Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja (HDZZ).

2. Povijesni pregled

Hrvatsko društvo za zaštitu od zračenja osnovano je u Zagrebu 16.7.1979. godine kao neprofitna udruga sa svrhom promidžbe i razvoja znanstvenih, obrazovnih i kulturnih aktivnosti u području zaštite od zračenja i srodnih znanosti, a većina članova novog Društva bila je već uključena u Jugoslavensko društvo za zaštitu od zračenja (JDZZ).

Inicijator osnivanja, jedan od osnivača i prvi predsjednik HDZZ-a od 1979. do 1983. godine bio je Živan Deanović. HDZZ je uskoro izborio status priznatog strukovnog društva. U razdoblju od 1983. do 1987. predsjednik HDZZ-a bio je Berislav Momčilović, a od 1987. do 1989. godine Društvo je vodila Đurđa Horvat.

U razdoblju od 1989. do 1994. godine, predsjednik HDZZ-a bio je Radoslav Despotović. HDZZ je postao jedna od prvih udruga koja se osamostalila u samostalnoj Republici Hrvatskoj. R. Despotović je pokrenuo uključivanje HDZZ-a u IRPA-u, te je od 1992. godine HDZZ punopravni član IRPA-e. Organiziran je i Prvi simpozij Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja, Zagreb, 1992. HDZZ je 1993. godine primljen kao punopravni član u organizaciju nacionalnih društava za zaštitu od zračenja centralne Europe i iste godine suorganizirao regionalni simpozij u Austriji (Oberurgl/Tyrol).

Od 1994. do 1998. godine na čelu HDZZ-a bila je predsjednica Maja Osmak. Organizirani su Drugi i Treći simpozij HDZZ-a u Zagrebu, 1994. i 1996. godine, a HDZZ je bio i suorganizator regionalnih kongresa (Portorož, Slovenija, 1995. i Prag, Češka, 1997.). Povodom 100. obljetnice otkrića rendgenskih zraka, 1995. godine je organizirana izložba pod nazivom "Otkriće rendgenskih zraka 1985. – 1995." te znanstveni skup "100. obljetnica otkrića rendgenskih zraka".

Od 1998. do 2008. godine, u dva mandata, predsjednica HDZZ-a bila je Mária Ranogajec-Komor. U tom su razdoblju organizirani 4. (Zagreb, 1998.), 5. (Stubičke Toplice, 2003.), 6. (Stubičke Toplice, 2005.) i 7. simpozij HDZZ-a (Opatija, 2008.). HDZZ je organizirao i Regionalni kongres IRPA u Dubrovniku 2001., i bio suorganizator dvaju regionalnih kongresa (Budimpešta, Mađarska, 1999. i

Bratislava, Slovačka, 2003). HDZZ je na 6. simpoziju u suradnji s Hrvatskim fizikalnim društvom (HFD, www.hfd.hr) obilježio i Svjetsku godinu fizike 2005. (*World Year of Physics 2005*) [4]. To je razdoblje stjecanja velikog međunarodnog ugleda HDZZ-a unutar članova IRPA-e. Od samog početka 2004. godine, HDZZ se uključio u rad neformalne organizacije europskih društava za zaštitu od zračenja.

Od 2008. do 2013. godine predsjednica Društva bila je Saveta Miljanić, koja je učvrstila međunarodni ugled HDZZ-a organizacijom 6. sastanka europskih društava za zaštitu od zračenja u Zagrebu (2009.) i uključanjem HDZZ-a u europsko natjecanje mladih znanstvenika i stručnjaka na području znanosti o zračenju i zaštite od zračenja. HDZZ je od 2009. godine raspisao tri natječaja, a nacionalni pobjednici (Martina Rožmarić Mačefat i Branko Petrincec) predstavljali su HDZZ na IRPA kongresima u Helsinkiju 2010. i Glasgou 2012. godine. Ovogodišnji pobjednik će nas predstavljati na 4. Europskom IRPA kongresu u Ženevi 2014. godine. Također je organizirano obilježavanje 30. obljetnice Društva, te 8. i 9. simpozij HDZZ-a na Krku, 2011. i 2013. godine. Od 2013. godine predsjednica Društva je Ines Krajcar Bronić.

Društvo danas okuplja preko 200 znanstvenika i stručnjaka iz cijele Hrvatske. Društvo je interdisciplinarno, kao što je i samo područje znanosti o zračenju i zaštite od zračenja. Članovi društva su fizičari i kemičari, biolozi, zdravstveni radnici (liječnici, osobito radiolozi, zatim medicinski fizičari i rendgenski tehničari). Sve veća primjena zračenja uz uvođenje novih sofisticiranih metoda u medicini kako u dijagnostici, tako i u radioterapiji čini zaštitu od zračenja u medicini posebno važnom. Posebnu pozornost članovi Društva posvećuje mjerenju radioaktivnosti u okolišu i istraživanju utjecaja radioaktivnosti na čovjeka i njegov okoliš (radioekologija).

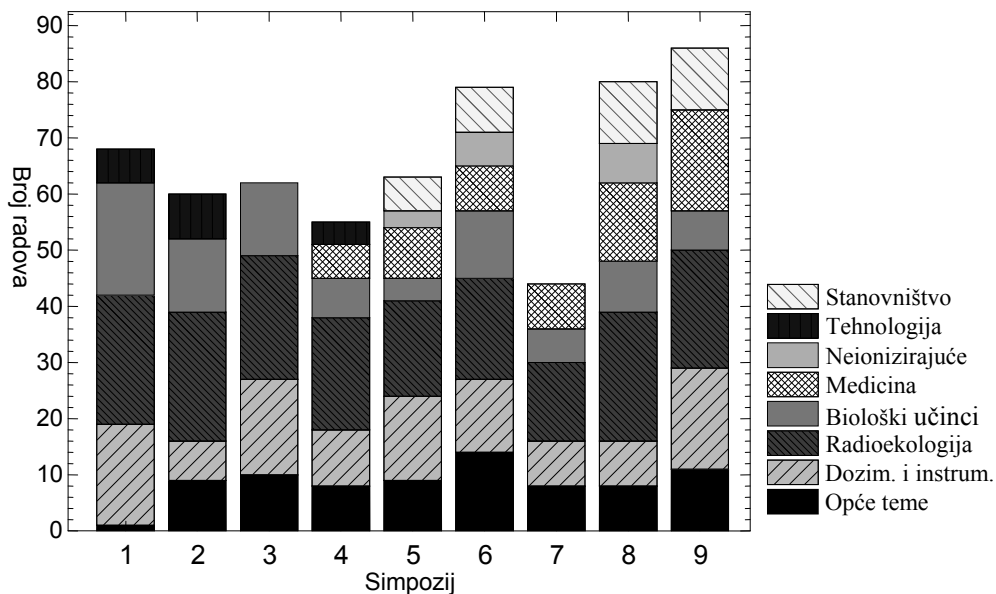
HDZZ ima svoje stranice na internetu (www.hdzz.hr) na kojima se mogu naći sve bitne informacije o Društvu. Od 2009. godine časopis *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju* (<http://hrcak.srce.hr/aiht>) je službeno glasilo HDZZ-a. Višegodišnja je praksa da se razne obavijesti, najave i druge informacije šalju članovima na njihove e-mail adrese, a godine 2012. pokrenut je i elektronski *Bulletin* čime je unaprijeđen način obavještavanja.

3. Simpoziji

JDZZ je organizirao ukupno 16 simpozija do 1990. godine [1], a u njihovoj organizaciji i realizaciji sudjelovali su i članovi HDZZ-a. Udio hrvatskih autora u jugoslavenskim istraživanjima iznosio je oko 25 %: 302 autora iz Hrvatske izradila su 439 od ukupno 1737 objavljenih priloga [5]. Radovi su pokrivali različita područja: radioekologiju (27 %), dozimetriju (25 %), radiotoksikologiju (18 %), opće probleme zaštite od zračenja (15 %), radioaktivni otpad (8 %) i biodozimetriju (7 %).

Od 1992. do 2013. HDZZ je organizirao 9 simpozija s međunarodnim sudjelovanjem (Zagreb 1992., 1994., 1996. i 1998. godine, Stubičke Toplice 2003. i 2005. godine, Opatija 2008. godine te Krk 2011. i 2013. godine). Uz svaki simpozij tiska se i zbornik radova u kojima broj objavljenih radova (Slika 1) varira od 44 (7. simpozij) do 86 (9. simpozij), a ukupno je u 9 knjiga objavljeno 597 radova [2].

Teme koje su u središtu istraživanja i interesa članova Društva mogu se pratiti kroz tematske cjeline u objavljenim zbornicima (Slika 1). Prema broju radova najzastupljenije je područje radioekologije s prosječno 30 % radova, a slijedi ga područje dozimetrije i instrumentacije s 19 % radova. Biološki učinci zračenja zastupljeni su s 15 % radova, a opće teme s 13 % radova. Područje "Medicina", odnosno zaštita od zračenja u medicini, javlja se kao posebna sekcija na 4. simpoziju, a na kasnijim simpozijima je vidljiv je porast broja radova u tom području. Na 5. simpoziju pojavljuje se posebna sekcija "Izloženost stanovništva zračenju" ("Stanovništvo" na Slici 1). Treba napomenuti da raste broj priopćenja o osiguranju i kontroli kvalitete na svim područjima zaštite od zračenja, bilo da se radi o radovima u kojima je to glavna tema ili se u opisu mjernih metoda opisuje kontrola kvalitete mjerenja.



Slika 1. Broj radova objavljenih u zbornicima simpozija HDZZ-a od 1992. do 2013. godine.

4. IRPA kongresi

HDZZ je nakon primanja u IRPA-u 1992. godine redovito sudjelovao u organizaciji i radu regionalnih kongresa o zaštiti od zračenja (*IRPA Regional Congresses on Radiation Protection*). U razdoblju 1992. – 2007. održano je sedam regionalnih kongresa za centralnu i jugoistočnu Europu (Austrija 1993., Slovenija 1995., Češka 1997., Mađarska 1999., Hrvatska 2001., Slovačka 2003. i Rumunjska 2007. godine). U prosjeku je na regionalnim IRPA kongresima sudjelovalo 10 sudionika iz Hrvatske, a to je i prosječan broj sažetaka [2]. Prosječan broj cjelovitih radova u odgovarajućim zbornicima je manji, 7 u prosjeku, i najmanji je na posljednja dva kongresa. Vjerojatni uzrok tomu je nedovoljno vrednovanje radova objavljenih u zbornicima skupova za znanstveno napredovanje u Hrvatskoj.

Posebno treba naglasiti vrlo uspješno organiziran Regionalni kongres o zaštiti od zračenja u centralnoj Europi 2001. u Dubrovniku s glavnom temom "*Radiation Protection and Health*", na kojem je sudjelovalo 229 znanstvenika i stručnjaka (od toga 45 iz Hrvatske) sa 180 priopćenja iz 29 zemalja s 4 kontinenta. Regionalne kongrese IRPA-e su nakon 2007. godine zamijenili Europski IRPA kongresi.

Članovi Društva redovno sudjeluju i u radu (ali i organizaciji kao članovi znanstvenih odbora) europskih (Firenca 2002; Pariz, 2006; Helsinki 2010) i svjetskih IRPA kongresa: IRPA-8 (Montreal 1992), IRPA-9 (Beč 1996), IRPA-10 (Hiroshima 2000), IRPA-11 (Madrid 2004), IRPA-12 (Buenos Aires 2008) i IRPA-13 (Glasgow 2012). Jedino na Osmom svjetskom kongresu u Montrealu 1992. godine nije bilo sudionika iz Hrvatske, dok je na ostalim svjetskim i europskim IRPA kongresima sudjelovalo prosječno 14,5 sudionika s prosječno 13,9 sažetaka [2].

5. Međunarodna suradnja

HDZZ ima vrlo bogatu i uspješnu međunarodnu suradnju. Prvenstveno se to odnosi na suradnju sa društvima za zaštitu od zračenja ili pojedincima iz susjednih i bliskih zemalja centralne i jugoistočne Europe (Slovenija, Austrija, Mađarska, Češka, Slovačka, Poljska, Rumunjska, Srbija i Crna Gora), kao i sa stručnjacima iz zemalja u regiji koje nemaju nacionalno udruženje (Bosna i Hercegovina, Makedonija, Kosovo).

HDZZ redovno sudjeluje na godišnjim sastancima predstavnika europskih društava za zaštitu od zračenja koji se održavaju svake jeseni počevši od 2004. godine. Na sastancima se usuglašavaju stavovi europskih društava kako bi ojačali nastup na međunarodnoj sceni, odnosno unutar krovne organizacije IRPA. HDZZ je organizirao 6. sastanak u Zagrebu 2009. godine, na kojem je sudjelovao 21 predstavnik iz 12 zemalja, a među njima i 3 člana *Executive Council*-a IRPA-e.

6. Umjesto zaključka

Ulaskom Hrvatske u Europsku uniju 2013. godine pred HDZZ se postavlja cilj jačanja i poboljšanja suradnje s europskim društvima za zaštitu od zračenja, ali i suradnje s društvima u regiji. Unatoč lošoj ekonomskoj situaciji u državi potrebno je i dalje sudjelovati na europskim i međunarodnim kongresima i nastojati financijski pomagati aktivno sudjelovanje članova na tim kongresima. Organizacija nacionalnog simpozija u redovnim dvogodišnjim ciklusima treba se nastaviti uz poticanje sve većeg sudjelovanja naših kolega iz regije i Europe. Važno je i dalje nastaviti s redovnim biranjem najboljeg rada mladih stručnjaka ili znanstvenika iz područja zaštite od zračenja ili znanosti o zračenju u dvogodišnjim ciklusima i financijski pomagati sudjelovanje nacionalnog pobjednika na europskom ili IRPA kongresu. Na nacionalnoj razini potrebno je unaprijediti djelovanje HDZZ-a kao stručne i interdisciplinarne organizacije u donošenju propisa vezanih za zaštitu od zračenja, te povećati utjecaj HDZZ-a u informiranju javnosti u svim stručnim pitanjima.

7. Literatura

- [1] O. Ciraj-Bjelac, G. Pantelić and M. Kovačević. On the occasion of the 50th anniversary of organised radiation protection. In: Ž. Knežević, M. Majer and I. Krajcar Bronić, eds. *Zbornik radova 9. simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja*, pp. 3-13, Krk, Croatia. 10-12 April 2013, HDZZ, Zagreb. Krajcar Bronić, S. Miljanić and M. Ranogajec-Komor. Hrvatsko društvo za zaštitu od zračenja: od Jugoslavije do Europe (*Croatian Radiation Protection Association: from Yugoslavia to Europe*). In: Ž. Knežević, M. Majer and I. Krajcar Bronić, eds. *Zbornik radova 9. simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja*, pp. 14-25, Krk, Croatia. 10-12 April 2013, HDZZ, Zagreb.
- [2] G. Omahen and M.J. Križman. Radiation protection in Slovenia over the past fifty years (1963 – 2013) and the Slovenian Society of Radiation Protection. In: Ž. Knežević, M. Majer and I. Krajcar Bronić, eds. *Zbornik radova 9. simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja*, pp. 26-36, Krk, Croatia. 10-12 April 2013, HDZZ, Zagreb, 2013.
- [3] G. Pichler. Izvori svjetlosti i svjetlosno zagađenje. U: V. Garaj-Vrhovac, N. Kopjar i S. Miljanić, ur. *Zbornik radova Šestog simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja*, pp. 3-8, Stubičke Toplice, Hrvatska. 18-20. travnja 2005. HDZZ, Zagreb 2005.
- [4] R. Despotović i Z. Nemet. Prilog bibliografiji radova iz zaštite od zračenja. U: Z. Franić i D. Kubelka, ur. *Zbornik radova Drugoga simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja*, pp. 13-23. Zagreb, Hrvatska. 23-25. studenoga 1994. HDZZ, Zagreb, 1994.

50 YEARS OF RADIATION PROTECTION AND THE CROATIAN RADIATION PROTECTION ASSOCIATION

**Ines KRAJCAR BRONIĆ, Saveta MILJANIĆ and
Mária RANOGAJEC-KOMOR**

Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia, krajcar@irb.hr

ABSTRACT

On the occasion of the fifty years of organised radiation protection activities at the area known as "former Yugoslavia", the professional activities and achievements of the Croatian Radiation Protection Association (CRPA) are presented in this paper. CRPA was founded in 1979 and in 1992 it became a regular member of the International Radiation Protection Association (IRPA). The main activities of CRPA members are: scientific research, participation in professional committees, intense cooperation in professional and scientific matters with the IRPA, other international bodies and Croatian scientific and professional societies, and related administrative work. Nine national symposia of CRPA with international participation were organized since 1991. All presentations were published as full papers in the Proceedings. CRPA participated in the organization of IRPA Regional Congresses in Central Europe from 1993 till 2007 and hosted IRPA Regional Congress in Dubrovnik in 2001. Members of CRPA are taking part in the organization of IRPA international congresses and in the work of IRPA General Assembly. CRPA has been actively involved in the informal meetings of European radiation protection societies since 2004 and organized their 6th meeting in Zagreb in 2009. As a society of the EU member state, CRPA will strengthen cooperation with the European radiation protection societies, especially with the societies in the region.

RADIATION PROTECTION IN SLOVENIA OVER THE PAST FIFTY YEARS (1963 – 2013) AND THE SLOVENIAN SOCIETY OF RADIATION PROTECTION

Gregor OMAHEN and Milko J. KRIŽMAN²

1) *Institute of Occupational Safety, Chengdujska 25, Ljubljana, Slovenia*

2) *Independent Qualified Expert of RP*

gregor.omahen@zvd.si, milko.krizman@gmail.com

1. INTRODUCTION

Activities of the Slovenian Society for Radiation Protection cannot be adequately represented if they are not placed in the context of events that have been running in the field of radiation protection (RP) in Slovenia in parallel. After the first humble beginnings of use of ionising radiation in medicine in the early 1900's, the number of sources and the use of radiation were constantly increasing in the 1950's, also outside medicine. The first regulations on protective measures at work with radiation sources were issued 1947, and were followed by the federal Law on Protection against Ionising Radiation (1959). In the meantime, the use of radiation broadened to industry, research activities, and elsewhere. On the basis of this law the competent administrative authorities were established and designated organisations were authorised to carry out technical protection at work with sources of ionising radiation elsewhere. The initial attitude towards the protection against ionising radiation was by that time rather unprofessional. By establishing the national infrastructure for radiation protection, the true basis for radiation protection was given since it became a legal obligation.

Radiation protection in Slovenia has some particularities. On the one hand, a wide and varied use of ionising radiation and operation of nuclear facilities (reactor, nuclear power plants, mining and processing of uranium and radioactive waste storage) accelerated the safety consciousness. On the other hand, Slovenia was the first of the former Yugoslav republics that joined the EU and had to meet the serious European attitude to radiation protection and nuclear safety.

The aim of this paper is to light up the development of radiation protection in Slovenia being in parallel with the expansion of the use of ionising radiation sources and with the formation of the necessary national infrastructure for radiation protection. The authors tried also to explain a pretty weak role of the Slovenian Society for Radiation Protection in the above processes.

2. RADIATION SOURCES AND NUCLEAR FACILITIES IN SLOVENIA

Radiation Sources in Medicine

The first user of radiation sources (X-ray apparatuses and radioactive sources) was medicine, either for the purpose of diagnosis or therapy. In Slovenia, the first X-ray machine was used in the General Hospital in Ljubljana in 1900 [1] and X-ray therapy was launched later (in 1923). The first radioactive source (²²⁶Ra) was also used early at the Department of Ophthalmology of the same hospital in 1902 for therapy of eye cancer [2]. The cancer therapy practices accelerated the establishment of the first Slovenian Institute for Cancer Treatment (1938) in Ljubljana, where radium sources and 200 kV X-rays were used. The Institute was renamed in 1945 into the Institute of Oncology (OI). In 1954 the first artificial radioisotopes (¹³¹I, ¹⁹⁸Au) were applied for diagnostics at the Internal Clinic in Ljubljana, and the application of unsealed sources was continued at the Institute of Oncology with ¹³¹I and ³²P. The first irradiation facility with a high activity source with ⁶⁰Co was launched at the OI in 1962. The use of radioisotopes in other nuclear medicine departments occurred in the period 1960 – 1974. In the 1980's the research reactor at the Jožef Stefan Institute (JSI) produced ^{99m}Tc to cover the current needs of the nuclear medicine in Ljubljana. Of the newer devices in Slovenia there are two PET/CT devices (at OI and Clinic of Nuclear Medicine at the University Hospital Centre).

Radiation Sources in Industry

Industrial radiography in Slovenia began in Ljubljana and Maribor in 1956 with radiation sources ^{137}Cs , ^{60}Co and ^{192}Ir , mainly in metal industry companies and in the next years at all three steel factories at Ravne, Jesenice and Štore [3]. In the early 1960's, the use of radioactive sources of ^{137}Cs , ^{85}Kr , ^{60}Co , ^{144}Ce , ^{147}Pm , ^{241}Am and ^{90}Sr spread in the process techniques in industry, such as in thickness, level and density gauges, electrostatic eliminators with ^{210}Po and ^{241}Am and smoke detectors with ^{226}Ra and ^{241}Am . The speciality in Slovenia was the use of numerous sources of ^{60}Co in the brake mechanisms of the mountain lifts and very restricted installation of lightning rods with ^{152}Eu and ^{60}Co .

Radiation Sources in Research and Educational Institutions

In its early days of its foundation in 1949, the nuclear research institute JSI conducted several military projects for a development of technological processes related to the recovery of uranium and production of nuclear fuel. The scientists also developed a technological process for the production of yellow cake with a closed water circuit for the later needs of uranium mining and milling. Many samples of uranium and thorium minerals are still specimens of mineral collections in museums and universities, as well as in geological research. Many radioactive sources in analytical and research laboratories are built-in in the measuring and analytical devices, often with activities exceeding the exemption levels.

Sources in State Institutions

This includes the use of radiation sources in the police and customs, and the use of radiation sources in the defence forces. Some newer devices used by the police for the detection of narcotics and explosives contain radiation sources that can far exceed the exemption levels. In the defence forces radioactive sources (with ^{226}Ra) are occurring in the vehicles of an older production (in tanks, planes) and in different devices (with ^3H) mostly as marker lights and luminous sights on artillery pieces. On the military radar systems some fields of X-ray radiation, originating from the high-voltage tubes, were indicated.

Nuclear Facilities as Sources of Ionising Radiation

A decade and a half after the construction of the research reactor TRIGA Mark II (in May 1966) the first nuclear power plant at Krško (Westinghouse PWR type) was completed with an installed capacity of 630 MWe (in 1981). A few years later (1986) the repository for low-and-medium level radioactive waste was built at the Reactor Centre at Brinje. At the end of 1984, the Uranium Mine Žirovski Vrh started a trial exploration of uranium. The operation lasted over 5 years and was shut down in July 1990 with a total production of 432 tonnes of yellow cake.

All of these facilities were legally obliged to set up an independent unit for radiation protection. They were required to establish a regular monitoring of environmental radioactivity thus showing they operate within the authorised limits, as required in their operation licenses.

3. STATE INFRASTRUCTURE OF RADIATION PROTECTION

The basic infrastructure of RP at the national level consists of (1) the law on RP and the relevant regulations, (2) the competent regulatory authorities with inspection services, (3) authorised organisations or approved qualified experts for RP, (4) authorised services to perform specific tasks, and (5) clear determination of responsibility at each stage of the involvement.

Legislation on Radiation Protection

The first Yugoslav legislation on RP, known to the authors, was the "Rules on Protective Measures at Work with X-ray Machines and Radioactive Substances". The Rules were issued by the Federal Ministry of Labour (1947) on the basis of the Law on Labour Inspection. In April 1959 the first Yugoslav Law on Protection against Ionising Radiation was adopted. On its basis six statutory regulations were issued, including that on permissible doses. Further acts on RP were adopted in 1965 and 1977, both with

a complete set of RP regulations. Due to the construction of nuclear facilities in Slovenia the national Act on the Protection against Ionising Radiation and for the Safety Measures of Nuclear Facilities was issued in 1980. The Law on Protection against Ionising Radiation and on Nuclear Safety (1984) with its 11 subsequent regulations was last federal law being in force in Slovenia.

In 2002, the Act on Protection against Ionizing Radiation and on Nuclear Energy was adopted. In the coming years 4 decrees and 10 regulations were issued, related to a narrower field of radiation protection. The existing regulations covered all the requirements of the directives and regulations of the European Council in the field of radiation protection.

Competent Authorities

The first competent authority for radiation protection in the former federal state of Yugoslavia was the Labour Inspectorate within the Ministry of Labour (1947). In accordance with the Federal Law on Protection against Ionising Radiation (1959), the highest ranking responsible body for RP was the Federal Commission for Nuclear Energy and later, its designated federal authorities on RP. With the next law (1965) the competence for RP was moved from the federal level to the lower republic level. Radiation protection was the domain of the Ministry of Health (actually, of the Sanitary Inspectorate), only radiation protection in defence forces was the exclusive responsibility of the Ministry of National Defence.

After Slovenia's independence, the new Law on Ionising Radiation Protection and Nuclear Safety (2002) took over responsibilities in the field of RP in industry, research, education and public administration the Slovenian Nuclear Safety Administration (within the Ministry of Environment). The Ministry of Health has retained its competence in the field of health and veterinary medicine. These tasks are actually carried out by its affiliated body, the Slovenian Radiation Protection Administration.

Authorised Technical Support Organisations

In general, these organisations carry out radiation measurements for licence holders, elaborate the expertises and radiation safety assessments, and are also in a function as authorised service providers. In Slovenia, two technical support organisations for RP were authorised, the Institute of Occupational Safety (IOS), and the Jožef Stefan Institute (JSI). The Centre for Radiation Protection at IOS was created in 1961 from the Central Unit for Radiation Protection founded at the Institute of Oncology.

The Institute of Occupational Safety has been developed during fifty years to the modern technical support organisation that controls radiation sources on the whole territory of Slovenia, and is authorised for providing services for personal dosimetry, training courses and medical examinations. It is also approved for radioactivity monitoring of the environment.

The Jožef Stefan Institute is the highly ranking research organization involved in numerous scientific fields. It is also authorised for supervising of radiation sources and radiation practices at the institute and elsewhere in the country. Its role on RP became more important with the operation of exacting nuclear facilities (Krško NPP, Uranium Mine Žirovski Vrh). It represents the leading institute in the area of environmental radioactivity monitoring since it developed specific physical and chemical methods for measurement of radionuclides at low concentrations.

4. RADIATION PROTECTION

Historical periods of radiation protection in Slovenia

The history of radiation protection in Slovenia could be divided into three periods.

For the most of the *first period* (1900 – 1958) radiation sources were used in medicine but from the middle of the 1950's the use of radiation spread also to industry and other areas. Specifically for this period was a very weak awareness of health risks of radiation and a lack of organised system of radiation protection. In medicine radiologists and radio-physicists actually met with the problems of radiation protection but the latter was subordinated to the treatment process. Similar situation was in the research institutions, where the majority of the scientists and researchers strongly underestimated the risk for

health [4]. Even the activities in the last decade of this period when Yugoslavia entered the nuclear era (by establishing three nuclear institutes, with secret research of uranium fuel and related nuclear activities) did not contribute much to the development of radiation protection issues in this period.

The *second period* of RP was shorter but more intensive and lasted 1959 – 1995. The sudden break in the weak awareness of radiation protection in the whole Yugoslavia happened when the fatal accident occurred on the RB reactor in the Vinča Institute of Nuclear Sciences in October 1958. This tragic event promptly initiated the establishment of the state infrastructure for radiation protection: by the adoption of the first federal law on RP with subsequent statutory regulations, by defining the competent authorities and by appointing the technical support organisations. The further legislation explicitly dealt with radiation protection measures for radiation workers, for the population and for patients undergoing medical examinations. Monitoring of radioactivity in the environment was established in the early 1960's, firstly for the control of global contamination due to atmospheric nuclear weapon tests, and later in the 1980's in Slovenia for the control of local contamination of the environment due to operation of the nuclear facilities. This period was namely characterized also by the construction of nuclear facilities in Slovenia and a further expansion of the use of radiation.

But in general, the administrative control over the radiation sources and radiation practices existed but it was not very rigorous and efficient. Only one inspector was in charge to control thousands of radiation sources and hundreds of licence holders. And the same inspector carried out the control over the exacting nuclear facilities, so as for the licensing and as for the inspection.

The *third period* began in the second half of the 1990's and continues until today (1996 – 2013). At this time the international basic safety standards on radiation protection (IAEA BSS, EC BSS) were issued, being prepared on the basis of the recommendations of the ICRP 1990. Slovenia was already underway with initial preparations to join the EU, drafting the new legislation on RP and nuclear safety. According to EC criteria, the former legislation on RP of Slovenia was only in 29 % of requirements in line with the EU *acquis communautaire*. Especially in the last decade, these changes in legislation made significant shifts ahead in radiation protection, as regards the quality of the implementation of radiation protection measures as the intensity of administrative controls. The increased number of inspectors regularly and directly supervised the radiation practices of the licensees and their use of radiation sources. As the result, the numerous discoveries of unregistered and orphan radiation sources took place as well as identifications of operators of radiation practices that had not the proper licences. The competent authorities were obliged to establish the central state records on radiation sources, licence holders, individual exposures received by domestic and foreign radiation workers, and records of radioactive waste. The state established a control of illegal transport of radioactive sources at the borders, the owners of scrap-yards are required to have a radiation control over scrap metals. Emergency preparedness for radiological and nuclear accident has been raised to the level comparable to other members of EU.

Incidents involving radiation sources in Slovenia

Only two serious radiation events have been reported so far, one resulted in an acute radiation injury and the other caused radioactive contamination of a significant part of the hospital [6]. After the capitulation of the Third Reich in May 1945, the Slovenian inmate returned home and wore with him a dozen of metal sticks in his pocket, not being aware that these items were in fact the radium needles with a total activity of about 1 Ci. A serious wound on the skin was recognised by the doctors of the Institute of Oncology as the radiation damage. The fate of the man has not been known. The next noteworthy accident with a radioactive source happened at the Institute of Oncology in 1961 and resulted in extended contamination of hospital areas due to an improper handling of a damaged ^{226}Ra source. Removing of contaminated items by the experts of the JSI and of the Vinča Institute of Nuclear Sciences resulted in a huge amount of radioactive waste with more than sixty barrels of contaminated material. Several other events with radioactive contamination of workplaces were reported to be of a limited extent (contamination with ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{131}I , uranium, ^{232}Th , ^{241}Am). A case of the lost radiography source with

^{137}Cs at the Metalna factory in Maribor, detected during the inspection survey and recovered by the mobile unit, was reported in 1993.

5. SLOVENIAN SOCIETY OF RADIATION PROTECTION

Slovenian Society for RP within JDZZ (1963 – 1991)

The Yugoslav Society for Radiation Protection (JDZZ, *Jugoslavensko društvo za zaščito od zračenja*) was founded on 11 October 1963 in Portorož during the 1st Symposium of the Society. The Provisional Board was elected who appointed an Executive Committee of the JDZZ a month later. The JDZZ Society had become an associate member of the International Radiation Protection Association (IRPA) in 1966, and three years later a full member of the IRPA (1969). Majority of Slovenian experts in the field of radiation protection and many radiation workers were members of the JDZZ and participated in its activities (as members of organizing and technical committees on the symposia, then in drafting regulations on radiation protection, at thematic meetings on RP with experts from other republics, etc). The JDZZ Society organised 16 symposia, and three of them took place in Slovenia: 1st one in Portorož (1963), 5th one at Bled (1970) and 11th one in Portorož again (1981).

The national societies for RP on the republican level were established in the second half of the 1970's as a result of constitutional changes and greater autonomy of the republics. The Slovenian Society for RP (SDVS) was founded during 11th Symposium JDZZ in Portorož (21-24 April 1981). The first president of the Society was Ivan Kobal, the head of RP unit at the JSI. The 1980's were a period of challenging events in RP in Slovenia: drafting the new Slovenian (1980) and the new federal Act of Protection against Ionising Radiation and Nuclear Safety (1984), a completion of the Krško NPP (1981), a yellow cake production at the Uranium mine Žirovski Vrh (1984), and a construction of the interim storage facility for radioactive waste at Brinje (1986), not to mention radioactive contamination of the Slovenian territory due to the Chernobyl nuclear accident (1986). The Slovenian Society was involved in all these activities, more through the engagement of its outstanding members as through its formal role.

Slovenian Society for Radiation Protection (1991 – 2013)

The new National Society for Radiation Protection (DSVS) in the independent Slovenia was launched on 8 November 1991 at JSI, Ljubljana. The president of the Society became Rafael Martinčič from JSI. From the independence onwards, the Society participated at international symposia, conferences and congresses related to RP. Thus, the Slovenian Society organised the Regional Congress of IRPA in Portorož (1995). In the last decade the topics of radiation protection have been regularly included into the programme the annual international conferences of the Nuclear Society of Slovenia (NSS). Since 2005, the head of the society is Gregor Omahen from IOS.

Society members played an important role in the period of Slovenian accession to EU, especially in the development of new legislation of RP, harmonised with the European directives. The important fact is that the professional staff of both competent authorities was affiliated to the Society too, in addition to the affiliated experts from technical support organisations and radiation workers.

The Slovenian Society is rather small and counts between 50 and 70 members; only about 20 of them could be recognized as actual radiation protection experts. Such a small number could be advantageous since everyone knows each other and can easily come with the problem to be solved. On the other hand, this reduces the need for the Society to be active as a formal association. The Society informs its members about important issues in radiation protection field and related events (international conferences and symposia, international training courses, meetings, etc.) via email. The official web site of the Society has been still in preparation.

6. CONCLUSION

A brief historical review of the use of sources of ionising radiation in Slovenia, a development of the supporting infrastructure of protection against ionising radiation and the present state of radiation

protection showed that the general trends of radiation protection followed the development in the rest of Europe, although with some delay. The formal role of the Slovenian Society for Radiation Protection has not been significant. In Slovenia, the critical mass of membership is obviously too small to be a professional association that may develop its activities and mission similarly as in the bigger countries. But the area of radiation protection in Slovenia is small enough that the participants involved at all levels of competence can mutually and directly participate in the ongoing improvement of radiation protection.

7. REFERENCES

- [1] Jevtič V. A Short History of the Radiology Institute of Ljubljana. In: Glaser E, ed. Hundred years of X-rays, Slovenian Medical Society, Medico-historical Section, Maribor, 1998 (*in Slovene*)
- [2] Zupančič-Slavec Z, Gaberšček S, Slavec K. The development of nuclear medicine in Slovenia. Radiology and Oncology, Ljubljana, 2012;46(1):81-88.
- [3] Križman M, Janžekovič H. Hundred years of the use of radioactive sources in Slovenia. In: Rožman S, Žefran B, Žagar T, eds. Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Portorož, Slovenia, Sept. 8-11, Nuclear Society of Slovenia, Ljubljana, 2008, pp. 1101.1-1101.8.
- [4] Ninković M M. Radiation Protection in the World and in Former Yugoslavia since Discovering of the X-rays to Nowadays. Facta Universitatis, Niš, Vol. 4, No 1, 2006.
- [5] Križman M. Incidents with radiation sources in Slovenia, February 2010 (SNSA archive).
- [6] Zupančič Č. The Story of the First Nuclear Measurement in Ljubljana. In: Osredkar M, Polenec N, eds. Tales about the Jožef Stefan Institute, IJS, Ljubljana, 2000, pp.76-80 (*in Slovene*).

RADIATION PROTECTION IN SLOVENIA OVER THE PAST FIFTY YEARS (1963 – 2013) AND THE SLOVENIAN SOCIETY OF RADIATION PROTECTION

Gregor OMAHEN¹ and Milko J. KRIŽMAN²

1) *Institute of Occupational Safety, Chengdujska 25, Ljubljana, Slovenia*

2) *Independent Qualified Expert of RP*

gregor.omahen@zvd.si, milko.krizman@gmail.com

The use of the ionizing radiation sources in Slovenia started as early as 1900 when X-ray device was put in operation; the first radioactive source was used two years later. Artificial radioactive sources were introduced from 1954 onwards. The use of radioactive sources in industry started in the middle of the 1950's when industrial radiography was introduced due to strong metal industry in Slovenia. Four nuclear facilities were built in Slovenia: the research reactor TRIGA (1966), the Krško nuclear power plant (1983), the mining and milling uranium complex at Žirovski Vrh (1984) and the low and intermediate level radioactive waste storage (1986).

The infrastructure of radiation protection (RP) in the former Yugoslavia was established as late as the first Law on RP was adopted in 1959, the competent authorities were defined and technical support organisations for RP were designated. But the whole infrastructure could not follow the rapid development of nuclear industry and the extent uses of sources. After joining EU, the changes in legislation made a significant shift ahead in radiation protection, as regards the quality of the implementation of radiation protection measures as the intensity of administrative and inspection controls.

Slovenian Radiation Protection Society was established in 1981 during the 11th symposium of the Yugoslav Radiation Protection Society. The role of the Slovenian Society for Radiation Protection has never been significant, mostly due to a small critical mass of membership. This is sometimes advantageous since everyone knows each other and can easily come with the problem to be solved. This feature reduces the need for the Society to be active as a formal association. The main role of the Society is the distribution of actual information on RP and related important events.

***RADIOEKOLOGIJA
I IZLAGANJE STANOVNIŠTVA***

АНАЛИЗА НЕКИХ ФАКТОРА КОЈИ БИ МОГЛИ УТИЦАТИ НА АКУМУЛАЦИЈУ ^{210}Pb У ЗЕМЉИШТУ

Александра МИХАИЛОВИЋ¹, Милица ВУЧНИЋ ВАСИЋ¹, Наташа ТОДОРОВИЋ², Јан ХАНСМАН² и Миодраг КРМАР²

1) Факултет техничких наука, Нови Сад, Србија, zandra@uns.ac.rs

2) Департаман за физику, ПМФ, Нови Сад, Србија, krmar@df.uns.ac.rs

САДРЖАЈ

Радиоизотоп ^{210}Pb се веома често користи у студијама атмосферског транспорта, седиментације, ерозије или датирања. Активност ^{210}Pb је мерена у преко 40 узорак земљишта у урбаном делу града Новог Сада са намером да се установи да ли неки локални фактори могу утицати на акумулацију овог радионуклида. Различита својства земљишта, као што су гранулометријски састав, садржај глине, песка или хумуса су мерени да би се установило постоји ли нека корелација између ових параметара и количине ^{210}Pb у земљишту. Посебна пажња је посвећена корелацији између ^{210}Pb и олова које потиче из антропогених извора.

1. Увод

Изотоп племенитог гаса радона ^{222}Rn доспева у атмосферу, најчешће из минерала у саставу земљине коре који садрже ^{238}U . Након три алфа и два бета распада долази до стварања ^{210}Pb , дугоживећег радионуклида коме је период полураспада 22 године. Када једном настане у атмосфери, ^{210}Pb као и сви остали потомци ^{222}Rn , будући да су хемијски активни, ступају у реакције са честицама аеросола и у том облику бивају транспортовани и депоновани на површину тла. Из тог разлога се ^{210}Pb користи као обележивач у истраживањима атмосферских процеса [1]. Након депоновања аеросола на тло, највећи део ^{210}Pb бива захваћен од стране земљишта, због високог хемијског афинитета честица глине. На тај начин хемијски везано олово ^{210}Pb је нашло своју примену у истраживањима брзине ерозије [2], седиментације у воденим системима или датирању седиментних наслага [3]. Из тог разлога је веома значајно познавати све могуће факторе који би могли имати утицаја на акумулацију ^{210}Pb у земљишту. За више од 40 узорак земљишта у области града Новог Сада извршена је анализа присутности ^{210}Pb , гранулометријског састава, садржаја глине, песка, хумуса итд. у циљу утврђивања корелације мерене активности ^{210}Pb са поменутиим факторима. Будући да стабилно олово може доспети до земљишта након емисије из индустријских постројења, веома је значајно знати да ли на тај начин акумулирано олово у земљишту има утицаја на приступ ^{210}Pb из атмосфере. Из тог разлога је узорковано земљиште у околини постројења за производњу акумулатора у Сомбору, где постоји повишена концентрација олова, да би се анализа могуће корелације стабилног олова и ^{210}Pb извела у знатно ширем опсегу мерених концентрација.

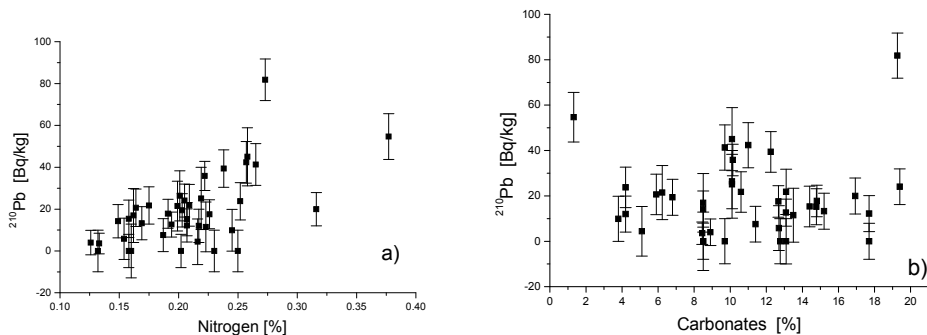
2. Узорковање и мерења

Сакупљен је укупно 41 узорак земљишта, од тога 36 узорак на ужем подручју града Новог Сада и 5 узорак у непосредној близини фабрике акумулатора у Сомбору. После сушења узорци су самлевени и просејани кроз сито отвора 2 mm. За овако припремљене узорке одређена су следећа хемијска својства земљишта: садржај карбоната одређен је волуметријски помоћу Scheiblerov-ог калциметра, садржај органске материје методом Тјурин-а, а лакоприступачни фосфор екстракцијом са амонијум лактатом. Механички састав земљишта (удео песка, праха и глине) је одређен пипет методом, а текстурна класа дата на основу класификације по Tommerup-и. Концентрација укупног олова одређена је методом индуковане купловане плазме (ICP - OES).

За мерење присуства ^{210}Pb узорци уситњеног и осушеног земљишта су паковани у пластичне контејнере цилиндричног облика ($D = 69 \text{ mm}$, $H = 31 \text{ mm}$) са зидовима дебљине 0.7 mm . У свим мерењима су пуњена два контејнера а средња маса узорка је била 280 g . Контејнери су херметички затворени а мерењу првог узорка се приступило након три недеље. Средње време мерења је било око $70 \cdot 10^3 \text{ s}$. У свим спектрима се могла уочити јасна гама линија ^{210}Pb на енергији од 46.5 keV . Неколико најинтензивнијих гама линија ^{214}Pb и ^{214}Bi су искоришћене да би се одредила концентрација ових радионуклида у свим мереним узорцима. Уз претпоставку да се поменута два радионуклида и ^{210}Pb налазе у равнотежи, одузимањем средње вредности активности ^{214}Pb и ^{214}Bi од израчунате вредности за концентрацију ^{210}Pb , добијен је допринос ^{210}Pb који потиче од депоновања из атмосфере, у Енглеској литератури често називан *unsupported ^{210}Pb* . Ово олово углавном потиче од распада радона ^{222}Rn који је доспео у атмосферу.

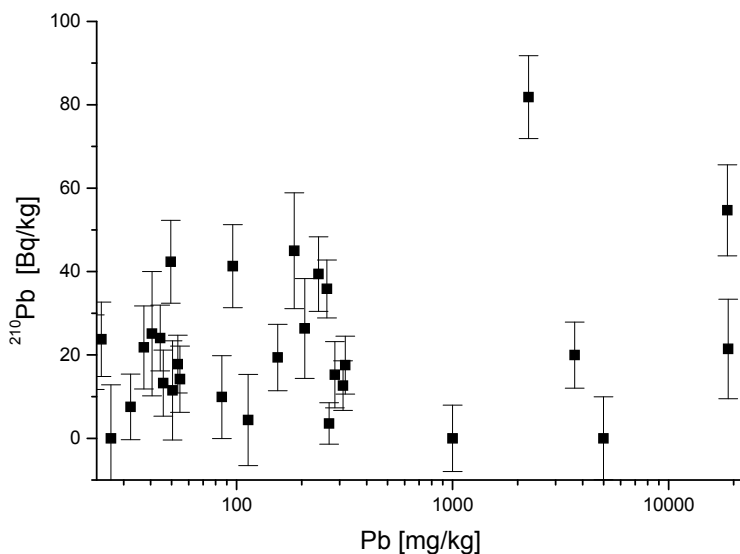
3. Резултати

Након одузимања доприноса ^{210}Pb који потиче од чланова низа ^{238}U , добијено је да се вредности *unsupported ^{210}Pb* у мереним узорцима земљишта крећу до 80 Bq/kg . Када се ове вредности упореде са неким другим резултатима мерења може се уочити блага корелација са ^{137}Cs ($r = 0.72$), што је потпуно разумљиво пошто оба радионуклида бивају заједно транспортована и депонована атмосферским токовима до земљишта. Такође је примећена позитивна корелација између измерених вредности ^{210}Pb и садржаја азота или хумуса у земљишту ($r = 0.64$), што се може видети на слици 1 а) за азот. Између осталих параметара земљишта, као што су гранулометријски састав, присуство фосфора, карбоната, глине, песка итд. и ^{210}Pb није примећена никаква корелација. Као пример на слици 1 б) је графички приказано да између садржаја карбоната и ^{210}Pb у мереним узорцима не постоји никаква зависност.



Слика 1. Корелација између азота, карбоната и ^{210}Pb у узорцима земљишта

У свим узорцима земљишта је измерена концентрација укупног олова. Олово у земљишту потиче од индустријских постројења, која емитују овај метал у атмосферу, али и издувних гасова моторних возила. На територији града Новог Сада измерене су вредности олова у узорцима земљишта до 300 mg/kg , са изузетком једног узорка чија је концентрација износила 1000 mg/kg . Да би се овај опсег проширио, пет узорка земљишта сакупљено је у околини фабрике акумулатора у Сомбору. Вредности укупног олова у овим узорцима су се кретале и до 18000 mg/kg . На слици 2 приказана је корелација између мерених вредности укупног олова и ^{210}Pb у испитиваним узорцима земљишта.



Слика 2. Корелација између укупног олова и ²¹⁰Pb у узорцима земљишта

4. Закључак

Добијени резултати указују на чињеницу да између концентрације ²¹⁰Pb и већине испитиваних параметара земљишта, као што су садржај карбоната, фосфата, песка, глине итд. не постоји никаква корелација. То је значајна информација која говори да акумулација ²¹⁰Pb у земљишту не зависи од извесног броја фактора, што методе у којима се овај радионуклид употребљава чини независним од могућих локалних варијација, барем оних параметара који су мерени у овој студији. Веома је занимљива блага корелација између ²¹⁰Pb и азота или хумуса. Ова би корелација указивала на евентуални афинитет аеросола који садрже ²¹⁰Pb ка органским једињењима или азоту који се налази у земљишту. Такође је веома значајна и чињеница да не постоји никаква корелација између укупног олова и ²¹⁰Pb, у веома широком опсегу измерених вредности олова. Ово говори у прилог чињеници да присутност олова у земљишту, па чак и у релативно високим концентрацијама не доводи до блокирања акумулације ²¹⁰Pb из атмосфере.

5. Literatura

- [1] W.C. Graustein and K.K. Turekian. ⁷Be and ²¹⁰Pb indicate an upper troposphere source for elevated ozone in the summertime subtropical free troposphere of the Eastern North Atlantic. *Geophys. Res. Lett.* 23 (1996) 539–542.
- [2] D.E. Walling, A.L. Collins, H.M. Sickingabula. Using unsupported lead-210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in small Zambian catchment. *Geomorphology*. 52 (2003) 193-213
- [3] N. Horvatinčić, J. Barešić, S. Babinka, B. Obelić, I. Krajcar Bronić, P. Vreća, A. Suckow. Towards a deeper understanding of how carbonate isotopes reflect environmental changes: a study with recent ²¹⁰Pb dated sediments of Plitvice lake. *Radiocarbon* 50 (2008) 1-21

POSSIBLE FACTORS AFFECTING ACCUMULATION
OF AIRBORNE ^{210}Pb IN SOIL

**Aleksandra MIHAILOVIĆ¹, Milica VUČINIĆ VASIĆ¹, Nataša TODOROVIĆ², Jan HANSMAN²
and Miodrag KRMAR²**

1) Faculty of technical Sciences, Novi Sad, Serbia, zandra@uns.ac.rs

2) Physics department, Novi Sad, Serbia, krmar@df.uns.ac.rs

ABSTRACT

Airborne ^{210}Pb , daughter of ^{222}Rn is frequently used as a tracer in different studies concerning atmosphere transport, sedimentation, soil erosion, dating, etc. Concentration of ^{210}Pb was measured in more than 40 soil samples collected in urban area of Novi Sad in order to get evidence about possible influence of some local factors on accumulation of airborne ^{210}Pb in soil. Different soil properties as granulation, content of the clay, sand and organic matter were measured to explore possible correlation with the amount of ^{210}Pb . Special care was taken in correlation between ^{210}Pb and lead accumulated in soil in vicinity of industrial objects releasing lead in atmosphere.

MULTIVARIJATNA ANALIZA URANA U PODZEMNIM VODAMA REJONA HADŽIĆA

Alfred VIDIC, Zorana ILIĆ

Zavod za javno zdravstvo FBiH, Sarajevo, BiH, a.vidic@zzjzfbih.ba

SADRŽAJ

Radioelementi, među kojima i uran, prelaze iz čvrste u tečnu fazu trošenjem stijena i otapanjem u podzemnim vodama. Analize izotopskog sastava urana, spektrometrijom alfa čestica, u podzemnim vodama na ispitivanom području su pokazala znatnu varijabilnost unutar relativno malog ispitivanog područja (25 km²). U cilju identifikacije faktora koji dominantno utiču na izotopski sastav urana, te eventualne pravilnosti u prostornoj distribuciji urana u ispitivanim podzemnim vodama u odnosu na geološke karakteristike terena, primjenjena je multivarijetna analiza, i to analiza glavne komponente (AGK) i klaster analiza (KA). AGK je pokazala da dva faktora dominantno utiču na izotopski sastav urana. Na osnovu različitog uticaja na izotopski sastav urana ta dva faktora mogu se pripisati efektu trošenja stijena i otapanja, i drugom efektu izboja jezgri. KA je pokazala da se ispitivane vode mogu svrstati u tri grupe. Prostorna analiza grupa dobijenih klastera pokazuje pravilnost u odnosu na geološke karakteristike tla, potvrđujući dominantan uticaj geologije na varijabilnost izotopskog sastava urana na ispitivanom području.

1. Uvod

Uran je široko rasprostranjen prirodni radioaktivni element sa prosječnim sadržajem od 3 mg/kg u Zemljinoj kori. Koncentracija urana u podzemnim i površinskim vodama, iznosi približno 1 µg/L, iako su zabilježene značajne varijacije od 0.001 do 1000 µg/L [1]. Prelazak urana, kao i drugih radioelemenata, iz čvrste u tečnu fazu je rezultat efekta izboja jezgri i niza fizičko-hemijskih procesa na granici faza, što rezultira frakcionacijom i neravnotežom uranovih izotopa u vodi.

Ispitivanja urana u podzemnim vodama na lokalitetu Hadžića, gdje je upotrebljavana municija od osiromašenog urana, su identifikovana kao glavni predmet od interesa za ispitivanje. Preliminarna ispitivanja urana u podzemnim vodama Hadžića su pokazala značajnu varijabilnost, kako ukupne koncentracije urana tako i odnosa aktivnosti ²³⁴U/²³⁸U.

Cilj ovog rada je primjenom multivarijetne analize identifikovati faktore koji dominantno utiču na izotopski sastav urana u podzemnim vodama, te ispitati korelaciju između ispitivanih voda vezanu za izotopski sastav urana, na užem području Hadžića.

2. Materijal i metode

Objekat ispitivanja su bile izvorske vode na lokalitetu gdje je korištena municija od osiromašenog urana tokom NATO kampanje 1995. godine. Uzorkovanje i analiza spektrometrijom alfa čestica je provedena juna 2010. (Tabela 1) i detaljno je opisana u Vidic et al. [2].

U cilju identifikacije faktora koji utiču na izotopski sadržaj urana i ispitivanja sličnosti među ispitivanim uzorcima korištena je multivarijetna analiza, i to: analiza glavne komponente (AGK) i klaster analiza (KA). AGK i KA se često kombinovano koriste u studijama ispitivanja životne sredine u cilju interpretacije rezultata mjerenja [3] i [4].

AGK se koristi za identifikaciju glavnih faktora koji leže u osnovi međusobne povezanosti mjerenih varijabli, u našem slučaju izotopskog sastava urana u ispitivanim vodama. Metoda AGK uključuje računanje korelacionog matriksa kojim se opisuje disperzija originalnih varijabli, te ekstrahovanja Eigen vrijednosti i Eigen vektora. Glavni faktori su oni čije su Eigen vrijednosti veće od 1. Mjera doprinosa identifikovanih glavnih faktora mjerenim varijablama može biti visoka (factor loading >0.6), umjerena (factor loading 0.3-0.6) i niska (factor loading <0.3) [4].

KA je multivarijaciona tehnika kojom se vrši grupisanje objekata prema karakteristikama koje poseduju. Klaster analiza klasifikuje objekte, ovdje uzorke podzemnih voda, svrstavajući ih u grupe prema sličnosti. Ward-ova metoda hijerarhijskog postupka klasterovanja je najčešće korištena tehnika u ispitivanjima životne sredine [4]. U ovom ispitivanju korištena je Ward-ova metoda klasterovanja uz klasifikaciju udaljenosti mjerenih varijabli standardnom euklidskom udaljenosti. Rezultati KA analize se shematski predstavljaju tzv. dendrogramom. Statistička obrada podataka je vršena software-om XLSTAT.

3. Rezultati i diskusija

Rezultati koncentracije aktivnosti ^{234}U i ^{238}U , odnos aktivnosti $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ i masena koncentraciju ukupnog urana su prikazani u Tabeli 1.

Uzorak	^{238}U (mBq/L)	^{234}U (mBq/L)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	C_U ($\mu\text{g/L}$)
1	4.44±0.29	8.42±0.45	1.90±0.16	0.36±0.02
2	7.22±0.41	8.39±0.46	1.16±0.09	0.58±0.03
3	6.64±0.38	10.70±0.52	1.61±0.12	0.53±0.03
4	11.00±0.68	13.50±0.77	1.23±0.10	0.88±0.05
5	1.85±0.25	4.87±0.43	2.63±0.42	0.15±0.02
6	10.30±0.35	13.60±0.72	1.32±0.08	0.83±0.03
7	13.20±0.63	15.10±0.70	1.14±0.08	1.06±0.05
8	10.90±0.65	12.60±0.71	1.16±0.09	0.88±0.05
9	13.90±0.71	15.30±0.76	1.10±0.08	1.12±0.06
10	2.57±0.19	3.62±0.24	1.41±0.14	0.21±0.02
11	2.56±0.20	3.20±0.23	1.25±0.13	0.21±0.02
12	7.82±0.63	9.00±0.68	1.15±0.13	0.63±0.05
13	8.67±0.65	9.63±0.69	1.11±0.12	0.70±0.05
14	11.60±0.68	13.30±0.74	1.15±0.09	0.93±0.05
15	10.70±0.57	10.90±0.57	1.02±0.08	0.86±0.05
16	5.39±0.32	5.87±0.34	1.09±0.09	0.43±0.03
17	4.03±0.38	6.95±0.53	1.72±0.21	0.32±0.03
18	4.35±0.37	6.38±0.47	1.47±0.17	0.35±0.03

Tabela 1. Rezultati alfaspektrometrijske analize ispitivanih voda

Koncentracija aktivnosti za ^{238}U je iznosila od 1.85±0.25 do 13.9±0.71 mBq/L, a za ^{234}U od 3.20±0.23 do 15.3±0.76 mBq/L. Ukupna koncentracija urana, izračunata prema koncentraciji aktivnosti ^{238}U je iznosila od 0.15 do 1.12 $\mu\text{g/L}$, srednja vrijednost 0.61±0.31 $\mu\text{g/L}$ (koeficijent varijacije, CV=50%). Relativno visok koeficijent varijacije (CV=50%) ukazuje na specifičnosti ispitivanih voda i značajnu prostornu varijabilnost rastvorenog urana. Odnos aktivnosti $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ u ispitivanim vodama varira od 1.02 do 2.63, srednja vrijednost 1.37±0.40 (CV=29%). Rezultati za odnos aktivnosti $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ su većinom <1.47 (75%), odnosno <1.16 (50%).

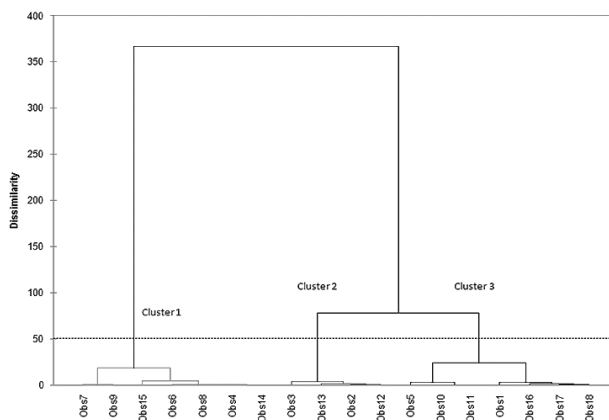
Rezultati APK (Tabela 2) su pokazali dva glavna faktora koji dominantno doprinose ukupnoj varijanciji (96%). Faktor (1) koji doprinosi 61% ukupnoj varijanciji, ima visok pozitivan uticaj na koncentracije aktivnosti ^{238}U i ^{234}U , i visok negativan uticaj na odnos aktivnosti $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$. Ovaj faktor se

može pripisati procesima trošenja stijena i otapanja, ovisno o geološkim i geochemijskim karakteristikama sredine. Faktor (2) doprinosi 35% ukupnoj varijanciji, i ima nizak uticaj na koncentraciju aktivnosti ^{238}U , a umjeren uticaj na koncentraciju aktivnosti ^{234}U i odnos aktivnosti $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$. Ovaj faktor se odnosi na procese koji doprinose povišenom odnosu aktivnosti $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, vezane za efekat izboja jezgri i preferencijalnog rastvaranja ^{234}U .

Tabela 2. Analiza glavnih komponenti

	F1	F2	F3
Eigen vrijednost	2.436	1.396	0.168
Varijancija (%)	60.897	34.892	4.211
Ukupna varijancija %	60.897	95.789	100.000
Doprinos pojedinog faktora			
	F1	F2	F3
^{238}U	0.953	0.275	0.128
^{234}U	0.836	0.545	0.057
$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	-0.831	0.463	0.308
^{234}U u višku	-0.371	0.899	-0.232

Rezultati KA su grupisali ispitivane vode u tri grupe (slika 1). Grupu 1 i 2 sačinjavaju vode uzorkovane u području kojim dominiraju pješčari, glinci, laporci i šljunkoviti aluvijalni sedimenti. Ispitivane vode iz ovog područja pokazuju relativno povišen sadržaj urana ($>0.53 \mu\text{g/L}$) što je u skladu sa mineraloškim podacima o relativno višem sadržaju urana u pješčarima u odnosu na okolne karbonatne stijene. Ispitivane vode koje sačinjavaju Grupu 3 su uzorkovane u dolomitnom i krečnjačkom karbonatnom području. Ispitivane vode Grupe 3 imaju relativno niži sadržaj urana ($<0.43 \mu\text{g/L}$). Dodatno, unutar Grupe 3 uočavaju se podgrupe koje se poklapaju sa geografskom lokacijom uzorkovanja ispitivanih voda.



Slika 1. Dendrogram KA ispitivanih voda

4. Zaključak

Rastvoreni uran pokazuje značajnu prostornu varijabilnost u podzemnim vodama ispitivanog područja. Metode multivarijetne analize, AGK i KA, kombinovana sa podacima o geologiji tla ukazuju na značajnu korelaciju rastvorenog urana sa tipom tla. Ispitane vode porijeklom iz karbonatnih sedimenata imaju nešto niži sadržaj urana (0.15 to 0.43 $\mu\text{g/L}$), u poređenju sa vodama uzorkovanim u dominantno pješčarskim sedimentima (0.53 to 1.12 $\mu\text{g/L}$).

5. Literatura

- [1] J.K. Osmond, J.B. Cowart and M. Ivanovich. Uranium Isotopic Disequilibrium in Ground Water as an Indicator of Anomalies. *Int J Appl Radiat Isot* 34 (1983) 283-308.
- [2] A. Vidic, Z. Ilić i Lj. Benedik. Recent measurements of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ isotope ratio in spring waters from the Hadzici area. *Journal of Environmental Radioactivity* 120 (2013) 6-13
- [3] W. Luo, Y. Lu, Y. Zhang, W. Fu, B. Wang, W. Jiao, G. Wang, X. Tong and J.P. Giesy. Watershed-scale assessment of arsenic and metal contamination in the surface soils surrounding Miyun Reservoir, Beijing, China. *Journal of Environmental Management* 91 (2010) 2599-2607
- [4] K. Chen, J.J. Jiao, J. Huang and R. Huang. Multivariate statistical evaluation of trace elements in groundwater in a coastal area in Shenzhen, China. *Environmental Pollution* 147 (2007) 771-780

PROCENA RADIJACIONOG OPTEREĆENJA MAHOVINA SOKOBANJE I BANJE JOŠANICE IZ 2010. I 2012. GODINE

Ana A. ČUČULOVIĆ¹, Rodoljub ČUČULOVIĆ² i Dragan VESELINović³

1) Univerzitet u Beogradu, INEP- Institut za primenu nuklearne energije, Banatska 31b, 11080 Zemun, Srbija, e-mail: anas@inep.co.rs

2) Visoka poslovna škola u Leskovcu, Vlade Jovanovića 8, 16000 Leskovac, Srbija

3) Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju, P.P. 137, 11001 Beograd, Srbija

SADRŽAJ

U radu su prikazane jačine apsorbovanih doza u mahovinama Sokobanje i Banje Jošanica, minimalne i maksimalne vrednosti. Jačina apsorbovane doze u ispitivanim uzorcima mahovina Sokobanje je bila od 0,006 mGy/god (2012. godina) do 0,503 mGy/god (2000. godina), a u mahovinama Banje Jošanice od 0,205 mGy/god (2010. godina) do 0,560 mGy/god (2009. godina). Mahovine Banje Jošanice su primile veću dozu od mahovina Sokobanje. Jačina apsorbovane doze opada u mahovinama sa vremenom. Jačine apsorbovanih doza u mahovinama sa ispitivane teritorije mnogo su niže od doza koje izazivaju promene u reproduktionom ciklusu biljnih i životinjskih organizama (0,4 Gy/god do 1 Gy/god) i letalnih doza (4 Gy/god i 0,4 Gy godišnje).

1. Uvod

Mahovine su veoma stara, primitivna grupa organizama, posebne građe i specifične ekologije u odnosu na više biljke. Nemaju list, koren, ni stablo u pravom smislu reči, ni kutikulu na površini stabla i listića i zbog toga lako upijaju zagađujuće supstance iz svoje okoline. Na teritoriji Srbije je zabeleženo 444 vrsta, koje su svrstane u 169 rodova i 53 familije [1]. U zavisnosti od vrste, starosti mahovina, njihovih morfoloških i fizioloških karakteristika, mesta i podloge nalaženja, nadmorske visine, mahovine usvajaju radionuklide.

Akcidentom u nuklearnoj elektrani Lenjin (26.04.1986., Černobilj) u okolinu je izbačeno oko 12×10^{18} Bq radioaktivnog materijala. Sa tačke posmatranja formiranja tkivnih doza i radiobioloških posledica, ^{137}Cs se smatra vodećim radionuklidom, kako zbog dugog fizičkog (30,17 god.) tako i biološkog vremena poluraspada. Jon cezijuma je hemijski i biohemijski homolog kalijuma i u organizmu prati njegov metabolizam. Potpuno je rastvorljiv u telesnim tečnostima i ravnomerno se raspoređuje u organizmu. Fizičko-hemijske karakteristike su mu takve da se aktivno uključuje u lanac ishrane ljudi i životinja preko biljaka jer metabolički zamenjuje kalijum [2]. Radionuklidi koji su se ugradili u telo organizma postaju izvorom unutrašnjeg zračenja konkretnog živog organizma, ali i izvor zračenja za druge organizme, neposredno povezane lancem ishrane.

Mahovine se smatraju hiperakumulatorima radionuklida iz životne sredine. Smatra se da je tolerantnost ka radionuklidima pasivna i da nastaje obrazovanjem različitih kompleksnih jedinjenja. Procena radijacionog opterećenja za mahovine je kompleksna. Zbog svega navedenog potrebno je izvršiti uopštavanja i uopštavanja podataka [3,4].

2. Materijal i metode

Uzorci mahovina sakupljeni su metodom slučajnog uzorka na teritoriji Sokobanje i Banje Jošanice, u periodu od 2000. do 2012. godine. Mahovina sa Ozrena su: *Hypnum cupressiforme*, *Homalothecium sericeum*, *Anomodon viticulosus*, *Syntrichia ruralis*, sa Lepterije: *Homalothecium sericeum*, *Brachythecium rutabulum*, *Isothecium myosuroides*, *Anomodon viticulosus*, *Necera complanata*, *Neckera crista* i iz Banje Jošanice: *Homalothecium sericeum*, *Hypnum cupressiforme*. Svi uzorci su homogenizovani i mereni u Marineli posudama zapremine 1L. Gamaspektrometrijska merenja su vršena na HPGe detektoru sa 8192 kanala, rezolucije 1,65 keV-a i relativne efikasnosti od 34% na 1,33 MeV-a za ^{60}Co . Vreme merenja jednog uzorka je bilo 60000s. Relativna greška koja obuhvata pripremu uzorka i

merjenja je do 10%. Obrada spektra je vršena pomoću softverskog paketa Gamma Vision 32. Aktivnost veštački proizvedenog radionuklida ^{137}Cs je merena preko γ -linije na energiji od 661,6 keV-a. Izmerena aktivnost je preračunata u dozu uz pretpostavku da su sve emitovane čestice (gama i beta) apsorbovane u tkivu koje je akumuliralo ^{137}Cs [3].

3. Rezultati i diskusija

U tabeli 1 prikazana je jačina apsorbovane doze, standardna devijacija, minimalna i maksimalna vrednost jačine doze u mahovinama u periodu od 2000. do 2012. godine, sakupljenih sa teritorije Ozrena, Lepterije i Banje Jošanice [5,6].

Tabela 1. Srednje, minimalne i maksimalne vrednosti jačine apsorbovanih doza (mGy/god) i standardna devijacija uzoraka mahovina sa teritorije Sokobanja i Banje Jošanice

Lokalitet	Sokobanja			Banja Jošanica		
Godina	Doza za ^{137}Cs (mGy/god)					
	sred. vredn. \pm st dev.	min	max	sred. vredn. \pm st dev.	min	max
2000.	0,503			---	---	---
2002.	0,250 \pm 0,159	0,071	0,503	---	---	---
2006.	0,099 \pm 0,090	0,008	0,304	---	---	---
2008.	0,063 \pm 0,051	0,008	0,145	---	---	---
2009.	0,035 \pm 0,036	0,007	0,139	0,461 \pm 0,093	0,375	0,560
2010.	0,055 \pm 0,042	0,025	0,153	0,300 \pm 0,080	0,205	0,421
2012.	0,034 \pm 0,031	0,006	0,116	0,255 \pm 0,026	0,236	0,310

Jačina apsorbovane doze u ispitvanim uzorcima mahovina Sokobanja je bila od 0,006 mGy/god (2012. god.) do 0,503 mGy/god (2000. god.), a u mahovinama Banje Jošanice od 0,205 mGy/god (2010. god.) do 0,560 mGy/god (2009. god.). Iz tabele 1 sledi da su mahovine Banje Jošanice primile veću dozu od mahovina Sokobanja, da jačina apsorbovane doze opada u mahovinama sa vremenom, kao i da su jačine apsorbovanih doza u mahovinama sa ispitivane teritorije mnogo niže od doza koje izazivaju promene u reprodukcijom ciklusu biljnih i životinjskih organizama (0,4 do 1 Gy godišnje) i letalnih doza (4 Gy i 0,4 Gy godišnje).

Tabela 2. Vrste mahovina, broj uzoraka, srednje, minimalne i maksimalne vrednosti jačine apsorbovanih doza (mGy/god) i standardna devijacija uzoraka mahovina sa teritorije Ozrena, Lepterije i Banje Jošanice sakupljenih 2010. i 2012. godine

Vrsta mahovine (br. uzoraka)	Doza za ^{137}Cs (mGy/god)					
	2010			2012		
	sred. vredn. ± st. dev.	min	max	sred. vredn. ± st. dev.	min	max
Ozren						
<i>H. cupressiforme</i>	0,042	---	---	0,015	---	---
<i>H. sericeum</i> (9,10)	0,043 ± 0,034	0,003	0,097	0,014 ± 0,006	0,009	0,027
<i>A. viticulosus</i> (6,5)	0,048 ± 0,019	0,024	0,077	0,022 ± 0,012	0,012	0,035
<i>S. ruralis</i> (1,1)	0,019	---	---	0,030	---	---
Lepterija						
<i>H. sericeum</i> (5,8)	0,091 ± 0,068	0,013	0,153	0,034 ± 0,027	0,010	0,085
<i>B. rutabulum</i> (1,1)	0,071	---	---	0,009 ± 0,005	0,006	0,013
<i>I. myosuroides</i> (0,1)	---	---	---	0,071	---	---
<i>A. viticulosus</i> (0,2)	---	---	---	0,064 ± 0,018	0,051	0,077
<i>N. complanata</i> (0,1)	---	---	---	0,108	---	---
<i>N. crispa</i> (0,3)	---	---	---	0,087 ± 0,037	0,046	0,116
Banja Jošanica						
<i>H. sericeum</i> (3,4)	0,244 ± 0,053	0,205	0,304	0,260 ± 0,035	0,236	0,310
<i>H. cupressif.</i> (3,3)	0,354 ± 0,064	0,293	0,421	0,248 ± 0,007	0,242	0,256

Na teritoriji Sokobanje i Banje Jošanica raste veliki broj mahovina koje su dobri modeli za istraživanja jačine apsorbovanih doza. Tako je na teritoriji Ozrena u mahovinama vrste *A. viticulosus* 2010. godine zabeležena najveća srednja vrednost apsorbovane doze 0,048 mGy/god, a 2012. u mahovinama vrste *S. ruralis* 0,030 mGy/god. Na teritoriji Lepterije je 2010. u mahovinama vrste *H. sericeum* zabeležena najveća srednja vrednost apsorbovane doze 0,091 mGy/god, a 2012. u mahovinama vrste *N. complanata* 0,108 mGy/god. Na teritoriji Banje Jošanica je 2010. u mahovinama vrste *H. cupressiforme* zabeležena najveća srednja vrednost apsorbovane doze 0,354 mGy/god, a 2012. u mahovinama vrste *H. sericeum* 0,260 mGy/god. Evidentno je da su mahovine Banje Jošanice primile veću dozu od mahovina Sokobanje u ispitivanom vremenskom periodu.

4. Zaključak

Jačine apsorbovanih doza u mahovinama Banje Jošanice su više od jačina apsorbovanih doza u mahovinama Sokobanje. Jačina apsorbovane doze opada u mahovinama sa vremenom. Jačine apsorbovanih doza u mahovinama sa ispitivane teritorije su mnogo niže od doza koje izazivaju promene u reprodukcijom ciklusu biljnih i životinjskih organizama (0,4 do 1 Gy/god) i letalnih doza (4 Gy do 0,4 Gy/god).

5. Literatura

- [1]. Stevanović V., Pavić S., Stevanović B., Diverzitet flore mahovina (Briophyty) Jugoslavije sa pregledom vrsta od međunarodnog značaja, u knjizi Biodiverzitet Jugoslavije sa pregledom vrsta od međunarodnog značaja, Biološki fakultet, Beograd, 1995, 173.
- [2]. Nichols A.L., Hunt E., Nuclear data table, in: Longworth G, ed. The radiochemical manual, Howell, UK, 1998.
- [3]. DOE-STD-1153-2002, A Graded Approach for Evaluating Radiation Doses to Aquatic and Terrestrial Biota, Module 3, Methods Derivation, US Department of Energy, Washington, 2002.
- [4]. IAEA, 1992, Effects of ionizing radiation on plants and animals at levels implied by current radiation protection standards, Technical Report Series, No. 332, IAEA, Vienna; Annals of the ICRP, pergamon Press, Oxford, Publ. 54, 1988.
- [5]. Čučulović A., Popović D., Čučulović R., Ajtić J., Natural radionuclides and ¹³⁷Cs in moss and lichen in Eastern Serbia, Nuclear technology & Radiation protection, Belgrade, 27 (1), 44-51, 2012
- [6]. Čučulović A., Čučulović R., Sabovljević M., Veselinović D., Activity concentrations of ¹³⁷Cs and ⁴⁰K in mosses from spas in Eastern Serbia, Arch. Biol. Sci., Belgrade, 64(3), 917-925, 2012

Zahvalnica: Ovaj rad finansiralo je Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Projekat broj: III 43009)

EVALUATION OF RADIATION LOAD OF MOSS FROM SOKOBANJA AND BANJA JOŠANICA IN 2010 AND 2012

Ana A. ČUČULOVIĆ¹, Rodoljub ČUČULOVIĆ² and Dragan VESELINOVIĆ³

1) University of Belgrade, Institute for the Application of Nuclear Energy – INEP, Banatska 31b, 11080 Zemun, Serbia, e-mail: anas@inep.co.rs

2) Higher Business School of Leskovac, Vlade Jovanovića 8, 16000 Leskovac, Serbia

3) Faculty for Physical Chemistry, University of Belgrade, P.O. Box 137, 11001 Belgrade, Serbia

ABSTRACT

In this work absorption dose strengths are given for moss from Sokobanja and Banja Jošanica, including minimal and maximal values. The absorbed dose strength in investigated moss samples from Sokobanja was from 0.006 mGy/year (2012) to 0.503 mGy/year (2000), while in moss from Banja Jošanica it was from 0.205 mGy/year (2010) to 0.560 mGy/year (2009). Moss from Banja Jošanica received a larger dose than moss from Sokobanja. The absorbed dose strength decreased in moss with time. The absorption dose strengths in moss on the investigated territories are much lower than doses that lead to changes in the reproductive cycle of flora and fauna (0.4 Gy/year to 1 Gy/year) and lethal doses (4 Gy/year and 0.4 Gy year).

AKTIVNOST ^{137}Cs I ^{40}K U LEKOVITOM BILJU SA PODRUČJA ZLATIBORA

**Branislava MITROVIĆ¹, Gordana VITROVIĆ¹, Gordana PANTELIĆ²,
Duško VITROVIĆ³, Velibor ANDRIĆ¹ i Svetlana GRDOVIĆ¹**

1) Fakultet veterinarske medicine, Univerzitet u Beogradu, radijacija@vet.bg.ac.rs

2) Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Univerzitet u Beogradu

3) Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu

Abstrakt

Gamaspektrometrijskom metodom određivana je aktivnost ^{137}Cs i ^{40}K u lekovitom bilju sa područja planine Zlatibor. Najveća aktivnost ^{137}Cs je izmerena u uzorku borovnice (120 Bq/kg), dok je u ostalim uzorcima lekovitog bilja aktivnost ^{137}Cs bila niska i kretala se u opsegu od 0,7-21 Bq/kg. U ispitivanim uzorcima ^{40}K je bio dominantni radionuklid i njegova aktivnost se kretala od 150 Bq/kg (borovnica) do 970 Bq/kg (podbel). Radiološki rizik za stanovništvo koje pije čajeve od ispitivanih lekovitih biljaka je nizak, osim u situaciji da se konzumiraju velike količine čaja od borovnice čijom ingestijom stanovništvo dobija godišnju efektivnu dozu od 1024,9 nS.

1. Uvod

Lekovite biljke se u narodnoj medicini koriste kao potporna terapija u lečenju različitih poremećaja i bolesti kod ljudi. Pored plantažno gajenih lekovitih biljaka, koriste se i samonikle biljke iz prirode, koje mogu sadržati radioaktivne elemente (WHO, 2007). Kako ingestija predstavlja glavni put radioaktivne kontaminacije ljudi, povišena radioaktivnost lekovitih biljaka može doprineti povećanju radijacionog opterećenja ljudi. Takođe, treba imati u vidu da se tokom lečenja lekovitim biljkama, preporučuje njihovo korišćenje u dužem vremenskom periodu.

Radioaktivni ^{137}Cs je u životnu sredinu Srbije dospelo posle nuklearnog akcidenta u Černobilju (1986. godine) i zbog dugog vremena posluraspada (30 godina) može se i dalje detektovati u životnoj sredini, pre svega u bioindikatorima, u koje spadaju i lekovite biljke (Mitrović i sar., 2009; Jevremović i sar., 2011). Cilj našeg istraživanja je bio da se u lekovitom bilju sakupljenom na području planine Zlatibor odredi aktivnost proizvedenog radionuklida ^{137}Cs i prirodnog radionuklida ^{40}K . Određivana je i prosečna godišnja efektivna doza usled ingestije ^{137}Cs za lica koja konzumiraju čajeve od lekovitog bilja.

2. Materijal i metode rada

Uzorci lekovitog bilja (koren, list, cvet) su sakupljeni u periodu od 2011-2012. godine, na području planine Zlatibor. Od svake vrste lekovitog bilja sakupljena su po dva uzorka, ukupno je bilo 12 uzoraka. Po dopremanju u laboratoriju, uzorci su sušeni na 105°C do konstantne mase, usitnjeni i prućeni u plastične posude zapremine 200 ml.

Radioaktivnost uzoraka je određivana gamaspektrometrijskom metodom merenja na HPGe detektoru (Ortec, USA), relativne efikasnosti 30% i energetske rezolucije od 1,85 keV (1332,5 keV ^{60}Co).

Prosečna godišnja efektivna doza za ingestiju ^{137}Cs kod odraslih ljudi koji piju čajeve pripremljene od lekovitog bilja, je računata prema sledećoj formuli (Jevremović i sar., 2011; Kilić i sar. 2009):

$$E_{\text{ing}} = C \cdot H \cdot DF_{\text{ing}}$$

E_{ing} je individualna godišnja efektivna doza (Sv), C je koncentracija radionuklida u proizvodu (Bq/kg), H je količina lekovite biljke koja se konzumira godišnje (kg/g), DF_{ing} je očekivana efektivna doza pri jediničnom unošenju radionuklida ingestijom (^{137}Cs - 1.3×10^{-8} Sv/Bq). Prilikom računanja E_{ing} korišćeni su podaci Kilića i sar. (2009) prema kojima 60% radioaktivnog ^{137}Cs sadržanog u suvoj biljnoj masi prelazi u pripremljen rastvor čaja.

3. Rezultati i diskusija

U Tabeli 1 dati su narodni i latinski nazivi ispitivanih lekovitih biljaka, kao i njihove preporučene količine koje se koriste (g) za pripremanje čaja (200 ml).

Tabela 1. Narodni i latinski nazivi ispitivanih lekovitih biljaka i preporučene količine (g) za pripremanje čaja (200 ml)

Narodni naziv	Latinski naziv	Preporučena količina* (g)
Borovnica	<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	3
Iva	<i>Teucrium montanum</i> L.	2
Hajdučka trava	<i>Achillea millefolium</i> L.	2
Majčina dušica	<i>Thymus serpyllum</i> L.	3
Nana	<i>Mentha piperita</i> L.	2
Podbel	<i>Tussilago farfara</i> L.	2
Jagorčevina	<i>Primula veris</i> Huds.	3
Timjan	<i>Thymus vulgaris</i> L.	3
Kantarion	<i>Hypericum perforatum</i> L.	2
Zdravac	<i>Geranium robertianum</i> L.	2
Podubica	<i>Teucrium chamaedrys</i> L.	2
Glog	<i>Crataegus monogyna</i> Jacq.	2

* preporučena količina lekovitih biljaka ("Lučar D.O.O. – Novi Sad")

Rezultati određivanja aktivnosti ^{137}Cs i ^{40}K u lekovitom bilju sa područja planine Zlatibor prikazani su u Tabeli 2. Kod svih ispitivanih uzoraka ustanovljeno je da ja ^{40}K dominantni radionuklida i njegova aktivnost je bila znatno viša u poređenju sa aktivnošću ^{137}Cs , osim kod uzorka borovnice gde su ove vrednosti bile približne. Aktivnost ^{40}K se kretala u opsegu od 150 Bq/kg (borovnica) do 970 Bq/kg (podbel). Najveća aktivnost ^{137}Cs je izmerena u borovnici (120 Bq/kg), dok je u ostalim uzorcima lekovitog bilja aktivnost ^{137}Cs bila niska (0.7-21 Bq/kg). Godišnja efektivna doza usled ingestije ^{137}Cs za odrasle osobe koje konzumiraju jednu šolju čaja (200 ml) data je u Tabeli 2. Izračunata godišnja efektivna doza za ^{137}Cs se kreće u rasponu od 4-1059 nSv. Jevremović i saradnici (2011) su utvrdili da se godišnja efektivna doza usled ingestije ^{137}Cs kod odraslih osoba koji uzimaju čajevе poreklom iz naše zemlje, kreće od 2.5-469.9 nSv, što je nešto niže u odnosu na naše rezultate.

Tabela 2. Aktivnost ^{137}Cs i ^{40}K (Bq/kg) u lekovitom bilju sa područja planine Zlatibor i godišnja efektivna doza usled ingestije ^{137}Cs za odrasle osobe koje konzumiraju jednu šolju čaja dnevno

Narodni naziv	^{40}K	^{137}Cs	^{137}Cs (nSv)
Borovnica	150 ± 10	120 ± 4	1024,9
Iva	250 ± 11	21 ± 1	117,3
Hajdučka trava	580 ± 24	4,7 ± 0,7	26,8
Majčina dušica	470 ± 19	4,5 ± 0,5	38,4
Nana	600 ± 22	2,0 ± 0,4	11,4
Podbel	970 ± 40	2,2 ± 0,6	12,5
Jagorčevina	710 ± 29	1,6 ± 0,2	13,7
Timjan	270 ± 12	14,8 ± 0,8	126,4
Kantarion	330 ± 15	2,1 ± 0,4	12,0
Zdravac	630 ± 25	17,2 ± 1,4	97,9
Podubica	380 ± 18	0,9 ± 0,1	5,1
Glog	420 ± 16	0,7 ± 0,3	4,0

4. Zaključak

Ispitivanjem aktivnosti ^{137}Cs u lekovitom bilju sa područja Zlatibora utvrđeno je da je aktivnost ^{137}Cs u najvećem broju ispitivanih uzoraka bila niska (do 10 Bq/kg). U uzorcima timjana, zdravca i ive aktivnost ^{137}Cs je bila nešto viša i kretala se od 14,8-21 Bq/kg, dok je najviša aktivnost izmerena u borovnici (120 Bq/kg). Radiološki rizik za stanovništvo koje konzumira ove lekovite biljke je nizak, osim u situaciji da se konzumiraju velike količine čaja od borovnice (1024,9 nSv).

5. Literatura:

- [1] M. Jevremovic, N. Lazarevic, S. Pavlovic, M. Orlic. Radionuclide concentration in samples of medicinal herbs and effective dose from ingestion of ^{137}Cs and natural radionuclides in herbal tea products from Serbian market. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 47:1, (2011), pp. 87-92.
- [2] Ö. Kiliç, M. Belivermiş, S. Topcuoğlu, Y. Çotuk. ^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K , ^{137}C radioactivity concentrations and ^{137}Cs dose rate in Turkish market tea, *Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology*, 164:2, (2009), pp. 138-143.
- [3] I. Kosalec, J. Cvek, S. Tomic. Contamination of medicinal herbs and herbal products, *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 60 (2009),4, pp. 485-501.
- [4] B. Mitrović, G. Vitorović, D. Vitorović, G. Pantelić, I. Adamović. Natural and anthropogenic radioactivity in the environment of mountain region of Serbia, *J. Environ. Monitor.* (2009), 11, pp. 383-388.
- [5] WHO, Guidelines for assessing quality of herbal medicines with reference to contaminants and residues, World Health Organization, Geneva, (2007), pp 1-105.

ACTIVITY CONCENTRATION OF ^{137}Cs AND ^{40}K IN HERBAL MEDICINES FROM ZLATIBOR MOUNTAIN

**Branislava MITROVIĆ¹, Gordana VITOROVIĆ¹, Gordana PANTELIĆ²,
Duško VITOROVIĆ³, Velibor ANDRIĆ¹, Svetlana GRDOVIĆ¹**

1) Faculty of veterinary medicine, University in Belgrade, radijacija@vet.bg.ac.rs

2) Institute for nuclear science «Vinča», University in Belgrade

3) Faculty of agriculture, University in Belgrade

ABSTRACT

The objective of this study were to evaluate the activity concentration of ^{137}Cs and ^{40}K in herbal medicines from Zlatibor mountain, by the gamma spectrometric method. The highest activity concentration of ^{137}Cs was detected in a sample of blueberries (120 Bq / kg), while in the other samples of herbs activity concentration of ^{137}Cs was low and varied in the range of 0.7 to 21 Bq/kg. Natural radionuclide ^{40}K was the dominant radionuclide and its activity concentration ranged from 150 Bq/kg (blueberry) to 970 Bq/kg (Cowslip primrose). Radiological risk to people who drink teas tested medicinal herbs is low, except in a situation to consume large amounts of tea blueberry (1059 nSv).

PROCENA DOZE OD GRAĐEVINSKOG MATERIJALA KOJI SE NEKADA DAVNO KORISTIO ZA STAMBENE OBJEKTE

Dragana TODOROVIĆ, Marija JANKOVIĆ, Milica RAJAČIĆ, Jelena NIKOLIĆ Gordana PANTELIĆ i Nataša SARAP

Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, 11001 Beograd, Srbija, beba@vinca.rs

SADRŽAJ

U radu su prikazani rezultati merenja aktivnosti u uzorcima građevinskog materijala iz Portugalije, Španije i sa Tajlanda, koji se nekada koristio za pravljenje stambenih objekata. Spektrometrijom gama emitera detektovani su prirodni radionuklidi i proizvedeni radionuklid ^{137}Cs . Dobijeni rezultati iskorišćeni su za procenu doze koja potiče od datog građevinskog materijala.

1. Uvod

Prirodna radioaktivnost je jedan od značajnijih izvora izlaganja ljudi jonizujućem zračenju, bilo da se radi o spoljašnjem ili unutrašnjem izlaganju. Unutrašnje izlaganje podrazumeva inhalaciju ili ingestiju radionuklida, dok se spoljašnje izlaganje odnosi na ekscpoziciju celog tela gama zračenju.

Svi građevinski materijali sadrže različite količine prirodnih radionuklida. Materijali koji potiču od stena i zemljišta uglavnom sadrže prirodne radionuklide kao što su članovi niza ^{238}U , ^{232}Th i ^{40}K [1]. U uranijumskoj seriji, njegov produkt ^{226}Ra je radiološki najznačajniji. Srednje vrednosti koncentracija u svetu za građevinski materijal za ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K iznose 50 Bq kg^{-1} , 50 Bq kg^{-1} i 500 Bq kg^{-1} , redom [2]. U davna vremena se koristio prirodni materijal koji je tada bio dostupan kao kamen, drvo, blato, glina, za izgradnju kuća, tvrđava, hramova. U modernom vremenu sve više se koristi građevinski materijal koji je nastao mešanjem prirodnih materijala sa industrijskim komponentama kao što su betonski blokovi i drugi. Cilj ovog rada je da se proceni doza koja potiče od građevinskog materijala (kamen, stena i cigla), koje su ljudi nekada davno koristili za izgradnju različitih objekata u Španiji, Portugaliji i na Tajlandu.

2. Eksperimentalni deo

Uzorci analizirani u ovom radu su građevinski materijali koji su se nekada koristili objekte različitih namena (stambene jedinice, javne zgrade i religiozni objekti). Ispitivani su sledeći uzorci: kamenje iz Univerziteta Koimbra u Portugaliji, kamen iz dominikanskog manastira u Batalji u Portugaliji, kamen sa tvrđave iz Salamanke u Španiji, kamenje iz tvrđave Alhambra u Španiji, stena sa tvrđave iz Toleda u Španiji, stena sa ostrva Koh na Tajlandu i cigla iz Ajutaje na Tajlandu.

Priprema uzoraka obuhvata mlevenje i prosejavanje do određene granulacije. U datim uzorcima uspostavljena je radioaktivna ravnoteža zatapanjem pčelinjim voskom. Spektrometrija gama emitera urađena je na HPGe detektorima relativne efikasnosti 18 i 20 %. Za kalibraciju detektora korišćen je sekundarni referentni radioaktivni materijal u geometriji plastične kutije od 100 cm^3 koji je dobijen od primarnog referentnog radioaktivnog materijala, Czech Metrological Institute, Praha, 9031-OL-427/12, type ERX, ukupne aktivnosti 72.40 kBq na 31.08.2012. godine (^{241}Am , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{203}Hg , ^{88}Y , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{210}Pb). Vreme merenja uzoraka je 60 ks. Rezultati merenja dati su sa mernom nesigurnošću koja je izražena kao proširena merna nesigurnost za faktor $k = 2$ koji za normalnu raspodelu odgovara nivou poverenja od 95 %.

3. Rezultati i diskusija

Spektrometrijom gama emitera u uzorcima iz Portugalije, Španije i sa Tajlanda detektovani su prirodni radionuklidi ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{238}U i ^{235}U , dok je u nekim uzorcima detektovan i proizvedeni radionuklid ^{137}Cs (Tabela 1).

Tabela 1. Vrednosti koncentracije radionuklida u uzorcima iz Portugalijske, Španijske i sa Tajlanda

Uzorak	Sadržaj radionuklida (Bq kg ⁻¹)					
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	²³⁵ U	²³⁸ U
Kamen sa zidina Univerziteta Koimbra, Portugalija	65 ± 5	43 ± 5	1470 ± 90	< 10	3.7 ± 0.4	90 ± 20
Kamen sa poda Univerziteta Koimbra, Portugalija	3.8 ± 0.9	13 ± 1	130 ± 10	< 0.1	0.9 ± 0.2	13 ± 5
Kamen sa poda sobe za samce Univerziteta Koimbra, Portugalija	81 ± 8	79 ± 8	810 ± 60	1.9 ± 0.7	4.5 ± 0.6	110 ± 10
Kamen iz dominikanskog manastira u Batalji, Portugalija	5 ± 1	5 ± 2	100 ± 10	< 0.3	1.0 ± 0.3	16 ± 5
Kamen sa tvrđave iz Salamanke, Španija	19 ± 3	29 ± 4	390 ± 30	1.2 ± 0.4	0.7 ± 0.2	23 ± 9
Kamen iz tvrđave Alhambra I, Španija	37 ± 3	21 ± 3	330 ± 30	< 0.2	1.6 ± 0.2	< 3.6
Kamen iz tvrđave Alhambra II, Španija	30 ± 3	23 ± 3	310 ± 30	< 0.2	1.8 ± 0.3	20 ± 5
Stena sa tvrđave iz Toleda, Španija	17 ± 3	37 ± 4	1660 ± 110	1.5 ± 0.5	2.7 ± 0.4	55 ± 14
Stena arhipelag oko ostrva Koh, Tajland	12 ± 1	< 0.6	9 ± 2	< 0.09	0.8 ± 0.1	20 ± 5
Cigla iz Ajutaje, Tajland	66 ± 4	84 ± 5	650 ± 30	< 2	3.7 ± 0.3	66 ± 7

Za procenu uticaja sadržaja radionuklida u građevinskom materijalu na vrednosti doze koju je primalo stanovništvo koje je provodilo oko 80 % vremena u zatvorenom prostoru, u stambenim objektima koji su pravljani od materijala prikazanog u ovom radu, korišćeni su parametri kao što su jačina

apsorbovane doze zračenja, \dot{D} i efektivna doza zračenja, D_E . Procena jačine apsorbovane doze od gama zračenja, \dot{D} , iz građevinskih materijala koji se koriste u konstrukcijama kuća, zgrada za stanovanje i drugih objekata vrši se na osnovu izmerene koncentracije ²²⁶Ra, ²³²Th i ⁴⁰K [1] (procena doze izvršena je preko ²²⁶Ra gde su dobijene manje vrednosti za mernu nesigurnost):

$$\dot{D}(\text{nGyh}^{-1}) = 0.92C_{Ra} + 1.1C_{Th} + 0.08C_K \quad (1)$$

i koristi se za izračunavanje jačine doze materijala koji se koristi za podove, plafone i zidove. Konverzioni koeficijenti odgovaraju 0.92 nGy h⁻¹ po Bq kg⁻¹ za ²²⁶Ra, 1.1 nGy h⁻¹ po Bq kg⁻¹ za ²³²Th i 0.08 nGy h⁻¹ po Bq kg⁻¹ za ⁴⁰K.

Godišnja efektivna doza, D_E , se računa po sledećoj relaciji [2]:

$$D_E = 0.7SvGy^{-1} \times 7000h \times \dot{D} \quad (2)$$

gde je \dot{D} u $\mu\text{Gy h}^{-1}$, 0.7 je konverzioni faktor, 7000 h je vreme koje ljudi provode u zatvorenom prostoru godišnje.

Dobijena jačina apsorbovane doze kreće se u opsegu od 0.01 do 0.23 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ (Tabela 2). Od 10 ispitivanih uzoraka u ovom radu, za 4 uzorka je dobijena vrednost jačine apsorbovane doze koja je veća od svetske prosečne vrednosti koja iznosi 0.08 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ [2] (ova vrednost se odnosi na unutrašnje izlaganje). Međutim, formula koja se koristi za procenu jačine apsorbovane doze (formula (1)) odnosi se

na dozu koja potiče od građevinskog materijala koji se koristi za sobu standardnih dimenzija $4\text{ m} \times 5\text{ m} \times 2.8\text{ m}$ [1]. Imajući u vidu da su se uzorci koji su ispitivani u ovom radu nekada davno koristili kao građevinski materijali za različite stambene objekte, koji su bili većih dimenzija (dvorci, tvrđave), možemo reći da bi doza izračunata u ovom radu bila dosta manja kada bi se uzeli neki drugi konverzioni faktori koji se odnose na mnogo veću zapreminu.

Sa druge strane, izračunata godišnja efektivna doza kreće se u opsegu od 0.01 do 1.13 mSv (Tabela 2), dok je srednja svetska vrednost 0.48 mSv [2]. Takođe za 4 uzorka isopitivana u ovom radu, godišnja efektivna doza prevazilazi srednju svetsku vrednost.

Tabela 2. Dobijene vrednosti za \dot{D} i D_E

Uzorak	\dot{D} / $\mu\text{Gy h}^{-1}$	D_E /mSv
Kamen sa zidina Univerziteta Coimbra, Portugalija	0.22	1.08
Kamen sa poda Univerziteta Coimbra, Portugalija	0.03	0.15
Kamen sa poda sobe za samce Univerziteta Coimbra, Portugalija	0.23	1.13
Kamen iz dominikanskog manastira u Batalji, Portugalija	0.02	0.10
Kamen sa tvrđave iz Salamanke, Španija	0.08	0.39
Kamen iz tvrđave Alhambra I, Španija	0.08	0.39
Kamen iz tvrđave Alhambra II, Španija	0.08	0.39
Stena sa tvrđave iz Toleda, Španija	0.19	0.93
Stena arhipelag oko ostrva Koh, Tajland	0.01	0.05
Cigla iz Ajutaje, Tajland	0.21	1.03

4. Zaključak

U ovom radu ispitano je 10 uzoraka građevinskog materijala koji se nekada davno koristio za stambene objekte u Portugaliji, Španiji i na Tajlandu. Dobijene vrednosti koncentracija prirodnih radionuklida su reda veličine koncentracija u građevinskom materijalu koji se koristi danas [3,4]. Takođe, izračunate vrednosti jačine apsorbovane doze kao i godišnje efektivne doze odgovaraju današnjim svetskim srednjim vrednostima.

5. Literatura

- [1] EC European Commission. Radiation Protection Unit, Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. Radiat. Prot 112, 1999.
- [2] UNSCEAR 2008 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionising radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. United Nations, New York, USA; 2010.
- [3] Dragana J. Todorović and Marija M. Janković. Natural radioactivity of materials used in industry and construction in Serbia. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46 (2011) 1147–1153.
- [4] Marija M. Janković, Dragana J. Todorović, Jelena D. Nikolić, Milica M. Rajačić, Gordana G. Pantelić and Nataša B. Sarap. Da li je veći radijacioni rizik po stanovništvo danas ili pre nekoliko hiljada godina. Uvodno predavanje Peti međunarodni kongres "Ekologija, zdravlje, rad, sport" Banja Luka, Zbornik Radova, Ed. S. Dikić, pp. 574-579, Banja Luka, Republika Srpska, 6 - 9 septembar 2012.

6. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije pod sledećim projektom: III43009.

DOSE ASSESSMENT FROM BUILDING MATERIALS WHICH WERE USED IN THE PAST

**Dragana TODOROVIĆ, Marija JANKOVIĆ, Milica RAJAČIĆ, Jelena NIKOLIĆ Gordana
PANTELIĆ and Nataša SARAP**

*University of Belgrade, Institute Vinča, Radiation and Environmental Protection
Department, 11001 Belgrade, Serbia, beba@vinca.rs*

ABSTRACT

This paper presents the results of measuring activity in building materials sampled at the historical sites in Portugal, Spain and Thailand. Naturally radionuclides as well as artificial radionuclide ^{137}Cs were detected by gamma spectrometry. The results were used to assess the dose that is derived from a given building materials.

MEĐUNARODNA INTERKOMPARACIJA GAMASPEKTROMETRIJSKE ANALIZE VODA

**Irena TANASKOVIĆ, Maja EREMIĆ SAVKOVIĆ, Ljiljana JAVORINA, Suzana BOGOJEVIĆ,
Vesna ARSIĆ, Jovana ILIĆ**

*Institut za medicinu rada Srbije "Dr Dragomir Karajović", Deligradska 29, 11000 Beograd, Srbija,
irenanaskovic@yahoo.com*

SADRŽAJ

U okviru aktivnosti Međunarodne agencije za atomsku energiju preko programa Mreže analitičkih laboratorija za merenje radioaktivnosti u životnoj sredini, Odeljenje za radioekologiju učestvuje u određivanju aktivnosti gamaemitera u različitim uzorcima od 2000. godine. Prikazani su rezultati gamaspektrometrijske analize voda za period 2010-2012. god. Većina rezultata je bila prihvaćena u potpunosti. Samo rezultati za aktivnosti ^{134}Cs i ^{60}Co su bil uslovno prihvaćeni.

1. Uvod

U skladu sa Novim Statutom i Poslovnikom o radu Evropske organizacije za akreditaciju (EA) Akreditaciono telo Srbije (ATS) je postalo punopravni član EA u Madridu 23.05.2012. god. Ovim članstvom sistem akreditacije Republike Srbije priznat je u Evropi i svetu. Poznato je da sve akreditovane laboratorije moraju učestvovati u međulaboratorijskim poređenjima i programima za ispitivanje osposobljenosti (proficiency test-PT), što predstavlja neophodan uslov za ostvarivanje kompetentnosti [1]. Ova obaveza treba da bude u fokusu funkcionisanja sistema menadžmenta i kvaliteta unutar laboratorije, jer je to jedan od značajnih zahteva SRPS ISO 17025:2006. Laboratorije moraju proveriti da li su PT aktivnosti organizovane u skladu sa međunarodnim standardima [2]. Međunarodna agencija za atomsku energiju iz Beča (MAAE) u okviru svojih aktivnosti osnovala je 1995. god. grupu laboratorija ALMERA (Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity). Laboratorije učesnice ulaze u lanac laboratorija koje su sposobne i zadužene za brza merenja u slučaju akcidenta. Institut za medicinu rada Srbije "Dr Dragomir Karajović" odnosno Odeljenje za radioekologiju je član od 2000. god. do danas. Svake godine smo uključeni u različite programe Mreže analitičkih laboratorija za merenje radioaktivnosti u uzorcima iz životne sredine [3].

2. Materijal i metode

Posle prijavljivanja Odeljenja za radioekologiju za učestvovanje u PT aktivnostima, MAAE nam je poslala različite uzorke iz životne sredine (voda, zemlja, vegetacija i druge). Uzorci voda su dobijeni u plastičnim bocama zapremine 500 ml. Ta količina uzoraka se koristi za različite metode ispitivanja nepoznatih radionuklida. Svake godine se dobijaju uzorci voda sa različitim sadržajem radionuklidi, koji pokrivaju širok energetski opseg gama emitera. Prilikom slanja rezultata analize potrebno je izvestiti o metodi i karakteristikama merne opreme koja je korišćena. Rok slanja rezultata ograničen je na 90 dana i uslovljen šifrom laboratorije.

Gamaspektrometrijska merenja vršena su na HPGe detektorima, relativne efikasnosti 25% i rezolucije 1,95 keV, odnosno 1,85 keV (na 1,332 MeV) firme "ORTEC". Energetska kalibracija, kao i kalibracija efikasnosti detektora obavlja se pomoću referentnog materijala AMERSHAM. Uzorci voda mereni su više puta od 60000 do 250000 s.

3. Rezultati i diskusija

U tabelama 1,2 i 3 su prikazani rezultata gamaspektrometrijske analize voda u periodu 2010-2012. god. i ocena rezultata u poređenju sa aktivnostima radionuklida MAAE. Rezultati su dati u Bq/kg.

Tabela 1. Ocena rezultata Instituta za medicinu rada Srbije (IMRS) u poređenju sa aktivnostima MAAE u 2010. godini

Radionuklid	Uzorak vode broj 3			Uzorak vode broj 5		
	MAAE	IMRS	Prihvatlji.	MAAE	IMRS	Prihvatlji.
⁵⁷ Co	7,5±0,2	8,4±0,5	A	7,5±0,2	7,8±0,6	A
⁶⁰ Co	6,0±0,1	6,0±0,1	A	6,0±0,1	6,0±0,1	A
¹³⁴ Cs	13,9±0,3	12,7±0,3	W	13,9±0,3	12,81±0,30	W
¹³⁷ Cs	9,5±0,2	9,7±0,2	A	9,5±0,2	9,9±0,2	A
¹⁵² Eu	11,3±0,2	11,1±0,4	A	11,3±0,2	11,1±0,5	A

Tabela 2. Ocena rezultata Instituta za medicinu rada Srbije (IMRS) u poređenju sa aktivnostima MAAE u 2011. godini

Radionuklid	Uzorak vode broj 2			Uzorak vode broj 3		
	MAAE	IMRS	Prihvatljiv	MAAE	IMRS	Prihvatljiv
²²⁶ Ra	0,86±0,02	0,81±0,04	A	1,57±0,04	1,50±0,08	A

Tabela 3. Ocena rezultata Instituta za medicinu rada Srbije (IMRS) u poređenju sa aktivnostima MAAE u 2012. godini

Radionuklid	Uzorak vode broj 1			Uzorak vode broj 3		
	MAAE	IMRS	Prihvatlji.	MAAE	IMRS	Prihvatlji.
²⁴¹ Am	4,7±0,1	5,3±0,4	A	3,3±0,1	3,6±0,2	A
¹³³ Ba	5,0±0,1	5,0±0,1	A	3,5±0,1	3,5±0,1	A
⁶⁰ Co	15,3±0,2	14,2±0,2	W	10,7±0,2	10,1±0,2	W
¹³⁴ Cs	7,7±0,1	7,3±0,1	A	5,4±0,1	4,8±0,1	W
¹³⁷ Cs	6,2±0,1	6,2±0,1	A	4,4±0,1	4,4±0,1	A
¹⁵² Eu	15,4±0,2	14,9±0,3	A	10,8±0,2	10,4±0,3	A

Pri ocenjivanju rezultata organizator je koristio standardne parametre uzimajući u obzir i tačnost i preciznost dobijenih laboratorijskih rezultata. Da bi rezultat laboratorije bio prihvaćen obavezno je da zadovolji oba uslova, ovi rezultati su ocenjeni sa A u izveštaju testa. Ako rezultat u jednom od ova dva parametra nije prihvatljiv, tada se laboratorijski rezultat upoređuje sa granicom prihvatljivih vrednosti. Ako je relativno odstupanje ispod ove definisane granice rezultat je prihvatljiv sa upozorenjem (W), ako je iznad definisane granice rezultat se obeležava kao neprihvatljiv (N). Rezultati testa se mogu dobiti preko interneta uz korišćenje šifre laboratorije ili u štampanim izveštajima koje izdaje MAAE.

4. Zaključak

Za dobijanje ovlašćenja za poslove zaštite od jonizujućih zračenja neophodna je akreditacija laboratorija, koja uključuje obaveznu inerkomparaciju jednom u četiri godine. Odeljenje za radioekologiju je imalo u ovim interkomparacijama dobre rezultate i potvrdilo osposobljenost laboratorija i kompetentnosti zaposlenih stručnjaka.

Mogućnost da svake godine učestvujemo u međunarodnoj interkomparaciji preko MAAE, koristimo da potvrdimo dobru laboratorijsku praksu u svim nivoima rada i za održanje akreditacije laboratorija a time i ovlašćenja za rad u poslovima zaštite od jonizujućih zračenja.

5. Literatura

- [1] ATS PA-02 Pravilnik o učešću međulaboratorijskim poređenjima i programima za ispitivanje osposobljenosti, 2011
- [2] SRPS ISO/IEC 17043:2011, Ocenjivanje usaglašenosti-Opšti zahtevi za ispitivanje osposobljenosti
- [3] V. Vuletić, G. Pantelić, I. Tanasković, M.E. Savković, Lj. Javorina.
- [4] Međulaboratorijsko poređenje određivanja aktivnosti gamaemitera u filteru za vazduh: Zbornik radova XXIV Simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, 345-349, Zlatibor 2007.

INTERNATIONAL INTERCOMPARISON OF GAMMASPECTROMETRY ANALYSIS OF WATER

Irena TANASKOVIĆ, Maja EREMIĆ SAVKOVIĆ, Ljiljana JAVORINA, Suzana BOGOJEVIĆ, Vesna ARSIĆ, Jovana ILIĆ

Institute of Occupational Health of Serbia "Dr Dragomir Karajović", Deligradska 29, 11000 Belgrade, Serbia, irenatanaskovic@yahoo.com

ABSTRACT

Proficiency test on the determination of gamma emitting radionuclides in water was organized by IAEA. Aim of the test was to estimate analytical performance of the participating laboratories. We have been participating in this program since 2000. The results for the period of 2010-2012 are presented in this paper. For most of the analysed radionuclides in water samples we obtained acceptable results. Only the results for ^{134}Cs and ^{60}Co in some samples were accepted with warning. There were no unacceptable results.

ПОЧЕТНА РАДИОЕКОЛОШКА ИСТРАЖИВАЊА У НОВОМ ПАЗАРУ – ПОДРУЧЈЕ НОВОПАЗАРСКА БАЊА

Иванка АНТОВИЋ¹, Далибор СТОЈАНОВИЋ¹, Никола СВРКОТА², Ранка ЖИЖИЋ²,
Мирзета ХАЏИБРАХИМОВИЋ¹

1) Депарتمان за биомедицинске науке, Државни универзитет у Новом Пазару, Србија,
Ivanka_Antovic@yahoo.com

2) Центар за екотоксиколошка испитивања, Подгорица, Црна Гора

САДРЖАЈ

Представљени су резултати почетних радиоеколошких истраживања подручја Новопазарска Бања. Осим анализе земљишта са једног локалитета (^{137}Cs , ^{40}K , као и потомака распада ^{226}Ra и ^{232}Th), за који су, као илустрација, процењени и екстремни ризик од канцера ($0.17 \cdot 10^3$) и годишња полножлездана еквивалентна доза узрокована природним радионуклидима ($316 \mu\text{Sv y}^{-1}$), анализирана су и 2 узорка хилоподне врсте *S. cingulata*, и једино је ^{232}Th за јединку мужјака био изнад минималне детектибилне активности (0.037 Bq g^{-1}). У стаблу „киселог дрвета“ *A. altissima* детектовано је 0.76 Bq kg^{-1} – ^{232}Th и 153 Bq kg^{-1} – ^{40}K , за кога је утврђен и највећи фактор трансфера из земљишта.

1. Увод

Новопазарска Бања се налази у долини Избичке реке, на око 3 km од Новог Пазара, Србија. Карактерише се изворима термоминералних вода које се користе у лечењу и рехабилитацији. Према нашим сазнањима, подручје до сада није детаљније радиоеколошки истраживано. У оквиру овог рада представљени су почетни резултати ширег истраживања, тј. резултати анализе земљишта са једног локалитета, као и једног узорка биљне и два узорка једне животињске врсте. Наиме, у заравњеном делу подручја доминира травна ксерофитна вегетација са местимичним групацијама дрвенасте врсте *Ailanthus altissima* Swingle, 1916 (у народу познате као „кисело дрво“). Ради се о инвазивној врсти широко распрострањеној у Србији и реткој врсти дрвенастих биљака која подноси велико загађење свих медијума (воде, земљишта, ваздуха). С друге стране, стонога, *Scolopendra cingulata* Latreille, 1829, најкрупнији је представник класе Chilopoda наших простора. Врста је са медитеранским зоогеографским афинитетима, и у Србији насељава камењаре са јужном експозицијом, са ниском травнатом вегетацијом или комбинацијом ниске травнате вегетације и жбунасте вегетације. Типични је представник фауне површинских слојева земљишта оваквих станишта. Током неповољних услова (зимског периода и најтоплијих периода лета) повлачи се у дубље слојеве земљишта. Стога је од значаја проценити и дозе којима је врста изложена, што ће бити предмет даљих истраживања.

2. Материјал и методи

Земљиште са локалитета Новопазарска Бања узорковано је на стандардни начин [1] – са површине 25 cm x 25 cm, при чему су узорци узети са три дубине: (0-5) cm, (5-10) cm и (10-15) cm.

Током теренског истраживања 2012. године, прикупљен је и материјал врсте *S. cingulata* (пинцетом испод камења), детерминисан коришћењем бинокуларне лупе ZEISS Discovery V8 stereomicroscope и одговарајуће литературе [2], а затим замрзнут до мерења. За анализу је, као што је претходно речено, изабрано и „кисело дрво“, тј. стабло *A. altissima*. Узоркована јединка била је висине око 3.5 m, узета из центра једне чисте састојине, на око 2 m од места узоркованог земљишта, на удаљености око 100 m од насељеног дела Бање. Од укупне масе (стабла) 350.4 g, након припреме и спаљивања на температури која није прелазила 350°C, добијено је 10.2 g pepela које је мерено у цилиндричној пластичној посуди запремине 50 mL, док су јединке *S. cingulata*

осушене на 105°C и након тога мерене. За ову студију изабрани су мужјак и женка, као основ за будућа истраживања.

Користећи гама-спектрометријски систем у Центру за екотоксиколошка испитивања у Подгорици, одређене су концентрације активности вештачког ^{137}Cs и природног ^{40}K , као и потомака распада природних ^{226}Ra и ^{232}Th (^{214}Bi и ^{228}Ac , респективно). За мерење активности изотопа у узорцима *S. cingulata* и *A. altissima* коришћен је ORTEC – GEM-40190, релативне ефикасности – 40% (FWHM – 1.80 keV на 1.33 MeV, FWHM – 840 eV на 122 keV, фон – 1.23 s^{-1}), док је за мерење активности наведених изотопа у узорцима земљишта коришћен GEM – 30185-S, релативне ефикасности 35 % (FWHM – 1.72 keV на 1.33 MeV, FWHM – 700 eV на 122 keV, фон – 0.98 s^{-1}).

На основу добијених резултата, процењен је и фактор трансфера радиоизотопа из земљишта у стабло *A. altissima* као: A_c („кисело дрво“)/ A_c (земљиште), при чему је коришћена средња вредност концентрације активности изотопа за три слоја земљишта, тј. (0-15) cm.

На основу концентрација активности у површинском слоју земљишта (подразумевајући да је, сходно претходним истраживањима, активност ^{226}Ra највише 30 % већа од активности ^{214}Bi у датом узорку), процењена је јачина апсорбоване дозе у ваздуху, на 1 m изнад гла: $D = A_c(^{226}\text{Ra}) \cdot 0.462 + A_c(^{232}\text{Th}) \cdot 0.604 + A_c(^{40}\text{K}) \cdot 0.0417 + A_c(^{137}\text{Cs}) \cdot 0.1243$, где су $A_c(^{226}\text{Ra})$, $A_c(^{232}\text{Th})$, $A_c(^{40}\text{K})$ и $A_c(^{137}\text{Cs})$ концентрације активности (у Bq kg^{-1}) ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K и ^{137}Cs респективно, у узорку земљишта, док су $0.462 \text{ nGy h}^{-1}/(\text{Bq kg}^{-1})$, $0.604 \text{ nGy h}^{-1}/(\text{Bq kg}^{-1})$, $0.0417 \text{ nGy h}^{-1}/(\text{Bq kg}^{-1})$ и $0.1243 \text{ nGy h}^{-1}/(\text{Bq kg}^{-1})$, респективно, одговарајући дозни/конверзиони коефицијенти – сходно литературним подацима и препорукама UNSCEAR [3]. Годишња ефективна доза израчуната је преко: $E = D(\text{nGy h}^{-1}) \cdot 8760 \text{ h} \cdot 0.2 \cdot 0.7 \text{ Sv Gy}^{-1}$, где је 0.7 Sv Gy^{-1} дозни конверзиони фактор, 0.2 фактор спољашњег излагања, а 8760 h y^{-1} је време излагања [3].

Као илустрација, у смислу почетних разматрања и као основ за даље студије, процењени су и експесни ризик од канцера, по формули:

$$\text{CR} = E \cdot T \cdot \text{RF}$$

где је E годишња ефективна доза, T је просечно време живота (узето као 70 година), а RF је фактор ризика од канцера по Sv – за одрасле (према ICRP, $\text{RF} = 0.04$ [5]); као и годишња полножлездана еквивалентна доза (G , $\mu\text{Sv y}^{-1}$) узрокована природним радиоизотопима, по формули [нпр. 4]:

$$G = A_c(^{226}\text{Ra}) \cdot 3.09 + A_c(^{232}\text{Th}) \cdot 4.18 + A_c(^{40}\text{K}) \cdot 0.314.$$

3. Резултати и дискусија

Концентрације активности изотопа ^{214}Bi , ^{137}Cs , ^{228}Ac и ^{40}K , у површинском слоју земљишта (узорак масе 0.531 kg), одређене мерењем током 87 815 s, су $(17 \pm 0.6) \text{ Bq kg}^{-1}$, $(40.8 \pm 1.3) \text{ Bq kg}^{-1}$, $(27.7 \pm 1.0) \text{ Bq kg}^{-1}$ и $(421 \pm 14) \text{ Bq kg}^{-1}$, респективно. У средњем слоју (узорак масе 0.535 kg, мерење током 79 916 s), су $(18 \pm 0.6) \text{ Bq kg}^{-1}$, $(41.6 \pm 1.4) \text{ Bq kg}^{-1}$, $(30.2 \pm 1.1) \text{ Bq kg}^{-1}$ и $(448 \pm 15) \text{ Bq kg}^{-1}$, респективно; а у најдубљем слоју (0.554 kg, време мерења: 68 781 s) – $(18.2 \pm 0.6) \text{ Bq kg}^{-1}$, $(34 \pm 1.1) \text{ Bq kg}^{-1}$, $(30 \pm 1.1) \text{ Bq kg}^{-1}$ и $(447 \pm 15) \text{ Bq kg}^{-1}$, респективно. С обзиром на извештај UNSCEAR из 2000. године [3], усредњене вредности концентрација ^{238}U (са ^{226}Ra као једним од потомака), ^{232}Th (са ^{228}Ac као једним од потомака) и ^{40}K у земљишту, на светском нивоу, износе 35 Bq kg^{-1} , 30 Bq kg^{-1} и 400 Bq kg^{-1} , респективно. Овде представљени почетни резултати указују да је у земљишту подручја Новопазарска Бања, концентрација активности ^{226}Ra испод наведене средње вредности на светском нивоу, за ^{40}K незнатно изнад, док су за ^{232}Th вредности упоредиве.

Јачина апсорбоване дозе у ваздуху, на 1 m висине изнад тла, узрокована активношћу наведених радиоизотопа из површинског слоја земљишта, као и последична ефективна доза, износе $\approx 49.5 \text{ nGy h}^{-1}$ и $60.7 \text{ }\mu\text{Sv y}^{-1}$, респективно; док су CR и G процењени на $0.17 \cdot 10^{-3}$ и $316 \text{ }\mu\text{Sv y}^{-1}$, респективно. Упоредјујући наведене вредности са средњим вредностима на светском нивоу, може се рећи да су резултати упоредиви (на пример, $G = 0.3 \text{ mSv y}^{-1}$ – средња вредност за земљиште на светском нивоу). Свакако, треба напоменути да су у анализу укључени не сви, већ одабрани (и доминантно радиоеколошки важни – са аспекта доприноса укупној дози) радиоизотопи, те су стварне дозе вероватно нешто изнад наведених вредности.

Концентрације активности разматраних изотопа у јединкама *S. cingulata* (јединка 1 – женка, јединка 2 – мужјак), дате су у табели 1, док су у табели 2 дате концентрације активности и процене фактора трансфера из земљишта у „кисело дрво“.

Табела 1. Концентрације активности у јединкама *S. cingulata*

Јединка – време мерења	Маса јединке, g	^{226}Ra (^{214}Bi), Bq g ⁻¹	^{232}Th (^{228}Ac), Bq g ⁻¹	^{40}K , Bq g ⁻¹	^{137}Cs , Bq g ⁻¹
1 – 87 290 s	2.31	≤ 0.012	< 0.025	< 0.069	< 0.008
2 – 91 327 s	2.43	< 0.012	0.037 ± 0.008	< 0.069	< 0.008

Табела 2. Концентрације активности и процењени фактори трансфера из земљишта у стабло *A. altissima*

Средња вредност концентрације активности у узорцима земљишта са три дубине	Концентрација активности у стаблу <i>A. altissima</i> (време мерења: 155 655 s)	Фактор трансфера
	^{214}Bi , Bq kg ⁻¹	
17.7 \pm 0.6	< 0.35	< 0.02
	^{232}Th (^{228}Ac), Bq kg ⁻¹	
29.3 \pm 1.1	0.76 \pm 0.20	0.026
	^{40}K , Bq kg ⁻¹	
439 \pm 15	153 \pm 5	0.348
	^{137}Cs , Bq kg ⁻¹	
38.8 \pm 1.3	< 0.10	< 0.002

Из података у табели 1 види се да је једино ^{232}Th (тј. ^{228}Ac) у случају *S. cingulata*, јединка 2, био изнад минималне детектибилне активности, рачунате помоћу 3MDA метода [6] (0.02 Bq g^{-1}), док се из података у табели 2 види да су активности ^{232}Th и ^{40}K у стаблу *A. altissima* биле изнад минималне детектибилне активности (0.4 Bq kg^{-1} и 1.38 Bq kg^{-1} , респективно). Фактори трансфера за природне радиоизотопе (посебно за ^{40}K) захтевају даље анализе, имајући у виду њихов „природни“ садржај у врсти. Надаље, следећи препоруке Међународне уније радиоеколога [7], у којима је наглашено „недостајуће знање“ везано за ниске дозе и јачине доза (и њихових ефеката), као и испитивање што већег броја врста (*more species – biodiversity*) као један од истраживачких приоритета, истраживање ће бити настављено и кроз анализу доза којима су врсте изложене. Наиме, у прелазу са историјског антропоцентричног на савремени биоцентрични приступ, разматрајући линеарне трансфере и ефекте, наглашавају се: *Radioactivity effects on wild animals and plants; Animals and plants as targets* [7] и томе слично.

4. Литература

- [1] HASL-300. EML Procedures Manual. Environmental Measurements Laboratory, U.S. Department of Energy, 28 Edition (1997).
- [2] A. D. Barber. Key to the identification of British centipedes. *Occas.Publicat. 130*, Shrewsbury, Field Studies Council (2008).
- [3] UNSCEAR: Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York (2000).
- [4] W. Arafa. Specific activities and hazards of granite samples collected from the eastern desert of Egypt. *J. Environ. Radioact. 75/3* (2004) 315-327.
- [5] ICRP Publication 103. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection 37/2-4 (2007).
- [6] ORTEC. Gamma-vision 32. Gamma-ray spectrum analysis NCA emulator for Microsoft (2003)
- [7] <http://www.iur-uir.org>, presentation 2011: *Radioecology in 2012 – Current research directions and trends for the future*.

OPENING RADIOECOLOGICAL RESEARCH IN NOVI PAZAR –TERRITORY OF NOVOPAZARSKA BANJA

Ivanka ANTOVIC¹, Dalibor STOJANOVIC¹, Nikola SVRKOTA², Ranka ZIZIC², Mirzeta HADZIBRAHIMOVIC¹

1) *Department for Biomedical Sciences, State University in Novi Pazar, Serbia,*

2) *Centre for Ecotoxicological Research, Podgorica, Montenegro*

ABSTRACT

*Results of opening radioecological research on the territory of Novopazarska Banja are presented. Besides analysis of soil from one locality (¹³⁷Cs, ⁴⁰K, as well as decay products of ²²⁶Ra and ²³²Th), for which, as an illustration, estimation of excess lifetime cancer risk ($0.17 \cdot 10^{-3}$) and the annual gonadal dose equivalent caused by natural radioisotopes ($316 \mu\text{Sv y}^{-1}$) are also given, the analysis of 2 samples of chilopod species *S. cingulata* was performed, and only ²³²Th in the male individual was found to be above minimum detectable activity (0.037 Bq g^{-1}). In the stem of "tree of heaven" *A. altissima* 0.76 Bq kg^{-1} of ²³²Th and 153 Bq kg^{-1} of ⁴⁰K were detected, the last one showing the highest transfer factor from the soil.*

BERILIJUM-7 I OLOVO-210: DEVET GODINA MONITORINGA NA DVE LOKACIJE U BEOGRADU

Jelena AJTIĆ¹, Dragana TODOROVIĆ², Dragana POPOVIĆ¹, Jelena NIKOLIĆ²

- 1) *Fakultet veterinarske medicine, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, jelena.ajtic@vet.bg.ac.rs, draganap@vet.bg.ac.rs*
2) *Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, Laboratorija za Zaštitu od zračenja i Zaštitu životne sredine, Beograd, Srbija, beba@vinca.rs, jnikolic@vinca.rs*

SADRŽAJ

Na dva merna mesta u Beogradu od 2004. do 2012. godine prikupljeni su uzorci aerosola iz prizemnog sloja atmosfere. Mesečne specifične aktivnosti ⁷Be i ²¹⁰Pb u uzorcima izmerene su standardnom metodom spektrometrije gama zračenja na HPGe detektorima. Na oba merna mesta, ⁷Be i ²¹⁰Pb su međusobno slabo korelisani, ali između mernih mesta nije nađena korelacija. Povezanost između merenih aktivnosti i količine padavina takođe nije nađena. Međutim, maksimalne vrednosti aktivnosti u intervalima količine padavina pokazuju visoku negativnu linearnu korelaciju sa količinom padavina.

1. Uvod

Berilijum-7 i olovo-210 su prirodni radionuklidi koji u prizemni sloj atmosfere dospevaju iz različitih izvora. Berilijum-7 (period poluraspada 53,28 dana) se stvara u višim slojevima atmosfere, u reakcijama kosmičkih zraka sa lakim elementima, a zatim se transportuje do površine zemlje [1]. Olovo-210 (period poluraspada 22,3 godine), sa druge strane, nastaje kao produkt radioaktivnog raspada radona-222, koji se iz zemljišta oslobađa u najniži sloj atmosfere [2].

Oba radionuklida se vezuju za aerosole, a primarni proces njihovog uklanjanja iz atmosfere je vlažna depozicija [3,4]. Pozitivna korelacija između depozicije ovih radionuklida i količine padavina je nađena [3,4,5], ali su za povezanost aktivnosti radionuklida i količine padavina dobijeni različiti rezultati, od značajne negativne korelacije [6] i linearne zavisnosti [7], do nepostojanja korelisanosti [8].

U ovom radu su upotrebljeni nizovi devetogodišnjih merenja za analizu međusobne povezanosti aktivnosti ⁷Be i ²¹⁰Pb u prizemnom sloju atmosfere, kao i uticaja lokalnih uslova, posebno količine padavina.

2. Materijal i metode

Uzorci aerosola iz prizemnog sloja atmosfere su tokom 2004–2012. godine prikupljeni na dve lokacije u Beogradu: u Institutu za nuklearne nauke Vinča (u daljem tekstu Vinča) i na Fakultetu veterinarske medicine (u daljem tekstu Centar). Pomoću uzorkivača vazduha sa konstantnom brzinom protoka, svakodnevno su sakupljani uzorci aerosola na filter papirima poznate efikasnosti. Spektrometrija gama emitera (HPGe detektor) urađena je u zbirnom mesečnom uzorku koji je dobijen mineralizacijom dnevnih uzoraka [9]. Kombinovana merna nesigurnost metode manja je od 25 %.

Podaci za količinu padavina na mernom mestu Vinča tokom 2004–2009. godine dobijeni su od meteorološke službe Instituta za nuklearne nauke Vinča, a za merno mesto Centar tokom 2004–2012. godine, podaci su dobijeni od projekta „European Climate Assessment & Dataset“ [10] i Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije.

3. Rezultati i diskusija

Tokom 2004–2012. srednja vrednost mesečnih aktivnosti ⁷Be je $(2,96 \pm 1,62) \cdot 10^{-3}$ Bq/m³ u Vinči, i $(2,60 \pm 1,74) \cdot 10^{-3}$ Bq/m³ u Centru. Srednja mesečna aktivnost ²¹⁰Pb u Vinči je $(5,25 \pm 2,12) \cdot 10^{-4}$ Bq/m³, odnosno $(4,37 \pm 2,31) \cdot 10^{-4}$ Bq/m³ u Centru. Na lokaciji Vinča, Pirsonov koeficijent linearne korelacije (u daljem tekstu r) između aktivnosti ⁷Be i ²¹⁰Pb iznosi 0,35, a u Centru $r = 0,30$, što pokazuje slabu međusobnu povezanost radionuklida. Za aktivnost ⁷Be između Vinče i Centra, kao i za aktivnost ²¹⁰Pb

između ovih mernih mesta, dobijeno je $r = 0,18$. Takođe, značajnost (Studentov t-test) iznosi 0,102 za ^7Be i 0,005 za ^{210}Pb , što pokazuje da su razlike u aktivnostima ^{210}Pb između mernih mesta značajne. Činjenica da se dobijeni rezultati ne slažu u potpunosti sa ranijim analizama istih nizova aktivnosti, ali u kraćim vremenskim periodima [11,9], ukazuje na potrebu za dugoročnim merenjima.

Nekorelisanost aktivnosti radionuklida između dva merna mesta može biti posledica razlike u lokalnoj klimi, te je u daljoj analizi ispitana povezanost aktivnosti radionuklida sa klimatskim elementom koji je bio dostupan za obe lokacije – količina padavina. Pirsonov koeficijent korelacije za izmerene vrednosti količine padavina i aktivnosti ^7Be i ^{210}Pb , na dva merna mesta (Tabela 1, kolona „merene vrednosti“), ukazuje na nepovezanost količine padavina sa aktivnostima ovih radionuklida u vazduhu, što se slaže sa [8]. Primera radi, aktivnosti ^7Be na lokaciji Centar, u funkciji ukupne mesečne količine padavina date su na Slici 1 (simbolom zvezdice).

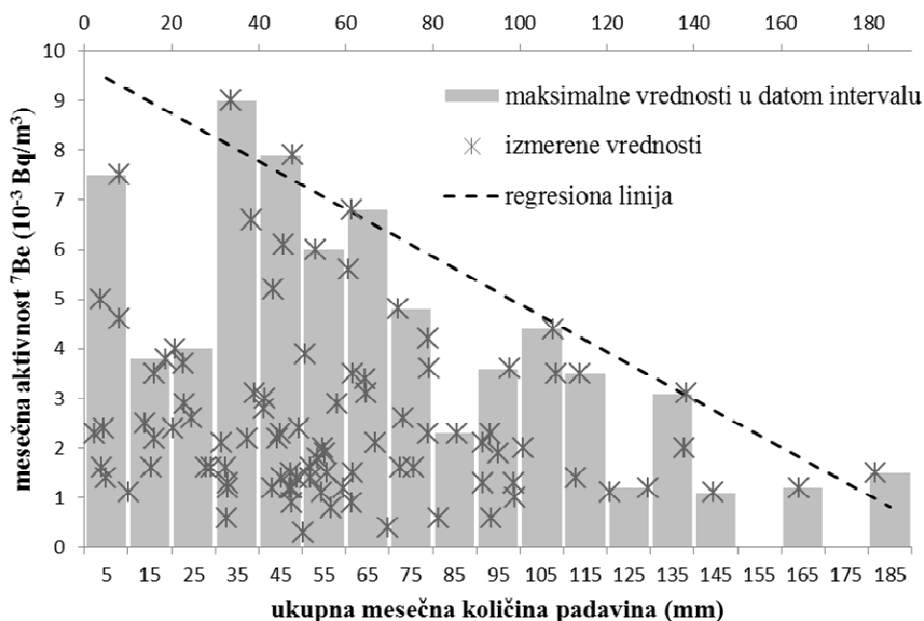
Na Slici 1 su takođe prikazani intervali ukupne mesečne količine padavina (broj intervala 19, minimalna vrednosti 0 mm, maksimalna 190 mm, širina intervala 10 mm), kao i maksimalne vrednosti aktivnosti ^7Be u svakom od intervala. Između ovih maksimalnih vrednosti i vrednosti koje odgovaraju sredinama intervala količine padavina postoji visoka negativna linearna korelisanost ($r = -0,76$). Analiza aktivnosti oba radionuklida na oba merna mesta, daje visoke negativne vrednosti za r , osim za ^7Be na lokaciji Vinča (Tabela 1, kolona „broj intervala 19“).

Tabela 1. Pirsonov koeficijent korelacije za količinu padavina i aktivnosti ^7Be i ^{210}Pb : Vinča (period 2004–2009) i Centar (period 2004–2012)

Korelacija između		merene vrednosti		broj intervala 19	
		Vinča	Centar	Vinča	Centar
količina padavina	^7Be	-0,04	-0,20	-0,08	-0,76
	^{210}Pb	-0,25	-0,19	-0,54	-0,82

Na dobijene vrednosti r utiče širina izabranog intervala ukupne količine padavina. Što je širina intervala veća (čime se smanjuje broj intervala), veća je i linearna negativna povezanost promenljivih. Tako se za aktivnosti ^7Be na lokaciji Centar dobija $r = -0,94$ kada se izabere 10 intervala (širine 20 mm) količine padavina, odnosno $r = -0,59$ za 38 intervala (širine 5 mm). Međutim, ukoliko se na lokaciji Centar skрати period analize na 2004–2009 (interval u kom su dostupni podaci za količinu padavina u Vinči), dobija se slabija povezanost aktivnosti i količine padavina, što pokazuje uticaj dužine mernog perioda na dobijene rezultate.

Zavisnost maksimalne aktivnosti po intervalima ukupne mesečne količine padavina (Slika 1) ukazuje i na mogućnost postojanja dva do tri različita režima spiranja radionuklida iz atmosfere, što je u saglasnosti sa rezultatima [7]. U prvi režim spadaju vrlo suvi meseci, sa ukupnom količinom padavina do 30 mm, tokom koga je najveći broj izmerenih aktivnosti ^7Be ispod $4 \cdot 10^{-3} \text{ Bq/m}^3$. U drugom režimu, maksimalne aktivnosti opadaju sa porastom količine padavina. Treći režim, sa ukupnom mesečnom količinom padavina iznad 120 mm (u kome se nalazi samo ~7% naših podataka) možda ukazuje na zasićenje pri kome povećanje padavina ne dovodi do daljeg smanjenja aktivnosti radionuklida. Slični režimi u zavisnosti maksimalnih aktivnosti od ukupne količine padavina se mogu videti i za olovo-210.



Slika 1. Mesečne aktivnosti ⁷Be i ukupna mesečna količina padavina na lokaciji Centar tokom 2004–2012. godine. Regresiona linija je dobijena za maksimalne aktivnosti u datim intervalima ukupne količine padavina.

4. Zaključak

Devetogodišnja merenja srednjih mesečnih aktivnosti ⁷Be i ²¹⁰Pb na dva merna mesta u Beogradu pokazuju da između ovih radionuklida na svakoj od lokacija postoji slaba povezanost, ali da između mernih mesta nema korelacije. Dobijen Pirsonov koeficijent korelacije ukazuje na nepovezanost aktivnosti radionuklida i količine padavina. Maksimalne aktivnosti radionuklida su, međutim, negativno linearno korelisane sa ukupnom mesečnom količinom padavina grupisanom u intervale. Ova zavisnost ukazuje na mogućnost postojanja različitih režima spiranja radionuklida iz atmosfere.

5. Zahvalnica

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta „Istraživanje klimatskih promena na životnu sredinu: praćenje uticaja, adaptacija i ublažavanje“ (43007) koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru programa Integrisanih i interdisciplinarnih istraživanja za period 2011-2014. godine. Autorke se zahvaljuju timu projekta „European Climate Assessment & Dataset“, Republičkom hidrometeorološkom zavodu Srbije i meteorološkoj službi Instituta za nuklearne nauke Vinča na podacima za količinu padavina.

6. Literatura

- [1] D. Allen et al. An Estimate of the Stratospheric Contribution to Springtime Tropospheric Ozone Maxima Using TOPSE Measurements and Beryllium-7 Simulations. *J. Geophys. Res.* 108 (2003) doi:10.1029/2001JD001428.
- [2] M. Baskaran. Po-210 and Pb-210 as atmospheric tracers and global atmospheric Pb-210 fallout: a Review. *J. Environ. Radioact.*, 102 (2011) 500–513.
- [3] A. Ioannidou and C. Papastefanou. Precipitation scavenging of ^7Be and ^{137}Cs radionuclides in air. *J. Environ. Radioact.*, 85 (2006) 121–136.
- [4] M. K. Pham, P. P. Povinec, H. Nies, and M. Betti. Dry and wet deposition of ^7Be , ^{210}Pb and ^{137}Cs in Monaco air during 1998–2010: Seasonal variations of deposition fluxes. *J. Environ. Radioact.*, 120 (2013) 45–57.
- [5] C. Doering and R. Akber. Beryllium-7 in near-surface air and deposition at Brisbane, Australia. *J.*
- [6] F. P. García, M. A. F. García, and M. Azahra. ^7Be behaviour in the atmosphere of the city of Granada January 2005 to December 2009. *Atmos. Environ.*, 47 (2012) 84–91.
- [7] N. Ali, E. U. Khan, P. Akhter, N. U. Khattak, F. Khan, and M. A. Rana. The effect of air mass origin on the ambient concentrations of ^7Be and ^{210}Pb in Islamabad, Pakistan. *J. Environ. Radioact.*, 102 (2011) 35–42.
- [8] M. K. Pham, M. Betti, H. Nies, and P. P. Povinec. Temporal changes of ^7Be , ^{137}Cs and ^{210}Pb activity concentrations in surface air at Monaco and their correlation with meteorological parameters. *J. Environ. Radioact.*, 102 (2011) 1045–1054.
- [9] D. Todorovic, D. Popovic, J. Nikolic, and J. Ajtic. Radioactivity Monitoring in Ground Level Air in Belgrade Urban Area. *Radiat. Prot. Dosim.*, 142 (2010) 308–313.
- [10] A. M. G. Klein Tank et al., Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int. J. Climatol.*, 22 (2002) 1441–1453.
- [11] J. Ajtić, D. Todorović, A. Filipović, and J. Nikolić. Ground Level Air Beryllium-7 and Ozone in Belgrade. *Nucl. Tech. Radiat. Protect.*, 23 (2008) 65–71.

BERYLLIUM-7 AND LEAD-210: NINE YEARS OF MONITORING IN TWO LOCATIONS IN BELGRADE, SERBIA

Jelena AJTIĆ¹, Dragana TODOROVIĆ², Dragana POPOVIĆ¹, Jelena NIKOLIĆ²

1) Faculty of Veterinary Medicine, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, jelena.ajtic@vet.bg.ac.rs, draganap@vet.bg.ac.rs

2) University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Laboratory for Environmental and Radiation Protection, Belgrade, Serbia, beba@vinca.rs, jnikolic@vinca.rs

ABSTRACT

During 2004–2012, samples of aerosols in surface air were collected in two measuring locations in Belgrade. Monthly specific activities of ^7Be and ^{210}Pb in the samples were determined on HPGE detectors by standard gamma spectrometry. A weak correlation between the ^7Be and ^{210}Pb activities in each of the measuring locations, and no correlation between the two sites, is found. The results further show no correlation between the measured activities and amount of precipitation. However, the maximum activities corresponding to binned amount of precipitation exhibit relatively high negative linear correlation.

EXTERNAL EFFECTIVE GAMMA DOSE RATES ORIGINATING FROM ^{137}Cs IN THE SURFACE SOILS OF BELGRADE URBAN AREA

Jelena PETROVIĆ¹, Ljiljana JANKOVIĆ-MANDIĆ², Mirjana ČUJIĆ¹ and Snežana DRAGOVIĆ¹

1) Institute for the Application of Nuclear Energy, University of Belgrade, Belgrade, Serbia,
jelenap@inep.co.rs

2) Institute of Nuclear Sciences Vinča, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

ABSTRACT

After the atmospheric nuclear weapon tests and Chernobyl accident large amounts of artificial radionuclides have been released to the environment. Because of long-term radioactive hazards to the public, the most attention among artificial radionuclides focused on the behavior and distribution of radiocesium ^{137}Cs . In this paper the ^{137}Cs specific activity in surface soils (0-5 cm) from the urban area of Belgrade city and corresponding external gamma dose rates are presented.

1. Introduction

After accident at the Chernobyl nuclear power plant (Former Soviet Union) the radioactive cloud arrived to Serbia, which led to the deposition of ^{137}Cs . Chernobyl fallout led to a significant contamination of soil, vegetation and other components of the environment of Serbia with ^{137}Cs . Numerous studies following the Chernobyl accident have shown that soil is the main reservoir for ^{137}Cs [1,2,3] and represent the medium for the migration and release of this radionuclide, which then (through different transfer processes) reaches the human body and causes hazard to the public.

2. Materials and methods

Soil samples were collected from Belgrade, the largest and capital city of Serbia, where the majority of Serbian population lives. A total of 142 soil samples were collected from the different locations of an urban area from 2006 to 2011. As previous studies have shown the highest ^{137}Cs specific activity in the top soil layer [4-7], the samples were collected from the layer (0-5) cm. The ^{137}Cs specific activity in soil samples was determined by the HPGe gamma-ray spectrometer (ORTEC-AMETEK, 34% relative efficiency and 1.65 keV FWHM for ^{60}Co at 1.33 MeV) using its gamma-ray line at 661.6 keV. Gamma Vision 32 MCA emulation software was used to analyse the gamma-ray spectra [8].

3. Results and discussion

The specific activity of ^{137}Cs in the analyzed samples ranged from 1.00 to 180 Bq/kg with the mean value of 26.5 Bq/kg (Table 1). The outstanding variations of ^{137}Cs specific activity among the analyzed soil samples could be attributed to non-homogeneous surface contamination after the Chernobyl accident in the investigated area. Dragović *et al.* (2012) reported wide range of values of ^{137}Cs specific activity in the surface soils layer (0-5 cm) in Belgrade from 8.3 to 160 Bq/kg [7]. Petrović *et al.* (2013) reported average ^{137}Cs specific activity of 29.9 Bq/kg for the undisturbed grassland areas in Belgrade from the same soil depth which is in accordance with results obtained in this study [9].

Table 1. Basic descriptive statistics of the ^{137}Cs specific activities and external effective gamma dose rates originating from ^{137}Cs in the analyzed surface soils

Parameter	Specific activity of ^{137}Cs (Bq/kg)	External effective gamma dose rate (nSv/h)
Mean	26.5	1.74
Median	17.5	1.15
Mode	11.0	0.72
Standard deviation	26.6	1.75
Minimum	1.00	0.07
Maximum	180	11.8

The external effective gamma dose rate (nSv/h) due to ^{137}Cs in the soil is calculated using the following equation [10]:

$$D(E) = 0.576 \times E \times \frac{\gamma_{FE} \times A_s}{2 \left[\frac{\mu_s(E)}{\rho} \right]^{soil}} \times \left[\frac{\mu_a(E)}{\rho} \right]^{tissue} \quad (1)$$

where $[\mu_a(E)/\rho]^{tissue}$ is the mass absorption coefficient for a small volume element of soft tissue (cm^2/g); E is the photon energy (MeV); γ_{FE} is the fractional presence of the gamma radiation; A_s is the specific activity of ^{137}Cs (Bq/kg); and $[\mu_s(E)/\rho]^{soil}$ is the mass attenuation coefficient for soil for the energy of 661.6 keV (cm^2/g).

The external effective gamma dose rate in the analyzed samples ranged from 0.07 to 11.8 nSv/h with the mean value of 1.74 nSv/h (Table 1). The bar diagram of the external effective gamma dose rate originating from ^{137}Cs in the soils from the different locations is shown in Figure 1.

The highest external effective gamma dose rates are found in the following parts of Belgrade: Ušće (11.8 nSv/h), Glumčevo brdo-Barajevo (9.40 nSv/h), Miljačkova šuma (9.26 nSv/h) and Vidikovački venac (6.44 nSv/h), marked as locations 8, 50, 47 and 1 in Figure 1, respectively.

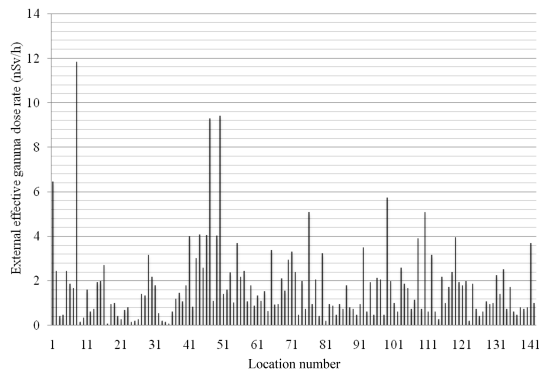


Figure 1. Bar diagram of the external effective gamma dose rates originating from ^{137}Cs in the soils of Belgrade urban area

4. Conclusions

The mean value of ^{137}Cs specific activity in Belgrade surface soil of 26.5 Bq/kg and that of corresponding external effective gamma dose rates of 1.74 nSv/h indicate that ^{137}Cs has no harmful effect to the population of the capital of Serbia. The ^{137}Cs specific activities in the top soil layer showed a wide range of values from 1.00 to 180 Bq/kg and corresponding external effective gamma dose rates range from 0.07 to 11.8 nSv/h, which could be attributed to non-homogeneous surface contamination after the Chernobyl accident. The obtained results are consistent with previous studies conducted on the territory of Belgrade. The knowledge of radionuclides distribution in soils is important for the assessment of the radiation exposure to the population and is useful to set the standards and national guidelines in accordance with the international recommendations. For this purpose continuous monitoring of radioactivity levels in this environmental compartment is highly needed.

5. Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia (Project No. III43009).

6. References

- [1] P. L. Nimis. Radiocesium in plants of forest ecosystems. *Studia Geobot.* 15 (1996) 3-49.
- [2] B. Rafferty, M. Brennan, D. Dawson and D. Dowding. Mechanisms of ^{137}Cs migration in coniferous forest soils. *J. Environ. Radioact.* 48 (2000) 131-143.
- [3] L. E. C. Ciuffo, M. Belli, A. Pasquale, S. Menegon and H. R. Velasco. ^{137}Cs and ^{40}K soil-to-plant relationship in a seminatural grassland of the Giulia Alps, Italy. *Sci. Total Environ.* 295 (2002) 69-80.
- [4] N. M. Antovic, P. Vukotic, N. Svrkota and S. K. Andrukhovich. Pu-239+240 and Cs-137 in Montenegro soil: their correlation and origin. *J. Environ. Radioact.* 110 (2012) 90-97.
- [5] M. Belivermiş. Vertical distributions of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{232}Th and ^{226}Ra in soil samples from Istanbul and its environs, Turkey. *Radiat. Prot. Dosim.* 151 (2012) 511-521.
- [6] A. Navas, J. Machín and J. Soto. Assessing soil erosion in a Pyrenean mountain catchment using GIS and fallout ^{137}Cs . *Agr. Ecosyst. Environ.* 105 (2005) 493-506.
- [7] S. Dragović, B. Gajić, R. Dragović, Lj. Janković-Mandić, L. Slavković-Beškoski, N. Mihailović, M. Momčilović and M. Čujić. Edaphic factors affecting the vertical distribution of radionuclides in the different soil types of Belgrade, Serbia. *J. Environ. Monit.* 14 (2012) 127-137.
- [8] ORTEC, Gamma Vision 32. Gamma-Ray Spectrum Analysis and MCA Emulation. ORTEC, Oak Ridge, Version 5.3.. (2001).
- [9] J. Petrović, M. Čujić, M. Đorđević, R. Dragović, B. Gajić, Š. Miljanić and S. Dragović. Spatial distribution and vertical migration of ^{137}Cs in soils of Belgrade (Serbia) 25 years after the Chernobyl accident. *Environ. Sci. Processes Impacts* 15 (2013) 1279-1289.
- [10] S. N. A. Tahir, K. Jamil, J. H. Zaidi, M. Arif and N. Ahmed. Activity concentration of ^{137}Cs in soil samples from Punjab province (Pakistan) and estimation of gamma-ray dose rate for external exposure. *Radiat. Prot. Dosim.* 118 (2006) 345-351.

SADRŽAJ PRIRODNIH RADIONUKLIDA I PROCENA RADIJACIONOG RIZIKA U OKOLINI TERMOELEKTRANA U SRBIJI

Jovana ILIĆ, Maja EREMIĆ-SAVKOVIĆ, Vesna ARSIĆ, Suzana BOGOJEVIĆ, Ljiljana JAVORINA, Irena TANASKOVIĆ

Institut za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“, Beograd, Srbija, ilicjo@gmail.com

SADRŽAJ

Laboratorija za merenje radioaktivnosti Instituta za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“ tokom 2011. godine vršila je monitoring radioaktivnosti u okolini termoelektrana „Nikola Tesla A“, „Nikola Tesla B“, „Morava“ i „Kolubara“. Analizirani su uzorci pepela, šljake, uglja i zemljišta. Ovaj rad sadrži prikaz rezultata gamspektrometrijskog merenja prirodnih radionuklida ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{238}U i ^{235}U u navedenim uzorcima. Na osnovu izmerenih aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K u zemljištu izračunata je jačina apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu, godišnja efektivna doza kao i indeks radijacionog rizika usled spoljašnjeg izlaganja za stanovništvo. Dobijeni rezultati ukazuju na to da ne postoji značajan radijacioni rizik kao posledica eksternog izlaganja.

1. Uvod

U termoelektranama se u okviru osnovnog procesa proizvodnje električne energije stvaraju velike količine pepela i šljake koje su produkti sagorevanja različitih vrsta ugljeva. Proizvodnja energije iz uglja jedan je od glavnih izvora povećane izloženosti stanovništva prirodnim izvorima radioaktivnosti. Ugalj sadrži prirodnu radioaktivnost—članove uranijumovog i torijumovog niza i ^{40}K . U procesu sagorevanja uglja koncentracija ovih radionuklida u pepelu se povećava nekoliko puta, što zavisi od vrste i aktivnosti uglja. Pepeo i šljaka odlažu se na deponije, a prisutni prirodni radionuklidi zbog dugog vremena poluraspada ostaju trajna opasnost i predstavljaju potencijalni ekološki i zdravstveni problem[1]. Veliki problem na deponijama predstavlja uticaj vetra i posledično rasipanje i raspršivanje pepela, a zemljište predstavlja glavni rezervoar za oslobođene radionuklide [2]. Termoelektrane u Srbiji se uglavnom nalaze u blizini naselja i stoga je njihov uticaj na životnu sredinu i zdravlje ljudi značajan. Tokom 2011. godine u okviru redovnog monitoringa radioaktivnosti u okolini termoelektrana „Nikola Tesla A“, „Nikola Tesla B“, „Morava“ i „Kolubara“ analizirani su uzorci pepela, šljake, uglja i zemljišta. Ovaj rad sadrži prikaz rezultata gamspektrometrijskog merenja ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{238}U i ^{235}U u uzorcima uglja, šljake, pepela i zemljišta. Na osnovu izmerenih aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K , u zemljištu izračunata je jačina apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu, godišnja efektivna doza kao i indeks radijacionog rizika usled spoljašnjeg izlaganja za stanovništvo.

2. Materijal i metode

Po jedan uzorak uglja, šljake i elektrofilterskog pepela dobijen je od saradnika iz svake termoelektrane. Uzorci zemljišta, ukupno 44, uzeti su u okolini termoelektrana sa različitih lokacija—bliže i dalje od deponija pepela. Zabeležene su GPS koordinate mesta uzorkovanja kako bi bilo moguće kasnije ponavljati merenja na istim lokacijama. Prikupljeni uzorci su očišćeni od biljnog materijala i kamenja i sušeni na temperaturi 105 °C do konstantne mase 24-48h. Nakon ovoga uzorci su samleveni, prosejani i preneti u marineli posude zapremine 1 l koje su hermetički zatvorene i ostavljene 30 dana da se dostigne ravnoteža između ^{238}U i ^{232}Th i njihovih potomaka. Nakon uspostavljanja ravnoteže vršena su gamspektrometrijska merenja na 2 čista germanijumska detektora firme EG&G „ORTEC“ relativne efikasnosti 25 % i rezolucije 1,85 keV i 1,95 keV na energiji 1332 keV (^{60}Co). Energetska kalibracija kao i kalibracija efikasnosti detektora obavlja se pomoću radioaktivnog standarda AMERSHAM. Vreme merenja jednog uzorka bilo je 60000s, dok je osnovno zračenje mereno 250000s. Obrada spektara vršena

je pomoću softverskog paketa Gamma Vision. Merna nesigurnost je izražena kao proširena merna nesigurnost za faktor obuhvata $k=1$.

Na osnovu izmerenih aktivnosti primordijalnih radionuklida ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K u datim uzorcima zemljišta u okolini termoelektana izračunata je jačina apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu, godišnja efektivna doza i indeks radijacionog rizika usled spoljašnjeg izlaganja (H_{eks}).

Jačina doze gama zračenja u vazduhu 1m iznad tla izračunata je na osnovu izmerenih aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K (pretpostavljeno je da su svi potomci u ravnoteži sa svojim prekursorima kao i da drugi radionuklidi kao što su ^{137}Cs , ^{90}Sr i ^{235}U neznatno doprinose ukupnoj dozi usled spoljašnjeg izlaganja [1]), prema jednačini (1):

$$D=0,462A_{\text{Ra}}+0,604A_{\text{Th}}+0,0417A_{\text{K}} \quad (1)$$

gde je D-jačina doze u nGyh^{-1} , a A_{Ra} , A_{Th} , A_{K} -specifične aktivnosti u Bqkg^{-1} , ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K respektivno.

Godišnja efektivna doza usled spoljašnjeg izlaganja izračunata je koristeći faktor konverzije $0,7 \text{ SvGy}^{-1}$ i pretpostavku da stanovništvo provodi u proseku 20% vremena na otvorenom [1] prema jednačini (2):

$$\text{Godišnja efektivna doza (mSv)} = D (\text{Gyh}^{-1}) \times 24\text{h} \times 365\text{d} \times 0,7 \text{ SvGy}^{-1} \times 0,2 \times 10^{-6} \quad (2)$$

Indeks radijacionog rizika usled spoljašnjeg izlaganja H_{eks} izračunat je prema jednačini (3):

$$H_{\text{eks}} = A_{\text{Ra}}/370 + A_{\text{Th}}/259 + A_{\text{K}}/4810 \quad (3)$$

gde su A_{Ra} , A_{Th} , A_{K} -specifične aktivnosti u Bqkg^{-1} , ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K respektivno [3]. Ukoliko je vrednost parametra H_{eks} manja od jedan, radijacioni rizik usled spoljašnjeg izlaganja se ne smatra značajnim.

3. Rezultati i diskusija

U Tabeli 1 date su specifične aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{238}U i ^{235}U u uzorcima šljake, pepela i uglja iz 4 termoelektane u Srbiji. Dobijeni rezultati potvrđuju da kotlovska šljaka i pepeo koji zaostaju nakon procesa sagorevanja uglja u termoelektranama postaju obogaćeni prirodnim radionuklidima. Šljaka i pepeo obično sadrže 3-5 puta veću koncentraciju prirodnih radionuklida u odnosu na uglj [4]. Obogaćenje zavisi od sastava korišćenog uglja, odnosno fizičko-hemijskih svojstava elemenata prisutnih u tragovima i njihovih jedinjenja u uglju i produkata sagorevanja. Prosečne vrednosti aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K izmerene u uzorcima pepela, šljake i uglja posmatranih termoelektana u Srbiji uporedive su sa vrednostima iz drugih zemalja datim u Tabeli 2.

U Tabeli 3 dat je opseg kao i prosečne vrednosti aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{238}U i ^{235}U u uzorcima zemljišta u okolini 4 posmatrane termoelektane. Izmerene aktivnosti ^{226}Ra i ^{232}Th su na nivou prosečnih svetskih vrednosti koje iznose 35, 30 i 400 Bqkg^{-1} za ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K respektivno [1], dok je aktivnost ^{40}K nešto veća. Odnos izmerenih aktivnosti ^{235}U i ^{238}U odgovara ovom odnosu u prirodnom uranijumu u svim uzorcima. Jačina apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu, godišnja efektivna doza i indeks radijacionog rizika usled spoljašnjeg izlaganja izračunati su na osnovu jednačina (1)-(3) i predstavljeni u Tabeli 4. za uzorke zemljišta.

Tabela 1. Aktivnost prirodnih radionuklida (Bg kg^{-1}) ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{238}U i ^{235}U u uglju, šljaci i elektrofilterskom pepelu 4 termoelektrane u Srbiji

Termoelektrana		Aktivnost / Bg kg^{-1}				
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{238}U	^{235}U
TENT „A“	ugalj	26 ± 3	19 ± 2	100 ± 11	37 ± 8	$1,2 \pm 0,3$
	šljaka	17 ± 2	14 ± 2	50 ± 7	<25	$<1,3$
	pepeo	153 ± 16	110 ± 12	476 ± 49	145 ± 19	$7,7 \pm 1,1$
TENT „B“	ugalj	26 ± 3	18 ± 2	82 ± 9	<11	$<0,6$
	šljaka	79 ± 8	56 ± 6	365 ± 38	93 ± 24	$4,1 \pm 0,7$
	pepeo	91 ± 10	71 ± 8	473 ± 49	151 ± 20	$5,8 \pm 0,9$
Morava	ugalj	39 ± 3	17 ± 2	100 ± 8	46 ± 13	$2,3 \pm 0,4$
	šljaka	77 ± 8	32 ± 3	208 ± 15	101 ± 16	$4,6 \pm 0,7$
	pepeo	180 ± 18	65 ± 7	399 ± 41	153 ± 31	$<9,7$
Kolubara	ugalj	28 ± 3	24 ± 3	91 ± 11	52 ± 10	$1,7 \pm 0,4$
	šljaka	42 ± 5	30 ± 4	220 ± 23	51 ± 17	$2,6 \pm 0,5$
	pepeo	130 ± 13	95 ± 11	365 ± 38	135 ± 52	$6,9 \pm 1,0$

Tabela 2. Poređenje vrednosti koncentracija prirodnih radionuklida u uglju, šljaci i pepelu termoelektrana u Srbiji sa vrednostima termoelektrana u svetu (u zagradama su date srednje vrednosti)

Zemlja		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	Referenca
Kina	ugalj	23-30 (26)	34-39 (37)	93-110(100)	[5]
	šljaka	63-110(93)	91-128 (105)	207-332(271)	
	pepeo	76-166(112)	119-196 (148)	262-521 (386)	
Poljska	ugalj	10-28	9-20	44-180	[6]
	šljaka	33-91	28-77	307-607	
	pepeo	54-119	48-92	449-758	
Indija	ugalj	11-67 (24)	19-93 (39) ^a	15-444(83)	[7]
	šljaka	44-155(89)	74-215(137) ^a	374-633(378)	
	pepeo	41-152(78)	96-178(126) ^a	148-840(374)	
Srbija	ugalj	26-39(30)	17-24(20)	82-100(93)	Ovaj rad
	šljaka	17-79 (54)	14-56(33)	50-365(211)	
	pepeo	91-180(139)	65-110(85)	365-476(428)	

^a Vrednost $^{228}\text{Ra} + ^{228}\text{Th}$

Tabela 3. Aktivnost ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{238}U i ^{235}U u uzorcima zemljišta u okolini posmatranih termoelektrana (u zagradama su date srednje vrednosti)

Termoelektrana		Aktivnost /Bg kg ⁻¹				
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{238}U	^{235}U
TENT „A“	min.-maks.	25-52(38)	30-56(41)	460-890(608)	16-62(45)	1,3-2,8(2,0)
TENT „B“	min.-maks.	29-59(48)	33-68(54)	555-818(680)	44-80(63)	1,9-3,7(2,8)
Morava	min.-maks.	31-47(39)	36-60(47)	525-844(602)	28-60(51)	1,9-2,8(2,4)
Kolubara	min.-maks.	44-118(57)	55-74(61)	470-687(568)	13-147(72)	1,9-6,7(3,4)

Tabela 4. Jačine apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu, godišnje efektivne doze i indeksi radijacionog rizika usled spoljašnjeg izlaganja za uzorke zemljišta iz 4 termoelektrane (u zagradama su date srednje vrednosti)

Termoelektrana		D (nGy h ⁻¹)	Godišnja efektivna doza (mSv)	H _{eks}
TENT „A“	min.-maks.	49-95(67)	0,06-0,12(0,08)	0,28-0,54(0,39)
TENT „B“	min.-maks.	59-96(83)	0,07-0,12(0,10)	0,33-0,56(0,48)
Morava	min.-maks.	58-89(72)	0,07-0,11(0,09)	0,33-0,51(0,41)
Kolubara	min.-maks.	76-119(87)	0,09-0,15(0,11)	0,44-0,70(0,51)

Jačina apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu pri spoljašnjem izlaganju kretala se od 49 do 119 nGyh⁻¹. Prema UNSCEAR (2000) jačina doze u vazduhu usled terestrijalnog gama-zračenja pri spoljašnjem izlaganju u normalnim uslovima iznosi 57 nGyh⁻¹. Godišnja efektivna doza za eksterno izlaganje bila je u opsegu od 0,06 do 0,15 mSv. Prosečna vrednost na svetskom nivou iznosi 0,07 mSv [1]. Vrednosti indeksa radijacionog rizika usled spoljašnjeg izlaganja terestrijalnom zračenju (H_{eks}) variraju od 0,28 do 0,70.

4. Zaključak

Izmerene aktivnosti prirodnih radionuklida u uzorcima pepela, šljake, uglja i zemljišta tokom 2011. godine u okolini 4 termoelektrane u Srbiji bile su na nivou svetskih vrednosti. Vrednosti indeksa radijacionog rizika (H_{eks}) manje od jedan za uzorke zemljišta ukazuju na to da u okolini termoelektrana ne postoji značajan radijacioni rizik za stanovništvo usled spoljašnjeg terestrijalnog izlaganja.

5. Literatura

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. Report to General Assembly, with Scientific Annexes, New York, 2000, United Nations.
- [2] Papp.Z, Dezső Z., Daróczy S. Significant radioactive contamination of soil around a coal-fired thermal power plant. Journal of Environmental Radioactivity 59 (2002) 191.
- [3] Yu KN, Guan ZJ, Stoks MJ, Young EC. The assessment of natural radiation dose committed to the Hong Kong people. Journal of Environmental Radioactivity 17 (1992) 31.
- [4] Coles DG, Regaini RC, Ondov JM. Behavior of natural radionuclides in western coal-fired power plants. Environ Sci Technol 12 (1978) 442.
- [5] Xinwei Lu, Xiaodan Jia, Fengling Wang. Natural radioactivity of coal and its by-products in the Baoji coal-fired power plant, China. Current Science 91(2006) 1508.
- [6] Bem H, Wiczorkowski P, Budzanowski M. Evaluation of technologically enhanced natural radiation near the coal-fired power plants in the Lodz region of Poland. Journal of Environmental Radioactivity 61 (2002) 191.
- [7] Mishra, U. C. Environmental impact of coal industry and thermal power plants in India. Journal of Environmental Radioactivity 72(2004)35.

ANALYSIS OF NATURAL RADIONUCLIDES AND RADIOLOGICAL RISK ASSESSMENT IN THE VICINITY OF COAL-FIRED POWER PLANTS IN SERBIA

Jovana ILIĆ, Maja EREMIĆ-SAVKOVIĆ, Vesna ARSIĆ, Suzana BOGOJEVIĆ, Ljiljana JAVORINA, Irena TANASKOVIĆ

Serbian Institute of Occupational Health „Dr Dragomir Karajović“, Belgrade, Serbia, ilicjo@gmail.com

ABSTRACT

The radioactivity monitoring in the vicinity of four Serbian coal-fired power plants : „Nikola Tesla A“, „Nikola Tesla B“, „Morava“ and „Kolubara“ was conducted during 2011 by Laboratory for radioactivity measurement, Serbian Institut of Occupational Health“Dr Dragomir Karajović“. Fly ash, coal, slag and soil samples were analysed. This paper contains results of the gamma-spectrometric measurments of natural radionuclides ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{238}U i ^{235}U in these samples. Outdoor absorbed dose rate in air, annual effective dose from external terrestrial radiation and external hazard index were calculated based on the measured activities of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in the soil samples. Obtained results indicate that there is no significant radiation risk for population from external terrestrial exposure.

MONITORING VODA SRBIJE U PERIODU OD MAJA 2011. DO APRILA 2012.GODINE

**Jovana NIKOLOV, Nataša TODOROVIĆ, Jan HANSMAN, Ištvan BIKIT, Miroslav VESKOVIĆ,
Miodrag KRMAR, Sofija FORKAPIĆ, Dušan MRĐA, Kristina BIKIT**

*Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, Srbija,
jovana.nikolov@df.uns.ac.rs*

SADRŽAJ

U periodu od maja 2011. godine do aprila 2012. godine Agencija za zaštitu od jonizujućeg zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije, sprovela je sistematski Monitoring životne sredine. Deo uzorkovanja i merenja predviđenih ovim programom urađen je u Laboratoriji za nuklearnu fiziku u Novom Sadu. U ovom radu prikazani su dobijeni rezultati monitoringa voda (vode za piće, reka i rečnog sedimenta) Srbije. Uzorci rečnih voda i rečnog sedimenta mereni su gama-spektrometrijskom metodom na HPGe detektorima, u pojedinim uzorcima određivana je još i koncentracija aktivnosti tricijuma na tečnom scintilacionom detektoru Quantulus 1220, Perkin Elmer. U vodama za piće određivana je koncentracija ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti takođe na Quantulus-u, a svi uzorci su mereni i gamaspektrometrijom. Zaključeno je da nije bilo povećanih koncentracija aktivnosti u ispitivanim uzorcima, ipak u reci Sava u uzorku uzetom na lokaciji kod Sremske Mitrovice registrovan je blagi porast koncentracije aktivnosti tricijuma u zimskim mesecima u vreme remonta nuklearne elektrane Krško u Sloveniji.

1. Uvod

Sistematsko ispitivanje prirodnih nivoa radioaktivnosti u životnoj sredini od izuzetnog je značaja. Pravilnikom je propisano da se sistematsko ispitivanje radioaktivnosti u životnoj sredini izvodi tako da se uzmu u obzir svi mogući putevi izlaganja stanovništva jonizujućem zračenju, koje nastaje zbog spoljašnjeg ozračivanja, inhalacije i ingestije. Monitoring radioaktivnosti obuhvata merenja koncentracije radionuklida koji značajno doprinose dozi, radi procene nivoa i kontrole izlaganja stanovništva jonizujućem zračenju. Merenja u okviru monitoringa radioaktivnosti vrše se tako, da je omogućeno praćenje promena radioaktivne kontaminacije životne sredine i spoljašnjeg zračenja sa vremenom. Kroz monitoring radioaktivnosti životne sredine prati se radioaktivnost životne sredine koja je posledica globalnog i lokalnog zagađenja nastalog upotrebom izvora jonizujućih zračenja, te prisustvo prirodne radioaktivnosti i povećane prirodne radioaktivnosti nastale u tehničko-tehnološkim procesima.

U periodu od maja 2011. godine do aprila 2012. godine Agencija za zaštitu od jonizujućeg zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije, sprovela je sistematski Monitoring životne sredine. Deo uzorkovanja i merenja predviđenih ovim programom urađen je u Laboratoriji za nuklearnu fiziku u Novom Sadu. Jedan deo dobijenih rezultata biće pomenut i prodiskutovan u ovom radu.

2. Lokacije uzorkovanja

Sadržaj radionuklida u rekama ispitivan je na sledećim lokacijama:

- 1) Dunav kod Bezdana, Zemuna, Vinče i Prahova
- 2) Sava kod Sremske Mitrovice i Beograda
- 3) Nišava kod Pirota
- 4) Tisa kod Kanjiže
- 5) Timok kod Knjaževca
- 6) Drina kod Loznice

Uzorci vode sa lokacija 1 i 2 ispitivani su gamaspektrometrijski kao zbirni mesečni uzorci. Uzorci vode uzeti sa lokacija 3-6 ispitivani su gamaspektrometrijski kao zbirni tromesečni uzorci. U uzorcima vode uzetim iz Dunava kod Bezdana i Save kod Sremske Mitrovice izvršeno je ispitivanje ^3H u zbirnom mesečnom uzorku.

Dva puta u toku jednogodišnjeg perioda ispitivanja uzet je uzorak sedimenta sa svih nabrojanih lokacija 1-6 i ispitivan gamaspektrometrijski.

Uzorci vode za piće iz vodovoda koji služi za snabdevanje vodom naselja sa više od 100000 stanovnika (Beograd, Niš, Palić – Subotica, Sava Ostružnica, Novi Sad, Kragujevac, Vinča, Čačak, Kraljevo, Vranje) uzimani su svakodnevno. U zbirnim mesečnim uzorcima određivan je sadržaj radionuklida u vodi za piće gamaspektrometrijski, a određivana je i ukupna alfa i ukupna beta aktivnost. Sadržaj radionuklida u vodi za piće iz vodovoda koji se snabdevaju vodom iz Save i Dunava, ispitivan je i određivanjem koncentracije aktivnosti ^3H u zbirnim tromesečnim uzorcima.

2. Metode merenja i pripreme uzoraka

(1) Ukupna alfa i ukupna beta aktivnost i tricijum

Određivanje ukupne alfa i beta aktivnosti u vodama za piće tečnim scintilacionim detektorom izvršeno je u skladu sa standardnom metodom ASTM D 7283-06 [1]. Detaljno objašnjenje procedure pripreme i merenja dato je u radu [2]. Merenja su obavljena tečnim scintilacionim detektorom Quantulus 1220, Perkin Elmer.

Za merenje tricijuma uzorci vode su pripremani u skladu sa standardnom test metodom ASTM D4107-08 [3]. Detaljno objašnjenje ove metode dato je u radu [4].

(2) Gamaspektrometrijsko određivanje aktivnosti radionuklida

Sadržaj radionuklida određivan je u uzorcima vode za piće i uzorcima rečnih voda sa lokacija koje su definisane programom monitoringa. Gamaspektrometrijska merenja obavljena su upotrebom HPGe detektora (relativnih efikasnosti 35.6%, 32.4% i 22.4%) [5]. Merenje uzoraka trajalo je 50 ks. Detektori su povezani na digitalno spektroskopsko procesiranje upotrebom Canberra 1300 InSpector. Gama spektri se prikupljaju i analiziraju pomoću softvera Canberra Genie 2000. Sve merne nesigurnosti su prikazane na nivou tačnosti 95%.

Za prekoncentrisanje radionuklida iz velike zapremine vode, korišćena je percipitacija na MnO. U ovoj metodi, uzorak vode se uzima u velikoj posudi, doda se kiselina HCl i tako prilagodi pH vrednost vode da bude 2. Dodaje se KMnO (na svakih 100 ml vode, doda se 2 g). Posle dodavanja NaOH da se podese pH vrednost na 8-9, dodaje se i rastvor MnCl (u odnosu MnCl : KMnO = 1 : 1 g/g) da bi se formirao MnO. Usled povećanja koncentracije jona vodonika, pH vrednost se mora proveriti i prilagoditi da bude 8-9.

Uzorci sedimenta su posle uzorkovanja sušeni na temperaturi od 105°C do konstantne mase. Posle sušenja, svaki uzorak je pakovan u cilindrične kutije (prečnik 67 mm i visina 62 mm), nakon čega je merenje vršeno na germanijumskim detektorima u kontaktnoj geometriji.

3. Rezultati i diskusija

Zbog velikog broja analiziranih uzoraka predviđenih programom monitoring, u ovom radu neće biti dat detaljan pregled dobijenih rezultata. Detaljan izveštaj sa svim izmerenim vrednostima nalazi se na internet adresi Agencije za zaštitu od zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije [6]. Ovdje ćemo se zadržati samo na diskusiji dobijenih rezultata.

U analiziranim rečnim vodama i uzorcima vode za piće najveći deo aktivnosti potiče od prirodnih radionuklida, dok su aktivnosti dugoživećih radionuklida veštačkog porekla (^{137}Cs) ispod granica detekcije. Izmerene koncentracije ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti u vodama za piće izuzetno su niske, bliske granicama detekcije. Sadržaj tricijuma ^3H u ispitivanim uzorcima voda je takođe blizak granicama detekcije. U uzorku vode uzetom u januaru 2012. iz reke Save kod Sremske Mitrovice primećena je blago povišena koncentracija aktivnosti tricijuma ^3H , obzirom da je u tom periodu bio remont nuklearne elektrane Krško u Sloveniji pretpostavlja se da je to razlog registrovanja ove blago

povišene aktivnosti. I ova aktivnost je takođe daleko ispod zakonskih granica za koncentraciju aktivnosti tricijuma u vodi (100 Bq/l). U uzorcima rečnih sedimenata sadržaj radionuklida veštačkog porekla (^{137}Cs) se kreće od 1.3 Bq/kg do 16.3 Bq/kg. Detektovana aktivnost ^{137}Cs , potiče od preostale kontaminacije prouzrokovane nuklearnim akcidentom u Černobilju 1986.godine.

4. Zaključak

Može se zaključiti da izmerene vrednosti koncentracije aktivnosti svih radionuklida predviđenih programom monitoringa ne prelaze granične vrednosti propisane Zakonom o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti (Službeni glasnik RS 36/2009) , Pravilnikom o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet (Službeni glasnik RS 86/2011) i Pravilnikom o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima (Službeni glasnik RS 86/2011).

5. Zahvalnica

Autori se zahvaljuju na finansijskoj pomoći Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije, u okviru projekta Nuklearne metode istraživanja retkih procesa i kosmičkog zračenja broj OI171002 i Biosensing tehnologije i globalni sistem za kontinuirana istraživanja i integrisano upravljanje ekosistemima broj III43002.

6. Literatura

- [1] ASTM International D 7283-06, Standard Test Method for Alpha- and Beta-activity in Water by Liquid Scintillation Counting. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. www.astm.org/.
- [2] N.Todorovic, J.Nikolov, B.Tenjovic, I.Bikit, M.Veskovic, Establishment of a method for measurement of gross alpha/beta activities in water from Vojvodina region, Radiation Measurements, Volume 47, Issues 11–12, 1053–1059, (2012).
- [3] ASTM D 4107-08, 2006, Standard Test Method for Tritium in Drinking Water, ASTM International, West Conshohocken, PA, United States, www.astm.org/ (<http://dx.doi.org/10.1520/D4107-08>).
- [4] J. Nikolov, N.Todorovic, M.Jankovic, M.Vostinar, I.Bikit, M.Veskovic, Different methods for tritium determination in surface water by LSC, Applied Radiation and Isotopes 71, 51–56 (2013).
- [5] Bikit I, Slivka J, Čonkić Lj, Krmar M, Žikić-Todorović N, Varga E, Ćurčić S, Mrđa D. Radioactivity of the soil in Vojvodina (northern province of Serbia and Montenegro), Journal of Environmental Radioactivity; 78:11-19, (2005).
- [6] Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti (Službeni glasnik RS 36/2009)
- [7] Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet (Službeni glasnik RS 86/2011)
- [8] Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima (Službeni glasnik RS 86/2011).
- [9] www.srbatom.gov.rs

MONITORING OF WATERS IN SERBIA FROM MAY 2011 TO APRIL 2012

**Jovana NIKOLOV, Nataša TODORVIĆ, Jan HANSMAN, Ištvan BIKIT, Miroslav VESKOVIĆ,
Miodrag KRMAR, Sofija FORKAPIĆ, Dušan MRDA, Kristina BIKIT**

University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Serbia jovana.nikolov@df.uns.ac.rs

ABSTRACT

Between May 2011 and April 2012 the Agency for Protection against Ionizing Radiation and Nuclear Safety, Serbia, conducted a systematic monitoring of the environment. Part of sampling and measurements provided by this monitoring program was performed in the Laboratory for Nuclear Physics in Novi Sad. This paper presents the results of water monitoring (drinking water, rivers and river sediment) of Serbia. Samples of river water and river sediment were measured by gamma spectrometry using HPGe detectors, in some samples activity concentration of tritium was determined by liquid scintillation counter Quantulus 1220, Perkin Elmer. In drinking water, we determined the concentrations of gross alpha and gross beta activity by Quantulus, all samples were measured by gamma spectrometry as well. It can be concluded that there was not increased activity concentration in any examined sample; however, in the sample taken from Sava river at the location near Sremska Mitrovica we detected a slight increase in activity concentration of tritium in the winter months at the time of repair of nuclear power plant in Slovenia.

PRIRODNA RADIOAKTIVNOST U OKOLINI BIVŠEG RUDNIKA URANA GABROVNICA

Jovana NIKOLOV^{1,*}, Sofija FORKAPIC¹, Jan HANSMAN¹,
Uranija KOZMIDIS-LUBURIC², Ištvan BIKIT¹, Miroslav VESKOVIC¹, Miodrag KRMAR¹,
Nataša TODOROVIC¹, Dušan MRĐA¹, Kristina BIKIT¹

- 1) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Trg Dositeja Obradovica 4, Novi Sad, Serbia
- 2) Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovica 6, Novi Sad, Serbia
e-mail: jovana.nikolov@df.uns.ac.rs

SADRŽAJ

"Gabrovnica" kod malog naseljenog mesta Kalna je bio jedan od prvih rudnika urana u bivšoj Jugoslaviji. Ovaj rudnik je započeo sa radom 1963.godine. Između 1964. i 1966., zaposleni u ovom rudniku eksploatisali su ukupno 900 kg UO_2 i 400 kg metala uranijuma. Ruda iz ovog rudnika je bila lošeg kvaliteta, sadržala je relativno nizak sadržaj urana, pa je zbog velikih troškova prerade i eksploatacije zaključeno da je dalji rad rudnika neisplativ. To je bio glavni razlog za zatvaranje ovog kopa.

U radu su prikazani rezultati dobijeni merenjem koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta, kao i koncentracija aktivnosti ²²²Rn u kućama u obližnjem naseljenom mestu Kalna. Ispitivanja prisustva prirodne radioaktivnosti na ovom području sprovedeno je kako bi se utvrdilo postojeće stanje životne sredine u okolini nekadašnjeg rudnika urana. Dekomisija rudnika nikada nije zvanično urađena. Dobijeni rezultati mogu biti korisni u budućem postupku dekomisije. Dalja istraživanja bi trebalo da obuhvate i druge navedene lokacije bivših rudnika u istočnoj Srbiji i da daju poređenja dobijenih rezultata sa sličnim oblastima širom sveta.

1. Uvod

Teritorija istočne Srbije poznata je po velikom broju prirodnih ležišta nuklearnih mineralnih sirovina sa povećanim sadržajem urana. Stara Planina predstavlja značajno geološko područje, sa različitim mineralima u zemljištu formiranim procesom parageneze, delom endogenog a delom atmosferskog porekla. Posebno su interesantne rude, kao što su uranijum, zlato, srebro i depoziti bizmuta [1]. Eksploatacija uranijuma u ovom regionu počela je krajem pedesetih godina dvadesetog veka, ali posle 1996 godine, rudnik i svi eksploatacioni pogoni su zatvoreni. U okviru ispitivanog područja postoje dva zatvorena rudarska okna, "Mezdreja" i "Gabrovnica", zajedno sa velikim brojem istražnih galerija na lokacijama "Srneći Do" i "Aldina reka" [1-2].

Područje zapuštenog rudnika urana "Gabrovnica" je interesantan lokalitet za istraživanje prisustva prirodne radioaktivnosti u cilju određivanja trenutnog stanja i moguće dekomisije ovog područja koja do sada nije urađena. U radu su prikazani rezultati dobijeni gamaspektrometrijskim merenjem koncentracija aktivnosti uzoraka zemljišta sakupljenih sa ovog lokaliteta, kao i aktivnosti ²²²Rn merenih u kućama u obližnjem selu Kalna (prvo naseljeno mesto u okolini napuštenog rudnika).

2. Materijal i metod

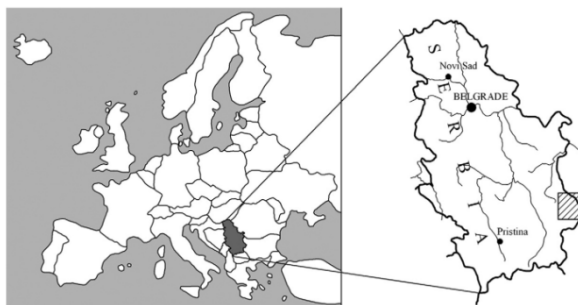
Uzorci zemljišta sakupljeni su (zajedno sa par uzoraka kamenja i mahovina) na nekoliko lokacija u okolini bivšeg rudnika urana u oktobru 2012. Koncentracije aktivnosti radona u vazduhu unutar kuća u obližnjem selu Kalna merene su pomoću ugljenih kanistera izlaganjem u periodu od 48 sati. Aktivnosti radionuklida u svim prikupljenim uzorcima određeni su merenjima na HPGe detektoru, po standardnoj metodologiji gamaspektroskopije. Homogenizovani uzorci sušeni su na 105°C do konstantne mase. Nakon toga, sve mehaničke nečistoće, uglavnom male stene i delovi biljnog materijala su uklonjene. Suvi uzorci su mehanički podeljeni i homogenizovani u fini prah. Pripremljeni uzorci su spakovani u

cilindrične posude koje se koriste kao nosači, visine 62 mm i prečnika 70 mm. Tipičan uzorak je imao masu između 200 i 300 g [3]. Merenje je trajalo oko 70 000 s. Aktivnost radionuklida određivana je na HPGe detektoru proizvođača ORTEC, relativne efikasnosti 32% u olovnoj zaštiti debljine 12 cm, sa dodatkom kalaja debljine 3 mm i bakra debljine 1.5 mm u unutrašnjem sloju [3].

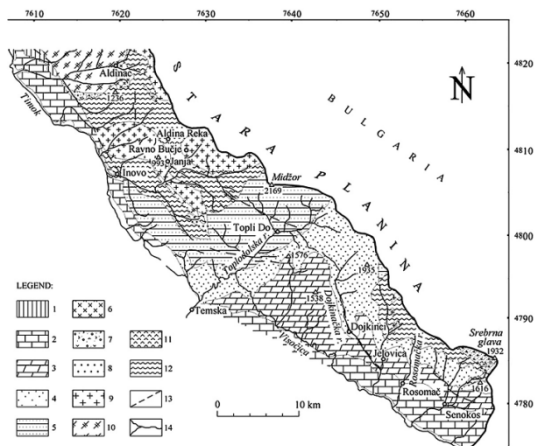
Ugljeni kanistri predstavljaju jednostavan uređaj za merenje koncentracije radona u vazduhu. Tačnost je veoma mala (oko 20%), a na tačnost u značajnoj meri utiče i vlažnost vazduha, zato ova metoda može poslužiti samo kao “screening” metoda. Detaljno objašnjenje ovog metoda dato je u radovima [4-5]. Ugljeni kanistri su izloženi u osam kuća u selu Kalna. Koncentracije aktivnosti ^{222}Rn u njima su određene potom na HPGe detektoru. Obračun je izvršen u skladu sa standardnim operativnim procedurama EPA [6].

3. Rezultati

Mapa lokacija uzorkovanja data je na Slici 1. Slika 2 predstavlja geološku mapu područja koje je predmet ovog istraživanja. Dobijeni gamaspektrometrijski rezultatu prikazani su u Tabeli 1.



Slika 1. Geografska lokacija Stare Planine [2]



Slika 2. Geološka mapa Stare Planine u delu koji pripada Srbiji [2]

Tabela 1. Koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorcima sakupljenim u okolini bivšeg rudnika urana “Gabrovnica”

Lokacije	Koncentracije aktivnosti [Bq·kg ⁻¹]					<i>H_{ex}</i>
	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	
1. Kamenje – ulaz u rudarsko okno	134±8	2290±270	111±9	1080±40	<4	6.8
2. zemljište – ulaz u rudarsko okno	131±6	51.6±1.4	136.2±2.3	1110±30	1.0±0.3	0.9
3. zemljište – malo dalje od ulaza	249±11	1308±100	69±4	960±30	15.3±0.8	4.0
4. zemljište – na putu ka ulazu u okno	279±16	3030±160	78±3	1260±80	42.1±2.3	8.8
5. zemljište – ispred kuće koja se nalazi na lokalitetu	120±7	46±4	118±8	1030±40	53.4±2.1	0.8
6. kamenje	112±6	40.1±1.3	114±4	1220±30	<1.7	0.8
7. mahovine – na ulazu u rudarsko okno	92±8	51±19	144±15	520±40	13.7±2.2	0.8
8. nasut put koji void ka rudarskom oknu	123±8	114±5	66.3±1.9	790±30	60.1±2.6	0.7
9. jalovina 1	262±11	390±9	137±7	1300±40	6.5±0.6	1.9
10. jalovina 2	273±11	495±13	109.2±2.5	1070±30	7.0±0.6	2.0
11. kamenje – pored jalovine	231±10	230±5	132±5	1510±40	<2.5	1.4
12. mahovina – pored jalovine	442±18	880±50	170±4	1290±50	74.0±2.2	3.3
13. jalovina iz reke	44.6±2.9	28.6±2.0	32.9±2.1	616±20	2.5±0.6	0.3
14. zemljište – oko bunara	207±9	63±5	160±8	1280±40	29.2±1.5	1.1

Spoljašnji gama indeks, prikazan u poslednjoj koloni Tabele 1. Izračunat je prema formuli (1) preuzetoj iz rada [7]:

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \leq 1 \quad (1)$$

gde su A_{Ra} , A_{Th} i A_K redom koncentracije aktivnosti ²²⁶Ra, ²³²Th i ⁴⁰K [Bq·kg⁻¹]. Vrednost spoljašnjeg gama indeksa mora biti manja od jedinice da bi se moglo zaključiti da nema opasnosti od kontaminacije na istraživanom području.

U Tabeli 2 prikazani su dobijeni rezultati za koncentraciju aktivnosti ^{222}Rn u kućama u obližnjem naseljenom mestu Kalna.

Tabela 2. Koncentracija aktivnosti ^{222}Rn u kućama merena ugljenim kanistrima.

Lokacija ID	Koncentracija aktivnosti ^{222}Rn , A [Bq m^{-3}]
Kuća 1 – prizemlje	107 ± 6
Kuća 2 – podrum	50 ± 4
Kuća 3 – prizemlje (stara gradnja)	49 ± 5
Kuća 4 – prizemlje (nova gradnja)	33 ± 3
Kuća 5 – prizemlje	93 ± 6
Zgrada 6 – radni prostor – veterinarska ordinacija – prizemlje	903 ± 14
Zgrada 6 – radni prostor – veterinarska ordinacija – podrum	231 ± 9
Kuća 7 – podrum	120 ± 6
Kuća 8 – prizemlje	114 ± 7
Kuća 8 – podrum	137 ± 6

4. Zaključak

Veći deo ispitivanih uzoraka iz okoline bivšeg rudnika urana "Gabrovnice" kod sela Kalne u istočnoj Srbiji pokazuje povišenu radioaktivnost. Samo šest uzoraka (od 14 merenih gama-spektrometrijom) imaju spoljni gama indeks manji od jedan. Postoje dva uzoraka zemljišta na nekadašnjem ulazu u rudarsko okno koja imaju zaista veliki spoljašnji gama indeks. U nekim uzorcima registrovana je povećana koncentracija aktivnosti ^{137}Cs .

Što se ^{222}Rn tiče, najviša koncentracija aktivnost registrovana je u zgradi 6 - koja je radna površina (veterinarska ordinacija). Prema preporukama Međunarodne komisije za radiološku zaštitu, Izjave o Radonu, od novembra 2009.godine, gornji nivo za gas radon u stanovima je $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Uzimajući u obzir razlike u dužini vremena provedenog u domovima i radnim mestima za oko faktor tri, nivo radona u radnim prostorijama od oko $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ definiše se kao polazna tačka za primenu mera dodatne zaštite od prisustva radona [8]. Sve kuće su veoma dobro provetravane što u velikoj meri utiče na koncentraciju aktivnosti ^{222}Rn u vazduhu, tako da nema potrebe za bilo kakvom intervencijom. Buduća istraživanja trebalo bi da obuhvate i druge navedene lokacije u istočnoj Srbiji, kao i da daju poređenje sa sličnim lokalitetima u Evropi.

5. Zahvalnost

Autori se zahvaljuju na finansijskoj pomoći Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije, u okviru projekta Nuklearne metode istraživanja retkih procesa i kosmičkog zračenja broj OI171002 i Biosensing tehnologije i globalni sistem za kontinuirana istraživanja i integrisano upravljanje ekosistemima broj III43002

6. LITERATURA

- [1] Milenić D, Dragisić V, Savić N, Vranješ A., Environmental Impact of Uranium Mine Waters in Eastern Serbia. – In: Rapantova N, Hrkal Z. eds. Mine Water and the Environment. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava; 2008. p. 197-200.
- [2] Kovačević J, Nikić Z, Papić P. Genetic model of uranium mineralization in the Permo-Triassic sedimentary rocks of the Stara Planina eastern Serbia. *Sedimentary Geology* 2009;219:252-261.
- [3] Bikit I, Slivka J, Čonkić Lj, Krmar M, Žikić-Todorović N, Varga E, Čurčić S, Mrđa D. Radioactivity of the soil in Vojvodina (northern province of Serbia and Montenegro). *Journal of Environmental Radioactivity* 2005;78:11-19.
- [4] Nikolov J, Todorović N, Petrović Pantić T, Forkapić S, Mrđa D, Bikit I, Krmar M, Vesković M. Exposure to radon in the radon spa Niška Banja, Serbia. *Radiation Measurements* 2012;47:443-450.
- [5] Todorović N, Forkapić S, Bikit I, Mrđa D, Vesković M, Todorović S. Monitoring for exposures to TENORM sources in Vojvodina region. *Radiation Protection Dosimetry* 2011;144(1-4):655-658.
- [6] EPA, EERF Standard Operating Procedures for Rn-222 Measurement Using Charcoal Canisters, U.S.EPA Publication, 520/5-87-005; 1987.
- [7] Diaz Rizo O, Gelen Rudnikas A, Arado Lopez J O, D'Alessandro Rodriguez K, Gonzalez Hernandez P, Fagundo Castillo J R, Blanco Padilla D. Radioactivity levels and radiation hazard of healing mud from San Diego River, Cuba. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 2013;295: 1293-1297.
- [8] ICRP, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, vol. 37, ICRP Publication 103, Ann. ICRP, 2007. pp.2-4.

NATURAL RADIOACTIVITY AROUND FORMER URANIUM MINE GABROVNICA

**Jovana NIKOLOV¹, Sofija FORKAPIĆ¹, Jan HANSMAN¹,
Uranija KOZMIDIS-LUBURIĆ², Ištvan BIKIT¹, Miroslav VESKOVIĆ¹, Miodrag KRMAR¹,
Nataša TODOROVIĆ¹, Dušan MRĐA¹, Kristina BIKIT¹**

1) University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Trg Dositeja Obradovica 4, Novi Sad, Serbia

*2) University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovica 6, Novi Sad, Serbia
e-mail: jovana.nikolov@df.uns.ac.rs*

ABSTRACT

“Grabovnica” near small village Kalna was one of the first uranium mine established in Yugoslavia. In 1963, the Nuclear Energy Commission began operating the mine and mill. Between 1964 and 1966, the staff at this mine extracted and produced an estimated 900 kg of UO₂ and 400 kg of uranium metal. The Kalna ore was of poor quality, containing very low uranium content, which required higher-cost mining and refining methods. That was the main reason for closing this mine. This paper presents results obtained by measuring the activity concentration of soil and water samples by gamma spectrometry and also indoor ²²²Rn activity concentrations in houses in the nearby village Kalna. The investigations of radioactivity content of the samples collected around abandoned mine “Grabovnica” are carried out in order to determine the present state of the environment in this area. The mine was never officially decommissioned. The results obtained might be useful for the future decommissioning procedure. Future investigations should include other mentioned former mine locations in East Serbia and also comparison with areas of this origin worldwide.

МОНИТОРИНГ РАДИОАКТИВНОСТИ У ЉУДСКОЈ ХРАНИ У РЕПУБЛИЦИ СРБИЈИ У 2011. И 2012. год.

Љиљана ЈАВОРИНА, Маја ЕРЕМИЋ-САВКОВИЋ, Ирена ТАНАСКОВИЋ, Сузана БОГОЈЕВИЋ, Весна АРСИЋ, Јована ИЛИЋ

*Институт за медицину рада Србије "Др Драгомир Карајовић"
Делиградска 29, Београд, Србија, lj.javorina@gmail.com;*

САДРЖАЈ

Приказане су средње годишње вредности активности радионуклида у људској храни добијене гамаспектрометријским мерењем. Сакупљање се обавља два пута у току године у седам сакупљачких места у оквиру законске регулативе мониторинга Републике Србије. Испитивање се обавља ради утврђивања присуства радионуклида у животnoj средини и процене нивоа излагања становништва јонизујућим зрачењима.

1. Увод

Мониторинг радиоактивности подразумева систематско испитивање садржаја радионуклида у животnoj средини. Врши се ради утврђивања присуства радионуклида у животnoj средини и процене нивоа излагања становништва јонизујућим зрачењима. Регулисан је законом^[1,2] републике Србије који Лабораторија за испитивање радиоактивности, Института за медицину рада Србије "Др Д. Карајовић", обавља преко тридесет година, вршећи систематско испитивање садржаја радионуклида између осталог и у људској храни^[3]. Резултати мерења указују да активност узорака из животне средине углавном потиче од вештачких радионуклида који су, као физиони производи, путем нуклеарног акцидента или нуклеарних проба (на пр. ваздушних од 1948-1978, Чернобилског акцидента 1986.), доспели у атмосферу, а затим путем падавина контаминирали цео екосистем^[3]. Цезијум је алкални метал који се у природи налази у малим количинама, као стабилан изотоп ¹³³Cs у стенама и земљишту, док радиоактивни изотоп ¹³⁷Cs у природу доспева путем fall-outa после нуклеарних проба или акцидента. Цезијум улази у системску циркулацију респираторним и дигестивним путем. Апсорпција у крви је готово потпуна. Цезијумов јон аналоган је хемијски и биохемијски јону калијума, те прати његов метаболизам. Потпуно је растворљив у телесним течностима и равномерно се дистрибуира у телу. Дистрибуција активности цезијума највећа је у компонентама крви, посебно у еритроцитима. Cs заузима место К у крвним ћелијама (као преобладајуће интрацелуларни нуклид) које га преносе до ткива. Највећи део се депонује у мишићним ћелијама. 10% укупног ¹³⁷Cs има полуживот од око 2 дана а 90% и до 100 дана. Од дужине задржавања ¹³⁷Cs зависи телесно оштећење. Трансфер цезијума у одељке за брзи или спорни проток специфичан је за старосно доба. Биокинетика цезијума код људи се карактерише широком варијабилношћу ретенције у разним случајевима, изазвана многим факторима осим годинама старости, као што су пол, величина мишићне масе, садржај калијума у организму и др. Ово су све разлози због којих је праћење активности овог радионуклида веома важно, нарочито узимајући у обзир да су деца угроженија категорија јер је њихов организам у развоју.

2. Метода рада

У оквиру законских прописа узорци су прикупљени два пута годишње (пролеће и јесен) у Републици Србији за период 2011. и 2012. година (Суботица, Нови Сад, Београд, Ужице, Ниш, Зајечар и Врање). За дечију храну су сакупљени композитни мешани узорци из друштвене исхране (дечији вртићи у Београду, Новом саду и Нишу). Испитиване су следеће врсте људске хране: поврће, воће, месо, житарице, млечни производи, млеко и дечија храна. После припреме узорака

(прање, одвајање јестивог дела, уситњавање, жарење на 400⁰ С, хомогенизација) врши се гамаспектрометријско мерење.

Гамаспектрометријска мерења вршена су на HP Ge детекторима, резолуције 1.95 keV, односно 1.85 keV, релативне ефикасности 25% на 1.33 MeV фирме ORTEC. Релативна грешка припреме узорка из мерења је 10%. Енергетска калибрација, као и калибрација ефикасности детектора обавља се помоћу радиоактивног стандарда Amersham. Време мерења једног узорка је 60000s, а време мерења основне активности 150000s.

3. Резултати мерења

У табелама 1,2,3 и 4 приказани су резултати средњих годишњих вредности са стандардном девијацијом, мерења вештачког радионуклида Cs-137 и природног К-40 по врсти узорка људске хране из наведених места Републике Србије (за дечју храну само за Београд, Нови Сад и Ниш). Резултати испитивања су добијени гамаспектрометријском анализом узорка. Сви резултати се односе на свежу масу узорка.

Табела 1. Специфична активност радионуклида ¹³⁷Cs дата је у средњим годишњим вредностима са стандардном девијацијом за период 2011/ 2012. године

МЕСТО	БЕОГРАД	НОВИ САД	СУБОТИЦА	УЖИЦЕ
ВРСТА УЗОРКА	¹³⁷ Cs (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)
Поврће	< 0.12	< 0.11	< 0.05	0.33 ± 0.13
Воће	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.05
Месо	< 0.16	< 0.07	< 0.07	5.6 ± 0.6*
Житарнице	< 0.05	< 0.02	< 0.03	< 0.05
Дечија храна из вртића	< 0.03	< 0.05	-	-
Млеко	< 0.02	< 0.02	< 0.03	0.20 ± 0.07
Млечни производи	< 0.05	< 0.07	< 0.12	0.29 ± 0.03

* вредност за један узорак

Табела 2. Специфична активност радионуклида ^{137}Cs дата је у средњим годишњим вредностима са стандардном девијацијом за период 2011/ 2012. године

МЕСТО	НИШ	ЗАЈЕЧАР	БРАЊЕ
ВРСТА УЗОРКА	^{137}Cs (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)
Поврће	< 0.07	< 0.09	< 0.07
Воће	< 0.06	< 0.11	< 0.06
Месо	< 0.20 *	< 0.08	< 0.22*
Житарице	< 0.06	< 0.02	< 0.04
Дечија храна из вртића	< 0.08	-	-
Млеко	< 0.03	0.17 ± 0.07	0.06 ± 0.01
Млечни производи	< 0.07	< 0.07	< 0.07

* вредност за један узорак

Табела 3. Специфична активност радионуклида ^{40}K дата је у средњим годишњим вредностима са стандардном девијацијом за период 2011/ 2012. године

МЕСТО	БЕОГРАД	НОВИ САД	СУБОТИЦА	УЖИЦЕ
ВРСТА УЗОРКА	^{40}K (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
Поврће	114 ± 106	138 ± 157	136 ± 111	149 ± 126
Воће	41 ± 22	32 ± 5	36 ± 15	39 ± 8
Месо	106 ± 29	75 ± 19	90 ± 2	90 ± 2
Житарице	28 ± 7	33 ± 6	25 ± 2	33 ± 4
Дечија храна из вртића	29 ± 10	35 ± 11	-	-
Млеко	31 ± 5	35 ± 7	45 ± 11	38 ± 10
Млечни производи	37 ± 12	28 ± 4	42 ± 9	43 ± 5

Табела 4. Специфична активност радионуклида ^{40}K дата је у средњим годишњим вредностима са стандардном девијацијом за период 2011/ 2012. године

МЕСТО	НИШ	ЗАЈЕЧАР	БРАЊЕ
ВРСТА УЗОРКА	^{40}K (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
Поврће	127 ± 111	132 ± 138	129 ± 121
Воће	36 ± 6	37 ± 7	40 ± 13
Месо	93 ± 24	91 ± 8	86 ± 2
Житарице	27 ± 2	28 ± 1	22 ± 2
Дечија храна из вртића	46 ± 11	-	-
Млеко	39 ± 4	42 ± 17	41 ± 9
Млечни производи	37 ± 5	30 ± 4	47 ± 13

4. Дискусија

Резултати испитивања су исказани у средњим годишњим вредностима са стандардном девијацијом за период од 2011/2012. године. Вредности за радионуклид природног порекла ^{40}K су у границама просечних вредности за поједине групе испитиваних узорака у Републици Србији. Резултати за радионуклид вештачког порекла ^{137}Cs показују да су у овом периоду већ достигле просечне вредности пре акцидента у Чернобилу (вредности обележене * су биле само за појединачне узорке и највероватније су у вези са додацима у храни за говеда).

5. Закључак

Из наведених резултата можемо закључити да је активност дугоживућег радионуклида вештачког порекла цезијума-137 у људској храни у Републици Србија за наведена мерна места за период 2011/2012. године веома опала и достигла вредности пре акцидента. То значи да у поменутом периоду није било додатног радиоактивног загађења животне средине, а такође и да су активности овог радионуклида у нашој исхрани на веома ниском нивоу. То условљава да ефективна доза зрачења за становништво од дугоживућих радионуклида унетих ингестијом буде значајно испод препоручене годишње границе. Препоручена граница износи 1 mSv/god и односи се на збир одговарајућих доза од спољашњег излагања и очекиване ефективне дозе унутрашњег излагања за период од годину дана.

6. Литература

- [1] Закон о заштити од јонизујућих зрачења и о нуклеарној сигурности Сл. гл. РС, бр. 36/2009
- [2] Правилник о утврђивању програма систематског испитивања радиоактивности у животној средини, Сл. гл. РС, бр. 100/2010
- [3] Радиоактивност животне средине у Србији, Институт за медицину рада Србије „Др Драгомир Карајовић”, Београд, 1995... 2012

RADIOACTIVITY MONITORING OF HUMAN FOOD IN THE REPUBLIC OF SERBIA IN 2011 AND 2012

**Ljiljana JAVORINA, Maja EREMIĆ-SAVKOVIĆ, Irena TANASKOVIĆ,
Suzana BOGOJEVIĆ, Vesna ARSIĆ, Jovana ILIĆ**
Serbian Institute of Occupational Health "Dr Dragomir Karajović

ABSTRACT

The material shows average annual values of radionuclide activity in human food resulting from gamma-spectrometric measurements. Collecting takes place twice a year at seven collection sites and in accordance with the legislation of the Republic of Serbia. The testing is aimed at detecting the presence of radionuclides in the environment and assessing the degree of ionizing radiation. the population is exposed to.

SADRŽAJ PRIRODNIH I VEŠTAČKIH RADIONUKLIDA U UZORCIMA ZEMLJIŠTA KOSOVSKE MITROVICE

Ljiljana GULAN¹, Biljana MILENKOVIĆ², Jelena STAJIĆ², Biljana VUČKOVIĆ¹, Dragana KRSTIĆ², Gordana MILIĆ¹ i Dragoslav NIKEZIĆ²

1) Univerzitet u Prištini, Prirodno-matematički fakultet, Kosovska Mitrovica, Srbija, ljgulan@gmail.com

2) Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet, Kragujevac, Srbija

SADRŽAJ

U ovom radu predstavljeni su rezultati specifičnih aktivnosti prirodnih i veštačkih radionuklida u uzorcima zemljišta Kosovske Mitrovice i okoline. Procenjene prosečne koncentracije radionuklida ²³⁸U, ²³²Th i ⁴⁰K čine 85% prirodne radijacije, dok preostalih 15% potiče od kosmičkog zračenja. Pored prirodnih, na kontaminaciju životne sredine utiču i veštački radionuklidi. Glavni izvor veštačkog radionuklida ¹³⁷Cs u životnoj sredini su nuklearni akcidenti i testovi nuklearnog oružja. Procena radijacionog izlaganja stanovništva zahteva merenje koncentracija radionuklida prisutnih u životnoj sredini. Osim toga, podaci služe kao polazna referenca u slučaju budućih antropogenih aktivnosti koje prouzrokuju dodatne kontaminacije. S tim u vezi, i obimne rudarske aktivnosti mogu da degradiraju životnu sredinu i da povećaju nivo prirodnog zračenja[3].

1. Uvod

Različiti nivoi prirodne radioaktivnosti uslovljeni su sastavom zemljišta i stena, tj. geološkim i geografskim karakteristikama svakog regiona [1], [2]. Terestrijalni dugoživeći radionuklidi ²³⁸U, ²³²Th i ⁴⁰K čine 85% prirodne radijacije, dok preostalih 15% potiče od kosmičkog zračenja. Pored prirodnih, na kontaminaciju životne sredine utiču i veštački radionuklidi. Glavni izvor veštačkog radionuklida ¹³⁷Cs u životnoj sredini su nuklearni akcidenti i testovi nuklearnog oružja. Procena radijacionog izlaganja stanovništva zahteva merenje koncentracija radionuklida prisutnih u životnoj sredini. Osim toga, podaci služe kao polazna referenca u slučaju budućih antropogenih aktivnosti koje prouzrokuju dodatne kontaminacije. S tim u vezi, i obimne rudarske aktivnosti mogu da degradiraju životnu sredinu i da povećaju nivo prirodnog zračenja[3].

2. Područje i metod istraživanja

Područje Kosovske Mitrovice je nekada bilo najvažnije rudarsko područje u Evropi. Kompleks "Trepča" činili su, pored rudnika olova i cinka, postrojenja za flotaciju i topionica, postrojenja za hemijsku industriju i fabrika baterija. Trepčina postrojenja stvorila su u periodu od 1939.-1999. godine enormne količine flotacijske jalovine, metalurške šljake, intermedijarnih proizvoda, blato, mulj, pepeo, itd. Od 1999. godine prestala je sa radom. Međutim, devet industrijskih deponija nalazi se i dalje u neposrednoj blizini Kosovske Mitrovice i predstavljaju glavni izvor kontaminacije vazduha, vode i zemlje. U cilju utvrđivanja nivoa radioaktivnosti u zemljištu Kosovske Mitrovice i okoline, a s obzirom da sistemska merenja do sada nisu vršena, sprovedeno je istraživanje radi procene radijacionog rizika stanovništva usled spoljašnjeg izlaganja.

Region Kosovske Mitrovice pripada zoni terciarnog magmatizma. Formiranje geološke strukture u posmatranom području odnosi se na period od ordovicijuma-silura do kvartara. Vulkanogeno-sedimentne formacije karakterišu klastiti sa vulkanitima, dolomiti, mermeri, karbonati, filiti i zeleni škriljci. Snažna vulkanska aktivnost proizvela je veće mase andezita, dacita, latita i piroklastita duž Ibarske doline[4]. Uzorci neobrađenog zemljišta, do 5 cm dubine, su prikupljeni sa 16 lokacija u gradu i okolini Kosovske Mitrovice, tokom proleća 2011. godine. Nakon uklanjanja kamenja i korenja uzorci su pakovani u plastične kese i transportovani u laboratoriju. Uzorci su sušeni na temperaturi od 100-110 °C do konstantne mase, sejani kroz sito (< 2 mm) i pakovani u Marineli posude zapremine 450 ml. Posude su zaptvane pčelinjim voskom i ostavljane duže od 4 nedelje da bi se dostigla ravnoteža između radijuma i njegovih produkata raspada.

Gama spektrometrijski sistem korišćen za analizu uzoraka zemljišta čini koaksijalni HPGe detektor (GEM30-70, ORTEC) relativne efikasnosti 32 % na 1,33 MeV (⁶⁰Co) i višekanalni analizator. Sistem ima energetska rezoluciju (FWHM) od 1,85 keV na 1,33 MeV (⁶⁰Co). Kalibracija detektora je izvršena

kalibracionim izvorom češkog metrološkog instituta, (tip 2 MBSS). Detektor je smešten u olovno kućište debljine 10 cm u cilju smanjenja uticaja prirodnog fona. Aktivnost svakog uzorka i fon su mereni 10800 s pod istim uslovima. Specifična aktivnost ^{226}Ra u uzorcima je određena kao prosečna aktivnost iz dve odvojene gama linije: ^{214}Pb na 351,9 keV i ^{214}Bi na 609,3 keV. Specifična aktivnost ^{232}Th je određena prema intenzitetima gama linija ^{228}Ac (na energijama 911,1 i 968,9 keV) i ^{208}Tl (na energijama 583,0 keV i 860,6 keV). Specifična aktivnost ^{40}K je određena prema intenzitetu jedine gama linije na 1460,7 keV. Za određivanje aktivnosti veštačkog radionuklida ^{137}Cs korišćen je intenzitet gama linije na 661,6 keV.

3. Rezultati i diskusija

Specifične aktivnosti radionuklida

Specifične aktivnosti prirodnih i veštačkih radionuklida u uzorcima zemljišta sa 16 lokacija prikazane su u tabeli 1. Izračunate prosečne koncentracije aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K i ^{137}Cs su: 40,6, 48, 81 i 743,2 Bq kg⁻¹, respektivno. Ove vrednosti su veće u poređenju sa prosečnim svetskim vrednostima od 32, 45 i 412 Bq kg⁻¹ za ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K . Prosečna vrednost dobijena za veštački radionuklid ^{137}Cs tri puta je veća u poređenju sa vrednostima dobijenim u Beogradu (29,9 Bq kg⁻¹) [5].

Jačina doze i godišnja efektivna doza

Apsorbovana doza D (nGy h⁻¹) u vazduhu na visini 1 m iznad tla uslovljena prisustvom prirodnih radionuklida računa se po sledećoj formuli (1):

$$D = 0,462 \cdot A_{\text{Ra}} + 0,604 A_{\text{Th}} + 0,0417 \cdot A_{\text{K}} \quad (1)$$

gde su A_{Ra} , A_{Th} i A_{K} specifične aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K (Bq kg⁻¹). Prosečna vrednost 78,7 nGyh⁻¹ (opseg 38,9-149 nGyh⁻¹) apsorbovane doze zračenja u vazduhu usled prirodnih radionuklida u zemljištu veća je od prosečnog svetskog opsega (50-59 nGyh⁻¹), ali se nalazi u okviru vrednosti od 20-100 nGyh⁻¹ za 90% svetskog stanovništva za koje su podaci dati u UNSCEAR-u [1]. Treba napomenuti da je prosečan doprinos apsorbovanoj dozi od zračenja veštačkog radionuklida ^{137}Cs neznatan u odnosu na doprinos prirodnih radionuklida (2,4 nGyh⁻¹ - oko 3% doprinosa od prirodnih radionuklida), pa nije uzet u obzir. Godišnja efektivna doza za stanovništvo je izračunata na osnovu koeficijenta konverzije 0,7 Sv Gy⁻¹ apsorbovane doze u vazduhu u efektivnu dozu u ljudskom telu prema sledećoj jednačini:

$$D_{\text{E}} = 0,7 \cdot D \cdot t \cdot p \quad (2)$$

gde je t godišnje vreme ekspozicije (8760 h), a p je faktor 0,2 koji se odnosi na vreme boravka stanovništva na otvorenom. Prosečna vrednost 96,6 mSv (opseg 47,7 - 182,7) je veća od godišnje prosečne vrednosti od 66 mSv za spoljašnje izlaganje terestrijalnim izvorima zračenja [1], tabela 1.

Radijumski ekvivalent aktivnosti i indeks radijacionog rizika usled spoljašnjeg izlaganja

Radijumski ekvivalent aktivnosti služi za normiranje doprinosa prirodnih radionuklida ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K na osnovu pretpostavke da specifične aktivnosti od 10 Bq kg⁻¹ ^{226}Ra , 7 Bq kg⁻¹ ^{232}Th i 130 Bq kg⁻¹ ^{40}K proizvode istu količinu gama zračenja. Računa se iz sledećeg odnosa [6]

$$\text{Ra}_{\text{eq}} = A_{\text{Ra}} + 1,43 \cdot A_{\text{Th}} + 0,077 \cdot A_{\text{K}} \quad (3)$$

Tabela 1. Specifične aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K i ^{137}Cs , jačina doze, godišnja efektivna doza, radijumski ekvivalent aktivnosti i indeks radijacionog rizika

Uzorak	^{226}Ra (Bq kg ⁻¹)	^{232}Th (Bq kg ⁻¹)	^{40}K (Bq kg ⁻¹)	^{137}Cs (Bq kg ⁻¹)	D (nGy h ⁻¹)	D _E (μSv)	Ra _{eq} (Bq kg ⁻¹)	H _{ex} (Bq kg ⁻¹)
S1	27±0.9	34.4±2.2	695.2±12.8	31.6±0.7	62.2	76.3	129.7	0.35
S2	32.1±1	36.6±2.3	778.6±13.1	86.9±1.1	69.4	85.1	144.4	0.39
S3	21.2±1	24.8±2	550.1±12.7	377.6±2.5	47.7	58.5	99.0	0.27
S4	43.2±1	44.4±2.3	820.4±12.6	23.3±0.6	81	99.3	169.9	0.46
S5	32.6±1	52.1±2.4	833.8±13.5	55.2±0.9	81.3	99.7	171.3	0.46
S6	50.5±1.4	69.8±3.4	789.2±15.6	34±0.9	98.4	120.7	211.1	0.57
S7	91.1±1.6	103.8±3.4	1061±15.6	46.5±0.9	149	182.7	321.2	0.87
S8	73±1.8	102.8±4	1148.7±18.5	33.6±0.9	143.7	176.3	308.5	0.83
S9	31±1.4	43±2.2	579.3±11.3	24.8±0.6	64.5	79	137.1	0.37
S10	57±1.4	67.2±3.2	986.9±16.2	60.4±1.1	108.1	132.5	229.1	0.62
S11	31.4±1.1	31.9±2.2	688.3±12.4	46.8±0.9	62.5	76.6	130.0	0.35
S12	29.4±0.9	29.4±1.9	622.7±11.6	24.8±0.6	57.3	70.3	119.4	0.32
S13	35.1±1	38.2±2.2	574±11.9	8.8±0.4	63.2	77.5	133.9	0.36
S14	29.3±1	34±2	723.4±13	6.8±0.4	64.2	78.8	133.6	0.36
S15	24.7±1.2	20.3±1.7	365.1±11.3	385±2.7	38.9	47.7	81.8	0.22
S16	41.7±1.2	35±2.5	674.3±12.5	49.7±0.9	68.5	84	143.7	0.39

Izračunati radijumski ekvivalent aktivnosti na datim lokacijama se kreće od 81,8 do 321,2, sa prosečnom vrednošću od 166,5 Bq kg⁻¹. Maksimalna vrednost je manja od 370 Bq kg⁻¹ i ne prevazilazi preporučenu granicu.

Indeks radijacionog rizika usled spoljašnjeg izlaganja H_{ex} je modifikovana veličina radijumskog ekvivalenta aktivnosti i može se izraziti sledećom jednačinom:

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (4)$$

Preporučeno je da indeks radijacionog rizika bude manji od jedinice. Izračunata prosečna vrednost indeksa spoljašnjeg izlaganja je 0,45, a kreće se od 0,22 do 0,87, Tabela 1. Dakle, uslov je zadovoljen.

U pogledu visokog sadržaja prirodnih radionuklida izdvajaju se uzorci S7 i S8, a po visokom sadržaju veštačkog radionuklida izdvajaju se uzorci S15 i S3, Tabela 1.

Najveće vrednosti prirodnih radionuklida izmerene su na lokacijama uzoraka S7 i S8. Imajući u vidu geološke karakteristike, to bi moglo da bude uslovljeno postojanjem zone raseda i seizmičke zone u blizini [4], [7]. Vulkanogeno-sedimentne stene postoje u blizini ovih lokacija. Vulkanaska aktivnost izaziva rasede, koji se formiraju od pukotina i drobljenog kamenja pod velikim pritiskom i temperaturom. Zbog toga su veoma porozne za podzemne vode koje nose radionuklide ka površini raseda [8].

Uzorak S15 ima najniže vrednosti za ^{40}K i ^{232}Th , ali najveće vrednosti ^{137}Cs . Razlika u dva reda veličine za ^{137}Cs u poređenju sa ostalim uzorcima je usled složenih načina disperzije radionuklida posle Černobiljskog akcidenta [9]. Tome treba pridodati globalne padavine i sporu migraciju cezijuma u dublje slojeve zemljišta. Takođe, zadržavanje ^{137}Cs u površinskim slojevima zemljišta zavisi od lokalnog kapaciteta sorpcije zemljišta. Uzorak S3 ima slične vrednosti.

4. Zaključak

Procenjene su visoke prosečne vrednosti sadržaja radionuklida u zemljištu u Kosovskoj Mitrovici. Kao posledica povišenog nivoa radioaktivnosti izračunata prosečna godišnja efektivna doza za stanovništvo je veća od vrednosti preporučene UNSCEAR-om. Podaci o nivou radioaktivnosti obezbeđuju se po prvi put na posmatranom području, pa se ne može ustanoviti da li je povećana radioaktivnost rezultat antropogenog delovanja, uslovljenog rudarskim aktivnostima. Veliki opseg rezultata ukazuje na neravnomernu distribuciju i prirodnih i veštačkih radionuklida u Kosovskoj Mitrovici i okolini.

5. Zahvalnica

Ovaj rad je urađen u okviru projekta III41028 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

6. Literatura

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Annex B: Exposure of the public and workers from various sources of radiation, 2008 (NY: UN)
- [2] M. Tzortzis, H. Tsertos, S. Christofides, G. Christodoulides, Gamma-ray measurements of naturally occurring radioactive samples from Cyprus characteristic geological rocks, *Radiat. Meas.* 37 (2003) 221 – 229.
- [3] V.R.K. Murty, N. Karunakara, Natural radioactivity in the soil samples of Botswana, *Radiat. Meas.* 43 (2008) 1541–1545
- [4] M. D. Dimitrijevic, *Geology of Yugoslavia*, Geol. Inst. GEMINI, Belgrade, 1997.
- [5] Jelena Petrović, Mirjana Čujić, Milan Dornević, Ranko Dragović, Boško Gajić, Šćepan Miljanić and Snežana Dragović, Spatial distribution and vertical migration of ^{137}Cs in soils of Belgrade (Serbia) 25 years after the Chernobyl accident, *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 15 (2013) 1279-1289
- [6] N. Q. Huy, T. V. Luyen, Study on external doses from terrestrial radioactivity in southern Vietnam. *Radiat. Prot. Dosim.* 118 (2006) 331-336
- [7] S. Singh, A. Rani, R. K. Mahajan, ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K analysis in soil samples from some areas of Punjab and Himachal Pradesh, India using gamma-ray spectrometry, *Radiat. Meas.* 39 (2005) 431 – 439
- [8] Oktay Baykara, Mahmut Dogru, Measurements of radon and uranium concentration in water and soil samples from East Anatolian Active Fault Systems (Turkey)
- [9] *Radiat. Meas.*, 41 (2006) 362-367
- [10] N. Celik, U. Cevik, A. Celik, B. Kucukomeroglu, Determination of indoor radon and soil radioactivity levels in Giresun, Turkey, *J. Environ. Radioactiv.* 99 (2008) 1349–1354

CONTENT OF NATURAL AND ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN SOIL SAMPLES OF KOSOVSKA MITROVICA

**Ljiljana GULAN¹, Biljana MILENKOVIĆ², Jelena STAJIĆ², Biljana VUČKOVIĆ¹, Dragana
KRSTIĆ², Gordana MILIĆ¹ i Dragoslav NIKEZIĆ²**

1) University of Pristina, Faculty of Natural Science, Kosovska Mitrovica, Serbia

2) University of Kragujevac, Faculty of Science, Serbia.

ABSTRACT

This paper reports the results of radioactivity concentrations in soil samples collected in the municipality and vicinity of Kosovska Mitrovica. The estimated average activity concentrations of ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K and ¹³⁷Cs are 40.6±19, 48±25.4, 743.2±200.5 and 81±119 Bq kg⁻¹, respectively. The estimated average absorbed dose rate in air and annual effective dose are 78.7 nGy h⁻¹ and 96.6 μSv, respectively. The radium equivalent activity and external hazard index were also calculated.

RADIOAKTIVNOST ZEMLJIŠTA U OKOLINI TERMoeLEKTRANA U SRBIJI

Marija JANKOVIĆ, Dragana TODOROVIĆ, Jelena NIKOLIĆ, Milica RAJAČIĆ, Gordana PANTELIĆ i Nataša SARAP

Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, 11001 Beograd, Srbija, marijam@vinca.rs

SADRŽAJ

U radu su prikazani rezultati merenja radioaktivnosti zemljišta za period 2010-2012. god. uzetih u okolini termoelektrana "Nikola Tesla (TENT)", "Kolubara" i "Morava" u Srbiji. Merenja su izvršena u Laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine u Institutu "Vinča". Analiza je urađena spektrometrijom gama emitera na HPGe detektoru. U uzorcima su detektovani prirodni radionuklidi ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{235}U , i ^{238}U kao i proizvedeni radionuklid ^{137}Cs .

1. Uvod

Procesom sagorevanja uglja u termoelektranama dolazi do oslobađanja i preraspodele niza zagađivača: sumpordioksida, azotnih oksida, ugljenmonoksida, toksičnih i teških metala, organskih čestica kao i radionuklida uranijumovog, torijumovog niza i kalijuma - 40. Najveći deo mineralnih materija iz uglja ostaje u pepelu dok njegov teži deo pada na dno kotla kao šljaka. Jedan deo lebdećeg pepela se izdvaja u elektrostatičkim precipitatorima, dok drugi deo putem dimnjaka odlazi u atmosferu. Iz atmosfere se potom deponuje na zemlju, gde može povećati aktivnost već postojećih prirodnih radionuklida u zemljištu. Ovo moguće povećanje radioaktivnosti zemljišta spada u tehnološki uslovljeno povećanje prirodne radioaktivnosti (TENORM) [1]. Ako posmatramo lanac ishrane, zemlja - biljka - životinja - čovek, promena prirodne radioaktivnosti kao posledica rada termoelektrana, može da utiče na ovaj povezani niz. Tip zemljišta kao i hemijski oblik radionuklida koji se nalazi u njoj, utiču na vezivanje radionuklida od strane biljke.

U ovom radu prikazan je deo rezultata kontrole radioaktivnosti radne i životne sredine termoelektrana koji se odnosi na merenje prirodne radioaktivnosti u zemljištu za period 2010-2012. god. u cilju da se odredi uticaj rada termoelektrana na moguću kontaminaciju zemljišta.

2. Eksperimentalni deo

Uzorci zemljišta uzeti su na više mernih mesta u okolini termoelektrana, tj. na određenim rastojanjima od termoelektrana (mesta uzorkovanja data u Tabeli 1). Priprema uzoraka obuhvata sušenje na 105 °C, prosejavanje i odmeravanje u odgovarajuću geometriju merenja. U datim uzorcima se uspostavlja radioaktivna ravnoteža zatapanjem pčelinjim voskom. Spektrometrija gama emitera urađena je na HPGe detektorima relativne efikasnosti 18 i 20 %. Kalibracija detektora urađena je referentnim radioaktivnim materijalom, matriksa silikonske smole, Czech Metrological Institute Praha, 9031-OL-420/12, ukupne aktivnosti 41.48 kBq na dan 31.08.2012.god (^{241}Am , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{203}Hg , ^{88}Y , ^{113}Sn , ^{85}Sr i ^{137}Cs) kao i referentnim radioaktivnim materijalom, matriksa silikonske smole, Czech Metrological Institute Praha, 9031-OL-208/08, ukupne aktivnosti 40.624 kBq na dan 15.04.2008.god. Vreme merenja uzoraka je 60 ks. Rezultati merenja dati su sa mernom nesigurnošću koja je izražena kao proširena merna nesigurnost za faktor $k = 2$ koji za normalnu raspodelu odgovara nivou poverenja od 95 %.

Tabela 1. Mesta uzorkovanja u okolini termoelektrana

TENT A	TENT B	MORAVA	KOLUBARA
ZBD* Topolice	ZBD	ZBD	ZBD Veliki Crljeni
ZDD# Obrenovac	ZDD Ušće	ZDD Crkvenac	ZDD Sokolovo
ZDD Urovci	ZDD Skela	ZDD Svilajnac	ZDD Stepojevac
ZDD Krtinska	ZDD Grabovac	ZDD Lovački Dom	ZDD Junkovac
ZDD Rvati	ZDD Dren		ZDD Lazarevac
ZDD Zabrežje	ZDD Ratari		

*ZBD zemlja blizu deponije; #ZDD zemlja dalje od deponije

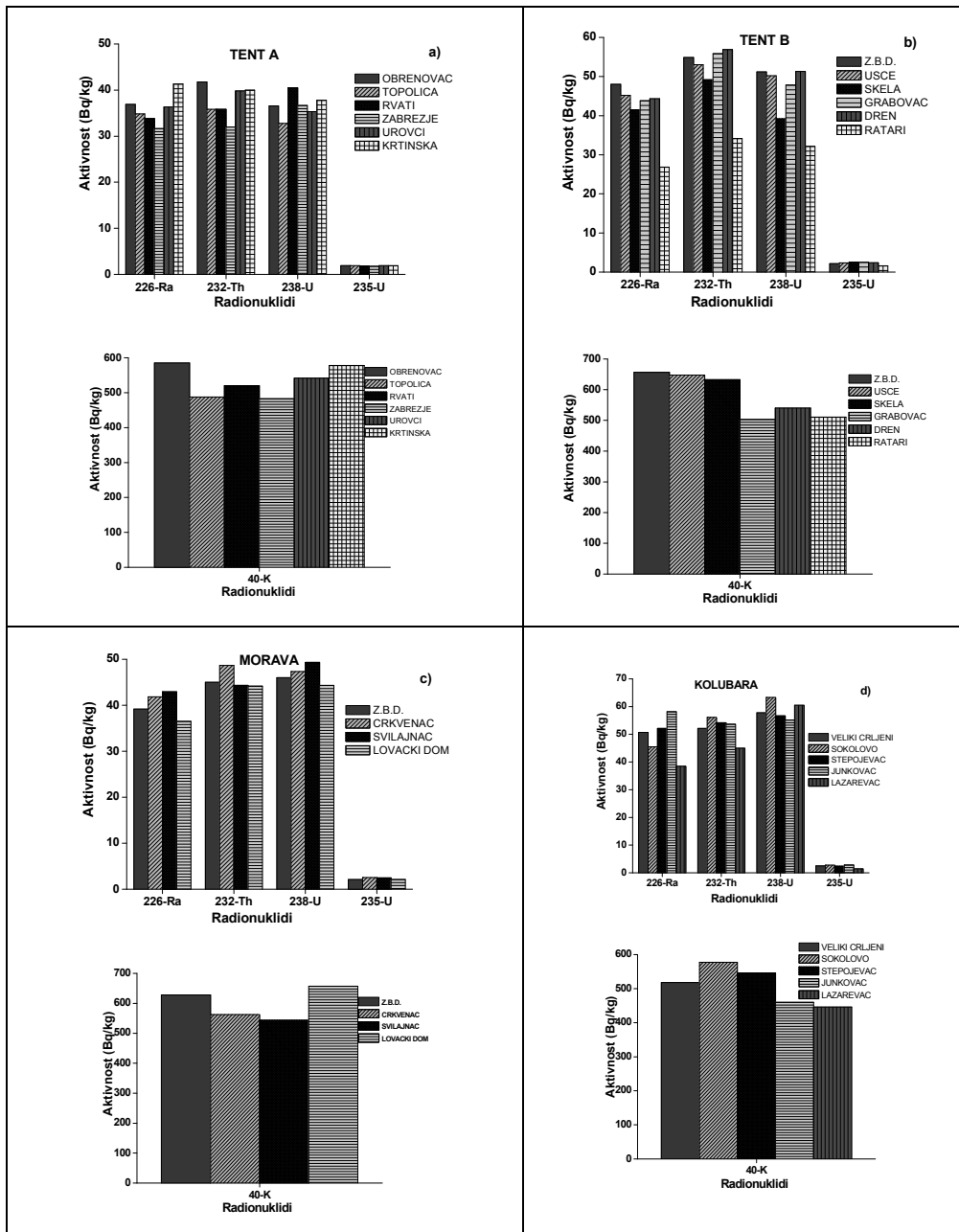
3. Rezultati i diskusija

Spektrometrijom gama emitera u uzorcima zemljišta detektovani su prirodni radionuklidi ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{238}U i ^{235}U kao i proizvedeni radionuklid ^{137}Cs . Minimalne i maksimalne vrednosti koncentracije prirodnih radionuklida u zemljištu na svim lokacijama, kao i srednje vrednosti koncentracija sa standardnom devijacijom date u Tabeli 2. Na Slici 1 prikazane su srednje vrednosti koncentracija radionuklida u zemljištu za svaku termoelektranu, odnosno za svaku mernu lokaciju za period 2010-2012. god.

Rezultati merenja ukazuju da nema razlike u vrednosti koncentracije prirodnih radionuklida u zemljištu na pojedinim lokacijama u odnosu na period ispitivanja (npr. za lokaciju Urovci TENT A koncentracije ^{226}Ra su 36 Bq/kg za 2010. god. 38 Bq/kg za 2011. i 36 Bq/kg za 2012.). Sa druge strane nema razlike između različitih lokacija u okolini jedne termoelektrane (npr. srednja vrednost koncentracije ^{226}Ra za lokaciju Obrenovac TENT A 37 Bq/kg ne razlikuje se u odnosu na srednju vrednost koncentracije ^{226}Ra za lokaciju Urovci TENT A 36 Bq/kg (Slika 1a)). Nisu primećene razlike između vrednosti koncentracije radionuklida na lokacijama koje su bliže i dalje od deponije (srednja vrednost koncentracije ^{226}Ra u zemljištu blizu deponije Topolice TENT A je 35 Bq/kg, dok je srednja vrednost koncentracije ^{226}Ra za zemljište dalje od deponije na lokaciji Urovci 36 Bq/kg). Dati zaključci odnose se i na druge ispitivane termoelektrane.

Tabela 1. Minimalne, maksimalne i srednje vrednosti koncentracije sa standardnom devijacijom prirodnih radionuklida u zemljištu u okolini termoelektrana (Bq/kg)

Radionuklidi		TENT A	TENT B	MORAVA	KOLUBARA
^{226}Ra	Minimum	21	21	26	31
	Maksimum	50	56	82	115
	Srednja vrednost	36.0 ± 6.6	41.6 ± 9.5	40.7 ± 9.6	50.6 ± 15.2
^{232}Th	Minimum	20	24	24	38
	Maksimum	57	68	63	71
	Srednja vrednost	38.1 ± 8.3	50.6 ± 9.9	45.3 ± 8.4	53.4 ± 8.2
^{40}K	Minimum	350	324	360	419
	Maksimum	787	723	817	790
	Srednja vrednost	540.1 ± 101.4	581.9 ± 91.3	587.1 ± 107.5	519.1 ± 84.3
^{238}U	Minimum	16	15	27	27
	Maksimum	61	82	73	117
	Srednja vrednost	36.7 ± 11.6	45.4 ± 13.7	47.3 ± 12.2	58.4 ± 21.1
^{235}U	Minimum	0.8	1	0.9	0.6
	Maksimum	2.7	3.3	4	6
	Srednja vrednost	1.9 ± 0.4	2.3 ± 0.6	2.3 ± 0.8	2.5 ± 1.0



Slika 1. Srednje vrednosti koncentracije prirodnih radionuklida u zemljištu u okolini termoelektrana: a) TENT A; b) TENT B; c) MORAVA; d) KOLUBARA

Dobijene vrednosti koncentracije proizvedenog radionuklida ^{137}Cs u zemljištu razlikuju se od godine do godine, za period ispitivanja (za lokaciju Rvati TENT A koncentracija ^{137}Cs je 54 Bq/kg za 2010. god. 14 Bq/kg za 2011. i 33 Bq/kg za 2012.), a takođe prisutne su i varijacije po godinama i po različitim lokacijama. Interval vrednosti koncentracije ^{137}Cs u zemljištu za TENT A kreće se od 1 do 82 Bq/kg, za TENT B od 1.5 do 36 Bq/kg, za Moravu od minimalne granice detekcije do 34 Bq/kg i za Kolubaru od 2.2 do 54 Bq/kg za period ispitivanja 2010-2012.god. Prisustvo ^{137}Cs u zemljištu je posledica Černobilja i nije povezano sa radom termoelektrana.

4. Zaključak

Na osnovu rezultata merenja radioaktivnosti u uzorcima zemljišta uzorkovanih u okolini termoelektrana "Nikola Tesla", "Kolubara" i "Morava" na više lokacija u periodu 2010-2012. god., prikazanih u ovom radu, može se zaključiti da se koncentracije prirodnih radionuklida ne menjaju značajno kako ni po godinama tako ni po lokacijama u okviru jedne termoelektrane. Sve dobijene vrednosti koncentracija prirodnih radionuklida karakteristične su za uzorke zemljišta i nema razlike u odnosu na druge lokacije na našim prostorima koje nisu u okviru termoelektrana [2] .

5. Literatura

- [1] R. L. Kathren. Radioactivity in the environment, Sources, Distribution, and Surveillance, Harwood academic publishers, New York, (1986).
- [2] Izveštaj o nivou izlaganja stanovništva jonizujućim zračenjima iz životne sredine u Republici Srbiji u 2010. godini, Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije, Republika Srbija, Beograd, (2011).

6. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije pod sledećim projektom: III43009.

RADIOACTIVITY OF SOIL FROM COAL-FIRED POWER PLANTS IN SERBIA

Marija JANKOVIĆ, Dragana TODOROVIĆ, Jelena NIKOLIĆ, Milica RAJAČIĆ, Gordana PANTELIĆ and Nataša SARAP

*University of Belgrade, Institute Vinča, Radiation and Environmental Protection
Department, 11001 Belgrade, Serbia, marijam@vinca.rs*

ABSTRACT

This paper presents the results of measurement of radioactivity in soil samples from the "Nikola Tesla", "Kolubara" and "Morava" coal-fired power plants for period 2010-2012. Measurements were performed by the Radiation and Environmental Protection Laboratory, Vinča Institute of nuclear sciences. Naturally occurring radionuclides ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{235}U and ^{238}U as well as artificial radionuclide ^{137}Cs were detected by gamma spectrometry using HPGe detector.

PROCENA IZLAGANJA ZRAČENJU U STANOVIMA IZGRAĐENIM OD SIPOREKS BLOKOVA OBAVLJENA RESRAD-BUILD PROGRAMOM

**Mladen D. NIKOLIĆ^{1,2}, Milica S. JAKOVLJEVIĆ², Dejan D. VUČKOVIĆ²,
Rodoljub D. SIMOVIĆ^{2,3}**

- 1) *Visoka hemijsko tehnološka škola, Kruševac, Srbija, mladennikolic2603@yahoo.com*
- 2) *Fakultet za ekologiju i zaštitu životne sredine, Univerzitet 'Union - Nikola Tesla', Beograd, Srbija, milica_jkvljvc@yahoo.com, vuckovic987@gmail.com*
- 3) *Javno preduzeće 'Nuklearni objekti Srbije', Beograd, Srbija, simovicr@vinca.rs*

SADRŽAJ

U radu je prikazana mogućnost korišćenja programa RESRAD-BUILD za procenu izlaganja zračenju u stambenim objektima izgrađenim od siporeks blokova. U zavisnosti od uspostavljenog režima provetranja, izračunata je godišnja ekvivalentna doza i udeo inhalacije, ingestije i depozicije u njoj.

1. Uvod

Poslednjih decenija pokazan je povećan interes za merenje prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima i za emanaciju radona, koji doprinose zagađenju prirodne sredine i predstavljaju rizik po zdravlje stanovništva. Izlaganje prirodnim radionuklidima iz građevinskih materijala, kao i prisutnom radonu u zatvorenim prostorijama u kojima se usled nedovoljnog provetranja nagomilava, prepoznato je kao značajan rizik od kancerogenih oboljenja, posebno oboljenja pluća. Godišnja doza izlaganja radonu, toronu i njihovim potomcima kratkog vremena poluraspada, u kućama i radnim prostorijama, procenjena je za Evropu na 1.6 mSv [1, 2].

RESRAD-BUILD je jedan od programa iz porodice RESRAD kodova razvijenih u skorije vreme u Nacionalnoj laboratoriji u Argonu, SAD [3, 4]. Program se koristi za proračun izlaganja zračenju osoba koje rade ili žive u zatvorenim prostorima, posebno u objektima kontaminiranim radioaktivnim materijalom [5]. Za potrebe ovog rada izvršena je simulacija ekspozicije prirodnim radionuklidima iz građevinskih materijala (siporeks i običan građevinski beton) od kojih je izgrađen savremen stambeni objekt. U zavisnosti od provetranja stana, simuliran je načini dospevanja radionuklida u organizam i ukupno godišnje izlaganje radionuklidima u pojedinim prostorijama.

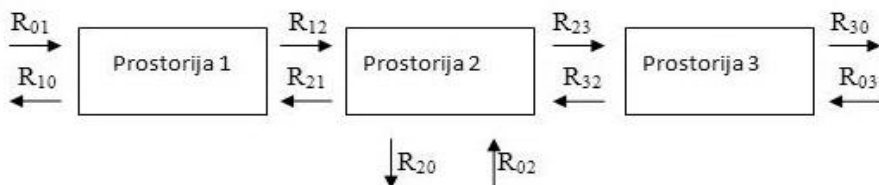
2. Model stana i osnovni podaci za proračun

U RESRAD-BUILD programu, pod prijemnikom podrazumeva se osoba koja boravi neko vreme u kontaminiranoj zgradi. U jednom postupku proračuna može se modelovati zgrada sa tri odeljka, četiri geometrije izvora (tačkasta, linijska, površinska i zapreminska), deset zasebnih položaja izvora i deset položaja prijemnika.

U ovom radu konstruisan je pojednostavljen model stana od 60 m², čiji su zidovi izrađeni od siporeks blokova debljine 0.25 m i gustine 600 kg/m³, a podovi, plafoni i noseći stubovi od betona gustine 2300 kg/m³. Pretpostavka je da se stan sastoji od dve jednake sobe ukupne površine 50 m² u kojima se nalaze prijemnici 1 i 3 i još jedne prostorije (predsoblja, ili neke slične prostorije koja ima slabiji intenzitet razmene vazduha sa okolinom) površine 10 m², u kojoj se nalazi prijemnik 2. Visinina plafona u celom objektu je 2.6 m. Određeno je godišnje izlaganje tri osobe smeštene na sredinama svake od prostorija, uz pretpostavku da one tokom 365 dana u godini provedu 60% vremena u zatvorenom prostoru. Specifična aktivnost radionuklida u siporeks blokovima iznosi: $A_{Ra-226} = 9.4$ Bq/kg, $A_{Th-232} = 5.4$ Bq/kg, $A_{U-235} = 121$ Bq/kg i $A_{K-40} = 0.70$ Bq/kg [1], dok je specifična aktivnost radionuklida u betonu: $A_{Ra-226} = 40$ Bq/kg, $A_{Th-232} = 30$ Bq/kg, $A_{K-40} = 400$ Bq/kg [2].

Model razmene vazduha u stanu prikazan je na slici 1, a vrednosti brzine izmene vazduha $R_{i,j}$ (indeksi i, j su oznake prostorija), u tabeli 1. S obzirom da strujanje vazduha nije konstantno, razmatrano je šest režima provetranja da bi se uočila zavisnost između doze zračenja i provetranja, pri čemu je za

središnju prostoriju 2 pretpostavljena manje intenzivna razmena vazduha sa okolinom i susednim prostorijama. Nulti režim ventilacije odgovara potpunom odsustvu izmene vazduha između prostorija i sa okolinom, dok režim 5 označava najintenzivnije provetranje stana. Za sve parametre koji nisu potpuno poznati u modelu (zapremina udahnutog vazduha u jedinici vremena, brzina depozicije i slično), korišćene su vrednosti podrazumevane u programu.



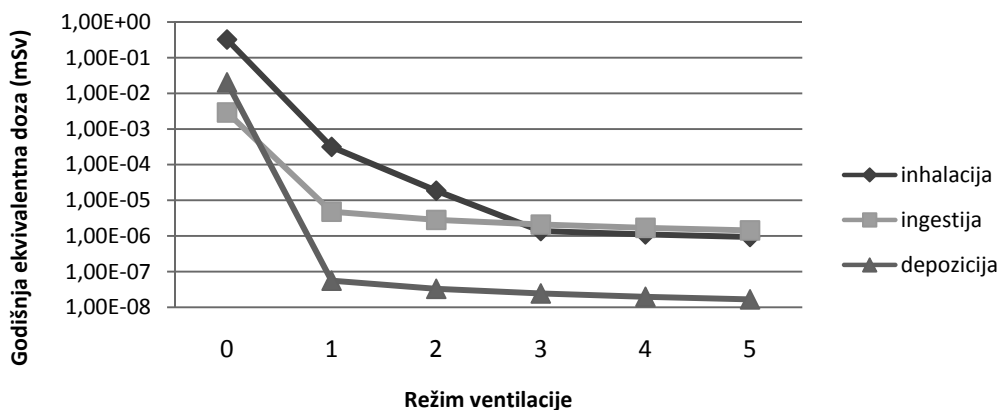
Slika 1. Model stana i razmene vazduha između prostorija i sa okolinom

Tabela 1. Režimi provetranja korišćeni u modelu

Režim	0	1	2	3	4	5
Parametar	Brzina izmene vazduha [m^3/h]					
R_{10}	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
R_{01}	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
R_{12}	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
R_{21}	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
R_{20}	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
R_{02}	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
R_{23}	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
R_{32}	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
R_{03}	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
R_{30}	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25

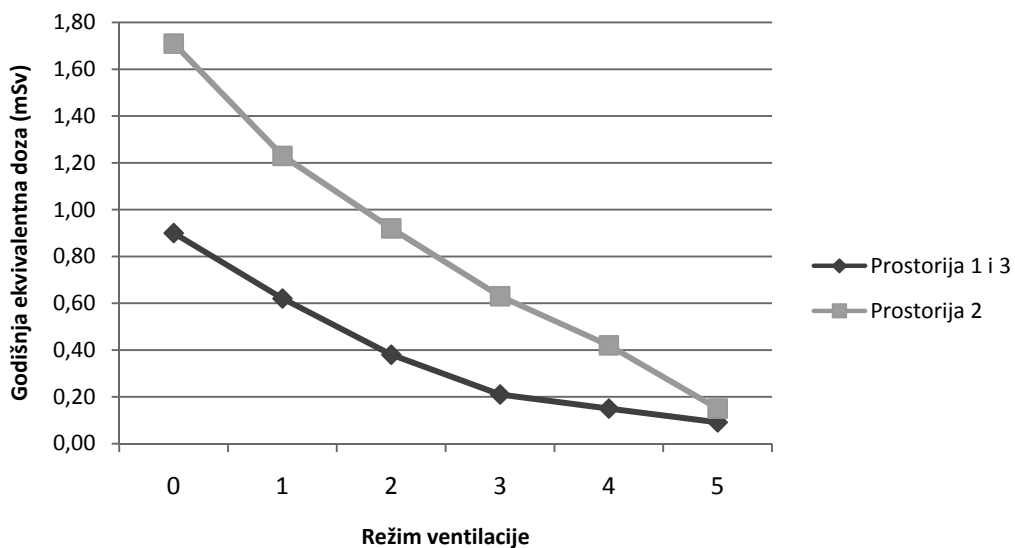
3. Rezultati proračuna

Na slici 2, za prostorije 1 i 2 (sobe) prikazani su načini dospevanja kontaminanata u organizam na godišnjem nivou i u zavisnosti od strujanja vazduha. Intenzivnija izmena vazduha sa okolinom smanjuje koncentracije kontaminanata u vazduhu i na površinama, time i mogućnost inhalacije, ingestije i depozicije - na sličan način u svim prostorijama stana.



Slika 2. Udeo inhalacije, ingestije i depozicije u godišnjoj dozi u sobama, u zavisnosti od režima provetravanja

Na slici 3 prikazano je ukupno godišnje izlaganje zračenju u prostorijama stana u zavisnosti od režima strujanja vazduha. Pri nultom režimu strujanja ukupna godišnja doza je najveća, pri čemu u svakom režimu dominira izloženost prijelnika u prostoriji 2 – predsoblju, koje ima najslabiju izmenu vazduha sa okolinom i okolnim prostorijama. Sa povećanim provetravanjem godišnja ekvivalentna doza brzo opada u svim prostorijama i već u režimu 2, u predsoblju godišnja ekvivalentna doza receptora pada ispod 1 mSv.



Slika 3. Ukupno izlaganje zračenju po prostorijama u zavisnosti od režima provetravanja

4. Zaključak

U radu je prikazana mogućnost korišćenja programa RESRAD-BUILD za procenu izlaganja zračenju osoba koji borave u stambenim objektima izgrađenim od siporeks blokova i građevinskog betona. Analiziran je uticaj jedino prirodnih radionuklida prisutnih u građevinskom materijalu u zavisnosti od uspostavljenog režima provetranja stana. Rezultati pokazuju neophodnost redovnog provetranja stambenih prostorija razmenom vazduha sa okolinom, kako bi se smanjila godišnja ekvivalentna doza zračenja i opasnost po zdravlje stanara.

5. Literatura

- [1] D. Popović, D. Todorović, Radon indoor concentrations and activity of radionuclides in building materials in Serbia, *Facta Universitatis, Series: Physics, Chemistry and Technology* 4 (2006) 11–20
- [2] Konstantin Kovler, Does the utilization of coal fly ash in concrete construction present a radiation hazard?, *Construction and Building Materials* 29 (2012) 158–166
- [3] RESRAD-BUILD for Windows, version 3.5, Argonne National Laboratory, Environmental Assessment Division (2003)
- [4] Probabilistic Modules for the RESRAD and RESRAD-BUILD Computer Codes, User Guide, NUREG/CR-6692, ANL/EAD/TM-91, Argonne NL (2000)
- [5] V. Ljubenov, R. Simović, Prilog proceni izloženosti radnika zračenju tokom dekomisije reaktora RA usled prisustva kontaminacije, XLIX konferencija za ETRAN, Budva, (2005), Zbornik radova, IV, 44-47

AN ASSESSMENT OF THE RADIATION EXPOSURE IN DWELLINGS MADE OF SIPOREX BLOCKS PERFORMED BY THE RESRAD-BUILD CODE

**Mladen D. NIKOLIĆ^{1,2}, Milica S. JAKOVLJEVIĆ², Dejan D. VUČKOVIĆ²,
Rodoljub D. SIMOVIĆ^{2,3}**

1) *The Higher School of Applied Chemical Technology, Kruševac, Serbia,
mladennikolic2603@yahoo.com*

2) *Faculty of Ecology and Environmental Protection, Union - Nikola Tesla University, Belgrade, Serbia,
milica_jkvljvc@yahoo.com, vuckovic987@gmail.com*

3) *Public Company Nuclear Facilities of Serbia, Belgrade, Serbia, simovic@vinca.rs*

ABSTRACT

The paper presents possibility of using the RESRAD-BUILD code to assess the radiation exposure in dwellings built of siporex blocks. Depending on the established modes of ventilation, the annual dose equivalent and share of inhalation, ingestion and deposition in it have been estimated.

UKUPNA ALFA I BETA AKTIVNOST U SOKOVIMA IZ SRBIJE

Nataša SARAP, Marija JANKOVIĆ, Dragana TODOROVIĆ, Milica RAJAČIĆ, Gordana PANTELIĆ i Jelena NIKOLIĆ

Univerzitet u Beogradu, Institut Vinča, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Beograd, Srbija, natasas@vinca.rs

SADRŽAJ

U radu su prikazani rezultati merenja ukupne alfa i beta aktivnosti u sokovima (4 gazirana i 2 negazirana) kupljenih u lokalnim supermarketima na području Beograda (proizvedeni u Srbiji). Dobijeni rezultati su pokazali da su ukupna alfa i beta aktivnost bile u okviru preporučenih vrednosti, ukoliko sokove posmatramo kao vodu za piće, (0.5 Bq L^{-1} za ukupnu alfa aktivnost i 1 Bq L^{-1} za ukupnu beta aktivnost)[1] samo za uzorke Coca Cola i Schweppes Indian Tonic Water. Za ostale uzorke u kojima je ukupna beta aktivnost veća od 1 Bq L^{-1} urađena je i gama spektrometrijska analiza. Rezultati su pokazali da povećana beta aktivnost u tim uzorcima potiče od ^{40}K .

1. Uvod

Globalni problem savremenog sveta je proizvodnja dovoljnih količina visoko kvalitetne i zdrave hrane, koja će zadovoljiti hemijske, fizičke i biološke kriterijume ispravnosti.

Voćni sok je proizvod dobijen mehaničkom preradom jedne ili više vrsta tehnološki zrelog, svežeg, ohlađenog ili zamrznutog voća, koji nije fermentisao, ali može da fermentiše, konzervisan isključivo fizičkim postupcima. Ukus, boja i aroma moraju da budu karakteristični za vrstu voća od koga je voćni sok proizveden. Voda koja se dodaje koncentrisanom voćnom soku mora da ima karakteristike vode za piće, a posebno njena hemijska, mikrobiološka i senzorska svojstva, tako da nakon razređivanja ne menja kvalitet voćnog soka. Gazirani sokovi su bezalkoholna pića od biljnih ekstrakata. Sva bezalkoholna gazirana pića na svetu imaju približno istu formulu: 90 % vode i 10 % šećera. Pored ovih osnovnih sastojaka, dodaju se i ugljendioksid, karamela, ortofosforna kiselina, prirodne arome i kofein. Sastojci ispitivanih sokova dati su u Tabeli 1.

Tabela 1. Sastojci ispitivanih sokova

Naziv soka	Sastojci
Coca Cola	voda, visoko fruktozni sirup, šećer, CO_2 min. 2 g L^{-1}
Fanta Orange	voda, visoko fruktozni sirup, sok od pomorandže 3 %, CO_2 min. 2 g L^{-1} , limunska kiselina, ekstrakt pomorandže 1 %
Schweppes Bitter Lemon	voda, visoko fruktozni sirup, sok od limuna min. 2 %, CO_2 min. 2 g L^{-1} , limunska kiselina, kinin max. 85 mg L^{-1}
Schweppes Indian Tonic Water	voda, visoko fruktozni sirup, CO_2 min. 2 g L^{-1} , limunska kiselina, kinin max. 85 mg L^{-1}
La Vita bistri sok od jabuke, 100 % voće	matični voćni sok jabuke bez vode
Nektar bistri sok od višnje, 35 % voće	voda, sok višnje iz koncentrisanog voćnog soka, glukozno fruktozni sirup, šećer, limunska kiselina

Poslednjih godina se sve više piju sokovi, te je otuda i proistekla ideja za ovaj rad tj. da se odredi ukupna alfa i beta aktivnost u sokovima različitih proizvođača.

2. Materijal i metoda

Sokovi za analizu su kupljeni u februaru 2013. godine. Priprema uzoraka za određivanje ukupne alfa i beta aktivnosti vrši se uparavanjem 3 L soka do suvog ostatka i mineralizacijom na 450 °C [2]. Merenja su obavljena na niskofonskom gasnom proporcionalnom brojaču Thermo Eberline FHT 770T u trajanju od 7200 s. Kalibracija brojača za merenje ukupne beta aktivnosti je urađena pomoću referentnog radioaktivnog materijala ⁹⁰Sr (EM 145, Prag) sa aktivnošću 189.4 Bq na dan 01.08.2011. godine i referentnog radioaktivnog materijala ²⁴¹Am (EM 445, Prag) sa aktivnošću 224.0 Bq na dan 01.08.2011. godine za merenje ukupnu alfa aktivnosti. Kontrola kvaliteta merenja gasnog proporcionalnog brojača se vrši jednom nedeljno. Efikasnosti detekcije iznose 28 % i 36 % za alfa, odnosno beta aktivnost, redom.

Ukupna alfa i beta aktivnost se izračunavaju pomoću formule (1):

$$A_{\alpha\beta} = \frac{(N - B)}{ef \times V} \quad (1)$$

gde je $A_{\alpha\beta}$ - aktivnost uzorka (Bq L⁻¹), N - odbroj (s⁻¹), B - odbroj za fon (s⁻¹), ef - efikasnost detektora za merenje alfa i beta aktivnosti i V - zapremina uzorka (L).

Minimalna detektovana aktivnost (MDA) se izračunava kao:

$$MDA = \frac{LLD}{V} \quad (2)$$

gde je LLD - limit detekcije (s⁻¹) i V - zapremina uzorka (L).

U uzorcima u kojima je beta aktivnost veća od 1 Bq L⁻¹, urađena je gama spektrometrijska analiza na HPGe detektorima relativne efikasnosti 18 i 20 %. Vreme merenja uzoraka je 60000 s. Geometrija merenja uzoraka je kutija od 100 g. Aktivnost ⁴⁰K je određena preko linije 1460 keV.

Specifična aktivnost radionuklida u uzorcima se izračunava pomoću formule (3):

$$A = \frac{N}{t \times P_{\gamma} \times ef \times V} \quad (3)$$

gde je N - površina ispod pika korigovana na fon, t - vreme merenja (s), P_{γ} - verovatnoća emisije (%), ef - efikasnost detekcije (%), V - zapremina uzorka (L).

3. Rezultati i diskusija

Rezultati merenja ukupne alfa i beta aktivnosti, kao i gamaspektrometrijske analize datih uzoraka prikazani su u Tabeli 2. Ukupna alfa aktivnost je u opsegu 0.012 - 2.2 Bq L⁻¹, dok je beta aktivnost u opsegu 0.13 - 27.6 Bq L⁻¹. Gamaspektrometrijska analiza uzoraka u kojima je ukupna beta aktivnost bila iznad 1 Bq L⁻¹, pokazuje da glavni doprinos ukupnoj beta aktivnosti potiče od ⁴⁰K, čije su vrednosti u opsegu od 2.6 do 22.2 Bq L⁻¹ (Tabela 2). U prirodnim sokovima La Vita i Nektar, dobijena je veća vrednost ukupne alfa i beta aktivnosti u odnosu na gazirane sokove, što je i očekivano s obzirom na činjenicu da prirodni sokovi sadrže veći procenat voća (u ovom slučaju od 35 do 100 %).

Sa druge strane, poreklo povećane beta aktivnosti u gaziranim sokovima, Fanta Orange i Schweppes Bitter Lemon, je najverovatnije od kalijum sorbata koji se dodaje u ove sokove kao konzervans ili može da potiče i od vode koja se koristi u procesu proizvodnje ove vrste sokova (udeo vode u gaziranim

sokovima iznosi 90 %). U nekim vodama [3], ukupna beta aktivnost je veća od preporučene vrednosti, 1 Bq L⁻¹, a voda se koristi za pravljenje gaziranih sokova.

Tabela 2. Ukupna alfa i beta aktivnost i aktivnost ⁴⁰K u sokovima iz Srbije (Bq L⁻¹)

Naziv soka	Alfa aktivnost	Beta aktivnost	⁴⁰ K
Coca Cola	0.16 ± 0.06	0.44 ± 0.09	nm*
Fanta Orange	0.18 ± 0.03	3.4 ± 0.2	3.9 ± 0.3
Schweppes Bitter Lemon	0.12 ± 0.02	2.5 ± 0.1	2.6 ± 0.2
Schweppes Indian Tonic Water	0.012 ± 0.004	0.13 ± 0.01	nm
La Vita bistri sok od jabuke, 100 % voće	2.2 ± 0.5	27.6 ± 2.0	22.2 ± 2.0
Nektar bistri sok od višnje, 35 % voće	0.8 ± 0.2	8.6 ± 0.5	8.7 ± 0.6

* nm - nije mereno

4. Zaključak

Preliminarna ispitivanja ukupne alfa i beta aktivnosti prirodnih i gaziranih sokova, pokazala su da je neophodno kontrolisati ove parametre u komercijalnim sokovima jer su dobijene vrednosti u nekim uzorcima veće od preporučenih.

U današnje vreme sve više stanovništva konzumira sokove umesto pijaće vode, tako da je neophodno da ispitivanje ukupne alfa i beta aktivnosti obuhvati voćne, kao i gazirane sokove.

5. Literatura

- [1] Službeni glasnik Republike Srbije. *Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet*, Srbija, 2011.
- [2] EPA (Environmental Protection Agency). *Prescribed Procedures for Measurement of Radioactivity in Drinking Water*. EPA-600/4-80-032, Method 900.0, 1980.
- [3] M. M. Janković, N. B. Sarap, D. J. Todorović. Radioactivity in drinking water from Smederevska Palanka. *Physical Chemistry 2012, Proceedings of the 11th International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry*, eds. S. Anić, Ž. Čupić, pp. 648-650, Belgrade, September 24-28, 2012. Society of Physical Chemists of Serbia.

GROSS ALPHA AND BETA ACTIVITY IN JUICES FROM SERBIA

Nataša SARAP, Marija JANKOVIĆ, Dragana TODOROVIĆ, Milica RAJAČIĆ, Gordana PANTELIĆ and Jelena NIKOLIĆ

*University of Belgrade, Institute Vinča, Radiation and Environmental Protection
Department, 11001 Belgrade, Serbia, natasas@vinca.rs*

ABSTRACT

This paper presents the results of measurement the gross alpha and beta activity in juices (4 carbonated and 2 non-carbonated) purchased in the local supermarkets in the area of Belgrade (produced in Serbia). The obtained results showed that the gross alpha and beta activity were within recommended levels, if juices look as drinking water (0.5 Bq L^{-1} and 1 Bq L^{-1} for gross alpha and beta activity, respectively) regulated in Serbia, only for samples Coca Cola and Schweppes Indian Tonic Water. For the rest samples which have gross beta activity higher than 1 Bq L^{-1} , gamma spectrometric analysis was performed. The results showed that increased the gross beta activity originated from ^{40}K .

FON TERESTRIJALNOG GAMA-ZRAČENJA U BARAMA KRALJSKIM

Perko VUKOTIĆ¹, Tomislav ANDELIĆ², Ranko SVRKOTA³

1) Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, Podgorica, Crna Gora, pvukotic@yahoo.mail

2) Centar za ekotoksikološka ispitivanja, Podgorica, Crna Gora

3) Republički zavod za geološka istraživanja, Podgorica, Crna Gora

SADRŽAJ

Metodama gama-spektrometrije i dozimetrije ispitivan je fon terestrijalnog zračenja na šest lokacija u području Bara Kraljskih, gdje je 1994. godine izmjereno visoko povećanje prirodnog fona zbog kontaminacije tla sa ¹³⁷Cs. Nađeno je da je ta kontaminacija još uvijek izrazito visoka i u površinskom sloju zemljišta ide čak do 1182 Bqkg⁻¹, a povećanje fona terestrijalnog zračenja zbog nje kreće se od 25% do 92%.

1. Uvod

Prvo sistematsko istraživanje fona terestrijalnog gama-zračenja u Crnoj Gori [1,2], realizovano 1994. godine metodom *in situ* gama-spektrometrije, pokazalo je da postoje dva lokaliteta u kojima je zbog kontaminacije terena sa ¹³⁷Cs iz nuklearnog akcidenta u Černobilju 1986. godine fon zračenja daleko najviše povećan. Ti lokaliteti su Bare Kraljske (naselje između Mateševa i Andrijevice) i Vratlo (katun na planini Sinjajevini). U Barama Kraljskim je tada izmjerena koncentracija aktivnosti ¹³⁷Cs od 481 Bqkg⁻¹, zbog koje je prirodni fon terestrijalnog gama-zračenja bio povećan za čak 255%, a na Vratlu je izmjerena najveća koncentracija ¹³⁷Cs u Crnoj Gori od 740 Bqkg⁻¹ i povećanje fona zračenja za 235%. Nakon toga nije rađeno detaljnije istraživanje te i kasnijih promjena fona zračenja na tim lokalitetima. S obzirom na to da su Bare Kraljske naseljeno mjesto, a da je na Vratlu katun (1700 m nad morem), na kojem malobrojni borave samo tokom ljeta, ovom prilikom (projekt CANU, 2012. godine) istraživali smo samo promjenu fona zračenja u Barama Kraljskim.

2. Materijal i metode

Bare Kraljske su na južnim obroncima planina Bjelasice i Ključa i sjevernim padinama Komova. Reljef tog područja je brdsko-planinskog tipa, sa visinama 1050-1550 m nad morem. Drenira se preko rijeke Drcke, njene pritoke Vranještice i više kraćih vodotoka.

U geološkoj građi ovog područja, u sjeveroistočnom dijelu (desna strana rijeke Drcke) dominiraju klastiti paleozoika, a u jugozapadnom njegovom dijelu (lijeva strana Drcke) kredno-paleogeni fliš [3], na kojima je smeđe kisjelo zemljište - distrični kambisol [4].

Na području Bara Kraljskih je za ispitivanja odabrano šest međusobno udaljenih, geološki i pedološki reprezentativnih lokacija, koje su bez antropogenog uticaja.

Na svakoj od tih lokacija, označenih sa BK-1 do BK-6, na visini 1 m nad tlom, mjerena je jačina apsorbovane doze gama-zračenja uređajem *Target Identifier NG Ultra*. Doza je mjerena iznad mjesta sa kojeg je kasnije uzorkovano zemljište i u pet međusobno simetričnih pravaca na rastojanjima od oko 10 m od tog mjesta, a iz tih šest mjerenja određeni su opseg i srednja vrijednost jačine doze zračenja. Na svakoj ispitivanoj lokaciji, standardnom *Trench Sampling* metodom, uzeta su za laboratorijsku analizu po četiri uzorka nekultivisanog zemljišta, stratifikovana po dubinama 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm i 15-30 cm.

Iz tih uzoraka zemljišta su standardnom procedurom pripremljena 24 analitička uzorka, koja su snimana nakon 40 dana, kada je uspostavljena radioaktivna ravnoteža ²²⁶Ra i ²²²Rn. Uzorci su snimani po 24 sata na sistemu sa HPGe koaksijalnim detektorom Canberra GR5023, relativne efikasnosti 58.1% i rezolucije 0.968 keV na 122 keV i 1.98 keV na 1.33 MeV. U uzorcima su određivani ⁴⁰K (preko linije 1460.75 keV), ²³²Th (linije 338.32 keV i 911.20 keV), ²³⁸U (63.29 keV), ²²⁶Ra (295.22 keV, 351.93 keV, 609.31 keV, 1120.2 keV, 1764.4 keV) i ¹³⁷Cs (661.62 keV).

3. Rezultati mjerenja i diskusija

Izmjerene jačine doze zračenja u vazduhu na ispitivanim lokacijama date su u Tabeli 1.

Tabela 1. Jačine apsorbovane doze u vazduhu u Barama Kraljskim

Lokacija	BK-1	BK-2	BK-3	BK-4	BK-5	BK-6
Srednja jačina i opseg doze (nGyh ⁻¹)	50 -	53 (50 - 60)	50 -	83 (80 - 90)	95 (90 - 100)	53 (50 - 60)

U Tabeli 2. prikazane su srednje koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida ⁴⁰K, ²³²Th i ²³⁸U na ispitivanim lokacijama, dobijene kao aritmetičke sredine izmjerenih njihovih koncentracija po četiri stratifikovana sloja uzorkovanog zemljišta.

Tabela 2. Srednje koncentracije prirodnih radionuklida u zemljištu Bara Kraljskih

Lokacija	⁴⁰ K (Bqkg ⁻¹)	²³² Th (Bqkg ⁻¹)	²³⁸ U (Bqkg ⁻¹)
BK-1	260	15.75	12.3
BK-2	249	20.83	14.8
BK-3	356	22.14	20.0
BK-4	605	43.30	32.6
BK-5	495	48.25	46.8
BK-6	274	20.48	19.3

Na osnovu tih srednjih koncentracija aktivnosti i doznih koeficijenata 0.0417 nGyh⁻¹/Bqkg⁻¹ za ⁴⁰K, 0.604 nGyh⁻¹/Bqkg⁻¹ za ²³²Th i 0.462 nGyh⁻¹/Bqkg⁻¹ za ²³⁸U [5], izračunate su jačine apsorbovane doze u vazduhu koje potiču od zračenja prirodnih radionuklida prisutnih u zemljištu i prikazane u Tabeli 3.

Tabela 3. Procijenjene jačine apsorbovane doze u vazduhu u Barama Kraljskim koje potiču od prirodnih radionuklida u zemljištu

Lokacija	Jačina apsorbovane doze (nGyh ⁻¹)			
	od ⁴⁰ K	od ²³² Th	od ²³⁸ U	ukupno od prir. radionuklida
BK-1	10.84	9.51	5.68	26.03
BK-2	10.38	12.58	6.84	29.80
BK-3	14.84	13.37	9.24	37.45
BK-4	25.23	26.15	15.06	66.44
BK-5	20.64	29.14	21.62	71.40
BK-6	11.42	12.37	8.92	32.71

Izmjerene koncentracije aktivnosti ¹³⁷Cs u uzorcima zemljišta date su u Tabeli 4.

Iz Tabele 1. slijedi da je na četiri lokacije jačina apsorbovane doze u vazduhu na nivou srednje vrijednosti u Crnoj Gori (55 nGyh⁻¹ [1,2]), dok je na BK-4 i BK-5 ona iznad te srednje vrijednosti i to za oko 50%. Kako i najveća do sada izmjerena jačina doze u vazduhu u Crnoj Gori (192 nGyh⁻¹) u poređenju sa područjima u svijetu sa povećanim prirodnim fonom zračenja pripada vrijednostima umjereno povećanog fona [6], to su i vrijednosti fona na lokacijama BK-4 i BK-5 u Barama Kraljskim sasvim umjerene.

Geološka podloga na lokacijama BK-4 i BK-5 su paleozojski pješčari, škriljci i konglomerati, i na njima je jačina apsorbovane doze u prosjeku (89.5 nGyh^{-1}) za 73% veća od prosječne na lokacijama BK-1, BK-2, BK-3 i BK-6 (51.5 nGyh^{-1}), koje su u flišu. Iz Tabele 2. se vidi da su srednje koncentracije aktivnosti ^{40}K , ^{232}Th i ^{238}U u paleozojskim klastitima (BK-4, BK-5) veće za 93%, 131% i 139%, respektivno, od odgovarajućih u kredno-paleocenskom flišu (BK-1, BK-2, BK-3, BK-6). Te povećane koncentracije i K i Th i U na lokacijama BK-4 i BK-5 u odnosu na ostale u Barama Kraljskim, pa i u odnosu na srednje vrijednosti u Crnoj Gori (246 Bqkg^{-1} , 23.7 Bqkg^{-1} i 29.3 Bqkg^{-1} , respektivno [1,2]), objašnjavaju povećane vrijednosti doze zračenja u vazduhu na tim lokacijama.

Tabela 4. Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u zemljištu Bara Kraljskih

Dubina (cm)	^{137}Cs (Bqkg^{-1})					
	BK-1	BK-2	BK-3	BK-4	BK-5	BK-6
(0-5)	434.6±5.3	961±12	426.9±5.3	213.1±2.6	1182±15	241.6±3.0
(5-10)	215.6±2.7	135.6±1.7	152.8±1.9	191.0±2.4	202.5±2.5	380.2±4.7
(10-15)	47.89±0.60	37.23±0.47	51.72±0.64	169.3±2.1	64.64±0.81	175.2±2.2
(15-30)	7.32±0.13	11.96±0.16	22.32±0.28	55.69±0.69	22.43±0.29	48.28±0.60

Tabela 5. Karakteristike apsorbovane doze zračenja u vazduhu u Barama Kraljskim

	BK-1	BK-2	BK-3	BK-4	BK-5	BK-6
Ukupna jačina doze u vazduhu (nGyh^{-1})	50	53	50	83	95	53
Jačina doze od prirod. radionuklida (nGyh^{-1})	26	30	37.5	66.5	71.5	33
Jačina doze od ^{137}Cs (nGyh^{-1})	24	23	12.5	16.5	23.5	20
Procentualno učešće doze od ^{137}Cs	48%	43.5%	25%	20%	25%	38%
Povećanje prirodnog fona zbog ^{137}Cs	92%	77%	33%	25%	33%	60.5%

Kako je na lokaciji BK-5, uz povećane koncentracije K, Th i U, još i daleko najveća koncentracija ^{137}Cs u površinskom sloju zemljišta (vidjeti Tabelu 4), jasno je zašto je tu registrovana i najveća apsorbovana doza zračenja u Barama Kraljskim od 95 nGyh^{-1} .

Mjerenja rađena 2008/09. godine širom Crne Gore [6] pokazala su da su koncentracije ^{137}Cs u tlu relativno niske, najčešće ispod nivoa od 20 Bqkg^{-1} . To kazuje da se černobiljski cezijum, nakon više od dvije decenije prisustva na terenima Crne Gore, djelimično raspao i migrirao sa površine u dublje slojeve tla, te da on stoga više ne doprinosi značajnije dozi zračenja u vazduhu. Izuzetak je bio samo lokalitet Kuside (255 Bqkg^{-1} , krečnjačko-dolomitna crnica u kamenjaru), gdje je isti nivo koncentracije ^{137}Cs izmjeren i 1994. Međutim, ovo naše istraživanje kazuje da je zemljište u Barama Kraljskim još uvijek jako kontaminirano sa ^{137}Cs , a na lokacijama BK-2 i BK-5 čak dvostruko i trostruko više nego što je izmjereno 1994. na lokaciji BK-1 (481 Bqkg^{-1}).

Očekivano, distribucija tehnenogog cezijuma po profilu zemljišta u Barama Kraljskim nije homogena (Tabela 4). Na svim lokacijama je koncentracija ^{137}Cs još uvijek najveća u površinskom sloju, izuzev na lokaciji BK-6, gdje je najveća u sloju zemljišta 5-10 cm. ^{137}Cs ima i u najdubljem ispitivanom sloju zemljišta, 15-30 cm, ali na svim lokacijama znatno manje nego u gornja tri sloja.

U Tabeli 5, uz ukupne, tj. izmjerene jačine apsorbovane doze u vazduhu, date su, kao razlika njihovih vijednosti i proračunatih vrijednosti doza od prirodnih radionuklida u zemljištu, i jačine apsorbovane doze u vazduhu koje potiču od ^{137}Cs u tlu. Iz nje se vidi da se učešće tehnogeno uzrokovane doze u ukupnoj dozi na ispitivanim lokacijama kreće od 28% do 48%, a povećanje prirodnog fona zračenja zbog kontaminacije tla sa ^{137}Cs kreće se od 25% na lokaciji BK-4 do 92% na lokaciji BK-1, a u srednjem 53.5%.

4. Zaključak

Na svim ispitivanim lokacijama u Barama Kraljskim je kontaminacija zemljišta sa ^{137}Cs još uvijek izrazito visoka i u površinskom sloju ide čak do 1182 Bqkg^{-1} , a povećanje fona terestrijalnog gama-zračenja zbog ^{137}Cs kreće se od 25% do 92%.

5. Literatura

- [1] P. Vukotić i drugi. Fon gama-zračenja u Crnoj Gori. Softverski program, MENEKO, Podgorica 1996.
- [2] P. Vukotić et al. Background gamma-radiation in Montenegro. *Proceedings of The IRPA Regional Symposium on Radiation Protection in Neighbouring Countries of Central Europe*, pp. 477-479, Prague, September 1997.
- [3] M. Živaljević i drugi. Osnovna geološka karta i Tumač za OGK, List "Ivangrad" 1:100 000, Savezni geološki zavod, Beograd, 1979.
- [4] B. Fuštić i G. Đuretić. Zemljišta Crne Gore. Univerzitet Crne Gore, Biotehnički institut, Podgorica, 2000.
- [5] UNSCEAR, "Sources and Effects of Ionizing Radiation". Report to the General Assembly of the United Nations with Scientific Annexes. Annex B: "Exposures of the Public and Workers from Various Sources of Radiation", New York 2010.
- [6] P. Vukotić, R. Svrkota, T. Anđelić, R. Zekić, N. Antović. Lokalnosti u Crnoj Gori sa povećanim fonom zračenja, *Glasnik Odjeljenja prirodnih nauka CANU*, u štampi.

TERRESTRIAL RADIATION BACKGROUND IN BARE KRALJSKE AREA

Perko VUKOTIĆ¹, Tomislav ANĐELIĆ², Ranko SVRKOTA³

1) *Montenegrin Academy of Sciences and Arts, Podgorica, Montenegro, pvukotic@yahoo.mail*

2) *Center for Eco-Toxicological Research, Podgorica, Montenegro*

3) *Geological Survey of Montenegro, Podgorica, Montenegro*

ABSTRACT

Terrestrial gamma-radiation at six location in Bare Kraljske area, where a high increase of natural background due to ^{137}Cs contamination of soil was revealed in 1994, is being investigated by gamma spectrometry and dosimetry methods. The new measurements show that ^{137}Cs contamination is still very high (up to 1182 Bqkg^{-1} in the surface layer of soil), and increase of radiation background due to it ranges from 25% to 92%.

ВРЕМЕНСКИ ПРОМЕНЉИВЕ КОМПОНЕНТЕ ФОНА ГАМА ЗРАЧЕЊА И МЕРЕЊЕ МАЛИХ АКТИВНОСТИ

Радомир БАЊАНАЦ, Александар ДРАГИЋ, Владимир УДОВИЧИЋ, Дејан ЈОКОВИЋ,
Димитрије МАЈЕТИЋ, Никола ВЕСЕЛИНОВИЋ,
Иван АНИЧИН

Институт за физику, Београд, Србија, banjanac@ipb.ac.rs

САДРЖАЈ

У реалним условима поређено је како варијација концентрације радона и варијација интензитета космичког зрачења утичу на симултану варијацију фона гама зрачења. Мерења су реализована у типичној надземној као и у нискофонској подземној лабораторији, а резултати потврђују значајну предност стабилности фона остварену у подземној лабораторији. Због могуће систематске грешке посебна пажња је неопходна приликом нискофонске гама спектрометрије НОРМ узорака радијума 226 услед интензивне дневне варијације концентрације радона у надземним лабораторијама.

1. Увод

Основни услов за реализацију мерења малих активности РА извора је довољно низак фон у области енергија од интереса. Време трајања фонских мерења требало би да буде и дуже од времена мерења узорака у зависности од потребне статистичке тачности предвиђених мерења. У пракси је мерење фона често много краће, реда трајања једног дана, и практикује се непосредно пре и на крају серије мерења узорака. Резултати мерења фона представљају само средње вредности фона што у принципу производи систематску грешку посебно код НОРМ узорака и у случају значајне временске варијације фона током мерења. Варијација фона у опсегу времена од неколико дана последица је дневне варијације концентрације радона и аperiodичних промена интензитета космичког зрачења.

Како је заједничка особина врло ретких, маловероватних, фундаменталних појава (као што је безнеутрински двоструки бета распад) и примењених мерења малих активности радиоактивних узорака управо техника мерења у условима ниског фона, и техничка решења за смањење фона су обострано примењива. Редукција интензитета космичких миона за фактор већи од милион неопходна је за реализацију најосетљивијих фундаменталних експеримената али је већ локација плитко укопаних подземних лабораторија (до око 50 метара воденог еквивалента - м.в.е) адекватна за довољно повећање осетљивости примењених мерења. Флукс космичких миона у плитким подземним лабораторијама је у односу на локације на површини редукован само неколико пута, али је довољно велики за статистички поуздану анализу ефеката којима миони генеришу нове компоненте фона. Како се гама зрачење најчешће користи као сигнатурно зрачење ретких процеса и мерења малих активности и пошто је германијумски (Ge) детектор најчешће коришћен спектрометар у студијама ових процеса, акценат се ставља на нискофонску Ge гама спектрометрију.

Концентрација радона се у комори за узорке најједноставније редукује гасовитим азотом који под надпритиском потискује радон одушком из Дјуарове посуде. Ефекат редуције често није довољан посебно ако је почетна средња концентрација радона у лабораторији реда 100 Bqm^{-3} и у ситуацији када се анализирају узорци са радијумом 226 преко интензитета пострадонских линија. Са друге стране проблем радона је додатно присутан у свим подземним лабораторијама у којима је нужна примена комплексног вентилационог система. Тај систем као резултат најчешће подразумева велики број измена целокупног ваздуха унутар лабораторије уз обавезно филтрирање улазног ваздуха.

Адекватна заштита Ге детектора од космичког зрачења се у надземним лабораторијама препоручује употребом вето детектора. Услед широке угаоне расподеле најпродорније врсте честица космичког зрачења на површини земље – миона, комплетна вето заштита обухвата неколико пластичних сцинтилатора који у горњој хемисфери окружују германијумски детектор заједно са његовом пасивном заштитом. Велики број вето детектора захтева комплекснији систем анализе па је компромис употреба само једног детектора довољно велике површине смештенос непосредно изнад пасивне заштите Ге детектора и који се антикоинцидентно повезује са Ге детектором.

Главни резултати мерења реализованих у Нискофонској подземној лабораторији Института за Физику у Београду су представљени у овом раду, док је детаљна анализа варијације фона гама зрачења у реалним условима дата у референци [1].

2. Опис експеримента и мерених ефеката

Надземна лабораторија (НЛ) и подземна (ПЛ, 25 м.в.е) лабораторија Института за Физику описане су детаљно у реф. [2], као и систем за дигиталну аквизицију података неопходан за анализу временских серија. Климатизована НЛ може се сматрати типичном надземном лабораторијом која испуњава нискофонске услове (<3 одброја у секунди у енергијском интервалу амбијенталног гама зрачења од 40keV до 3MeV). Услови ниског фона су посебно испуњени у ПЛ (<0.5 cps) у којој вентилациони систем обезбеђује ниску концентрацију радона (око 10 Bqm^{-3}) и у којој је површински флуks миона редукован око 4 пута, [3].

За симултано мерење интензитета космичких миона и фона гама зрачења су у НЛ коришћени пластични сцинтилатор (МП) димензија 50cm x 23cm x 5cm и германијумски детектор (МГе) релативне ефикасности 13% у вето конфигурацији. Слично, у ПЛ у истој конфигурацији коришћени су пластични сцинтилатор (ВП, 100 cm x 100cm x 5cm) и нискофонски Ге детектор (ВГе, 35%). Како су амплитуде периодичних варијација космичких миона реда неколико процената, [4], најчешће се њихов утицај на фон гама зрачења занемарује имајући у виду да се, са изузетком анихилационе линије, космичко зрачење у Ге детекторима детектује у континууму фона. Посебна пажња у мерењима је посвећена аperiodичним променама флуksа миона који су већих амплитуда и у којима доминирају 3 врсте ефеката. Први је реални Форбушов ефекат који настаје смањењем интензитета галактичког космичког зрачења (до 30%) услед заклањања планете Земље међупланетарним шоком или појавом соларног ветра. Након корекције измереног космичког зрачења на промену атмосферског притиска овај ефекат остаје евидентан. Карактерише га брзи пад и успорен пораст у односу на средњу вредност интензитета космичког зрачења у укупном трајању од 3 до 4 дана. Други ефекат који називамо “ефекат који личи на Форбушов” је релевантан за промену фона гама зрачења јер му је трајање упоредиво са трајањем реалног ефекта али је често у антикорелацији са променом притиска, па се након корекције на притисак ефекат промене интензитета космичких миона изгуби. У овом раду је приказана промена само за овај тип ефекта који је у пракси најчешћи. Најређи, али и ефекат са највећом амплитудом промене (повећања) интензитета космичког зрачења је тзв. ефекат “повећања на нивоу земље” (енгл. *Ground Level Enhancement*).

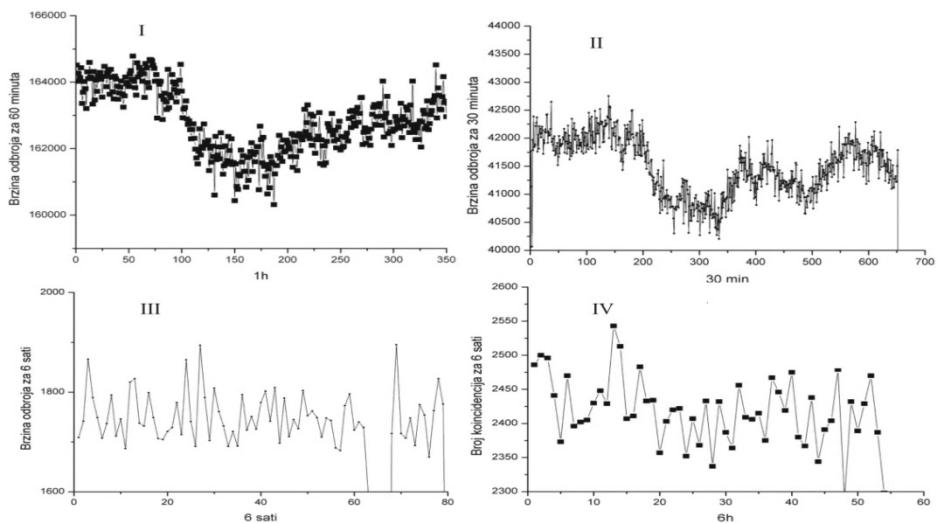
Мониторинг радона реализован је радонмонитором РМ, силицијумском диодом као детектором алфа честица, који истовремено мери амбијенталне параметре - температуру, релативну влажност и атмосферски притисак. Сам уређај РМ смештен је унутар коморе за узорке (КУ) у непосредној близини Ге детектора и као и сам Ге детектор оклопљен је оловном пасивном заштитом. Амплитуде дневне варијације концентрације радона у зависности од промена атмосферских параметара могу бити веома велике, а сам радон се у фону гама зрачења идентификује преко многобројних и јасно издвојених пострадонских линија.

За анализу спектра из Ге детектора коришћена су два брза АДЦ-а (С.А.Е.Н, тип N1728В) који узоркују на 10ns у 2^{14} канала. За анализу С.А.Е.Н података развијен је програм са могућношћу

избора времена интеграције у анализи временских серија фонских мерења која су сагласна времену мерења радон монитора.

3. Резултати мерења

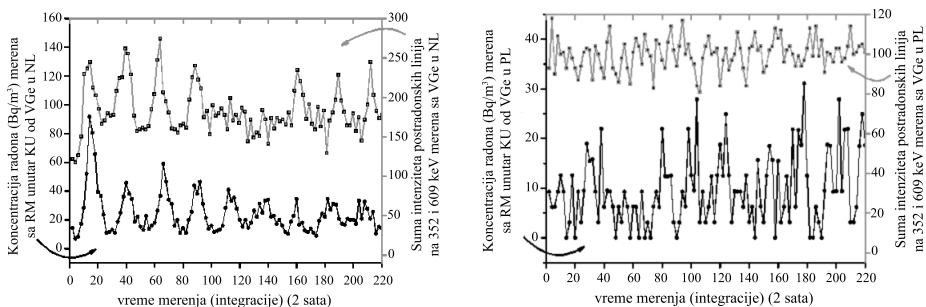
Типичан “ефекат који личи на Форбушов” регистрован је пластичним сцинтилаторима ВП и МП, док је коинцидентни спектар одговарајућих сцинтилатора и Ге детектора сниман интегрално. Снимљени спектри приказани су на слици 1.



Слика 1. “Ефекат који личи на Форбушов” измерен сцинтилаторима (ВП-I и МП-II) и Ге детекторима (ВГе-III и МГе-IV) у ПЛ (I и III) и НЛ (II и IV).

Приказани ефекат се сматра типичним пошто је смањење интензитета космичког зрачења релативно мало (око 4% у НЛ и око 2.5% у ПЛ), али је ефекат релативно чест. Ефекат, иако мали по интензитету, слика 1.IV, производи симултану промену у интегралном фону чак и у малоефикасном Ге детектору у НЛ. Може се закључити да би сваки германијумски детектор смештен у типичну надземну лабораторију осетио интегралну промену фона. Једини поуздан начин корекције промене фона на промену интензитета космичког зрачења јесте обавезна вето заштита Ге детектора пластичним сцинтилаторима који у антикоинцидентном режиму мерења додатно редукују фон.

Дневна промена концентрације радона јасно се види у пострадонским линијама Ге детектора у НЛ. Како је МГе мале релативне ефикасности, слика 2 приказује коинцидентне дневне варијације радона и суме две најинтензивније пострадонске линије МГе детектора мерене у НЛ. Ефекат дневне варијације радона и последично пострадонских линија у фону је занемарив у ПЛ што је за разлику од типичне НЛ чини адекватнијим амбијентом за нискофонска мерења НОРМ узорака радијума 226 у којима велике дневне варијације радона доприносе значајном систематском грешком мерења таквих узорака.



Слика 2. Дневна варијација концентрације радона и истовремено мерене суме пострадонских линија у НЛ (лево) и ПЛ (десно)

4. Литература

- [1] Р. Бањанац, “Временски променљиве компоненте фона у нискофонској подземној лабораторији”, докторска дисертација, Физички факултет Универзитета у Београду (2011), <http://cosmic.ipb.ac.rs/repository.html>
- [2] А. Драгић *et al.*, The new set-up in the Belgrade low-level and cosmic-ray laboratory. *Nucl. Techn. & Radiat. Protect.*, 26, No. 3, (2011) 181-192
- [3] А. Драгић *et al.*, Measurement of cosmic ray muon flux in the Belgrade ground level and underground laboratories. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Reas. A.*, 591, (2008) 470-475
- [4] А. Драгић *et al.*, Comparative study of power spectra of ground and shallow underground muon data. *Int. J. Mod. Phys. A* 20, (2005) 6953-6955
- [5] В. Удовичић *et al.*, *Radiat. Prot. Dosimetry* 145 (2-3) (2011) 155-158

TIME VARIABLE COMPONENTS OF GAMMA-RAY BACKGROUND AND MEASUREMENT OF LOW-ACTIVITY SAMPLES

**Radomir BANJANAC, Aleksandar DRAGIĆ, Vladimir UDOVIČIĆ,
Dejan JOKOVIĆ, Dimitrije MALETIĆ, Nikola VESELINOVIĆ, Ivan ANIČIN**
Institute of Physics, Belgrade, Serbia, banjanac@ipb.ac.rs

ABSTRACT

Influence of radon concentration and cosmic-rays variations on the simultaneous variation of gamma radiation background was compared in real conditions. Measurements were carried out in a typical ground and low-level underground laboratories and the results confirm the significant advantage of background stability achieved in the underground laboratory. Because of possible systematic errors, special attention is needed in low-level gamma spectrometry of NORM samples with radium 226 because of the intense diurnal variation of radon concentration in the aboveground laboratories.

КОМПОЗИЦИЈА НИСКОЕНЕРГИЈСКОГ ДЕЛА ФОНСКОГ СПЕКТРА ГАМА ЗРАЧЕЊА У НАДЗЕМНОЈ И ПОДЗЕМНОЈ НИСКОФОНСКОЈ ЛАБОРАТОРИЈИ

Радомир БАЊАНАЦ, Александар ДРАГИЋ, Владимир УДОВИЧИЋ, Дејан ЈОКОВИЋ, Димитрије МАЈЕТИЋ, Никола ВЕСЕЛИНОВИЋ, Иван АНИЧИН
Институт за физику, Београд, Србија, banjanac@ipb.ac.rs

САДРЖАЈ

Апсорпционим мерењима у површинској и подземној лабораторији је утврђено да највећи део континуума у фонским спектрима незаштићених германијумских детектора потиче од зрачења континуираног спектра која пристижу из горње хемисфере. Интеграли тог континуума дају у површинској лабораторији флуке од око 8000 фотона/($m^2 \cdot s \cdot 2\pi \text{srad}$), а у подземној око 5000 фотона/($m^2 \cdot s \cdot 2\pi \text{srad}$), средњих енергија око 150 keV, што по грубим проценама у површинским ткивима производи дозе од око 1.5 nSv/h и 1 nSv/h, респективно. Симулације одговарајућих експерименталних ситуација пакетима GEANT4 и CORSIKA показују да је ово расејано и деградирано зрачење двојаког порекла – космичког и терестријалног.

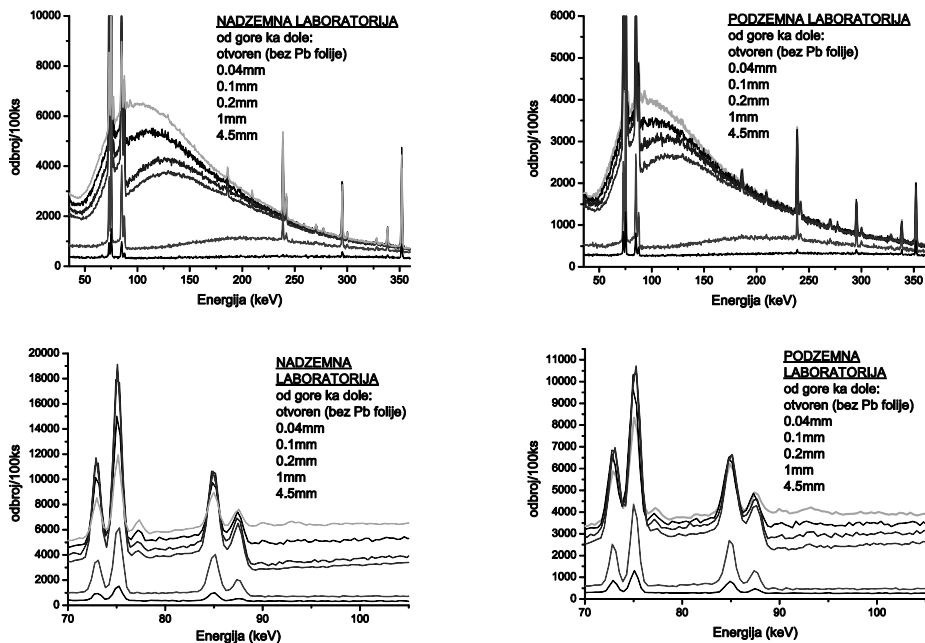
1. Увод и кратак опис експеримента

Уобичајена поставка нискофонских мерења са германијумским детектором подразумева употребу пасивне заштите којом се у средњем фон редукује око 100 пута. У циљу испитивања композиције нискоенергијског дела фонског спектра коришћен је Ге детектор без потпуне оловне заштите. Познато је да фонски спектри незаштићених германијумских детектора потичу првенствено од гама зрачења дискретних енергија из природних радиоактивности присутних у околини и од космичког зрачења. Такође, гама зрачење дискретних енергија одговорно је за линијску компоненту фонског спектра, али и за његов континуум, који је сачињен од комптонских расподела гама зрачења дискретних енергија које је избегло потпуну детекцију. Миони космичког порекла производе континуирани спектар губитака енергије који има максимум интензитета на високим енергијама, реда десетина MeV, док мека компонента деградираним енергијама високоенергијских фотона и електрона свакако производи изванредан континуум. Све ово резултује у инструменталним фонским спектрима у којима је доминантна компонента, која носи и далеко највећи део инструменталног интензитета, континуирани спектар са изразитим максимумом, у зависности од величине детектора, у близини 100 keV. У овом раду је апсорпционим мерењима испитивано фонско зрачење које долази из горње хемисфере, које се може сматрати извором овог континуираног спектра, са циљем одређивања интензитета, природе и порекла тог зрачења.

Апсорпциона мерења су вршена радијационо чистим германијумским детектором релативне ефикасности 35% у магнезијумском кућишту, потпуно заштићеним оловом од зрачења која долазе из доње хемисфере, а потпуно отвореним за она из горње хемисфере. Идентична мерења су реализована како у површинској лабораторији тако и у подземној на 25 метара воденог еквивалента (м.в.е.), употребом оловних фолија различитих дебљина које су блокирале пут зрачењима из горње хемисфере.

2. Резултати мерења и дискусија

Мерења су вршена са оловним фолијама у 10 различитих дебљина, али су због јасноће разликовања овде приказани само фонски спектри са дебљинама 4.5мм, 1мм, 0.2мм, 0.1мм и 0.04мм, као и спектри без апсорбера, у два опсега енергија, слика 1.



Слика 1. Фонски спектри Ге детектора отвореног према горњој хемисфери, и са различитим дебљинама оловних апсорбера, у површинској лабораторији (лево) и у подземној лабораторији на 25 м.в.е. (десно).

Већ визуелна инспекција апсорпционих спектра са слике омогућава неколико занимљивих квалитативних закључака:

1). Велика је сличност између ових спектра на површини и у подземљу, при чему је интегрални интензитет континуума у подземљу око 1.75 пута мањи. Истовремено, интензитет космичких миона је у подземљу мањи око 3.5 пута, [1],

2) Са повећањем дебљине апсорбера долази до померања максимума интензитета континуума ка вишим енергијама, што је типична карактеристика континуираних спектра, позната као “отврдњавање спектра”,

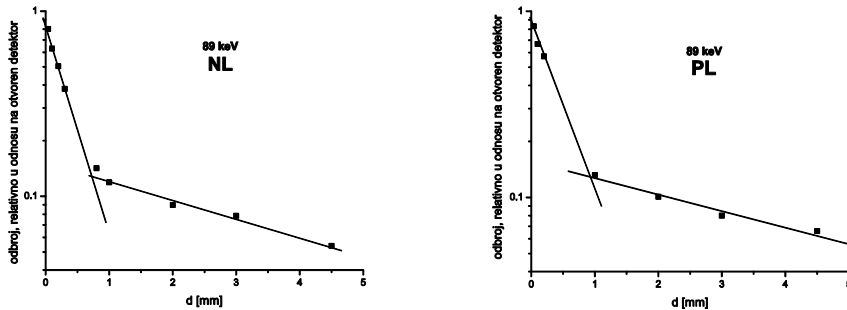
3) Дисконтинуитет у апсорпционим спектрима на енергији K_{β} X-зрака олова (88 keV) одражава чињеницу да је инструментални континуирани спектар највећим делом истовремено и стварни спектар долазећих зрачења, а да није последица непотпуне детекције зрачења дискретних енергија,

4) Почетни пораст интензитета флуоресцентног X-зрачења олова са порастом дебљине апсорбера такође указује да се долазеће зрачење апсорбује фотоэффектом, те да је стварни спектар тог зрачења идентичан са инструменталним спектром, и да је то тако бар до енергија реда 200 keV, докле још фотоапсорпција доминира у односу на комптоново расејање,

5) Извесне разлике у карактеру апсорпције на површини и у подземљу су последица нужно различите композиције зрачења и његове различите угаоне расподеле на те две локације.

Ови квалитативни закључци су потврђени квантитативном анализом апсорпционих кривих за енергије у различитим областима континуума. На слици 2 су као илустрација приказане

апсорпционе криве за одброј у каналу у континууму који одговара енергији од 89 keV (енергије најближе апсорпционој ивици).



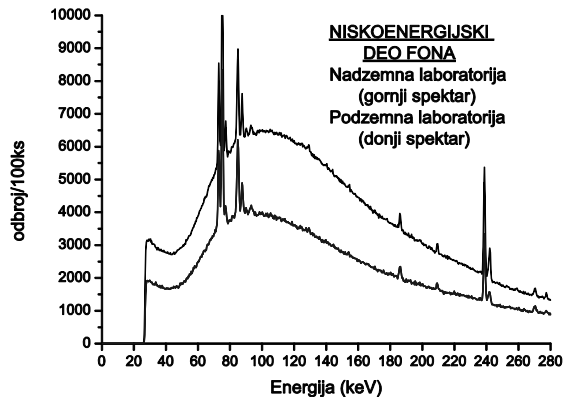
Слика 2. Апсорпционе криве за одброј у континууму који одговара енергији од 89 keV, у надземној лабораторији (лево) и подземној лабораторији (десно).

На слици су уочљиве две компоненте потпуно различитих апсорпционих особина – мање продорна која по апсорпционим особинама добро одговара енергији од 89 keV (стрма права), и друга знатно продорнија али и знатно мањег интензитета, која по апсорпционом коефицијенту одговара енергији од око 500 keV. Ова прва компонента очигледно представља зрачење континуираног спектра, истих енергија на којима се оно и појављује у инструменталном спектру, док ова друга представља комптонске расподеле од зрачења виших енергија које се апсорбују као јединствено зрачење средње енергије око 500 keV. Са слика се такође види да нискоенергијска компонента континуираног спектра бива практично апсорбована већ дебелином од око 1 мм олова, те да одузимање спектра зрачења које пролази кроз апсорбер те дебелине (видети слику 1) од спектра потпуно отвореног детектора оставља практично чист спектар зрачења континуираног спектра, онако како га види дати детектор. Такви спектри су приказани на слици 3.

Интеграли тих спектара, грубо кориговани на детекциону ефикасност, дају за флуксеове овог зрачења континуираног спектра које долази из горње хемисфере и има средњу енергију око 150 keV, вредности од око 8000 фотона/(m² s 2πsrad) на површини и око 5000 фотона/(m² s 2πsrad) у подземној лабораторији.

Претпоставка да је овакво зрачење по својим јонизационим особинама слично зрачењу Co-57 доводи до грубе процене за дозе које оно саопштава површинским ткивима, од око 1.5nSv/h на површини и око 1nSv/h у подземљу.

Експерименталне ситуације које резултују оваквим фонским спектрима детаљно су симулиране програмским пакетима GEANT4 и CORSIKA. Закључено је да је то зрачење континуираног спектра двојаког порекла – једним делом оно представља расејано и деградирано зрачење електромагнетне компоненте космичког зрачења, док другим делом представља од целокупне околине расејано зрачење терестријалног порекла, често познатог под називом “skyshine radiation”, [2]. И поред велике сличности збирног спектра на обе локације, јасно је да је релативни удео ове две компоненте веома различит на две испитиване локације, и тај релативни удео још треба одредити.



Слика 3. Чисти инструментални спектри фонског зрачења континуираног спектра које долази из горње хемисфере, у површинској лабораторији (горњи) и у подземној лабораторији на 25 м.в.е. (доњи). Интегралне брзине бројања у њима су око 21 и 12 cps, респективно.

3. Литература

- [1] А Драгић *et al.*, Measurement of cosmic ray muon flux in the Belgrade ground level and underground laboratories. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Reas. A.*, 591, (2008) 470-475
- [2] Swarup J. *Nucl. Instr. and Meth.* **172** (1980) 559-566

COMPOSITION OF LOW-ENERGY PART OF GAMMA-RAY BACKGROUND SPECTRUM IN THE GROUND AND UNDERGROUND LOW-LEVEL LABORATORIES

**Radomir BANJANAC, Aleksandar DRAGIĆ, Vladimir UDOVIČIĆ,
Dejan JOKOVIĆ, Dimitrije MALETIĆ, Nikola VESELINOVIĆ, Ivan ANIČIN**
Institute of Physics, Belgrade, Serbia, banjanac@ipb.ac.rs

ABSTRACT

The background spectrum of a germanium detector, shielded from the radiations arriving from the lower and open for the radiations arriving from the upper hemisphere, is studied by means of absorption measurements, both in a ground level and in an underground laboratory. It is established that the continuous portion of this background spectrum is of very similar shape at the two locations, and that it is mostly due to the radiations that arrive from the upper hemisphere, with the continuous spectrum that is similar to the instrumental one. The intensity of this radiation of an average energy about 150 keV is estimated to about 8000 photons/(m² s 2πsrad) in the ground level laboratory, and to about 5000 photons/(m² s 2πsrad) in the underground laboratory at the depth of 25 m.w.e. Rough estimates of the dose that it contributes to the skin are about 1.5 nSv/h and 1 nSv/h respectively. Simulations by Geant4 and CORSIKA demonstrate that this radiation is both of cosmic and of terrestrial origin.

PROVERA MODULA ZA ATMOSFERSKU DIFUZIJU RADIONUKLIDA KROZ GRANIČNI SLOJ ATMOSFERE U MODELU NFS_Vinca

Zoran GRŠIĆ¹, Predrag MILUTINOVIĆ², Snežana PAVLOVIĆ¹, Dalibor ARBUTINA² Dragan DRAMLJIĆ², Stefan DRAMLJIĆ², Jelica KALJEVIĆ³, Dušan JOKSIMOVIĆ⁴

- 1) JPNuklearni objekti Srbije, Vinča, Srbija, grsa@vinca.rs
- 2) Univerzitet u Beogradu, Institut za fiziku, Zemun-Beograd, Srbija
- 3) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“
- 4) Megatrend Univerzitet, Beograd, Srbija

SADRŽAJ

Najčešće korišćen model za procenu uticaja na životnu sredinu, emisije zagađujućih materija u granični sloj atmosfere iz tačkastih izvora, je Gausov pravolinijski model dimnme perjanice. U radu su prikazani rezultati provere ovog modela, u JP Nuklearni objekti Srbije, na osnovu podataka o emisiji radionuklida ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁶⁰Co i ¹⁵⁴Eu, podataka o fizičkim karakteristikama izvora, karakteristikama zagađujuće materije i zadatim meteorološkim uslovima, koje je dostavila IAEA u okviru DeSa projekta. Difuzioni model je proveren i sa eksperimentalnim podacima termoelektrane Šoštanj iz Slovenije sa odgovarajućim setom ulaznih podataka. Bolje slaganje rezultata dobijeno je za idealne ulazne podatke IAEA, a sa eksperimentalnim podacima za termoelektranu Šoštanj, dobijeno je uslovno dobro slaganje, jer se radi o kompleksnom terenu sa orografijom.

1. Uvod

Kada se kaže da postoji veliki broj matematičkih modela, koji se koriste za procenu rasprostiranja zagađujućih materija kroz granični sloj atmosfere, podrazumevaju se kompjuterski kodovi matematičkih modela koji imaju veliki broj raznih modula sve do koncentracija u vazduhu, suve i mokre depozicije i kada je u pitanju rasprostiranje radionuklida do doza, kojima se kvantifikuje uticaj na okolinu i stanovništvo.

U praktičnim primenama koristi se, međutim, relativno mali broj matematičkih modela atmosferske difuzije, od kompleksnih, koji se zasnivaju na teoriji sličnosti graničnog sloja atmosfere, na kontinualnom prikazu turbulencije i koeficijena disperzije u graničnom sloju atmosfere, u čijoj su osnovi sistemi parcijalnih diferencijalnih jednačina mehanike fluida i numerčke metode za njihovo rešavanje, do jednostavnih, koji u svojoj osnovi imaju matematičke modele atmosferske difuzije/algebarske jednačine, zasnovane na K-teoriji i Gausovom modelu atmosferske difuzije sa diskretnim setom disperzionih koeficijena.

Situacija se komplikuje kada se sa kontinualnih izvora pređe na kratkotrajne-akcidentalne emisije, kada se prelazi na tzv. lagrangeovski pristup modeliranja atmosferske difuzije. U oba slučaja, i kompleksnih i jednostavnih matematičkih modela-kodova, očekuje se da su sprovedene verifikacija i validacija, odnosno da su sprovedeni postupci na osnovu kojih se može odrediti koliko verno i precizno modeli predstavljaju realan sistem.

U praksi ovi postupci se sprovode upoređivanjem rezultata dobijenih matematičkim modelima sa rezultatima fizičkih eksperimenata u prirodi sa traserima. Ovo je prilično skup i tehnički komplikovan postupak, pa se provere matematičkih modela češće rade poređenjem sa rezultatima drugih modela koji su prošli ovu proveru.

2. Gausov pravolinijski model dimne perjanice

U skladu sa molekularnom teorijom o transportu količine kretanja ili bilo koje druge odgovarajuće veličine, korišćenjem virtuelnih koeficijenata viskoznosti, provodljivosti i difuzije, razvijene su teorije turbulencije koje su zasnovane na koeficijentima difuzije ili koeficijentima turbulentne razmene. Osnovu ovih teorija predstavlja Fickova jednačina difuzije:

$$\frac{d\bar{c}}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_i \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

Uz pretpostavku da su koeficijenti difuzije K_i konstantni i uz definisanje Gausovih parametara:

$$\sigma_y = \sqrt{2K_y \frac{x}{u}} \quad \sigma_z = \sqrt{2K_z \frac{x}{u}} \quad (2)$$

dobija se rešenje difuzione jednačine za srednje koncentracije, u dobro poznatom obliku Gausovog modela dimne perjanice. Obzirom da se na osnovu navedenog, Gausov model zasniva na fizičkoj teoriji atmosferske difuzije, preporučuje se kao validan, jer uz određene uslove na zadovoljavajući način reprezentuje realan sistem.

Verifikacija modela pri tome se svodi na proveru grešaka u kompjuterskom kodu koji je napisan u nekom programskom jeziku.

Konačna provera, validacija i verifikacija modela, dobija se numeričkim i eksperimentalnim proverama prostorno vremenske raspodele koncentracije, koji se dobijaju matematičkim modelom za zadate fizičke karakteristike izvora (kao što su njegove dimenzije, dijametar svetlog otvora, nadmorska visina baze izvora, temperatura i vertikalna brzina ispusta u atmosferu, jačina izvora), zatim za zadate meteorološke uslove, karakteristike tla na računskom domenu i za fizičko hemijske karakteristike posmatranog efluenta.

3. Rezultati provere matematičkog modela atmosferske difuzije NFS_Vinca

U okviru projekta IAEA, DeSa [1], matematički model za procenu rasprostiranja kroz granični sloj atmosfere u okolini nuklearnog objekta, koji se koristi u JP Nuklearni objekti Srbije pod radnim nazivom NFS_Vinca, proveren je uz zadatu emisiju radionuklida iz izvora visine 15m.

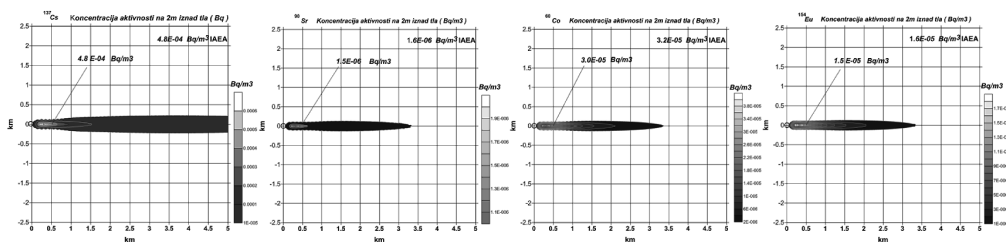
Tabela 1. Jačina izvora po radionuklidu (brzina emisije)

	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	⁶⁰ Co	¹⁵⁴ Eu	
Jačina izvora	0.95	0.003	0.06	0.03	Bqs ⁻¹

Od meteoroloških uslova zadata je brzina vetra 2ms⁻¹ iz smera 270° u skladu sa konvencijom o smeru vetra u meteorologiji, a kontrolna tačka je na rastojanju 500m niz vetar od izvora na visini 2m iznad tla, pri klasi stabilnosti F.

Tabela 2. Koncentracija aktivnosti na 2m iznad tla po radionuklidu

	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	⁶⁰ Co	¹⁵⁴ Eu	
Modelirano	4,8E-04	1,5E-06	3,0E-05	1,5E-05	Bq/m ³
IAEA	4,8E-04	1,6E-06	3,2E-05	1,6E-05	Bq/m ³



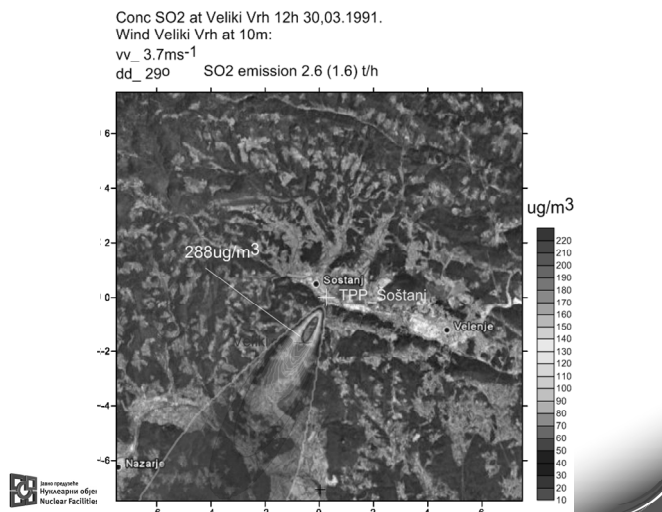
Slika 1. Polje koncentracija aktivnosti na 2m iznad tla po radionuklidu

Dobijene vrednosti primenom modela NFS_Vinca, malo se razlikuju od kontrolnih vrednosti IAEA. Provera modula za atmosfersku disperziju u modelu NFS_Vinca, urađena je i sa eksperimentalnim podacima koje su pripremili saradnici firme MEIS iz Ljubljane. Posmatrani izvor je dimnjak visine 100m u termoelektrani Šoštanj, koji emituje SO₂, a podaci o emisiji osvežavani su na 30 min. Ostali podaci korišćeni za proveru modela, sa istim vremenskim korakom osvežavanja podataka, su vertikalni profili meteoroloških veličina prikupljeni akustičkim radarom (SODAR) do visine 500m (brzina i pravac vetra i temperatura vazduha) i podaci sa 6 automatskih meteoroloških stanica oko termoelektrane Šoštanj. 3D orografija terena na računskom domenu 30km X 30km data je u digitalnom obliku. Na svim stanicama gde su se merili meteorološki podaci, merile su se i koncentracije SO₂, koji je u ovom eksperimentu predstavljao traser za proveru modela.

Izdvojen je datum kada su koncentracije u jednoj kontrolnoj tački (Veliki Vrh) pokazivale visoku vrednost 288 µg/m³. Variranjem klasa stabilnosti, dobija se da se vrednost u kontrolnoj tački u izabranom terminu desila pri klasi stabilnosti A (nestabilna atmosfera) i pri emisiji od 2.6 t/h SO₂, Sl.2. Izmerena emisija SO₂ iznosila je međutim 1.6 t/h. Umesto pravca vetra izmerenog sodarom na lokaciji TE Šoštanj, uzet je pravac vetra izmeren automatskom meteorološkom stanicom na lokaciji Veliki Vrh pa su potrebne dodatne analize i ove epizode sa visokim koncentracijama, ali i za druge termine iz eksperimenta u TE Šoštanja. Ove provere su u toku u okviru četvorogodišnjeg projekta Modelling and Data for Radiological Impact Assessments Programme, MODARIA. (IAEA).

4. Zaključak

Proverom pravolinijskog Gausovog modela atmosferske difuzije na osnovu zadatih ulaznih podataka i koncentracija aktivnosti radionuklida u kontrolnoj tački, na ravnom terenu, dobija se dobro slaganje modeliranih vrednosti koncentracija (NFS_Vinca) i kontrolnih (IAEA). U realnom eksperimentu sa emisijom SO₂ iz dimnjaka termoelektrane Šoštanj u Sloveniji dobijeno je uslovno dobro slaganje modeliranih i izmerenih koncentracija. Radi se o terenu sa kompleksnom orografijom koja utiče na polje strujanja vazduha, sa druge strane iz podataka sa meteoroloških stanica i sa akustičkog radara nije se mogla dobiti stabilnost atmosfere. Zbog razlike u izmerenoj jačini izvora SO₂ od 1.6t/h i jačini izvora od 2.6 t/h sa kojom se dobija dobro slaganje vrednosti koncentracija u kontrolnoj tački Veliki Vrh potrebne su dodatne provere modela sa eksperimentalnim podacima.



Slika 2. Polje koncentracija SO₂ u terminu sa visokim koncentracijama na mernom mestu Veliki Vrh

5. Literatura

- [1] IAEA (2007): Safety Assessment for Decommissioning of a Research Reactor, (*Test case B of the DeSa Project*), (Draft 3.0), IAEA SAFETY REPORT SERIES, IAEA (2007)
- [2] IAEA (2013): Safety Assessment for Decommissioning, No.77, AnnexI, Part B Safety Assessment for Decommissioning of a Research Reactor IAEA SAFETY REPORTS SERIES, IAEA (2013)

VERIFICATION OF MODULE FOR ATMOSPHERIC DIFFUSION OF RADIONUCLIDES THROUGH BOUNDARY LAYER OF THE ATMOSPHERE IN THE MODEL NFS_VINCA

Zoran GRŠIĆ¹, Predrag MILUTINOVIĆ², Snežana PAVLOVIĆ¹, Dalibor ARBUTINA², Dragan DRAMLJIĆ², Stefan DRAMLJIĆ², Jelica KALJEVIĆ³, Dušan JOKSIMOVIĆ³

1) Nuclear Facilities of Serbia, Vinca, Serbia, grsa@vinca.rs

2) University of Belgrade, Institute of Physics, Zemun- Belgrade, Serbia

3) University of Belgrade, Institute of Nuclear Sciences "Vinca", Belgrade, Serbia

4) Megatrend University, Belgrade, Serbia

ABSTRACT

This paper presents the results of the verification of the Gaussian straight line plume dispersion model, in PC Nuclear facilities of Serbia, based on data on the emission of radionuclides ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁶⁰Co and ¹⁵⁴Eu, provided by the IAEA within DeSa project. Diffusion model is also validated with experimental data of thermal power plant Sostanj from Slovenia with the appropriate set of input data. Better agreement between results was obtained for the ideal IAEA input data than for the experimental data for the thermal power plant Sostanj, due to a complex terrain with orography in this case.

НАЦИОНАЛНИ ПРОГРАМ ЗА РАДОН, РЕГУЛАТИВА И СТРАТЕГИЈА

Предавање по позиву

Владимир УДОВИЧИЋ

Институт за физику, Универзитет у Београду, Београд, Србија, udovicic@ipb.ac.rs

САДРЖАЈ

Проблематици радона се у Србији до сада није прилазило на систематски и организовани начин. Тренутно се тематски радоном бави више истраживачких група и институција што чини добру основу да се сва та активност обједини у један свеобухватан национални програм којим би се дефинисали стратешки циљеви и акциони план за следећих неколико година. У сваком случају, у оквиру приступања Србије ЕУ хармонизација у области заштите од јонизујућих зрачења ће бити један од задатака који морамо обавити, а у томе радон представља један важан део. У овом раду, дефинише се хијерархија стратешких циљева везаних за радон, а на основу SWOT анализе утврђује се акциони план који даје временске оквири за поједине активности које треба спровести у наредних неколико година са основним задатком добијања националног програма за радон.

1. Увод

Радон је јединствен елемент у природи. Откривен је 1900. године [1], и припада групи инертних гасова, што значи да тешко ступа у хемијске везе са другим елементима, а као гас, јако је продоран и има особину да се нагомилава у затвореним просторијама. Изнад свега, ради се о радиоактивном гасу и самим тим представља фактор који има штетан утицај на здравље становништва. Радон настаје као продукт у природном радиоактивном низу ^{238}U у земљишту и релативно лако доспева до површине земље а затим продире у стамбене објекте. Такође, налази се у грађевинском материјалу па самим тим на тај начин доспева у затворене, боравишне или радне просторије. У укупној средњој ефективној годишњој дози коју становништво прими од свих извора природне радиоактивности, радон чини готово 50%.

Штетно дејство радона је доказано у великом броју епидемиолошких студија тако да је Светска здравствена организација радон класификовала као IARC (46) карциноген који припада Групи 1, други по значају узрочник добијања рака плућа [2]. Поред тога, радон је уврштен у ред главних загађивача ваздуха у затвореним просторијама [3]. Досадашња сазнања о механизмима по којима радон штетно утиче на здравље човека огледају се пре свега у штетном, радиоактивном дејству радонових потомака. Наиме, радонови потомци се закаче за честице аеросола из ваздуха и такве радиоактивне честице улазе у организам путем удисања. Овакви радиоактивни аеросоли таложу се у плућима, емитујући алфа зрачење. Штетна делатност се огледа у поремећајима ћелијске структуре ДНК, изазивајући развој канцерогених ћелија. Због свега тога, проблему радона се приступа озбиљно и у великом броју земаља (пре свега ЕУ држава) постоје национални програми радона који у основи имају мултидисциплинарни карактер и захтевају ангажман великог броја стручњака, од истраживача који се баве радијационом физиком, хемијом, биологијом до специјалиста из разних области медицине.

У овом раду дефинише се мисија, визија и хијерархија стратешких циљева везаних за радон. Полазећи од овога, на почетку је дата кратка SWOT анализа стања у проблематици радона у Србији данас, и из ње се изводи списак конкретних и краткорочних, тактичких циљева који представљају предлог првих корака у спровођењу националног акционог плана или мапе пута који треба спровести у наредних неколико година.

2. SWOT анализа стања у проблематици радона у Србији

Унутрашње предности: У Србији до данас није постојао систематски приступ проблематици радона. У том смислу, постојале су појединачне иницијативе и активности истраживача (Београд, Нови Сад, Крагујевац). Тренутно се у Србији, посредно или непосредно, радоном бави неколико истраживачких група.

Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Департман за физику, Катедра за нуклеарну физику, Нови Сад: Мапирање радона за територију Војводине, дуготрајна и краткотрајна мерења концентрације радона у земљишту, води и ваздуху коришћењем пасивних уређаја, угљених канистара уз гама спектрометријску анализу и активног уређаја RAD7, екскхалација и дифузија радона.

Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке Винча, Београд: Мапирање радона и торона у целој југо-источној Србији, Косову и Метохији и деловима западне Србије пасивним уређајима, електро-хемијско нагрizaње траг детектора у специјално дизајнираној и изграђеној лабораторији, кампање мерења у школама и кућама у Сокобањи и тестирање ONION модела репрезентативности школа у односу на куће, интензивна међународна сарадња.

Универзитет у Београду, Институт за физику Београд: Мониторинг радона у подземној нискофонској лабораторији, пасивним и активним уређајима, мерења ниских концентрација радона, интеркомпаративна мерења ниских концентрација радона, лабораторија за хемијско нагрizaње траг детектора и аутоматско бројање трагова оптичким микроскопом, мапирање радона, моделирање понашања радона у затвореним просторијама, мерење флукса радона.

Институт за медицину рада Србије „Др Драгомир Карајовић“, Центар за радиолошку заштиту, Београд: Мерење концентрације радона угљеним канистрима уз гама спектрометријску анализу, мониторинг радона у школама и вртићима на територији града Београда у периоду 1997.-2008. година и кампања мерења у школама и вртићима у Београду 2010. године.

Универзитет у Крагујевцу, Природно-математички факултет Крагујевац, Институт за физику: Мерења концентрације радона пасивним уређајима уз хемијско третирање траг детектора и аутоматско скенирање развијених детектора, моделирање понашања радона у затвореним просторијама, дозиметријско моделовање ефеката које инхалација радона и његових потомака праве у плућима.

Од јануара 2011., у оквиру два национална интегрално интердисциплинарна истраживачка пројекта 43002: Биосенсинг технологије и глобални систем за континуирана истраживања и интегрисано управљање екосистемима, и 41028: Интегрална студија идентификације регионалних генетских фактора ризика и фактора ризика животне средине за масовне незаразне болести хумане популације у Србији, кроз одређене пројектне задатке дефинишу се елементи националног програма радона и на тај начин се овој проблематици прилази на систематски начин.

Унутрашње слабости: Нажалост, услед кризе у финансирању националних пројеката, горе поменути пројекти нису оствариви, другим речима велики посао израде мапе радонског ризика у Србији чека неки другачији и одржив организациони оквир. Једно од могућих решења биће понуђено у овом раду у оквиру одељка о Националном програму за радон. Поред израде мапе радонског ризика као полазне тачке у изради националног програма постоји читав низ мера и активности који укључује рад великог броја државних Агенција, институција који се баве науком, здравством, заштитом животне средине, укључивање медија са јасно дефинисаном медијском стратегијом, вођење кампања о штетности радона које је најбоље водити уз већ постојеће кампање борбе против пушења или борбе против рака плућа. Да би покрили све те активности, неопходно је окупити све заинтересоване субјекте и уз заједнички рад доћи до дефинисања националног акционог плана за радон.

Спољне могућности: У оквиру ЕУ простора покренута је EARST (**European Association of Radon Scientists and Technologists**, <http://earst.eu/>) иницијатива. Замишљена је по узору на сличну америчку асоцијацију (**The American Association of Radon Scientists and Technologists**,

<http://www.aarst.org/>). Крајем маја 2013. године одржана је оснивачка скупштина и практично основана европска радонска асоцијација која је и добила такав назив: European Radon Association. Предвиђено је да се сваке године одржава конференција ове асоцијације, па би активно учешће наших радонских стручњака било од вишеструке користи. Такође, сваке године се одржавају научни скупови посвећени проблематици радона што додатно пружа шансу за интензивирање међународне сарадње. Посебан значај могу имати различити билатерални пројекти, поготово ако се ради о земљама из региона.

Спољни ризици: Светска економска криза утиче на смањење улагања у програме везане за радон, па је и у развијеним земљама све теже имплементирати препоруке IAEA [4] или WHO [2], [3]. У региону западног Балкана је још тежа ситуација, и заправо у свим суседним државама, релативно мали број људи се бави проблематиком радона. Непостоје довољни ни људски ресурси ни финансијска средства неопходна за дефинисање националног програма за радон. Уједно, то пружа и шансу за боље повезивање и размену искустава која би допринела јачању сопствених капацитета у тој области.

3. Национални програм за радон

Мапа радонског ризика: У основи сваког националног програма радона јесте добијање мапе радонског ризика. Колики то има значај показује и велики број међународних пројеката са датом темом. Тренутно су актуелни пројекти у оквиру ЕУ истраживачког простора, коме и Србија равноправно припада: Израда великог атласа природне радиоактивности Европе (<http://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/Index.aspx>), и специфично везано за радон – РАДПАР Радон Превенција и Ремедијација (<http://web.jrc.ec.europa.eu/radpar/index.cfm>).

У циљу стандардизације и синхронизације израде радонских мапа у Европи, 2005. године је настао пројекат чији је носилац група за Радиоактивни мониторинг животне средине (**Radioactivity Environmental Monitoring**) у Институту за трансуранијумске елементе (**Institute for Transuranium Elements**) у оквиру Обједињеног истраживачког центра (**Joint Research Centre-JRC**), Испра, Италија. Какви су захтеви постављени према изради радонске мапе? Територија Европе је подељена у мрежу чија појединачна ћелија има димензије 10км × 10км. У оквиру једне ћелије потребно је имати минимално 5±2 мерних места. Након добијања резултата, узима се аритметичка средина података усредњених по броју мерних места по једној ћелији. Такође је важно истаћи да позиција детектора мора бити у приземним просторијама у оквиру стамбеног објекта. У циљу добијања радонске мапе дате територије користе се искључиво пасивни уређаји, јер је могуће истовремено постављање великог броја детектора на великим површинама. Таква мерења, по дефиницији трају дуго и то углавном 12 месеци, уз замену детектора на шест месеци како би се уочиле сезонске варијације у концентрацији радона у затвореним просторијама. Ова врста детектора је заснована на детекцији радона помоћу чврстих траг детектора. Експонирање ове врсте детектора траје неколико месеци (најчешће, три или шест), након чега се детектори хемијски третирају по датој рецептури и врши читавање броја трагова који представљају број алфа честица који потичу од радона и његових потомака. За сваки тип радонског пасивног детектора одређује се (мерењем у радонским калибрационим коморама) калибрациони коефицијент који густину трагова преводи у концентрацију радона.

Регулатива: Питање регулативе везане за изложеност становништва радону и његовим потомцима различито је решена у различитим земљама. У већини држава, укључујући и чланице ЕУ дефинише се акциони ниво који за новоизграђене објекте износи 200 Bqm⁻³, старе објекте 400 Bqm⁻³ и радну средину 1000 Bqm⁻³. Дефинисане концентрације радона се заправо односе на средњу годишњу концентрацију у затвореним просторијама. Акциони ниво заправо представља концентрацију радона изнад које, ако се установи да је мерена концентрација већа од дефинисане, даје препорука да се предузму мере за његову редукцију.

На основу истраживања и великог броја епидемиолошких студија, у последњих неколико година уводе се нови стандарди и регулаторне препоруке које треба уградити у националну легислативу везану за проблематику радона. Најважнија су два документа. Један је већ поменут у уводу овог рада [2]. У њему се дефинише референтни ниво, не као строга граница између сигурне и опасне концентрације радона већ као средња годишња концентрација радона у стамбеним објектима изнад које је неопходно предузети мере за редукцију радона. Тај референтни ниво је постављен на 100 Bq m^{-3} , а ако није могуће постићи референтни ниво онда тај ниво не сме прећи 300 Bq m^{-3} . Други важан документ је новијег датума, а настао је у Међународној агенцији за атомску енергију из Беча (IAEA) [4]. У том новом БСС-у (International Basic Safety Standards) радон се помиње на више места, али је најзначајнији захтев 50 (**Requirement 50**: Public exposure due to radon indoors). У њему се дефинише референтни ниво, у затвореним просторијама високог окупационог фактора, који не сме прећи 300 Bq m^{-3} . Уз претпоставку фактора равнотеже за радон 0.4 и годишњег окупационог фактора од 7000 сати, референтни ниво од 300 Bq m^{-3} одговара годишњој ефективној дози од 10 mSv. У захтеву 52 (**Requirement 52**: Exposure in workplaces) дефинише се референтни ниво за радон у радним срединама од 1000 Bq m^{-3} . С обзиром да је окупациони фактор 2000 сати, уз исти фактор равнотеже за радон од 0.4 долази се до исте годишње ефективне дозе од 10 mSv.

Стратегија: У документу [4] дати су оквири за прављење стратегије и националног акционог плана за радон. Из целог документа, у раду [5] приказани су делови који се односе на радон. Пре свега, препорука је државама чланицама IAEA да донесу сопствене националне акционе планове у којима би се правила дугорочна процена ризика од излагања становништва радону у становима, кућама, зградама опште намене и радним срединама. Посебно се издвајају елементи стратегије као списак конкретних и краткорочних, тактичких циљева који представљају предлог првих корака у спровођењу националног акционог плана: израда радонске мапе (могуће је и парцијално мапирање), идентификација типова радних средина и зграда са јавним приступом за које је неопходно урадити мерења са проценом ризика, дефинисање националног референтног нивоа за радон, поделу одговорности, добру координацију и пронаћи расположиве ресурсе за имплементацију акционог плана, стратегију за редукцију изложености радону у случајевима утврђене повишене концентрације радона, осмишљена медијска стратегија у подизању степена информисаности становништва о штетном утицају радона и повећаном ризику од добијања рака плућа, нарочито у комбинацији са пушењем, проналажење финансијске подршке, нарочито у случајевима када је потребно применити мере ремедијације у објектима у којима је измерена знатно повишена концентрација радона, потенцирање медицинског аспекта и важности смањења ризика од добијања рака плућа као циљу коме треба тежити приликом спровођења националног акционог плана за радон.

4. Закључак

На основу свега написаног, мислим да је сазрео тренутак да се проблематици радона приђе на један свеобухватан и систематски начин. У овом раду су дати оквири за дефинисање јасног и одрживог националног акционог плана. Како би се до тога дошло на што ефикаснији начин, неопходно је организовати једну непрофитну Националну Асоцијацију за Радон кроз коју би, а по узору на Европску Радонску Асоцијацију, могли да на најбољи могући начин дођемо и до Националног програма за радон.

5. Literatura

- [1] F.E. Dorn. Die von radioactiven Substanzen ausgesandte Emanation. *Abhandlungen der aturforschenden Gesellschaft zu Halle* 23 (1900) 1–15.
- [2] WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. (2009), www.who.int/ionizing_radiation/env/radon/en/index1.html
- [3] WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. (2010), <http://www.who.int/indoorair/publications/9789289002134/en/index.html>
- [4] Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards INTERIM EDITION, General Safety Requirements Part 3 (2011) http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/p1531interim_web.pdf
- [5] P A Colgan, T Boal, R Czarwinski. Requirements relating to radon in the International Basic Safety Standards: information, measurement and national strategies. *Journal of Radiological Protection* 33 (2013) 41–50.

NATIONAL RADON PROGRAMME, REGULATION AND STRATEGY

Vladimir UDOVIČIĆ

Institute of Physics, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, udovicic@ipb.ac.rs

ABSTRACT

The issue of radon in Serbia has not approached in a systematic and organized way. Currently radon theme deals with more research groups and institutions as a good basis to integrate all these activities into a comprehensive national program to define the strategic objectives and action plan for the next few years. In any case, the accession of Serbia to the EU needs to harmonize regulative in the field of radiation protection and this will be one of the tasks we have to perform, and the radon is an important part of that process. In this paper, we define a hierarchy of strategic objectives related to radon, and also, based on the SWOT analysis determines the national action plan provides a timetable for specific actions to be implemented over the next few years, with the main task of obtaining a national program for radon.

RADON U ZATVORENIM PROSTORIJAMA U SEVEROZAPADNOM DELU KOSOVA I METOHIJE

Biljana VUČKOVIĆ, Ljiljana GULAN, Gordana MILIĆ i Feriz ADROVIĆ

Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Prištini, Kosovska Mitrovica, biljanavuck@gmail.com

Sažetak

U radu su prikazani rezultati istraživanja koncentracije aktivnosti radona u kućama na prostoru severozapadnog dela Kosova i Metohije - Goraždevca, šire okoline Istoka i Zubinog Potoka. Merenja su vršena trag detektorima CR-39, u dva uzastopna perioda od po tri meseca u sezoni zima-proleće. Srednja vrednost izmerenih koncentracija aktivnosti radona u kućama obuhvaćenih istraživanjem je 97Bq/m^3 . Ovo su prve informacije o prirodnoj radioaktivnosti vazduhu ovoj oblasti, a deo su kontinuiranog istraživanja o radonu na Kosovu i Metohiji.

1. Uvod

Čovek provede oko 80 % svog vremena u zatvorenim prostorijama i zato je merenje koncentracije radona u njima veoma značajno. Ne treba zanemariti činjenicu da je radon jedan od glavnih uzročnika karcinoma pluća i njegov doprinos izloženosti čoveka prirodnoj radijaciji je čak 50% [1], [2]. U organizam se pored inhalacije može uneti i ingestijom [1], [2], [3]. Gas je bez boje, mirisa i ukusa, prodire kroz stene i zemljište i akumulira se u zatvorenim prostorijama. Mehanizmi prodiranja u zatvorene prostorije su mnogobrojni, ali svakako najznačajniji su difuzija i razlika u pritiscima [4], [5]. Što je veća razlika u pritiscima van i u kućama, veća količina radonadifundira u unutrašnjost i menja koncentraciju radona. Mesta kroz koja radon prodire su najčešće pukotine u podu i zidovima, kao i šupljine oko cevi i kablova. Faktori koji utiču na koncentraciju radona su i građevinski materijali od kojih je kuća napravljena, ventilacija i klimatske promene. Intervalni nivoi za hronično izlaganje radonu u kućama su koncentracija radona od 200Bq/m^3 u novim do 600Bq/m^3 , u starim kućama [4]. Svetska zdravstvena organizacija (WHO) preporučuje da presečna vrednost koncentracije radona u kućama ne bude veća od 100Bq/m^3 , što je u ovom radu usvojeno kao referentna vrednost [6].

U radu su izneti rezultati merenja koncentracije radona u kućama na severozapadnom delu Kosova i Metohije. Istraživanje je izvedeno na 24 merna mesta. Zbog prisutnih klimatskih promena moguće sezonske varijacije izbegavaju se merenjem u sezoni leto-jesen ili zima- proleće [7]. Ova merenja su izvedena u vremenu zima-proleće u toku 2011.

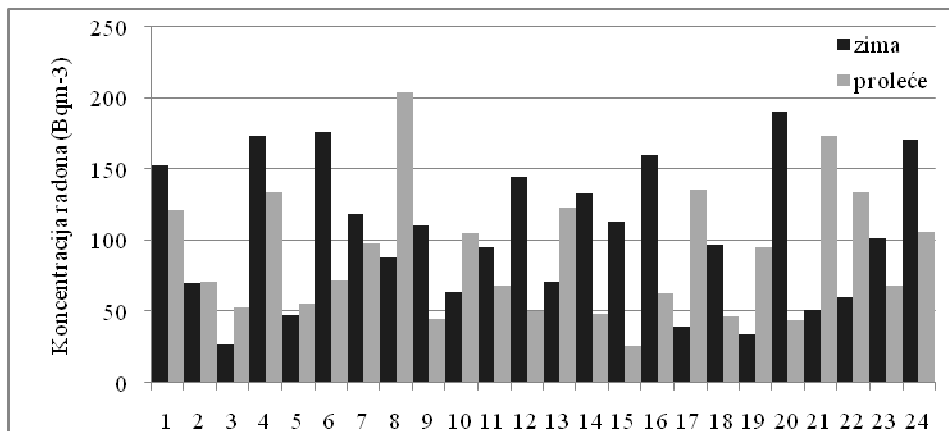
2. Eksperimentalna merenja

Istraživanjem su obuhvaćene porodične kuće na severozapadu Kosova i Metohije: u Goraždevcu, široj oblasti Istoka i Zubinog Potoka. Kontinuirano merenje koncentracija aktivnosti radona se odvijalo u prostorijama u kojima se provodi veći deo dana. U tu svrhu korišćeni su 'RadoSys' dozimetri sa CR-39 detektorima. Trag detektor je plastični materijal koji osetljivom strukturom omogućava detektovanje α -čestica u širokom energetsom intervalu. Trag detektori veličine 10^{-2}m^2 postavljani su unutar plastičnih difuzionih komora kroz koju radon difundira i čija veličina odgovara dometu i time omogućava maksimalnu detekciju stvorenih α -čestica. Tipična osetljivost detektora je 2,0 tragova $\text{cm}^{-2}/\text{kBqm}^{-3}\text{h}$, inicijalna pozadina 0,3 traga/mm, a limit zasićenja je veći od 12000kBqh/m^3 . Vreme izlaganja detektora na jednom mernom mestu bilo je po 3 meseca u zimskom i 3 meseca u prolećnom periodu, u prostorijama na visini od 1,5m u odnosu na pod, daleko od vode ili izvora grejanja. Postavljeni su i na udaljenosti od desetak centimetara od zida kako bi se onemogućio prodor radonaekshaliranog iz građevinskog materijala direktno u dozimetar. Hemijsko nagrizanjedetektora vršeno je u 6,25% rastvoru NaOH, u 'RadoBath' jedinici u vremenu od 4,5 sati na konstantnoj temperaturi od 90°C . Tragovi su očitavani pomoću 'RadoMeter' automatizovanog mikroskopa povezanog sa kompjuterom, u kome je instaliran namenski

softver za analizu CR-39 detektora. Vreme očitavanja po detektoru je oko 60 sekundi. Sam postupak brojanja se može vizuelno pratiti na monitoru, a rezultati se ispisuju u tabele.

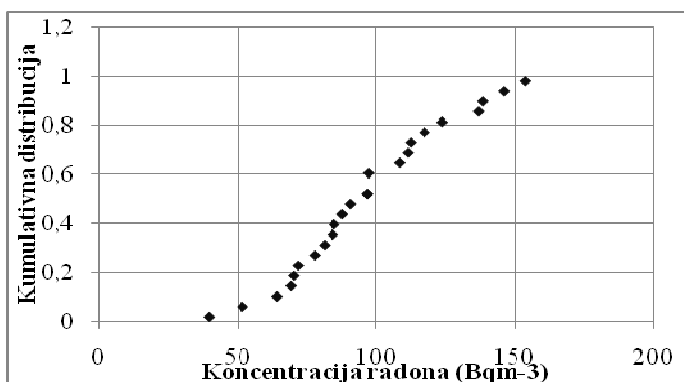
3. Rezultati istraživanja i diskusija

Koncentracija aktivnosti radona u period zima-proleće po svim (24) mernim mestima predstavljena je naslici 1.



Slika 1. Koncentracija aktivnosti radona u periodu zima-proleće po mernim mestima

Sa slike2., na kojoj je prikazana kumulativna distribucija koncentracije radona, vidi se da 60 % kuća ima manju koncentraciju od 100 Bqm⁻³.



Slika 2. Empirijska (kumulativna) distribucija koncentracije radona za 24 merenja

Tabela 1. predstavlja karakteristične vrednosti koncentracije aktivnosti radona u tri opštine severozapadnog Kosova i Metohije. Kolmogorov Smirnov (KS) test pokazuje poklapanje merenja sa lognormalnom raspodelom u vrednosti od $P = 0.66$ u zimskom periodu, i $P = 0.90$ u prolećnom periodu. Razlika srednjih vrednosti koncentracija za zimski i prolećni kvartal je beznačajna (t-test za nezavisne uzorke; dvostrana P vrednost jednaka je 0.33). Prema konvencionalnim kriterijumima ova razlika nije statistički značajna.

Tabela 1. Statističke karakteristike istraživanih koncentracija aktivnosti radona po opštinama u sezoni zima-proleće

	GORAŽDEVAC		ISTOK		ZUBIN POTOK	
	zima	proleće	zima	proleće	zima	proleće
Brojmernih mesta	6	6	8	8	10	10
Min (Bqm⁻³)	27	53	64	45	34	26
Max(Bqm⁻³)	176	134	145	204	191	174
Medijana(Bqm⁻³)	111.5	71.5	103	83	99.5	81.5
Aritmetičkasredina (Bqm⁻³)	108	85	103	93	102	89.3
Standardnadevijacija(Bqm⁻³)	67.3	34.4	28.8	53.6	56.8	47.9
Geometrijskasredina (Bqm⁻³)	87	81	100	81	81	77
Geometrijska standardnadevijacija	2.2	1.5	1.3	1.3	1.8	1.6

Od ukupno 24 mernih mesta, 6 se nalazi na području Goraždevca, 8 na području opštine Istok i 10 u opštini Zubin Potok. Srednja vrednost izmerene koncentracije aktivnosti radona za sva merna mesta je 97Bq/m³. Na osnovu navedenih aritmetičkih srednjih vrednosti koncentracija, može se zaključiti da je prisustvo radona izraženije zimi nego u proleće, što se i moglo očekivati [7]. Usled zagrevanja prostorija, kao i zbog zatvorenih prozora javlja se povećana razlika u pritisima između tla i kuća čime se povećava prisustvo radona. Tokom prolećnog perioda pritisci se ujednačavaju usled češćeg provetravanja prostorija, pa je izmerena niža koncentracija radona. Kuće koje su bile obuhvaćene istraživanjem na području Goraždevca su iz 50-tih godina prošlog veka, što može biti jedan od uzroka veće razlike u medijanama u zimskom i prolećnom periodu, nego na području Istoka i Zubinog Potoka.

4. Zaključak

Na osnovu dobijenih rezultata polugodišnjih merenja ovo područje karakteriše prosečna koncentracija radona od 97Bq/m³. To je u saglasnosti sa preporukom Svetske zdravstvene organizacije za nivo aktivnosti radona u stambenim objektima. Tokom hladnijih meseci izmerena je veća koncentracija radona, što je i očekivano, ali nije statistički značajno. Analizom podataka zaključeno je i da su koncentracije radona veće u prizemnim prostorijama kuća bez podruma, ili kada nemaju betonsku podlogu. Postojanje podrumskih prostorija, kao i betonskih podloga sprečava prodor radona direktno iz zemlje u objekte.

5. Zahvalnica

Rad je podržan od strane projekata P 41028 i P 43002 koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Autori visoko cene saradnju sa vlasnicima kuća u kojima su bili raspoređeni detektori.

6. Literatura

- [1] ICRP, Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters, ICRP Publication 50, Annals of the ISRP 17(1), 1987
- [2] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation, Report to General Assembly, Vol. II, pp 2-9, 2000
- [3] Radon: An Overview of Health Effects, Encyclopidia of Environmental Health, pp 745-753, 2011
- [4] Međunarodna komisija za radiološku zaštitu, Preporuke međunarodne komisije za radiološku zaštitu, (ICRP), 37 (2-4), str 1-332, 2007
- [5] Todorović N., Forkapić S., Papuga J., Bikit I., Slivka J., Analiza uticaja faktora na koncentraciju aktivnosti radona u zatvorenim prostorijama, XXV Simpozijum društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Kopaonik 2009, str 84-87, 2009
- [6] World Health Organization. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. WHO, ISBN 97892 4 1547673,
- [7] http://www.who.int/ionizing_radiation/env/radon/en/index1.html, 2009.
- [8] Milic G., Gulan Lj., Bossew P., Vuckovic B., Zunic S.Z., Indoor Radon Mapping: a Survey of Residential Houses of Kosovo and Metohija, First East European Radon Symposium - FERAS 2012, Cluj-Napoca, Romania, 2012

INDOOR RADON IN NORTHWESTERN PART OF KOSOVO AND METOHILJA

Biljana VUCKOVIC, Ljiljana GULAN, Gordana MILIC i Feriz ADROVIC

*Faculty of Natural Sciences, University of Pristina, Lole Ribara 29,
38200 Kosovska Mitrovica, Serbia, biljanavuck@gmail.com*

Abstract

This paper presents the results of indoor radon activity concentrations in houses in the area of the northwestern part of Kosovo and Metohija – Gorazdevac, the wider area of Istok and Zubin Potok. The measurements were carried out with track detectors CR-39, six months during winter-spring season. For houses typical of this region, the mean measured radon activity concentration is 97 Bq/m³. The researches have not yet done in this area, and there is no information in literature about the natural radioactivity of the air. The results are part of continuing research on radon in Kosovo and Metohija, in order to make radon risk maps.

МОНТЕ КАРЛО СИМУЛАЦИЈА ЗА ПРОЦЕНУ РАДОНСКЕ АКТИВНОСТИ УНУТАР ОЛОВНЕ ЗАШТИТЕ ГЕРМАНИЈУМСКИХ ДЕТЕКТОРА

Дејан ЈОКОВИЋ¹, **Јована НИКОЛОВ²**, **Радомир БАЊАНАЦ¹**,
Владимир УДОВИЧИЋ¹, **Димитрије МАЈЕТИЋ¹**, **Александар ДРАГИЋ¹**, **Бојана ГРАБЕЖ¹**

1) *Институт за физику, Универзитет у Београду, Србија, yokovic@ipb.ac.rs*

2) *Депарتمان за физику, Природно-математички факултет, Универзитет у Новом Саду, Србија*

САДРЖАЈ

Монта Карло симулација, заснована на симулационом пакету Geant4, направљена је за одређивање доприноса радона фонском спектру германијумских детектора. У симулацији, примарни фотони су равномерно случајно генерисани у ваздуху унутар оловне заштите детектора, са равномерном расподелом праваца у целом простору. Енергије фотона су енергије карактеристичних пострадонских линија у спектру. Резултат симулација је спектрални одзив германијумског детектора, односно спектар детектора, из кога су добијени интензитети спектралних линија и одређене ефикасности за сваку енергију. Из интензитета линија одређене су вредности за концентрацију радона, које су онда упоређене са експерименталним резултатима.

1. Увод

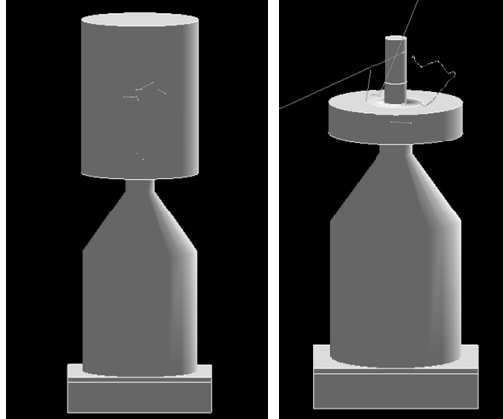
Лабораторија за нуклеарну физику Института за физику у Београду има подземну нискофонску лабораторију укопану на дубини од 12 m (еквивалентно дубини од 25 m.w.e). Лабораторија је детаљно описана у [1]. Нискофонска просторија је потпуно обложена херметички затвореним алуминијумом дебљине 1 mm. Вентилациони систем у лабораторији филтрира ваздух двоструко – механички и активним угљем, и такође држи натпритисак од 2 mbar у просторији у односу на атмосферски. Алуминијумска облога и вентилациони систем заједно омогућују постизање доста ниске концентрације радона на нивоу од око 15 Bq/m³. Нека од интересантних појава везаних за промене концентрације радона могу се наћи у [2,3]. У лабораторији се налази један германијумски детектор (ORTEC, модел GEM30), активне запремине 148,9 cm³ и релативне ефикасности 35%. Он је оклопљен релативно старим оловом дебљине 12 cm. Подземна позиција детектора, заједно са пасивном оловном заштитом, омогућује добру редукцију фона, са брзином одброја мањом од 0,5 cps у енергијском опсегу 40-3000 keV. Главни допринос фону германијумског детектора потиче од радона и његових потомака. Карактеристичне енергијске линије из распада потомака радона (Bi-214, Pb-214) јасно се могу видети у фонском спектру детектора.

Монте Карло симулација, заснована на симулационом пакету Geant4 [4], направљена је за одређивање спектралног одзива германијумских детектора, која би, евентуално, могла да што боље репродукује експериментални спектар детектора. У овом случају, симулациони програм је употребљен за прорачун фона германијумског детектора који је радонског порекла, као и за процену концентрације радона из интензитета пострадонских линија у фонском спектру.

2. Симулација

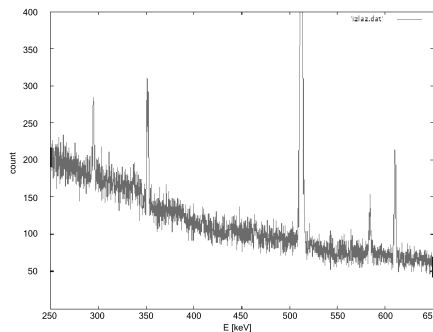
У Монте Карло симулацији, целокупна детекторска конструкција направљена је према детаљним техничким подацима добијеним од произвођача. У основи, она се састоји од германијумског кристала цилиндричног облика, који је активна запремина детектора, бакарног држача на који је монтиран Ge кристал, и магнезијумског кућишта у коме се налази цела конструкција. Неактивни слојеви Ge кристала као и шупљина у кристалу су такође урачунате. Германијумски детектор има пречник 58,5 mm и дужину 56,4 mm, док шупљина у њему има пречник 9 mm и дужину 42,9 mm. Неактивни слој Ge кристала дебео је 0,7 mm. Бакарни држач је шупљи цилиндар дужине 94 mm и

дебљине 0,76 mm. Све ово даје активну запремину детектора од 148,9 cm³. Околина детектора такође је укључена, како би се тако узели у обзир и расејани фотони. Овако направљена детекторска конструкција смештена је унутар 12 cm дебеле оловне заштите, на удаљености од 10 cm испод горњег слоја олова. Изглед целог система са германијумским детектором приказан је на слици 1.



Слика 1. Графички приказ детекторског система и трајекторија фотона у Geant4 симулацији германијумског детектора

Примарни фотони генерисани су у ваздуху који окружује детектор (комора унутар оловне заштите), са равномерно случајно изабраним позицијама и правцима у целом простору (4π srad). Почетне енергије фотона су енергије пострадонских линија (295, 352, 609 keV). Сваки фотон у симулацији интерагује са материјом и на тај начин депонује енергију у активној запремини детектора, или пролази кроз детектор (или кроз цео систем) без интеракције. Сви електромагнетни процеси су укључени у симулацију, уз употребу Geant4 пакета за нискоенергијске процесе (G4EMLOW6.32). Расподела депонованих енергија довољно великог броја фотона даје одзив детектора, односно симулирани спектар; део спектра од интереса у овом случају приказан је на слици 2.



Слика 2. Део спектра германијумског детектора добијеног симулацијом одзива детектора на гама зрачење индуковано радоном

3. Резултати и дискусија

Из симулираног спектра могу се добити интензитети линија у спектру, а знајући интензитете линија могу се онда наћи симулиране ефикасности детектора за дату енергију. Са овако добијеним ефикасностима и са измереним интензитетима линија у експерименталном фонском спектру, одређена је концентрација радона. За сваку од енергија, концентрација радона, као активност по јединици запремине, израчуната је по формули $A=I/(eff \cdot p \cdot V)$, где су I измерени интензитет линије за дату енергију, eff је симулирана ефикасност детектора, p вероватноћа емисије и V запремина коморе унутар оловне заштите. Резултати су представљени у табели 1.

Табела 1. Концентрација радона одређена из интензитета линија у експерименталном спектру и симулиране ефикасности детектора

E [keV]	I [$\cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$]	p	eff	A [Bq/m^3]
295	0,428	0,19	0,0247	15(3)
352	0,906	0,36	0,0212	19(4)
609	0,654	0,47	0,013	17(4)

Концентрације радона добијене описаним семиемпиријским методом упоређене су са вредностима измереним радонским монитором, који мери концентрацију радона у ваздуху; средња измерена вредност је 13(5) Bq/m^3 . Више вредности радонске активности добијене из фонског спектра германијумског детектора последица су депоновања потомака радона на зидове оловне заштите и кућишта детектора, што овде није узето у обзир. Процена активности ових депонованих изотопа је $\sim 1/4$ од укупне радонске активности. Такође, очекује се да на вишим енергијама фотона део активности дође и од радона изван оловне заштите.

4. Захвалница

Аутори се захваљују проф. др Ивану Аничину на константном интересовању и подршци. Овај рад је реализован уз подршку Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије, у оквиру пројекта ИИИ 43002.

5. Литература

- [1] A. Dragić, V. Udovičić, R. Banjanac, D. Joković, D. Maletić, N. Veselinović, M. Savić, J. Puzović, I. V. Aničin. The new setup in the Belgrade low-level and cosmic-ray laboratory. *Nucl. Technol. Radiat.* 26 (2011) 181-192.
- [2] V. Udovičić, B. Grabež, A. Dragić, R. Banjanac, D. Joković, B. Panić, D. Joksimović, J. Puzović, I. Aničin. Radon problem in an underground low-level laboratory. *Radiat. Meas.* 44 (2009) 1009-1012.
- [3] V. Udovičić, I. Aničin, D. Joković, A. Dragić, R. Banjanac, B. Grabež, N. Veselinović. Radon time-series analysis in the underground low-level laboratory in Belgrade, Serbia. *Radiat. Prot. Dosim.* 145 (2011) 155-158.
- [4] S. Agostinelli et al. Geant4 – a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A.* 506 (2003) 250-303.

MONTE CARLO SIMULATION METHOD FOR ESTIMATING RADON CONCENTRATION INSIDE LEAD SHEILD OF GERMANIUM DETECTORS

Dejan JOKOVIĆ¹, Jovana NIKOLOV², Radomir BANJANAC¹, Vladimir UDOVIČIĆ¹, Dimitrije MALETIĆ¹, Aleksandar DRAGIĆ¹, Bojana GRABEŽ¹

1) *Institute of Physics, University of Belgrade, Serbia, yokovic@ipb.ac.rs*

2) *Department of Physics, Faculty of Science and Mathematics,*

3) *University of Novi Sad, Serbia*

ABSTRACT

Monte Carlo simulation method, based on Geant4 simulation package, has been developed to obtain background spectra of HPGe detectors. In this paper the emphasis was on radon induced background, while other sources of background were treated elsewhere. In the simulation, primary photons are uniformly randomly generated in the air surrounding the detector, with uniformly randomly momentum directions in 4π space. Energies of photons are those of characteristic peak lines in the HPGe spectra; their relative intensities are given by relative intensities seen in experimental spectra. The simulation gives a detector response to primary photons and their secondary particles, i.e. spectrum of the HPGe detector. The obtained results for radon concentration are then compared with experimental ones.

UTICAJ KALIBRACIONOG FAKTORA NA REZULTAT KONCENTRACIJE RADONA

Gordana PANTELIĆ, Miloš ŽIVANOVIĆ, Milica RAJAČIĆ, Jelena NIKOLIĆ, Dragana TODOROVIĆ

Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Beograd, Srbija, milosz@vinca.rs

SADRŽAJ

U ovom radu je ispitivan uticaj korišćenja različitih kalibracionih faktora na rezultate koncentracije radona dobijene pomoću metode ugljenih filtera. Dva seta kalibracionih faktora su dobijena u radonskim komorama, s tim što je u jednom slučaju vazduh bio statičan, dok je u drugom slučaju simulirano kretanje vazduha tipično za zatvorene prostorije. Poređenjem rezultata se primećuju značajne razlike za uslove srednje relativne vlažnosti vazduha.

1. Uvod i metoda merenja

Radon je plemeniti gas, bez ukusa, boje i mirisa. U periodnom sistemu elemenata se nalazi na 86. mestu i nema stabilnih izotopa. U prirodi se javljaju njegova tri radioaktivna izotopa koji pripadaju uranijumovom, torijumovom i aktinijumovom radioaktivnom nizu. Poseban značaj radona je u tome što je jedini gas u prirodnim radioaktivnim nizovima, što mu omogućava da difunduje na velike udaljenosti [1]. Najveći značaj, sa aspekta zaštite od zračenja, ima izotop ^{222}Rn , koji se nalazi u uranijumovom nizu. Vreme poluraspada ovog izotopa je 3,82 dana, dok druga dva izotopa imaju vreme poluraspada ispod jednog minuta [2]. Kao posledica, koncentracija ^{222}Rn u vazduhu je značajno veća, a njegov doprinos ukupnoj dozi koja potiče od radona na globalnom nivou je preko 90% [3].

Američka agencija za zaštitu životne sredine (EPA) je razvila metodu merenja koncentracije ^{222}Rn uz korišćenje aktivnog uglja, kao jednostavnu, brzu i jeftinu metodu [4]. Ova metoda se zasniva na činjenici da se veliki broj gasova, uključujući radon, adsorbuje na aktivnom uglju. Po adsorpciji, radon podleže radioaktivnom raspadu, a njegovi potomci ^{214}Pb i ^{214}Bi su neisparljivi. Posredstvom intenzivnih gama linija ^{214}Pb i ^{214}Bi , moguće je odrediti aktivnost ^{222}Rn , tako da je ova metoda pogodna za merenje koncentracije ^{222}Rn u zatvorenim prostorijama.

U praksi, aktivni ugalj se smešta u metalne kanistere i prekriva metalnom mrežicom. Kanister (ugljeni filter) se zatvara dobro dihtujućim poklopcem, da bi se kontakt sa atmosferom ograničio na izlaganje u prostoriji u kojoj se određuje koncentracija. Pre svakog izlaganja, ugljeni filter se greje 4 sata na 110°C , da bi se desorbovale sve adsorbovane hemijske vrste [4].

Posle izlaganja ugljenog filtera, potrebno je sačekati tri sata da se uspostavi radioaktivna ravnoteža između ^{222}Rn , ^{214}Pb i ^{214}Bi . Ugljeni filter se zatim meri na gama spektrometru, pri čemu se posmatraju linije ^{214}Pb na 295 i 352 keV, kao i linija ^{214}Bi na 609 keV. Zbog jednostavnosti spektra, uz odgovarajuću kalibraciju, dovoljno je zabeležiti ukupan odbroj u spektralnom regionu koji obuhvata sve tri navedene linije. Zbog toga nije neophodno koristiti spektrometre visoke rezolucije, kao što su High Purity Germanium (HPGe) spektrometri, već je dovoljno koristiti natrijum jodidni spektrometar ili čak jednokanalni analizator [4]. Svakako, ugalj, kao i ostali delovi kanistera, moraju biti nisko aktivni, da bi se izbegle interferencije i poboljšala osetljivost merenja.

2. Izračunavanje koncentracije radona

Koncentracija ^{222}Rn u vazduhu se određuje prema jednačini (1). G i B predstavljaju odbroje u spektru ugljenog filtera i spektru fona, redom, t vreme snimanja spektra, E_f efikasnost detektora, koja se eksperimentalno određuje, D_f korekciju na vreme poluraspada radona i C_f kalibracioni faktor za brzinu adsorpcije radona [4].

$$A_{Rn} = \frac{G - B}{t \cdot E_f \cdot C_f \cdot D_f} \quad (1)$$

U određivanju koncentracije radona, najveći problem predstavlja poznavanje C_f , dok su merenje vremena i beleženje odbroja trivijalni, a određivanje E_f jednostavno uz posedovanje odgovarajućih standarda. Određivanje C_f umnogome komplikuju realni uslovi koji se sreću na terenu. Naime, sa radonom se na aktivnom uglju kompetitivno adsorbuju i druge hemijske vrste koje se nalaze u vazduhu, a naročito je značajna vodena para, pa će efikasnost skupljanja radona zavisiti od koncentracija ovih hemijskih vrsta. Pošto se istovremeno sa adsorpcijom radona odvija i njegova desorpcija, koncentracija radona u uglju će imati složenu zavisnost od vremena izlaganja kanistera. Takođe, C_f će zavisiti od temperature i kretanja vazduha. S druge strane, i temperatura i vlažnost vazduha se menjaju na mestu izlaganja ugljenog filtera i njihove vrednosti nisu poznate (praćenjem ambijentalnih parametara i računanjem njihovog uticaja, metoda bi postala višestruko skuplja i složenija) [4, 5].

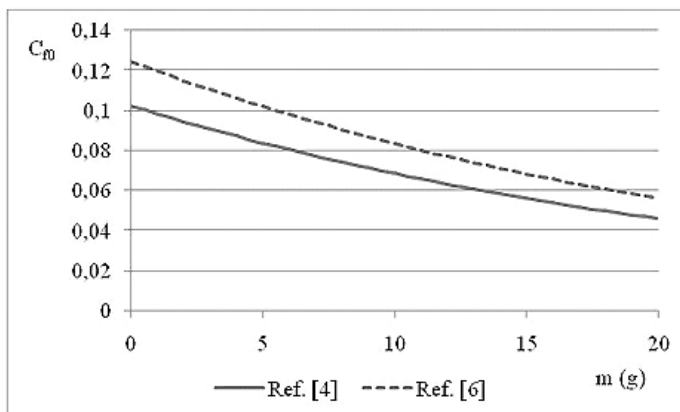
3. Određivanje kalibracionog faktora

Korekcija na vlažnost vazduha se vrši uz pomoć kalibracionih krivih i praćenja promene mase ugljenog filtera. Naime, u toku izlaganja kanistera, masa vlage koja se adsorbuje na uglju je reda veličine 1 g, dok se masa drugih adsorbovanih vrsta zanemaruje. Pretpostavka je da će masa adsorbovane vode rasti sa vremenom izlaganja ugljenog filtera, kao i sa vlažnošću vazduha, po složenoj zavisnosti. Da bi se ova zavisnost odredila, ugljeni filteri se izlažu u radonskim komorama u uslovima kontrolisane vlažnosti, temperature i koncentracije radona. U metodi EPA, mase ugljenih filtera su merene za različita vremena izlaganja pri relativnoj vlažnosti vazduha od 20%, 50% i 80% [4].

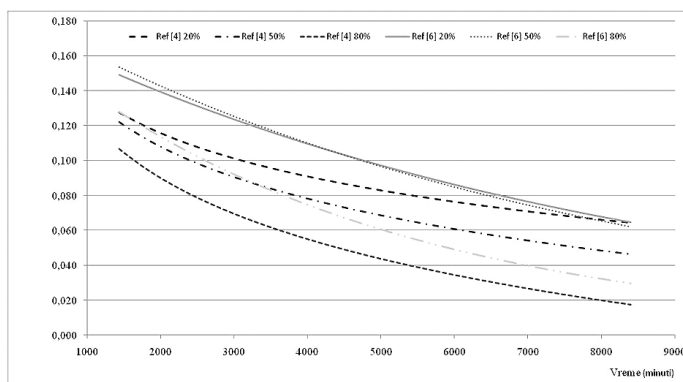
Ako se jednačina (1) reši po C_f , dobija se serija vrednosti za različitu vlažnost vazduha i vremena izlaganja. Ako se C_f dobijeno izlaganjem ugljenog filtera od 48 sati označi $C_{f,0}$, vrednosti za drugačije trajanje izlaganja se dobijaju u skladu sa jednačinom (2), gde je uveden faktor podešavanja A_f . Zgodno je $A_{f,0}$ i $C_{f,0}$ tako izraziti da $A_{f,0}$ bude 1. U tom slučaju se A_f za različito vreme izlaganja dobija rešavanjem jednačine (2) po A_f .

$$C_f = C_{f,0} \frac{A_f}{A_{f,0}} \quad (2)$$

Pošto se kalibracija vrši na tri vlažnosti vazduha, postojaće tri krive zavisnosti A_f od vremena izlaganja, a odgovarajuća kriva se bira na osnovu promene mase ugljenog filtera pre i posle izlaganja [4]. Praksa je pokazala da ovako dobijeni kalibracioni faktori nisu odgovarajući za ugljene filtere koji se izlažu na terenu [6, 7], pa su koncentracije dobijene ovom metodom više u odnosu na realne vrednosti. U referenci [4] je korišćena radonska komora sa potpuno statičnom atmosferom, što je u realnim uslovima merenja nemoguće reprodukovati. U naknadnoj kalibraciji, korišćena je komora u kojoj je simulirano kretanje vazduha tipično za zatvorene prostorije [6]. Na slici 1 su prikazane zavisnosti $C_{f,0}$ od promene mase ugljenih filtera, dok su na slici 2 prikazane zavisnosti A_f od vremena izlaganja, dobijene u toku obe kalibracije.



Slika 1. Korekzioni faktor C_{m0} dobijen izlaganjem kanistera 48 sati, dati u referencama [4] i [6]



Slika 2. Koeficijenti A_f za različite vlažnosti vazduha dati u referencama [4] i [6]

4. Rezultati i diskusija

Na dva primera je prikazan uticaj korišćenja različitih kalibracionih faktora na rezultate merenja. U toku 2012. godine je u Srbiji organizovana interkomparacija između tri domaće laboratorije [8] koje koriste istu metodu ispitivanja [4], a različite koeficijente A_f ([4] ili [6]). U tabeli 1 su prikazani rezultati interkomparacije dobijeni merenjem u našoj laboratoriji, pri čemu je koncentracija radona računata korišćenjem oba skupa vredosti A_f i C_f . Razlike u ovako izračunatim vrednostima su veoma male.

Tabela 1. Rezultati merenja koncentracije radona računati sa različitim koeficijentima Af

Број филтера	Концентрација радона (Bq/m ³)	
	Раčунато са Af из референце [4]	Раčунато са Af из референце [6]
1	91 ± 7	92 ± 7
2	92 ± 7	92 ± 7
3	80 ± 6	79 ± 6
4	74 ± 6	73 ± 6
5	134 ± 10	133 ± 10
6	134 ± 10	133 ± 10
7	126 ± 9	127 ± 9
8	121 ± 9	122 ± 9

Međutim u tabeli 2 su prikazani rezultati naših merenja u međunarodnoj interkomparaciji FERAS 2012 [9]. Može se primetiti značajna razlika između rezultata dobijenih korišćenjem različitih vrednosti A_f i C_f , koja višestruko prevazilazi mernu nesigurnost. Kako je referentna vrednost koncentracije radona u toku interkomparacije 741 Bq/m³, a vrednosti izmerene od strane učesnika se kreću između 618 i 985 Bq/m³ [9], jasno je da kalibracioni koeficijenti iz reference [6] omogućavaju bolju procenu koncentracije radona.

Tabela 2. Rezultati merenja koncentracije radona računati sa različitim koeficijentima Af

Број филтера	Концентрација радона (Bq/m ³)	
	Раčунато са Af из референце [4]	Раčунато са Af из референце [6]
1	1052 ± 58	811 ± 45
2	1065 ± 59	821 ± 45

Postavlja se pitanje zašto je razlika u rezultatima mnogo veća u drugom primeru. Posmatranjem grafika na slici 2 se dobija lažan utisak da se sva tri para odgovarajućih krivih značajno razlikuju. Međutim, na slici 1 se može primetiti da su vrednosti $C_{f,0}$ takođe različite u dve kalibracije. Kombinovanjem vrednosti $C_{f,0}$ i A_f , pokazuje se da je značajna razlika samo za slučaj krive A_f koja odgovara vlažnosti vazduha od 50%, što i dovodi do velikog odstupanja rezultata u tabeli 2.

5. Zaključak

Pošto u Srbiji ne postoji referentna radonska komora koja bi poslužila za određivanje kalibracionih faktora za ugljene filtere koje koriste naše laboratorije, prinuđeni smo da koristimo faktore koje je proizvođač preporučio. Učešćem u interkomparacijama na međunarodnom nivou možemo potvrditi kvalitet naših rezultata, a na osnovu interkomparacije FERAS 2012 smo zaključili da je bolje korišćenje kalibracionih faktora dobijenih u komori u kojoj je simulirano kretanje vazduha tipično za zatvorene prostorije [6].

6. Literatura

- [1] C.M. Lederer, J.M. Hollander, I. Perlman. Table of Isotopes, 6th ed. New York, John Wiley & Sons, 1968.
- [2] BIPM. Monographie BIPM-5, Table of Radionuclides Vol. 1-6. Bureau International des Poids et Mesures, Sevres (2004 - 2011).
- [3] UNSCEAR 2000. Exposures from natural radiation sources, Report to the General Assembly Vol. I, Annex B. United Nations, New York, USA, 2000.
- [4] D.J. Grey, S.T. Windham. EERF Standard Operating Procedures for Radon-222 Measurement Using Charcoal Canisters, EPA 520/5-87-005, 1987.
- [5] M. Ronca-Battista, D. Gray. The influence of changing exposure conditions on measurements of radon concentrations with the charcoal adsorption technique. *Radiation Protection Dosimetry* Vol. 24 (1988) No.1/4, 361-365.
- [6] EERF 1989. Addendum to EERF Standard Operating Procedures for Rn-222 Measurement Using Charcoal Canisters, USA, 1989.
- [7] P. H. Jenkins. A Critique of the "EPA Method" for Analyzing and Calibrating Charcoal Canisters for Radon Measurements, Proceedings of the 2002 International Radon Symposium, American Association of Radon Scientists and Technologists, Reno Nevada, October 27-30, 09 1-18, 2002.
- [8] G. Pantelić, M Živanović, M. Eremić Savković, S. Forkapić. Radon concentration intercomparison in Serbia. Proceedings of the ninth symposium of the Croatian Radiation Protection Association; 10.-12. April 2013. Krk, 193-198.
- [9] Preliminary results of Intercomparison exercise. First East European Radon Symposium – FERAS 2012.

CALIBRATION FACTOR INFLUENCE ON RADON CONCENTRATION RESULTS

Gordana PANTELIĆ, Miloš ŽIVANOVIĆ, Milica RAJAČIĆ, Jelena NIKOLIĆ, Dragana TODOROVIĆ

University of Belgrade, Institute for Nuclear Sciences Vinca, Belgrade, Serbia

ABSTRACT

Influence of different calibration factors on results for radon concentration obtained by charcoal canisters method was assessed in this paper. Two sets of calibration factors were obtained in radon chambers. In first case, environment around canister was devoid of air movement, while in the other case the air movement was present and was typical for closed rooms. By comparing the results, it is clear that there are considerable differences between results in case of medium humidity.

ВРЕМЕНСКЕ СЕРИЈЕ МЕРЕНИХ ВРЕДНОСТИ ^{222}Rn АНАЛИЗИРАНЕ МЕТОДОМ СТОХАСТИЧКЕ КОМПЛЕКСНОСТИ

**Миодраг КРМАР¹, Владимир УДОВИЧИЋ², Драгутин МИХАИЛОВИЋ³
и Илија АРСЕНИЋ³**

- 1) Департман за физику, ПМФ, Нови Сад, Србија, krmar@df.uns.ac.rs
- 2) Институт за физику, Београд, Србија, udovicic@ipb.ac.rs
- 3) Пољопривредни факултет, Нови Сад, Србија, guto@polj.uns.ac.rs

САДРЖАЈ

Мерене вредности концентрације ^{222}Rn у неком простору резултат су дејства ваћег броја процеса, почев од његовог стварања, транспорта, па све до акумулације и распада. Постоји велики број студија у којима се путем испитивања динамике ^{222}Rn покушавају установити могуће корелације концентрације ^{222}Rn са неким мерљивим параметрима. У овом раду су употребљене вредности концентрације ^{222}Rn мерене у подземној лабораторији током једне године да би се тестирао метод Колмогоровеве (стохастичке) комплексности. Овај је метод употребљен да се провери како температура и релативна влажност мерене истовремено са концентрацијама радона утичу на комплексност ^{222}Rn временских серија. Установљено је да релативна влажност редукује комплексност ^{222}Rn временских серија знатно више него температура.

1. Увод

Чињеница да радиоактивни гас ^{222}Rn због слабог афинитета ка хемијским везама и релативно дугог периода полураспада (3.82 дана) може бити транспортован на веће дистанце и акумулиран у извесним просторима је била основни мотив да се развију разне технике праћења концентрације ^{222}Rn . Мерење нивоа присутности радона је посебно значајно за просторе у којима обитавају људи. Такође је веома значајно познати концентрације ^{222}Rn у нискофонским лабораторијама где је редукација позадинског зрачења понекад једини метод да се мерним уређајима снизи праг детектибилности за неке ретке процесе. Будући да на процесе стварања, транспорта и акумулације радона велики број фактора има значајан утицај, понекад је веома тешко пратити на који начин неки од њих утиче на коначан резултат одређеног мерења. У експерименталној пракси чест је случај да се за одређене просторе прати динамика промене концентрације ^{222}Rn уједно са променама неких других релевантних параметра, да би се, најчешће путем статистичке анализе покушало доћи до закључка о неким корелацијама између мерених вредности концентрације радона и неких других величина. Други приступ би се састојао у стварању модела путем којих би се покушао урачунати утицај свих релевантних фактора на промену концентрације радона у неком простору. До сада развијени модели се понекад одликују веома великом комплексношћу, са преко 60 укључених параметара. У овом раду је учињен пионирски покушај да се метод стохастичке комплексности, развијен од стране А. Колмогорова, у пракси понекад познат као комплексност Лемпел-Зива [1] (метод назван по творцима алгоритма за израчунавање стохастичке комплексности), употреби за анализу временских серија мерених вредности ^{222}Rn . За тестирање овог модела, употребљене су вредности концентрације радона, температуре и релативне влажности мерене током једне целе године у подземној лабораторији на Институту за физику у Земуњу.

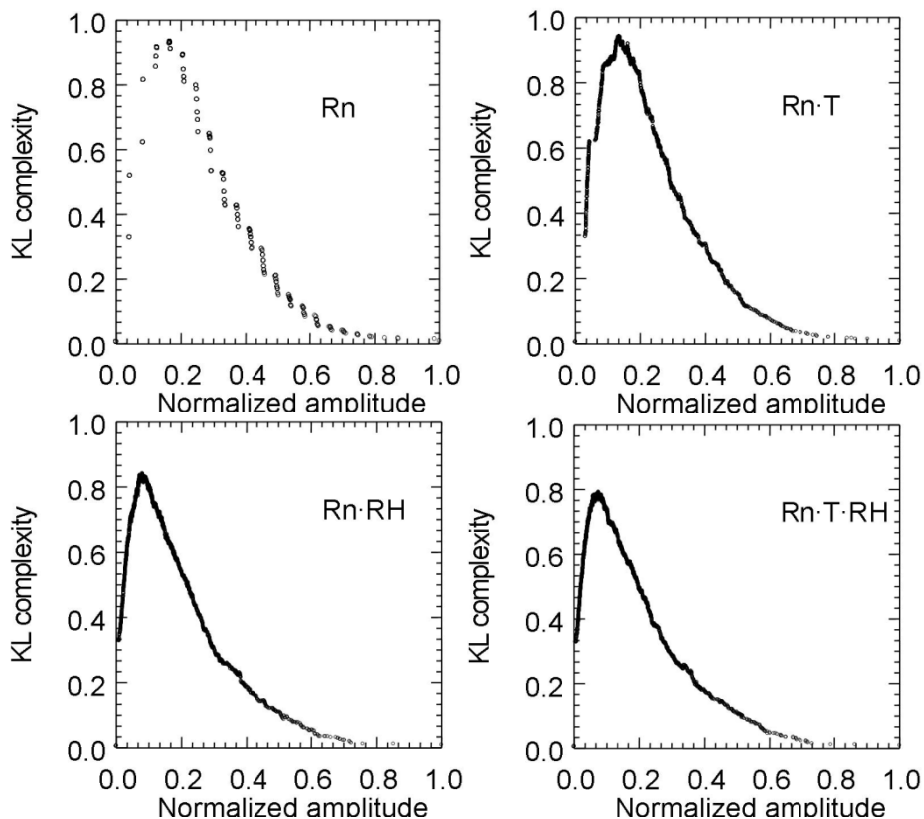
2. Метод

Метод Колмогорова се употребљава за процену комплексности једнодимензионалних секвенци података коначне величине. Ради се о веома једноставном и не-параметарском методу где се низ података путем бинарне конверзије трансформише у низ јединица и нула на основу неке усвојене референтне вредности. Најчешћи је случај да се за референтну вредност одабере медијана или средња вредност одређена из сета анализираних податка. Након тога се сваком од појединачних чланова посматраног низа додељује вредност 1 или 0 у зависности да ли је бројна вредност тог члана већа или мања од одабране референтне вредности. На тај се начин једна коначна секвенца од N бројева трансформише у низ бинарних симбола. Овај се низ бројева скенира с лева надесно да би се пребројало колико има различитих субсеквенци у целом низу. Појава сваког новог низа бинарних симбола, који није раније уочен у целом сету података повећава вредност бројача $c(N)$ за јединицу. Коначна вредност $c(N)$ једнака је броју препознатих субсеквенци тј. броју различитих комбинација бинарних јединица у једном исечку из целог низа. Да би вредност $c(N)$ била независна од величине оригиналног низа бројева, уобичајено је да се нормира вредношћу максималне ентропије система од N елемената ($b(N) = N/\log_2 N$). На овај начин се као мера комплексности посматраног низа добије један број, чија се вредност налази у интервалу од 0 до 1. Комплексност је једнака нули за случај неког потпуно уређеног низа бројева или је једнака јединици када низ поседује максимално хаотично распоређене елементе.

Мерења концентрација ^{222}Rn је изведена монитором SN1029 где су се на свака два сата бележиле и вредности температуре, притиска и релативне влажности. Подземна нискофонска лабораторија се од осталих простора у којима се прати присутност ^{222}Rn у многоме разликује по томе што су примењене мере редукције радона, као што су то херметичке алуминијумске облоге на зидовима, филтрација вадуха који се уводи у простор и благи надпритисак [2]. Из тог разлога је тешко извести закључак о евентуалним корелацијама концентрације ^{222}Rn заснован на пракси мерења у просторима који не поседују овакве механизме редукције. Да би се испитао утицај неколицине параметара на мерене концентрације радона, израчунате су комплексности за вредности производа концентрације ^{222}Rn и температуре, релативне влажности, као и за производ све три величине. Идеја за једну овакву анализу је била релативно проста – да се установи да ли производ вредности концентрације радона и поменутих параметара поседује мању или већу комплексност него низ оригиналних вредности мерене концентрације ^{222}Rn .

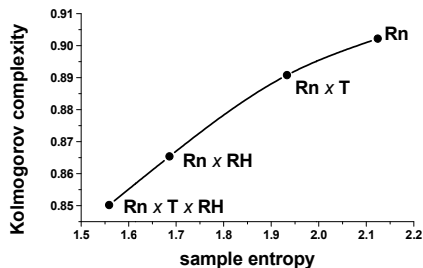
3. Резултати

За потребе ове студије, учињена је једна мала иновација где је израчунат спектар комплексности, тј. установљена је комплексност посматраног скупа података на тај начин да је сваки појединачни члан низа био изабран да послужи као референтна вредност. На тај је начин могло бити установљено за коју одабрану референтну вредност посматрани скуп бројева поседује максималну комплексност. Добијене вредности спектра комплексности приказане су на Слици 1. Установљено је да се максималне вредности комплексности, како серије мерења концентрације ^{222}Rn , тако и добијених производа могу очекивати у случају када се као референтна вредност одабере медијана. Такође се са Сlike 1 може уочити да се комплексности производа концентрације ^{222}Rn и температуре као и комплексност сета података са мереним вредностима радона не разликују знатно док множење оригиналног сета вредности концентрације ^{222}Rn и релативне влажности доводи до значајне редукције комплексности добијеног низа података.



Слика 1. Вредности Колмогоровљеве комплексности за разне низове улазних података

Да би се добио увид у ваљаност анализе засноване на методу Колмогорова, за сва четири низа података је извршена процена комплексности методом Sample Entropy. Бројне вредности ова два статистичка метода, којим се описује комплексност неког система су приказане на Слици 2



Слика 2. Вредности добијене путем два статистичка метода

4. Закључак

У овом раду је по први пут извршен покушај да се путем метода Колмогоровљеве стохастичке комплексности анализирају подаци добијени мерењима концентрације ^{222}Rn у неком простору. Сам метод стохастичке комплексности даје резултате који су у доброј корелацији са чешће употребљаваном техником Sample Entropy. Основна идеја овога рада је била да се установи да ли се мења комплексност низа бројева који описује временске промене концентрације ^{222}Rn када се ове вредности помноже вредностима неких параметара који би на концентрацију ^{222}Rn могле имати утицаја. Чињеница да се комплексност производа концентрације ^{222}Rn и температуре не разликује значајно од комплексности мерених вредности концентрације ^{222}Rn би се могла протумачити тиме да промена температуре не утиче значајније на акумулацију радона у просторији. Такође је значајно приметити да се множењем са вредностима релативне влажности добија низ који је у знатно мањој мери хаотичан него што је то случај са вредностима концентрације ^{222}Rn . Намеће се закључак да би се могло очекивати да између концентрација ^{222}Rn и релативне влажности влада инверзна пропорционалност.

5. Литература

- [1] A Lempel, J. Ziv. On the complexity of finite sequences. *IEEE Trans. Inform. Theory* 22 (1976) 75–81.
- [2] V. Udovičić, B. Grabež, A. Dragić, R. Banjanac, D. Joković, B. Panić, D. Joksimović, J. Puzović, I. Aničin. Radon problem in an underground low-level laboratory, *Radiation Measurements* 44 (2009) 1009-1012.

INDOOR ^{222}Rn TIME SERIES ANALYZED BY THE STOCHASTIC COMPLEXITY METHOD

**Miodrag KRMAR¹, Vladimir UDOVIČIĆ², Dragutin MIHAILOVIĆ³
i Ilija ARSENIĆ³**

1) *Physics Department, Novi Sad, Serbia, krmar@df.uns.ac.rs*

2) *Institute of Physics, Belgrade, Serbia, udovicic@ipb.ac.rs*

3) *Faculty of Agriculture, Novi Sad, Serbia, guto@polj.uns.ac.rs*

ABSTRACT

Measured value of ^{222}Rn concentration in some room is a final outcome of plenty processes including its generation, transport, accumulation and decay. A number of studies of the dynamic of indoor radon changes were performed with idea to find correlation of ^{222}Rn concentration with some measurable parameters. Kolmogorov (stochastic) complexity is used to describe level of randomness of the set of the ^{222}Rn concentrations, measured in low-background underground laboratory during one year. The same method was employed to check how the temperature and relative humidity, measured together with radon concentrations affected general complexity of ^{222}Rn time series. It was determined that humidity can reduce complexity of the ^{222}Rn time series much more than temperature.

КОНЦЕНТРАЦИЈА РАДОНА У ШКОЛСКИМ И ПРЕДШКОЛСКИМ УСТАНОВАМА У БЕОГРАДУ У ПЕРИОДУ 2011–2012.

**Сузана БОГОЈЕВИЋ, Весна АРСИЋ, Ирена ТАНАСКОВИЋ,
Маја ЕРЕМИЋ САВКОВИЋ, Љиљана ЈАВОРИНА и Јована ИЛИЋ**

*Институт за медицину рада Србије, "Др Драгомир Карајовић", Центар за радиолошку заштиту,
Лабораторија за иптитивање радиоактивности, Београд, Србија, suzanabogojevic13@gmail.com*

САДРЖАЈ

Од 2011-те године, у Лабораторији за иптитивање радиоактивности у склопу Института за медицину рада Србије, "Др Драгомир Карајовић" врши се контрола присуства радона у школским и предшколским установама у Београду и иптитивање радиоактивности земљишта на коме су ови објекти изграђени. У раду су приказани резултати мерења ^{222}Rn на 10 београдских општина, у периоду 2011.-2012. године. За мерење радона коришћена је стандардна процедура са активним угљем која је регулисана протоколом ЕРА. За одређивање концентрације природних радионуклида у узорцима земљишта, коришћена је стандардна гама-спектрометријска метода. Резултати показују да су концентрације радона у ваздуху и радионуклида (^{235}U , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs , ^{40}K) у земљишту, углавном биле у дозвољеним границама. Концентрација радона је у преко 83% измерених објеката била испод 200 Bq/m^3 , у 11% објеката концентрација радона се кретала у опсегу од $200\text{-}400 \text{ Bq/m}^3$, док је само у око 5 % објеката прелазила 400 Bq/m^3

1. Увод

Радон је природни радиоактивни гас, настаје радиоактивним распадом урана (^{238}U), распада се емисијом алфа честица, садржан је у природи - у стенама и земљиштима која садрже гранит, уран, глину и фосфате, одакле може дифундовати у животну средину. Највеће концентрације радона (^{222}Rn) налазе се у приземном слоју атмосфере. При удисању, радон и производи његовог распада доспевају у плућа, оштећују ткиво што доводи до рака плућа у току једног животног века [1]. Радон има највећи удео у просечној дози, односно, 79% од укупне дозе зрачења коју прима становништво излагањем природном радиоактивном зрачењу. Научни комитет Уједињених Нација о ефектима атомске радијације (United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation –UNSCEAR) је известио да просечна доза зрачења која потиче од радона и његових потомака износи $1,3 \text{ mSv/god}$ [2]. Међународна агенција за атомску енергију, IAEA (International Atomic Energy Agency), је препоручила такозване "акционе (или интервентне) нивое" концентрације радона у ваздуху при константној изложености која за боравак у становима износи $200\text{-}600 \text{ Bq/m}^3$, а на радним местима до 1000 Bq/m^3 (средње годишње концентрације радона у ваздуху) [3]. У Србији, према Правилнику о границама излагања јонизујућим зрачењима и мерењима ради процене нивоа излагања јонизујућим зрачењима (Сл. лист 86/11, од 18.11.2011. године) интервентни нивои за хронично излагање радону (^{222}Rn) у ваздуху, у становима једнаки су просечној годишњој концентрацији од 200 Bq/m^3 у новоизграђеним становима, односно 400 Bq/m^3 за постојеће стамбене објекте[4].

Све земље спровode национална истраживања у циљу утврђивања концентрације радона и примењују одговарајуће мере заштите за своје грађане. У складу са Законом о заштити од јонизујућих зрачења и о нуклеарној сигурности (Сл.гласник РС бр.36/2009) [5] и Правилником о утврђивању програма систематског испитивања радиоактивности у животној средини (Сл. гласник РС бр. 100/2010) [6], вршена су испитивања концентрације радона у предшколским и школским установама на Београдским општинама: Стари Град, Савски Венац, Нови Београд, Врачар и Вождовац у току 2011. и Чукарица, Обреновац, Палилула, Лазаревац, Младеновац у 2012. години. Такође, вршено је и испитивање радиоактивности земљишта на коме су ови објекти изграђени. У раду су приказани резултати мерења ^{222}Rn у ваздуху и упоређени са измереним концентрацијама

радионуклида: ^{235}U , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs , ^{40}K у земљишту на коме су подигнути испитивани објекти.

2. Материјал и метода

Систем за мерење радона – EG&G ORTEC AirGuard™ Radon Monitoring System, је комплет интегралног гама спектрометра са сцинтилационим NaI детектором (тип-905-4) апсолутне ефикасности од 16,144 % и резолуције на 661.66 keV од 58.9 keV. Радни напон детектора је 800 V, опсег 100 – 1000 keV. Детектор је смештен у оловно кућиште, повезан са вишеканалним анализатором, одговарајућом електроником и програмом "GammaVision".

За калибрацију детектора односно за свакодневно одређивање ефикасности мерења и перформанси мерног система, користе се угљени филтри (слика 1) израђени по протоколу EPA (United States Environmental Protection Agency) 520/5-87-005 [7]. За одређивање основне активности (фона) користи се запечаћен канистер са угљеним филтром који није никад излаган. Као стандард за одређивање ефикасности детекторског система користи се стандардни угљени филтер (производње: EG&G Instruments, серијски бр.236-4-1-2) који се састоји од канистера са активним угљем (70g) којем је додат познат садржај ^{226}Ra (758.5Bq) и затим је запечаћен. Радијум се распада у своје потомке и успоставља се радиоактивна равнотежа у запечаћеном канистеру.



Слика 1. Затворени (а) и отворени (б) филтер са активним угљем

Угљени филтри који служе за мерење концентрације радона у затвореним просторијама (слика 1) израђени су такође по протоколу EPA 520/5-87-005. Сви филтри морају имати исти садржај активног угља, дефинисаних адсорпционих карактеристика (за сваки угљени филтер посебно), и морају бити калибрисани по "Air Guard Monitoring" систему.

Мерење концентрације радона и његових краткоживећих потомака адсорпцијом на активном угљу врши се на следећи начин: 1) канистер са активним угљем се отвори у просторији у којој се мери радон, остави се преко викенда и за то време просторију не треба проветравати, 2) по затварању канистер оставити да стоји три сата да би се успоставила равнотежа између адсорбованог ^{222}Rn и његових потомака ^{214}Bi и ^{214}Pb , чије се енергетске линије (^{214}Bi : 609 keV и ^{214}Pb : 295.2 keV и 351.9 keV) улотребљавају се за квантитативну анализу. 3) канистери се, по истеку овог времена мере на NaI-спектрометру и 4) на крају се врши анализа снимљених енергетских спектра.

Испитивање радиоактивности у земљишту и грађевинском материјалу врши се гамаспектрометријски помоћу полупроводничког HPGe детекторског система (марке EG&G ORTEC ; релативне ефикасности: 40%; и резолуције 1.85 keV за гама линију ^{60}Co од 1332.5 keV) [8].

3. Резултати и дискусија

Мерења су вршена на 10 београдских општина, у 56 обданишта и 38 школа. У свакој установи је обрађено по 5-6 просторија и узети су узорци земљишта где је то било могуће. Узорци грађевинског материјала нису били доступни. Сви објекти грађени су од бетонских блокова и цигла блокова. Грејање у предшколским и школским установама је централно, вентилација је природна. У просторијама у којима је вршено мерење зидови и таванице су прекривени кречом. Подови су највећим делом од ламината (39 %), паркета (33 %), линолеума (15 %), керамичких плочица (8 %), бетонски (2 %) и виназ плочица (2 %).

У поређењу са Правилником о границама излагања јонизујућим зрачењима (Сл. лист 86/11, 18.11.2011. године) резултати испитивања садржаја радона у ваздуху у школама и вртићима у Београду у периоду 2011.-2012. године показују да се количина овог гаса кретала у дозвољеним границама. Концентрација радона у 83%(у 2011.) одн. 84%(у 2012.) измерених објеката била је испод 200 Bq/m³, у 11% објеката концентрација радона је била у опсегу од 200-400 Bq/m³, док је највећа концентрација, преко 400 Bq/m³, измерена у 6%(у 2011.) одн. 5%(у 2012.) објеката.

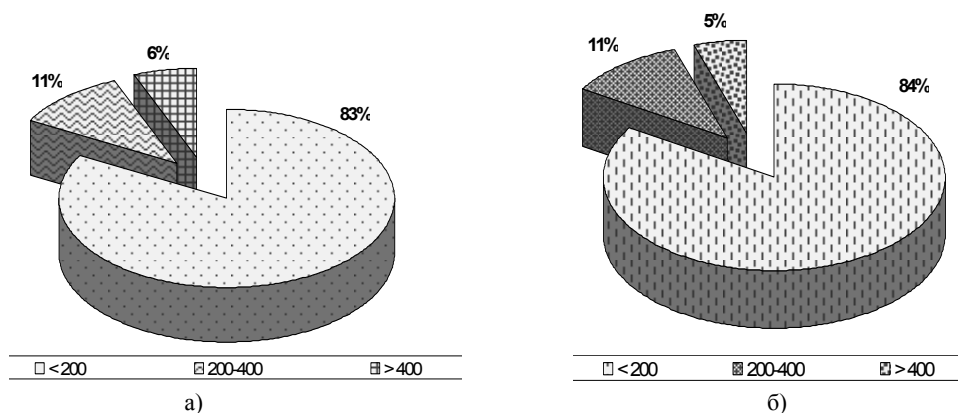


График 1: Процентуална расподела концентрације радона у школама и вртићима на територији Београда у а) 2011. и б) 2012. години.

У табели 1 приказане су граничне вредности активности радионуклида (Мин – Макс.) у измереним узорцима земљишта на којима су саграђени објекти за боравак деце. Активности природних радионуклида се налазе у границама просечних вредности за регион Београда, чије се испитивање врши по програму мониторинга радиоактивности у животној средини Београда [9]. Активност вештачког радионуклида ¹³⁷Cs, који је у животну средину доспео након нуклеарне несреће у Чернобиљу, се такође кретала у границама вредности измерених на територији Београда [9].

Табела 1. Опсег концентрација радионуклида у земљишту на коме су подигнути објекти

Концентрација радионуклида	⁴⁰ K (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	²³⁸ U (Bq/kg)	²³⁵ U (Bq/kg)
Мин-Макс.	374–684	0.3 – 151	29 – 98	25 – 60	12 – 78	1.3 – 3.4

Повишене концентрације радона у школама и вртићима

Као што се са графика 1 види, у 5–6% од укупно обрађених просторија, измерене су и концентрације радона од преко 400 Bq/m³. У овим објектима мерења су поновљена излагањем по два канистера у истој просторији.

Концентрације радона веће од 400 Bq/m³ измерене су у неким просторијама два вртића на територији општине Вождовац и у једној просторији основне школе на територији општине Стари Град. Резултати првих и поновљених мерења се поклапају.

Резултати мерења активности природних радионуклида у узорцима земљишта на којима су објекти подигнути (табела 1) не указују да може доћи до повећања концентрације радона у просторијама. Активност грађевинских материјала нисмо били у могућности да испитамо, јер су они већ уграђени у објекат. Запосленима у овим установама дат је савет да се ове просторије чешће проветравају. Због сезонске варијације концентрације радона потребно је у овим објектима поновити мерења, ради што боље процене просечне концентрације радона у простору у коме бораве деца, њихови професори и васпитачи.

4. Закључак

Резултати мерења показују да су концентрације радона у ваздуху и радионуклида у земљишту: ²³⁵U, ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²³²Th, ¹³⁷Cs, ⁴⁰K углавном биле у дозвољеним границама. Концентрација радона је у највећем броју обрађених објеката (преко 83 %) била испод 200 Bq/m³, у 11% објеката концентрација радона се кретала у опсегу од 200-400 Bq/m³ и свега у око 5 - 6 % објеката била је преко 400 Bq/m³. Са обзиром да се активности природних радионуклида у земљишту на којима су подигнути објекти за боравак деце не показују пораст у односу на просечне вредности за Београд, не очекујемо утицај састава тла на количину радона у обрађеним просторијама. Због сезонске варијације концентрације радона у овим просторијама су поновљена мерења, ради што боље процене просечне концентрације радона у простору у коме бораве деца, њихови професори и васпитачи. Како састав материјала уграђених у објекат може знатно да утиче на концентрацију радона у затвореним просторијама, неопходна је контрола грађевинског материјала, пре уградње, у колико, по спецификацији произвођача, постији могућност присуства природних радионуклида у њему.

У циљу смањења концентрације радона у зградама, могу се предузети следећи општи поступци: 1) уклањање извора зрачења (замена елемената и материјала); 2) скретање тока кретања радона - вентилација испод доње плоче подрума, системом перфорираних цеви, које су повезане са димњаком ; 3) извођење препрека између извора радона и просторије - заптивање свих отвора и пукотина у преградама, облагањем фолијама или вишеслојним премазивањем површина преграде; 4) појачање вентилације; 5) пречишћавање ваздуха електростатичким и електронским пречистачима којима се може снизити концентрација радона до 19 пута. Код пројектовања нових зграда концентрација радона се може смањити: 1) постављањем додатне арматуре у плочу и зидове ради спречавања настанка пукотина; 2) посебном обрадом спојева између плоча и зидова као и продора цеви; 3) избегавањем употребе шупљих бетонских блокова, због израженог ефекта димњака.

5. Литература

- [1] US Environmental Protection Agency and Department of Health and Human Services "A citizen's Guide to Radon", publ. No. OPA-086-004, Washington D.C. 1986.
- [2] Effects of Ionizing Radiation, *United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* –UNSCEAR 2006,
- [3] International Basic Safety Stanadards for Protection Against Ionizing Radiation and for the safety of Radiation Sources, Safety Series No.115, IAEA –Vienna 1996. pp 291.
- [4] Правилник о границама излагања јонизујућим зрачењима и мерењима ради процене нивоа излагања јонизујућим зрачењима (Сл. лист 86/11, од 18.11.2011. године
- [5] Закон о заштити од јонизујућих зрачења и о нуклеарној сигурности (Сл.гласник РС бр.36/2009)
- [6] Правилник о утврђивању програма систематског испитивања радиоактивности у животној средини (Сл. гласник РС бр. 100/2010)
- [7] Gray, David J. et al „EERF Standard Operating Procedures for RN-222 Measurement Using Charcoal Canisters” EPA 520/5-87-005 – 1987, chapter 3.4.
- [8] “Measurement of Radionuclides in Food and the Environment“, *Technical Report Series No 295*, IAEA Vienna 1989.
- [9] Радиоактивност животне средине у Србији, Институт за медицину рада Србије „ Др Драгомир Карајовић”, Београд, 1995... 2012

INDOOR RADON CONCENTRATION IN SCHOOLS AND DAY-NURSERIES OF BELGRADE IN THE PERIOD 2011-2012

**Suzana BOGOJEVIĆ, Vesna ARSIĆ, Irena TANASKOVIĆ,
Maja EREMIĆ SAVKOVIĆ, Ljiljana JAVORINA, Jovana ILIĆ**

*Serbian Institute of Occupational Health "Dr Dragomir Karajović", Radioecology Department,
Laboratory for Radioactivity Measurements Belgrade, Serbia
suzanabogojevic13@gmail.com*

ABSTRACT

Since 2011. the presence of radon in schools and day-nurseries is measured by the Laboratory for Radioactivity Measurements at the Serbian Institute of Occupational Health "Dr Dragomir Karajović". Radioactivity control of the ground at which these objects were built was done simultaneously. This paper presents the results of ^{222}Rn measurements in 10 Belgrade municipalities, in the period 2011-2012. For radon measurements standard procedure with activated carbon was used, which is regulated by the EPA protocol. For determination of the natural radionuclides concentrations in soil, a standard gamma-spektrometry method is used.

The results show that radon concentrations in air and radionuclides (^{235}U , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs , ^{40}K) content in soil, were generally within acceptable limits. Radon concentrations were: under 200 Bq/m^3 in about 84% objects, in the range of 200-400 Bq/m^3 in 11% objects and over 400 Bq/m^3 in about 5 % objects.

KONTROLA KVALITETA GAMASPEKTROMETRIJSKOG ISPITIVANJA KONCENTRACIJE RADONA U ZATVORENOM PROSTORU

**Vesna ARSIĆ, Maja EREMIĆ SAVKOVIĆ, Irena TANASKOVIĆ,
Ljiljana JAVORINA, Suzana BOGOJEVIĆ i Jovana ILIĆ**

Institut za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“, Beograd, Srbija, s.vesna.a@gmail.com

SADRŽAJ

U ovom radu je prikazana procedura kontrole kvaliteta koja se redovno sprovodi u laboratoriji za gamaspektrometriju Instituta za medicinu rada Srbije u svrhu obezbeđenja poverenja u tačnost određivanja koncentracije radona u zatvorenim prostorima. Ovim prikazom je obuhvaćena provera efikasnosti detektora, međusobno poređenje rezultata merenja na dve vrste detektora i međulaboratorijska poređenja, koja su u okviru interne i eksterne kontrole kvaliteta, rađene tokom 2012. Godine.

1. Uvod

Laboratorija za gamaspektrometriju Instituta za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“ akreditovana je za metodu određivanja koncentracije radona u zatvorenim prostorijama pomoću ugljenih filtera. Metoda je standardna i radi se prema proceduri koju je propisala EPA-520/5-87-005 [1]. Da bi se obezbedilo poverenje u kvalitet dobijenih rezultata, što je što je jedan o važnijih ciljeva sprovođenja politike kvaliteta Instituta, neophodno je dosledno sprovođiti Program osiguranja i kontrole kvaliteta (QA&QC-Quality Assurance and Quality Control Program) u celini. *Osiguranje kvaliteta* predstavlja sve planske i sistematske aktivnosti uključene u sistem kvaliteta koje treba da obezbede adekvatno poverenje da će proces određivanja koncentracije radona, zadovoljiti zahteve za kvalitetom. *Kontrola kvaliteta* zauzima centralno mesto u programu QA&QC i sastoji se iz niza operativnih tehnika i aktivnosti koje se koriste da bi se uočile promene i uklonile eventualne greške u funkcionisanju procesa, a time zadovoljili zahtevi za kvalitetom. U gamaspektrometrijskoj laboratoriji Instituta sprovode se redovno, prema zahtevima standarda SRPS ISO/IEC 17025:2006 [2], i u ovom radu su prikazane, i interna i eksterna kontrola kvaliteta mernih uređaja. Kao interna kontrola kvaliteta obavlja se periodična provera karakteristika uređaja i u tu svrhu, prema Planu kontrole kvaliteta, rade se kontrolna merenja za scintilacioni NaI detektor D4, i za HPGe detektor D3. U cilju obezbeđenja poverenja u kvalitet rezultata merenja, u okviru interne kontrole radi se i poređenje rezultata merenja izvršenih na ova dva tipa detektora. Rezultati ovog poređenja su obuhvaćeni ovim radom. Eksternu kontrolu kvaliteta omogućavaju međulaboratorijska poređenja i ova laboratorija učestvuje u njima kad god to dozvoljavaju uslovi učešća, redovni poslovi laboratorije, materijalne i finansijske mogućnosti i usaglašenost sa predviđenim PT šemama za određeni period. U ovom tekstu su prikazani i rezultati jednog od međulaboratorijskih poređenja izvršenih u toku 2012. godine.

2. Materijal i metode

Merenja u svrhu određivanja koncentracije radona obavljaju se na dva tipa detektora: scintilacionom NaI (tip: 905-4, proizvođač: EG&G Ortec, radni napon: 800 V, apsolutna efikasnost: 16.144 %, rezolucija na 661.66 keV: 58.9 keV) i čisto germanijumskom (tip: GEM40, proizvođač: ORTEC AMETEK-AMT, radni napon: 4800 V, relativna efikasnost: 40 %, rezolucija na 1332.5 keV: 1.85 keV). Oprema koja se koristi u laboratoriji mora biti etalonirana prema planu etaloniranja, a pored toga se mora vršiti stalna provera kvaliteta ispitivanja. Za uzorkovanje se koriste metalne kutije-kanistri sa aktivnim ugljem. Metod merenja se zasniva na adsorpciji radona na uglju i merenju gama zračenja njegovih potomaka. Kanistri sa aktivnim ugljem se otvaraju i izlažu u zatvorenim prostorijama 48-72 h, a postavljaju se na 1 m od poda i zidova. Posle zatvaranja filtera, merenju se može pristupiti nakon uspostavljanja ravnoteže (oko tri sata) između radona i njegovih potomaka i to na NaI detektoru ili HPGe detektoru. Mernje, po proceduri traje

30 min. Koncentracija radona-222 određuje se preko njegovih kratkoživećih potomaka: gama energija olova-214 na 295 keV i 352 keV i Bi-214 na 609 keV. U okviru QA&QC određuje se efikasnost detektora i proverava energetska kalibracija. Prema Planu kontrole kvaliteta, provera efikasnosti detektora D4 radi se pre svake grupe merenje a za detektor D3, jednom nedeljno, i to u onim nedeljama kada se merenje vrši (određivanje koncentracije radona se radi sezonski-dva puta godišnje, na proleće i u jesen). Efikasnost detektora ulazi u proces izračunavanja tražene koncentracije radona za sva merenja izvršena u toku tog dana i za njeno izračunavanje neophodno je izmeriti fon i sertifikovani standard (Ra-226, proizvođača Isotope Product Laboratory, Burbank, California, aktivnosti 913.9 Bq na dan 1.01.1989. godine, koji sadrži radijum nitrat uniformno raspoređen u ugljenom filteru iste geometrije kao i uzorci koji će se ispitivati. Ovaj referentni etalon je sledljiv do američkog nacionalnog biroa za standarde.). Izračunate vrednosti efikasnosti detektora unose u odgovarajuće kontrolne karte koje predstavljaju grafički prikaz praćenja merene veličine u odnosu na kontrolne granice a na osnovu čega se proverava stabilnost rada detektora. Proces ili uređaj se smatra stabilnim ukoliko se odvija unutar granica slučajnih faktora.

3. Rezultati i diskusija

Određivanje efikasnosti NaI detektora D4

Internim dokumentima je propisan način i dinamika sprovođenja osiguranja i kontrole kvaliteta u skladu sa preporukama datim u TCS No. 24 [3]. Za NaI detektor, kao što je rečeno, određivanje efikasnosti se vrši pre svake grupe merenja. Fon se određuje merenjem ugljenog filtera koji nikada nije izlagan. Merenje traje 30 min i analiziraju se vrednosti ukupnog broja impulsa (gross) za tri, gore pomenuta, gama prelaza. Slično, meri se i standard Ra-226 30 min i dobijaju se vrednosti za sumu površina ispod tri gama energije (olova-214 na 295 keV i 352 keV i Bi-214 na 609 keV) preko kojih se određuje koncentracija radona prema metodi EPA 520/5-87-005 [1]. Efikasnost se računa po formuli 1:

$$E_f = \frac{G_s - B}{t_m \cdot A_{rf}} \quad (1)$$

gde je:

G_s - ukupna površina ispod sva 3 pika kod merenja referentnog materijala

B - ukupna površina ispod sva 3 pika kod merenja fona

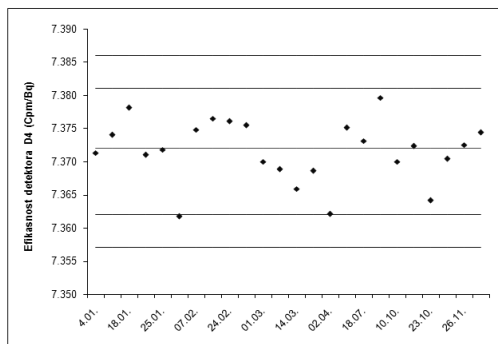
A_{rf} - aktivnost radijuma u referentnom materijalu (Bq)

t_m - vreme merenja fona i referentnog materijala (30 minuta)

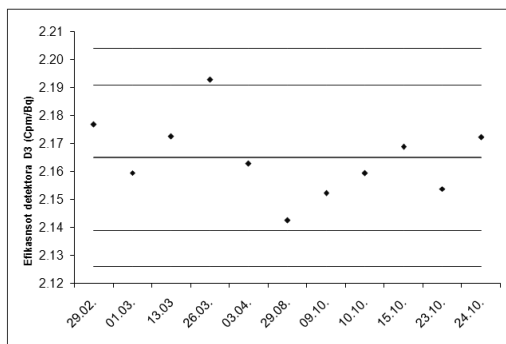
Efikasnost detektora se izražava u cpm/Bq. Na Grafiku 1 a) prikazane su izračunate vrednosti za efikasnost NaI detektora tokom 2012. godine.

Određivanje efikasnosti HPGe detektora D3

Kontrola kvaliteta na detektoru D3, u pogledu određivanja koncentracije radona u zatvorenom prostoru, radi se na na sličan način kao kod detektora D4. Prema Planu kontrole kvaliteta ova merenja se rade jednom nedeljno, u onim nedeljama u kojima se vrši uzorkovanje i merenje koncentracije radona. Najpre se realizuju kontrolna merenja fona i sertifikovanog standarda Ra-226 na osnovu kojih se izračunava efikasnost detektora i prikazuje, pa onda i prati, na kontrolnoj karti efikasnosti detektora D3. Time se proverava stabilnost detektora i obezbeđuje poverenje u tačnost rezultata. Na Grafiku 1 b) je kontrolna karta efikasnosti detektora D3 dobijena tokom merenja u 2012. godini.



a)



b)

**Grafik 1: Kontrolna karta efikasnosti za:
a) NaI detektor D4 i b) HPGe detektor D3 u 2012. godini**

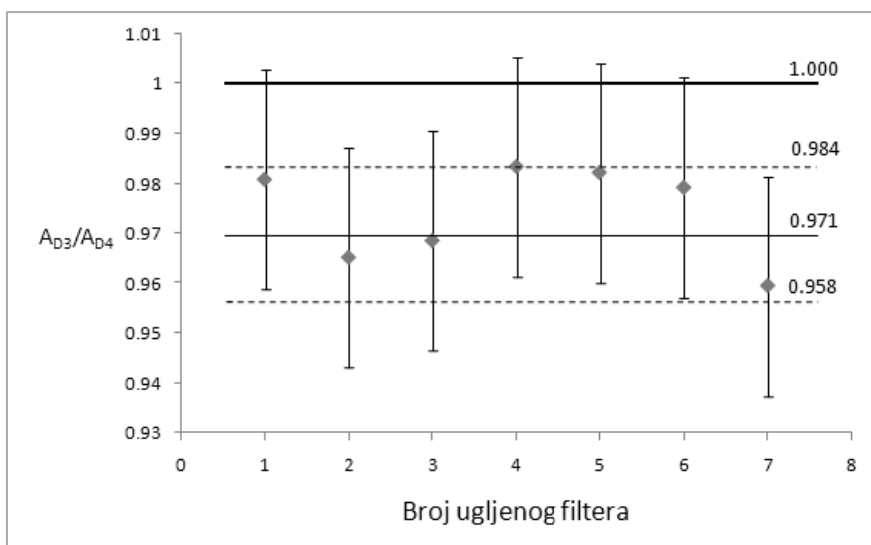
Oba grafika su opšte prihvaćene Shewhartove kontrolne karte sa prikazanim granicama upozorenja koje se postavljaju na ± 2 standardne devijacije (sistem bi mogao biti van kontrole) i sa kontrolnim ili granicama akcije koje su na ± 3 standardne devijacije (sistem je van granica kontrole i neophodno je preduzeti korektivne mere). Grafički prikaz nam omogućava vizuelno praćenje stanja. Na ovoj vrsti kontrolne karte, najčešće se kao referentna vrednost uzima srednja vrednost većeg broja merenja. Svi kontrolisani rezultati treba da su unutar kontrolnih granica. Iskakanja ukazuju da je došlo je do promene u mernom sistemu koji je značajno promenio svoje performanse. Kontrolne karte ove promene čine vidljivim i omogućavaju brzo otkrivanje greške. Na osnovu rezultata i celokupnog stanja sistema analitičar odlučuje da li je promena vrlo značajna i da li su potrebne korektivne mere. Sigurni pokazatelji neophodnosti korektivnih mera su npr 2 uzastopne vrednosti izvan granice akcije, 4 uzastopne izvan granica upozorenja, 10 uzastopnih sa iste strane srednje vrednosti, ulazni ili silazni trend za nekoliko uzastopnih vrednosti, itd...

Poredjenje rezultata merenja na dva tipa detektora

U cilju kontrole kvaliteta rezultata merenja koncentracije radona u laboratoriji za gamaspektrometriju vrši se i poredjenje rezultata dobijenih za iste uzorke merene na različitim vrstama detektora i analizira se njihovo slaganje. Jedno takvo poredjenje za grupu ugljenih filtera izloženih radonu visoke aktivnosti prikazano je u Tabeli 1. Očigledno je da se rezultati dobijeni merenjem na ova dva detektora dobro slažu. Radi dubljeg uvida, analizira se njihov odnos. Na Grafiku 2 prikazan je odnos ovih dveju vrednosti (na nivou poverenja od 95 %) za sedam merenih uzoraka, zajedno sa srednjom vrednošću ovog odnosa koji iznosi: $[A_{D4}/A_{D3}]_{sr} = 0.971 \pm 0.013$ i koji je na grafiku predstavljen tankom punom horizontalnom linijom (isprekidane linije su sr. vrednost \pm merna nesigurnost, deblja puna linija odgovara jedinici). Odnos pokazuje slaganje unutar nekoliko procenata, što predstavlja vrlo dobro poklapanje.

Tabela 1. Rezultati merenja istih ugjenih filtera na detektroma D4 i D3

Broj filtera	Oznaka filtera	Koncentracija radona A_{D4} (Bq/m ³)	Koncentracija radona A_{D3} (Bq/m ³)	A_{D4}/A_{D3}
1	128	1872 (15)	1836 (26)	0.981 (0.022)
2	127	1894 (15)	1828 (26)	0.965 (0.021)
3	126	1906 (15)	1846 (26)	0.969 (0.021)
4	124	1922 (15)	1890 (26)	0.983 (0.021)
5	123	1905 (15)	1871 (26)	0.982 (0.021)
6	122	1921 (15)	1881(25)	0.979 (0.021)
7	121	1876 (15)	1800 (25)	0.959 (0.021)



Grafik 2: Poredjenje rezultata merenja na detektroma D4 i D3

Sa grafika se vidi da mali broj vrednosti značajnije odstupa od srednje vrednosti a da se i one koje to čine, nalaze u okviru merne nesigurnosti, što, kao i odnos koji je blizak jedinici, potvrđuje vrlo dobro slaganje.

Tabela 2: Rezultati merenja koncentracije radona u Institutu za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“ u okviru Interkomparacije

Broj filtera	Oznaka filtera	Koncentracija radona		Evaluacija
		Referentna vrednost A_s (Bq/m ³)	Izmerena vrednost A_i (Bq/m ³)	
1	106	91 ± 6	104 ± 7	A
2	107	91 ± 6	86 ± 7	A
3	B21	91 ± 6	96 ± 6	A
4	B22	91 ± 6	91 ± 6	A
5	112	148 ± 22	103 ± 6	A
6	131	149 ± 22	155 ± 8	A
7	B23	150 ± 22	146 ± 8	A
8	B24	151 ± 22	156 ± 8	A

Učešće u interkomparaciji

Laboratorija za gaspektrometriju je u 2012. godini, između ostalog, učestvovala u interkomparaciji iz oblasti merenja koncentracije radona pomoću pasivnih radon detektora koju je organizovala Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine „Zaštita“, Instituta za nuklearne nauke „Vinča“. Izlagano je osam kanistra na dve lokacije u Institutu Vinča. Merenja su obavljena na HPGe detektoru D3. Rezultati objavljeni septembra 2012 u zvaničnom izveštaju prikazani su u Tabeli 2. Prema kriterijumu za evaluaciju i na osnovu kriterijuma vrednovanja rezultata laboratorije, izmerena koncentracija radona u svim ugljenim filterima imala je konačnu ocenu A (Acceptable, prihvatljiv). U skladu sa ciljevima koje je laboratorija postavila pred učešće u interkomparaciji i kriterijumima za vrednovanje rezultata zaključeno je da je u ovoj interkomparaciji potvrđena metoda koju laboratorija koristi za merenje niskih aktivnosti Rn-222 pasivnim dektorima [1], potvrđena je kalibracija za merenje radona koja je radena na detektoru D3, prikazano je odlično slaganje sa rezultatima drugih laboratorija koje koriste istu metodu, potvrđena je QA/QC i sledljivost referentnog etalona.

4. Zaključak

Laboratorija za gaspektrometriju IMR Srbije sprovodi interne i eksterne provere radi verifikacije usklađenosti sopstvene aktivnosti sa zahtevima sistema menadžmenta kvalitetom i međunarodnog standarda SRPS ISO/IEC 17025:2006 [2]. Interne provere obuhvataju sve elemente menadžmenta kvalitetom uključujući i procese ispitivanja. U radu je prikazana primena interne i eksterne kontrole kvaliteta na metodu određivanja koncentracije radona u 2012. godini. Na osnovu prikazanih kontrolnih karti, poređenja rezultata merenja na dva tipa detektora i rezultata interkomparacije može se zaključiti da je rad sistema pri određivanju koncentracije radona pouzdan, da su dobijeni rezultati ujednačenog i zadovoljavajućeg kvaliteta uz razumno nisku mernu nesigurnost, te da je rad akreditovane gaspektrometrijske laboratorije usaglašen sa međunarodnim propisima.

5. Literatura

- [1] D.J. Gray, S.T. Windham "EERF Standard Operating Procedures for Radon-222 Measurement Using Charcoal Canisters", EPA 520/5-87-005, United States Environmental protection Agency, Montgomery, 1987
- [2] SRPS ISO/IEC 17025:2006, *Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje* (ISO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories).
- [3] TCS No. 24, *Quality System Implementation for Nuclear Analytical Techniques*, IAEA, Vienna, 2004.

QUALITY CONTROL OF INDOOR RADON CONCENTRATION MEASUREMENTS BY GAMASPECTROMTRY

**Vesna ARSIĆ, Maja EREMIĆ SAVKOVIĆ, Irena TANASKOVIĆ,
Ljiljana JAVORINA, Suzana BOGOJEVIĆ i Jovana ILIĆ**

*Serbian Institute of Occupational Health „Dr Dragomir Karajović“, Belgrade, Serbia,
s.vesna.a@gmail.com*

ABSTRACT

This paper describes the quality control procedures that are regularly conducted in the Serbian Institute of Occupational Health in order to ensure confidence in the accuracy of radon indoors calculations. This presentation covers the evaluation of efficacy of detectors, comparison of measurements on the two types of detectors and interlaboratory comparisons (which are the internal and external quality controls), made in the year 2012.

Key words: Radon concentration, gammaspectrometry, quality control, quality assurance.

PRIMENA RAZLIČITIH METODA U ANALIZI VREMENSKIH SERIJA KONCENTRACIJE RADONA

**Vladimir UDOVIČIĆ, Dimitrije MALETIĆ, Aleksandar DRAGIĆ, Radomir BANJANAC,
Dejan JOKOVIĆ, Nikola VESELINOVIĆ i Jelena FILIPOVIĆ**

Institut za fiziku, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, udovicic@ipb.ac.rs

SADRŽAJ

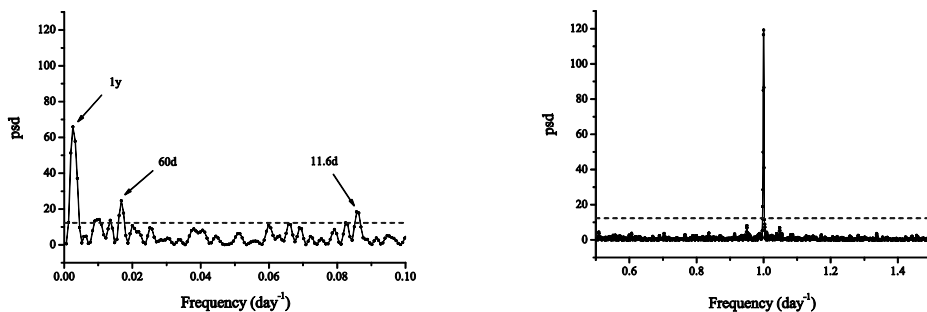
Kao rezultat kratkotrajnih merenja koncentracije radona atkivnim uređajima, dobija se vremenska serija podataka. U ovom metodološkom radu predstavljeni su različiti metodi za analizu vremenskih serija merenih koncentracija radona. O svakom od njih dat je kratak opis i kakve se sve informacije mogu dobiti o ponašanju radona u datoj sredini. Svaki od modela je ilustrovan nekim primerom iz prakse merenja radona.

1. Uvod

Istraživanja dinamike radona u različitim sredinama, naročito u zatvorenim prostorijama, imaju veliki značaj kako sa aspekta zaštite od jonizujućih zračenja tako i sa projektovanjem mera za njegovu redukciju. To predstavlja dosta složen zadatak. Dosadašnji rezultati i mnogobrojni modeli ponašanja radona u zatvorenim prostorijama ukazuju na svu kompleksnost, pre svega u predviđanju varijabilnosti radona, iz prostog razloga što u toj zavisnosti učestvuje veliki broj parametara. U tom smislu, u ovom radu su prikazani neki od metoda za analizu vremenskih serija merenih koncentracija radona, kao i načini na koje je moguće istovremeno procesirati veći broj vremenskih serija fizičkih veličina koje se mere simultano sa koncentracijom radona i potencijalno mogu dati doprinos varijabilnosti radona u datoj sredini. O svakom od njih dat je kratak opis i kakve se sve informacije mogu dobiti o ponašanju radona u određenoj sredini. Svaki od modela je ilustrovan nekim primerom iz prakse kratkotrajnih merenja koncentracije radona.

2. Metode u analizi vremenskih serija koncentracije radona

Lomb-Skarglov metod: Nakon dobijanja vremenske serije merenih veličina, prvo se pristupa spektralnoj analizi u kojoj se traga za potencijalnim periodikama. Primena uobičajene Furijeove spektralne analize nije moguća u slučaju kada postoji veliki procenat nedostajućih podataka odnosno prekida u merenjima, što je sasvim normalna pojava u dugotrajnim kontinualnim merenjima. Jedan od načina da se prevaziđu problemi nedostajućih podataka je interpolacija između realnih podataka. Ona se kao metoda međutim nije pokazala kao pouzdana, jer može dati lažne pikove u nisko-frekventnoj oblasti. Potpuno drugačiji metod spektralne analize neravnomerno raspoređenih podataka koji olakšava ove teškoće i ima neke druge poželjne karakteristike, razvio je Lomb [1]. Lombov metod koristi podatke samo u trenucima koje smo zaista izmerili, a sama tehnika je razvijena upravo za tretman isprekidanih podataka. Na Slici 1 je prikazana unapređena tehnika analize od prvobitnog Lombovog periodograma do Lomb-Skarglovog (Lomb-Scargle) periodograma koji je dizajniran za spektralnu analizu neravnomernih vremenskih nizova, u ovom slučaju merenih koncentracija radona u Niskofonskoj podzemnoj laboratoriji, Instituta za fiziku u Beogradu u periodu od novembra 2010. do novembra 2011. godine, i ekvivalentan je fitovanju podataka sinusnim funkcijama metodom najmanjih kvadrata pri čemu je interpretacija statistički dobro zasnovana. Takođe, procedurom CLEAN, vrši se dekonvolucija vremenskog niza i tzv. prozorske funkcije i uklanjaju se lažni pikovi iz periodograma koji su posledica neravnomernog uzorkovanja. Jasno se uočavaju dve izrazite periodike, jednodnevna i jednogodišnja. Takođe, rezultati ove analize publikovani su u referenci [1].



Slika 1. Lomb-Scarglovog (Lomb-Scargle) periodogram neravnomernih vremenskih nizova merenih koncentracija radona u Niskofonskoj podzemnoj laboratoriji, Instituta za fiziku u Beogradu u periodu od novembra 2010. do novembra 2011. godine

Metod stohastičke kompleksnosti: U referenci [3] je po prvi put izvršen pokušaj da se putem metoda Kolmogorovljeve stohastičke kompleksnosti analiziraju podaci dobijeni merenjima koncentracije radona u nekom prostoru. Osnovna ideja je bila da se ustanovi da li se menja kompleksnost niza brojeva koji opisuju vremenske promene koncentracije radona kada se ove vrednosti pomnože vrednostima nekih parametara koji bi na koncentraciju radona mogle imati uticaja. Činjenica da se kompleksnost proizvoda koncentracije radona i temperature ne razlikuje značajno od kompleksnosti merenih vrednosti koncentracije radona bi se mogla protumačiti time da promena temperature ne utiče značajnije na varijabilnost radona u prostoriji, za razliku od uticaja relativne vlažnosti. Više detalja o ovoj metodi biće prikazano u posebnom radu u okviru istog XVII Simpozijuma DZZSCG, Vrnjačka Banja 2013, Srbija.

MVA (MultiVariate Analysis) metod: Sledeći metod za analizu varijacija koncentracija radona implementiran je kao deo programskog paketa ROOT [4]. Ovaj programski paket namenjen je za analizu podataka, i razvijen u CERN-u za potrebe NA49 eksperimenta, ali pravi procvat dobija u eri Velikog hadronskog kolajdera. ROOT sadrži, pored programa za analizu podataka, i programe za multivarijantnu analizu (The Toolkit for Multivariate Analysis - TMVA) [5]. Iako je TMVA prvenstveno razvijen za potrebe analiza u Fizici visokih energija, vremenom se primena proširuje i na druge oblasti. TMVA, u suštini, čini okvir za procesiranje, paralelnu evaluaciju i aplikaciju multivarijativnih klasifikacija. Sve multivarijantne tehnike u TMVA pripadaju familiji algoritama "nagledanog učenja". Nagledano učenje rezultira u dobijanju algoritma za "mapiranje" (aproksimiranje) izlazne funkcionalne zavisnosti. Put do dobrog algoritma je učenje treniranjem, a srž treniranja je korišćenje skupa ulaznih varijabli (npr. atmosferske varijable) sa poznatim izlaznim vrednostima (npr. koncentracijom radona). Rezultujuća izlazna funkcionalna zavisnost može biti, jednostavno, skup "odluka", tj. uslova na vrednosti ulaznih podataka, kojim klasifikujemo izlazne vrednosti. Češće, traga se za nekom aproksimativnom funkcionalnom zavisnošću, sa uslovom da ova zavisnost daje izlazne vrednosti sa nekom proizvoljnu tačnošću. U ovom radu ćemo prikazati primer klasifikacije na visoke i niske koncentracije radona u zatvorenoj prostoriji. Na slici 2. prikazane su izračunate korelacije raznih atmosferskih varijabli, koje bi mogle da utiču na varijaciju koncentracije radona.

USAGE OF THE DIFFERENT METHODS IN RADON TIME-SERIES ANALYSIS

Vladimir UDOVIČIĆ, Aleksandar DRAGIĆ, Radomir BANJANAC, Dejan JOKOVIĆ, Dimitrije MALETIĆ, Nikola VESELINOVIĆ i Jelena FILIPOVIĆ

Institute of Physics, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, udovicic@ipb.ac.rs

ABSTRACT

As a result of short-term measurements of radon concentration by the active devices, you get the data time series. In this methodological paper we present different methods for the analysis of time series of the measured radon concentrations. For each of them there is a short description, and what kind of information can be obtained about the behavior of radon in a given environment. Each model is illustrated with an example from the practice of the radon measurements.

KORELACIONA ANALIZA UTICAJA ATMOSFERE NA VARIJACIJU KONCENTRACIJE RADONA U RAZLIČITIM SREDINAMA

Vladimir UDOVIČIĆ, Aleksandar DRAGIĆ, Radomir BANJANAC, Dejan JOKOVIĆ, Dimitrije MALETIĆ, Bojana GRABEŽ i Jelena FILIPOVIĆ

Institut za fiziku, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, udovicic@ipb.ac.rs

SADRŽAJ

Ponašanje radona u različitim sredinama predstavlja jedan složen proces koji se ogleda, pre svega u intenzivnim prostorno vremenskim varijacijama njegove koncentracije. U ovom radu analizirane su vremenske serije koncentracije radona u različitim sredinama kao i vremenske serije meteoroloških parametara u datoj sredini (temperatura, atmosferski pritisak i relativna vlažnost). Korišćenjem standardnih statističkih alata, a na osnovu dobijenih vremenskih serija određivane su korelacije između koncentracije radona i parametara atmosfere u određenoj sredini. Dobijeni rezultati pokazuju svu složenost ponašanja radona, kao i različitost u doprinosima određenih atmosferskih parametara u varijacijama koncentracije radona u različitim sredinama.

1. Uvod

U niskofonskoj podzemnoj laboratoriji, Instituta za fiziku u Beogradu vrše se kontinuirana merenja koncentracije radona od njenog postanka, 1997. godine. U poslednjih pet godina, prevashodno se rade kratkotrajna merenja aktivnim uređajem SN1029 (proizvođača Sun Nuclear Corporation). Ova metoda se koristi za dobijanje vremenskih serija koncentracija radona u datoj sredini. Dobijeni rezultati su publikovani u nekoliko radova u međunarodnim naučnim časopisima [1], [2], [3] i prezentovani na više međunarodnih i domaćih konferencija posvećenih problematici radona.

Od 2012. godine, merenja koncentracije radona istim uređajem vršena su na različitim lokacijama u Beogradu. S obzirom da pomenuti uređaj omogućava simultano merenje atmosferskih parametara (temperatura, atmosferski pritisak i relativna vlažnost) to je bilo moguće dobijanje njihovih vremenskih serija. Dobijene vremenske serije mogu dati dosta korisnih informacija o dinamici procesa koji utiču na varijaciju koncentracije radona u datoj sredini. U tom smislu, a za ovu priliku, odabrana su tri merna mesta (nadzemna laboratorija u okviru Niskofonske laboratorije za nuklearnu fiziku, Instituta za fiziku u Beogradu, spoljašnja sredina u neposrednoj blizini pomenute laboratorije i jedna tipična kuća u Beogradu) i korelacionom analizom je pokušano da se ustanovi uticaj pojedinih parametara atmosfere na varijaciju koncentracije radona u datoj sredini. Dobijeni rezultati pokazuju složenu dinamiku radona i postojanje još dosta faktora koji utiču na njegovu varijaciju u određenom prostoru.

2. Eksperiment

Vremenske serije merenih koncentracija radona, temperature, atmosferskog pritiska i relativne vlažnosti dobijene su pomoću uređaja SN1029 (proizvođača Sun Nuclear Corporation). To je merni uređaj jednostavne konstrukcije i primene u praksi. U suštini, radi se o brojaču sa dodatkom senzora za merenje meteoroloških parametara. Nedostatak uređaja je nemogućnost merenja koncentracije radona u zemljištu i vodi. Operater može podesiti vremenske sekvence od 0.5 sati do 24 sati. Jedan ciklus merenja može trajati 1000 sati ili ukupno 720 vremenskih sekvenci (broj sukcesivnih merenja, odnosno tačaka u vremenskoj seriji). Nakon tog vremena neophodno je prebaciti dobijene podatke u računar i zatim nastaviti merenje novim ciklusom. Na taj način dobija se vremenski niz podataka koji se dalje mogu analizirati različitim metodama.

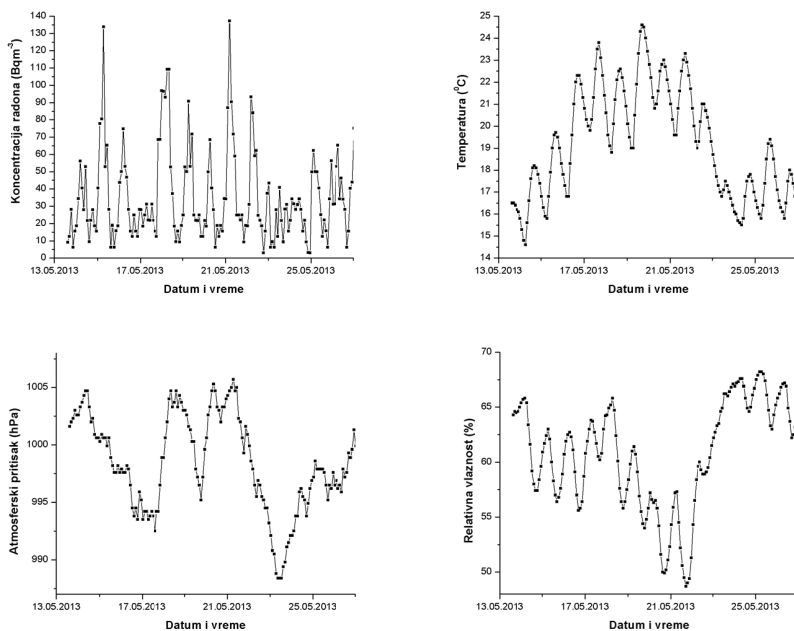
Za merenja su odabrana tri merna mesta (nadzemna laboratorija u okviru Niskofonske laboratorije za nuklearnu fiziku, Instituta za fiziku u Beogradu, spoljašnja sredina u neposrednoj blizini pomenute laboratorije i jedna tipična kuća u Beogradu). Izbor mernih mesta je slučajan.

3. Rezultati i diskusija

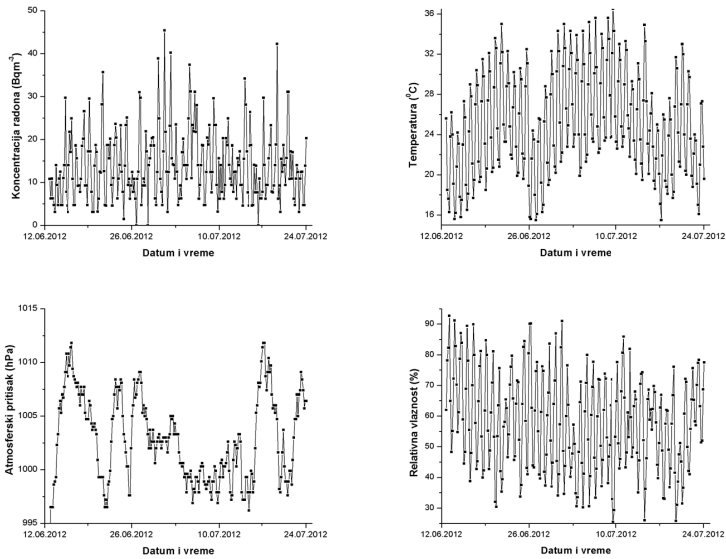
Dobijeni rezultati su predstavljeni u: Tabela 1, slika 1, slika 2 i slika 3.

Tabela 1. Srednja koncentracija radona sa standardnom devijacijom (SD) i Pearson-ov korelacioni koeficijent R za radon i temperaturu T, radon i atmosferski pritisak p, radon i relativnu vlažnost RV i zbirni R² na mernim mestima

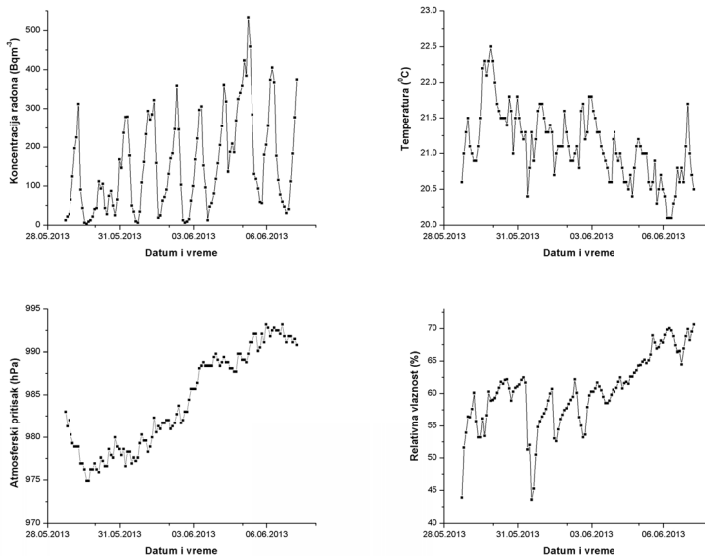
Merno mesto	□ R _n □ (SD) (Bqm ⁻³)	Pearson-ov korelacioni koeficijent R			R ²
		R _n i T	R _n i p	R _n i RV	
Nadzemna laboratorija	35(26)	-0.17	0.30	0.17	0.1478
Spoljašnja sredina	14(8)	-0.20	-0.02	0.35	0.1629
Kuća u Beogradu	154(123)	-0.35	0.38	0.47	0.4878



Slika 1. Vremenske serije koncentracije radona, temperature, atmosferskog pritiska i relativne vlažnosti u nadzemnoj laboratoriji



Slika 2. Vremenske serije koncentracije radona, temperature, atmosferskog pritiska i relativne vlažnosti u spoljašnjoj sredini u blizini nadzemne laboratorije



Slika 3. Vremenske serije koncentracije radona, temperature, atmosferskog pritiska i relativne vlažnosti u dnevnoj sobi u jednoj tipičnoj kući u Beogradu

Dobijeni rezultati pokazuju različite doprinose pojedinih meteoroloških parametara na varijaciju koncentracije radona u datoj sredini. U sva tri slučaja, radon i temperatura su obrnuto proporcionalne, dok su radon i atmosferski pritisak i relativna vlažnost direktno zavisne veličine. Pearson-ovi korelacioni koeficijenti R imaju relativno male vrednosti i kada se pogledaju zbirni kvadrati Pearson-ovih korelacionih koeficijenata R^2 za pojedinačna merna mesta dolazi se do zaključka da se varijacije koncentracije radona objašnjavaju sa ukupnom varijacijom sva tri meteorološka parametra u rasponu od 14.78% u nadzemnoj laboratoriji, preko 16.29% u spoljašnjoj sredini do 48.78% u kući. Takođe, to znači da postoji mnogo drugih faktora koji doprinose varijabilnosti radona.

4. Zaključak

Dobijeni rezultati pokazuju svu složenost ponašanja radona, kao i različitost u doprinosima određenih atmosferskih parametara u varijacijama koncentracije radona u različitim sredinama. Pored uticaja parametara atmosfere, postoji još puno faktora koji utiču na, pre svega jednodnevne i sezonske periodike u varijabilnosti radona u datom prostoru.

5. Literatura

- [1] V. Udovičić, B. Grabež, A. Dragić, R. Banjanac, D. Joković, B. Panić, D. Joksimović, J. Puzović, I. Aničin. Radon problem in an underground low-level laboratory. *Radiation Measurements* 44, (2009) 1009-1012.
- [2] V. Udovičić, I. Aničin, D. Joković, A. Dragić, R. Banjanac, B. Grabež, N. Veselinović. Radon Time-Series Analysis in the Underground Low-Level Laboratory in Belgrade, Serbia. *Radiation Protection Dosimetry* 145 (2-3), (2011) 155-158.
- [3] R. Banjanac, V. Udovičić, A. Dragić, D. Joković, D. Maletić, N. Veselinović, B. Grabež. Daily Variations of Gamma-Ray Background and Radon Concentration. *Romanian Journal of Physics* Volume 58, Supplement, (2013) S14-S21.

CORELATION ANALYSIS OF THE ATMOSPHERE INFLUENCE ON RADON VARIABILITY IN THE DIFFERENT ENVIRONMENTS

Vladimir UDOVIČIĆ, Aleksandar DRAGIĆ, Radomir BANJANAC, Dejan JOKOVIĆ, Dimitrije MALETIĆ, Bojana GRABEŽ i Jelena FILIPOVIĆ

Institute of Physics, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, udovicic@ipb.ac.rs

ABSTRACT

Dynamics of radon in different environments is a complex process that is reflected primarily in the intensive spatial and temporal variations in its concentration. In this paper we analyze the time series of radon concentration in different environments as well as time series of meteorological parameters in a given environment (temperature, pressure and relative humidity). Using standard statistical tools, based on the study of time series were determined by the correlation between radon and atmospheric parameters in a particular environment. The results show the complexity of the radon behavior, as well as differences in the contributions of certain atmospheric parameters in the variations of radon concentration in different environments.

**ZAŠTITA OD ZRAČENJA
U MEDICINI**

MERENJE I PRORAČUN KERME U VAZDUHU NA DIJAGNOSTIČKIM RENDGEN-APARATIMA

**Predrag BOŽOVIĆ^{1,2}, Jelena STANKOVIĆ^{1,2}, Danijela ARANDIĆ^{1,2} i Olivera CIRAJ-BJELAC^{1,2},
Zoran RAJOVIĆ^{1,3}**

1) Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

2) Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija, bozovic@vinca.rs

3) Elektrodistribucija, Beograd, Srbija

SADRŽAJ

Cilj ovog rada je proračun i simulacija merenja kerme u vazduhu. Prikazane su izmerene vrednosti kerme u vazduhu, dobijene merenjem poluprovodničkim detektorom, proračunate vrednosti softverom SpekCalc i vrednosti dobijene Monte Karlo simulacijom. Dobijene proračunate i simulirane vrednosti su u opsegu merenih vrednosti sa maksimalnim odstupanjem od srednje vrednosti od 25%.

1. Uvod

Prema pravilniku o primeni izvora jonizujućih zračenja u medicini [1] kontrola kvaliteta dijagnostičkih rendgen-aparata se sprovodi jednom godišnje, a cilj ovih ispitivanja je konzistentno održavanje standarda koji su utvrđeni prijemnim ispitivanjima i pravovremena detekcija narušenih performansi [2]. Male dimenzije poluprovodničkih detektora čine ih pogodnim za neinvazivno ispitivanje dijagnostičkih rendgen-aparata u okviru programa kontrole kvaliteta u zdravstvenim ustanovama [3]. Veličina koja se ovde meri je kerma u vazduhu merena na 1 m od fokusa rendgenske cevi [4]. Kerma u vazduhu na određenom rastojanju od fokusa rendgenske cevi se takođe može proračunati softverskim paketima SpekCalc i MCNP5. SpekCalc je softver koji služi za proračun spektra X-zračenja zasnovan na determinističkom (analitičkom) modelu proizvodnje spektra X-zračenja [5,6]. MCNP5 je Monte Karlo program kojim se simulira transport neutrona, fotona, elektrona, ili uparen transport neutrona/fotona/elektrona u trodimenzionalnoj geometriji [7]. U ovom radu je prikazano poređenje izmerene kerme u vazduhu pomoću poluprovodničkog detektora, na 15 rendgen aparata na prostoru Srbije, i vrednosti kerme u vazduhu dobijene proračunom softverskim paketima SpekCalc i MCNP5.

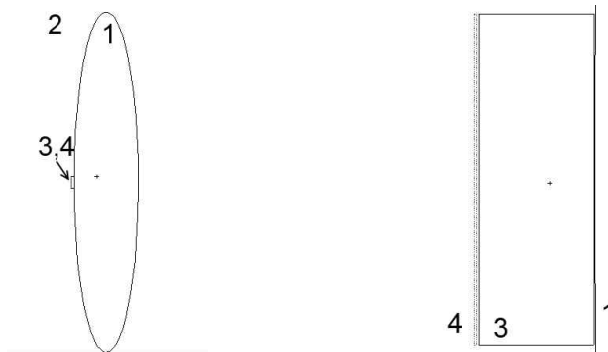
2. Materijali i metode

Podaci o kermi u vazduhu prikupljeni su sa 3 različita modela rendgen-aparata (Philips Duodiagnost, EI Niš Superix 1000 i Innomed Top-X HF). Vrednosti kerme u vazduhu su merene za pet vrednosti napona rendgenske cevi (60, 70, 80, 90 i 100 kV), dok su jačina struje i vreme ekspozicije bili konstantni i iznosili 200 mA i 0.5 sekundi, a kerma u vazduhu je srednja vrednost 15 ponavljanja merenja. Za merenje kerme u vazduhu korišćen je poluprovodnički detektor RTI Electronics Barracudda MPD. Detektor je bio postavljen na rastojanju od 100 cm od fokusa rendgenske cevi. Filtracije na rendgen-aptarima su bile veće od 2.5 mm Al, dok je za potrebe simulacija uzeta srednja vrednost koja iznosi 3.3 mm Al.

SpekCalc program je imao dve uloge u ovom radu. Prva je proračun kerme u vazduhu, dok je druga generisanje ulaznog spektra za program MCNP5. Da bi dobijena kerma bila uporediva merenim vrednostima, potrebno je usaglasiti parametre SpekCalc-a (napon cevi, anodni ugao, filtracija i rastojanje) sa realnom postavkom merenja.

Za metod Monte Karlo simulacije kerme u vazduhu pokrenut je program MCNP5 verzije 1.6, na računaru od 4 GB RAM-a i 2.66 GHz. Geometrija problema je prikazana na sl. 1. Na fantomu elipsoidnog oblika ($a=6$ cm, $b=30$ cm, $c=30$ cm) ispunjenog vodom, postavljen je detektor pravougaonog oblika (5 mm \times 20 mm \times 4 mm) prema specifikaciji proizvođača RTI Electronics Barracudda MPD [8]. Umesto materijala poluprovodničkog detektora, ova zapremina je ispunjena vazduhom radi dobijanje kerme u vazduhu. Spektar X-zračenja koji je dobijen pomoću programa SpekCalc predstavlja spektar X-zračenja

na 100 cm od izvora. Takav spektar je iskorišćen kao površinski fotonski izvor postavljen na 0.01 mm od detektora, sa pravcem fotona normalnim na površinu detektora. Pomoću „F6 talije“ u programu MCNP5 dobija se apsorbovana energija po jedinici mase i po ulaznoj čestici u željenoj zapremini. MCNP5 je pokrenut u modu za praćenje fotona i za 30 miliona istorija. Krajnji rezultat kerme u vazduhu se dobija množenjem rezultata „F6 talije“ i ukupnog broja fotona iz spektra dobijenog SpekCalc softverom.



Slika 1. Geometrija problema (levo) i uvećani prikaz detektora (desno):
1 - fantom, 2 – okolni vazduh, 3 - zapremina detektora, 4 – izvor X-zračenja

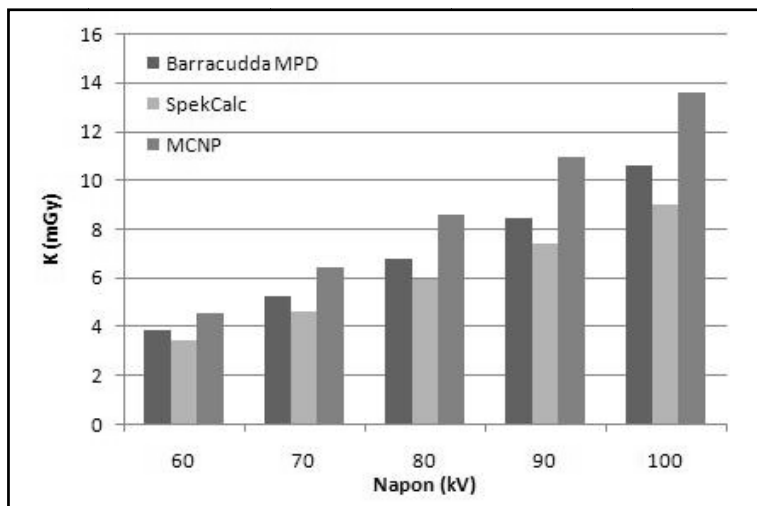
3. Rezultati i diskusija

U Tabeli 1 prikazani su rezultati merenja kerme u vazduhu pomoću poluprovodničkog detektora (Barracudda MPD), na 15 dijagnostičkih rendgen aparata.

Tabela 1. Dobijene vrednosti kerme u vazduhu merenjem detektorom (proizvod jačine struje i vremena ekspozicije 100 mAs, rastojanje fokus - detektor 1 m, srednja vrednost filtracije 3.3 mm Al)

Napon (kV)	K_{air} (mGy)
	Sr. vred. \pm Std. dev. (min - max)
60	3.85 ± 1.25 (2.09 – 6.34)
70	5.19 ± 1.60 (3.03 – 8.44)
80	6.77 ± 2.08 (4.09 – 10.88)
90	8.39 ± 2.58 (5.09 – 13.35)
100	10.58 ± 2.86 (6.52 - 15.51)

Na sl. 2 prikazano je poređenje srednje vrednosti rezultata dobijenih merenjem (Barracudda MPD) i rezultata dobijenih proračunom pomoću softvera SpekCalc (SpekCalc) i simulacijom Monte Karlo (MCNP5).



Slika 2. Kerma u vazduhu za različite vrednosti napona (proizvod jačine struje i vremena ekspozicije 100 mAs, rastojanje fokus - detektor 1 m, srednja vrednost filtracije 3.3 mm Al)

Dobijene vrednosti proračunom i simulacijom se nalaze u okviru izmerenih vrednosti kerme u vazduhu. Maksimalno odstupanje rezultata dobijenih proračunom SpekCalc od srednje vrednosti merenja je 18% (za posmatrani napon od 100 kV). U slučaju simulacije MCNP5, maksimalno odstupanje od srednje vrednosti merenja je 23% (za posmatrani napon od 100kV).

Sa sl. 2 se može uočiti da proračun SpekCalc za sve vrednosti napona cevi daje niže vrednosti od merenih. Uzrok ovome je nepostojanje fantoma u proračunu SpekCalc, izbor filtracije za koju je uzeta srednja vrednost filtracija pojedinačnih rendgen-aparata i početne vrednosti parametara faktora normalizacije - Nf i P koje nisu podešavane u ovom radu.

Vrednosti dobijene simulacijom MCNP5, za sve posmatrane vrednosti napona cevi, su više od srednje izmerene vrednosti. Ovo je posledica simulacije izvora X- zračenja, kao površinskog izvora čiji se fotoni emituju u jednom pravcu - normale na površinu detektora.

4. Zaključak

Proračun i simulacija pomoću SpekCalc i MCNP5 softvera daju dobru procenu kerme u vazduhu (maksimalno odstupanje od srednje vrednosti je 18% odnosno 23%) i mogu se koristiti pri simulaciji kontrole kvaliteta i kao moguće pomoćno sredstvo pri edukaciji. Dalji rad bi bio usmeren na smanjenje odstupanja od srednje vrednosti i sastojao bi se iz poboljšanja modela izvora u MCNP5 simulaciji, i dodatnog finog podešavanja parametara u programu SpekCalc.

5. Literatura

- [1] Pravilnik o primeni izvora jonizujućih zračenja u medicini (Sl. glasnik RS 1/12)
- [2] International Electrotechnical Commission: Evaluation and routine testing in medical imaging departments. International standard. IEC 61223-2-11. International Electrotechnical Commission (1999)
- [3] Knoll, G.F. *Radiation Detection and Measurement*, 3rd ed.; John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA, 2000
- [4] International Atomic Energy Agency (IAEA). *Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice, Technical Reports Series No 457*; IAEA: Vienna, Austria, 2007.
- [5] Poludniowski G., Landry G., DeBlois F., Evans PM, Varhaegen F., *SpekCalc: a program to calculate photon spectra from tungsten anode x-ray tubes*, Phys Med Biol. 2009 Oct 7;54(19):N433-8.
- [6] Poludniowski GG, *Calculation of x-ray spectra emerging from an x-ray tube. Part II. X-ray production and filtration in x-ray targets.*, Med Phys. 2007 Jun;34(6):2175-86.
- [7] *MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code: Overview and Theory, Ver. 5*, LANL, Los Alamos, USA, 2008.
- [8] <http://www.rti.se/products/barracuda/>.

6. Zahvalnost

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva za Nauku i Tehnološki razvoj Republike Srbije projektom III43009.

MEASUREMENTS AND CALCULATIONS OF AIR KERMA ON DIAGNOSTIC X-RAY DEVICES

Predrag BOZOVIĆ^{1,2}, Jelena STANKOVIĆ^{1,2}, Danijela ARANDJIC^{1,2} i Olivera CIRAJ-BJELAC^{1,2}, Zoran RAJOVIĆ^{1,3}

1) *University of Belgrade – School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia*

2) *Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija, bozovic@vinca.rs*

3) *Electrodistribution, Serbia, Belgrade*

ABSTRACT

The goal of this paper is calculation and simulation of air kerma measurement. Results shown in paper are air kerma values measured with solid state detector, calculated with SpekCalc software and simulated in MCNP5. Calculated and simulated values are within the range of measured air kerma values with maximum deviation from mean value of 25%.

PROCENA DOZE OD MEDICINSKIH IZLAGANJA U REPUBLICI SRBIJI

**Olivera CIRAJ-BJELAC^{1,2}, Danijela ARANDIĆ^{1,2}, Predrag BOŽOVIĆ^{1,2},
Duško KOŠUTIĆ²**

1) Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

2) Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija, ociraj@vinca.rs

SADRŽAJ

U radu su prikazani rezultati procene per caput i kolektivne doze za stanovništvo u Srbiji koja potiče od medicinskih izlaganja, odnosno dijagnostičke radiologije i nuklearne medicine. Efektivna doza za preglede u nuklearnoj medicini procenjena je na osnovu konverzionih faktora iz aktivnosti u efektivnu dozu, dok je u slučaju pregleda u dijagnostičkoj radiologiji efektivna doza procenjena na osnovu konverzionih faktora koji povezuju direktno merljivu dozimetrijsku veličinu i efektivnu dozu. Ukupan broj pregleda u nuklearnoj medicini iznosi 35000, a kolektivna doza 125 čovek Sv. Procenjena doza per caput iznosi 17 μ Sv. Ukupan broj radioloških pregleda procenjen je na 5 miliona, kolektivna doza na 4500 čovek Sv a srednja per caput doza na 0.6 mSv. Kompjuterizovana tomografija odgovorna je za 40% kolektivne doze u dijagnostičkoj radiologiji. Rezultati ukazuju na potrebu za uspostavljanjem nacionalnog sistema za monitoring doza od medicinskih izlaganja.

1. Uvod

Medicinsko izlaganje je najznačajniji činilac u ukupnoj dozi za stanovništvo od veštačkih izvora zračenja, sa tendencijom stalnog rasta [1]. Prosečna per caput efektivna doza u nekoj zemlji i broj obavljenih pregleda jesu globalni pokazatelji upotrebe jonizujućih zračenja u medicini nacionalnom nivou. Ovi pokazatelji se koriste za procenu uticaja različitih izvora jonizujućih zračenja, za poređenje nacionalne prakse u različitim zemljama ili za poređenje različitih dijagnostičkih modaliteta [2-5]. Cilj ovog rada je procena per caput i kolektivne doze za stanovništvo u Srbiji koje potiče od medicinskih izlaganja, odnosno dijagnostičke radiologije i nuklearne medicine.

2. Metode

Koristeći metodologiju predloženu u dokumentu EC Radiation Protection No 154: *European Guidance On Estimating Population Doses From Medical X-Ray Procedures* [5], istraživanje je obuhvatilo 18 odeljenja za nuklearnu medicinu i 20 odeljenja za dijagnostičku radiologiju u bolnicama u Srbiji. Informacija o frekvencijama pojedinih pregleda prikupljena je u odabranom uzorku bolnica u periodu maj - decembar 2011, a prikupljeni podaci se odnose na 2010 godinu. Prikupljeni podaci su ekstrapolirani uzimajući u obzir ukupan broj bolnica i distribuciju bolnica sa sličnim praksama u Srbiji, sa idejom da bude uključen što veći broj velikih bolnica.

Tipične doze iz različitih radioloških pregleda procenjene su na osnovu ranije objavljenih rezultata [6-10]. Vrednosti direktno merljivih dozimetrijskih veličina (kerma u vazduhu, proizvod kerme i dužine, proizvod kerme i površine...) konvertovane su u efektivnu dozu korišćenjem odgovarajućih konverzionih faktora [5,11]. Pored frekvencije, prikupljeni su podaci o prosečnoj aktivnosti radiofarmaceutika za određene vrste pregleda u nuklearnoj medicini. Efektivna doza za pacijenta od pojedinih pregleda u nuklearnoj medicini procenjena je kristeći podatak o srednjoj vrednosti aktivnosti radiofarmaceutika i konvezione faktore za izračunavanje efektivne doze na osnovu aktivnosti sadržane u ICRP publikacijama [5,12,13]. Rezultati procene doze i prikupljeni podaci o frekvenciji pojedinih pregleda upotrebjeni su za procenu per caput efektivne doze i kolektivne doze na godišnjem nivou. Za procenu kolektivne efektivne doze po glavi stanovnika upotrebljen je podatak o broju stanovnika od 7.498 miliona [14].

3. Rezultati

Rezultati procene doze prikazani su u Tabeli 1 i Tabeli 2. Za radiološke preglede, podaci o frekvenciji prikupljeni su u 5 od 8 kliničkih i kliničko-bolničkih centara, u 19 od ukupno 40 opštih bolnica i u 12 od 157 domova zdravlja različitih veličina. Ukupna godišnja *per caput* doza procenjena je na 0.6 mSv, sa odgovarajućom godišnjom kolektivnom dozom od 4300 čovek Sv. Ukupan broj radioloških pregleda iznosi 5 miliona. Na osnovu uzorka od 18 bolnica, procenjen broj pregleda u nuklearnoj medicini na godišnjem nivou iznosi 35000. Odgovarajuća kolektivna doza iznosi 125 čovek·Sv a *per caput* efektivna doza po jednom pregledu 17 μ Sv.

Table 1. Broj radioloških pregleda, efektivna doza (E) i procenjena kolektivna doza (S) u Srbiji na godišnjem nivou

Procedura	Ukupan broj pregled	Broj pregleda/1000 stanovnika	E (mSv)	S (čovek·Sv)	Doprinos S (%)
Pluća/toraks	1539800	205	0.039	61	1.4
Vratna kičma	415882	55	0.12	49	1.2
Torakalna kičma	350888	47	0.62	217	5.1
Lumbalna kičma	601262	80	0.93	559	13
Mamografija	379216	51	0.22	82	1.9
Abdomen	223097	30	0.44	97	2.3
Karlica i kukovi	525030	70	0.29	156	3.7
Gornji deo GIT	126622	17	2.4	298	7.0
Irigografija	44171	6	6.7	298	7.0
Pasaža creva	10359	1	2.9	30	0.7
IVU	30706	4	2.4	75	1.8
Koronarna angiografija	34451	5	10	345	8.1
CT glave	175940	23	1.9	329	7.8
CT vrata	34446	5	1.9	66	1.6
CT pluća	56175	7	5.6	314	7.4
CT kičme	20715	3	4.8	99	2.3
CT abdomena	57827	8	8.2	473	11
CT krlice	26945	4	7.4	198	4.7
CT trupa	10679	1	17	185	4.4
PCI	11820	2	26	304	7.2

Uslud relativno malog uzorka nicabo upotrebljenog za procenu doze i frekvencije pregleda, nesigurnost procene frekvencije pojedinih pregleda iznosi 49%, dok odgovarajuća nesigurnost procene kolektivne doze iznosi oko 60%.

4. Zaključak

U radu su prikazani rezultati procene kolektivne doze od pregleda u nuklearnoj medicini i dijagnostičkoj radiologiji u Srbiji. Procenjene *per caput* doze iznose 17 μ Sv i 0.6 mSv u nuklearnoj medicini i dijagnostičkoj radiologiji, respektivno. Uočene su iznačajne varijacije u praksi u različitim bolnicama koje ukazuju na potrebu za optimiacijom prekse u ob.modaliteta obuhvaćena ovim istraživanjima.

Table 2. Broj pregleda u nuklearnoj medicini, efektivna doza (E) i procenjena kolektivna doza (S) u Srbiji na godišnjem nivou

Procedura	Radionuklid i hemijski oblik	Tipična aktivnost (MBq)	Ukupan broj pregleda	E (mSv)	S (čovek· Sv)	Doprinos S (%)
Kosti	^{99m} Tc, Phosph.	672	11000	3.9	42	34
Perfuzija miokarda, rest	^{99m} Tc, MIBI	833	1500	7.6	11	9
Perfuzija miokarda, sters	^{99m} Tc, MIBI	870	1300	6.9	9.0	7
Tumor (PET) + dijagnostički CT	¹⁸ F, FDG	333	2400	1.6	3.8	3
Štitasta žlezda, metastaze (nakon ablacije, uptake” 0%)	¹³¹ I, Iodide	119	1200	7.0	8.4	7
Štitasta žlezda, (oralna aplikacija)	^{99m} Tc, Pertech.	119	7000	1.7	12	<0.1
Štitasta žlezda (“uptake” 35 %)	¹²³ I, Iodide	2	250	0.044	0.011	1.5
MUGA, srčani protok krvi	^{99m} Tc	833	300	6.0	1.8	0.5
Dopamin (parkinsonizam)	¹²³ I, Beta-CIT	130	200	3.1	0.62	1.5
Perf. scintigrafija pluća	^{99m} Tc,MAA	131	1400	1.3	1.8	22
Neuroendokrini tumori	¹¹¹ In, Pentetr.	740	300	88	27	3
Scintigrafija bubrega	^{99m} Tc, DMSA	136	3000	1.1	3.5	0.5
Scintigrafija bubrega	^{99m} Tc, MAG3	111	800	0.81	0.65	3
Scintigrafija bubrega	^{99m} Tc, DTPA	194	4000	1.1	4.3	6
Paratireoidna žlezda	^{99m} Tc, MIBI	459	1200	5.7	6.8	0.7
Cerebralna angioscintigrafija	^{99m} Tc, HMPAO	925	100	8.5	0.86	0.7
Infekcije/upale	^{99m} Tc, labeled leucocytes	740	100	8.1	0.81	0.7
Infekcije/upale	^{99m} Tc, monoclonal antibodies	740	100	5.9	0.59	0.5

5. Literatura

- [1] United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiations. Sources And Effects Of Ionizing Radiation". Unsecar 2008 Report, United Nations, New York (2010).
- [2] Scanff P, Donadieu J, Prard P, Aubert B. Population exposure to ionising radiation from medical examination in France. Br J Radiol 81 (2008) 204-213.
- [3] Compagnone G, Angelini P, Domenichelli S. Radiation Doses To The Population Of Emilia-Romagna Region From Medical Exposures. Radiol. Med 117 (2012) 312-321.
- [4] Hart D, Wall B. UK Population Dose From Medical X-Ray Examinations. European Journal Of Radiology 50 (2004) 285-291.

- [5] European Commission. EC Radiation Protection No 154: European Guidance On Estimating Population Doses From Medical X-Ray Procedures, Luxembourg (2008).
- [6] Ciraj-Bjelac, O., et al. Radiation protection of patients in diagnostic radiology: Status of practice in five Eastern-European countries, based on IAEA project. European Journal of Radiology, 79 (2011) e70-e73.
- [7] Muhogora W, et al. Patient doses in radiographic examinations in 12 countries in Asia, Africa and Eastern Europe - Initial results from IAEA projects, Am J Roentgenol, 190 (2008) 1453-1461.
- [8] Ciraj-Bjelac, O., et al. Rehani, M. Status of radiation protection in interventional cardiology in four East European Countries. Radiat Prot Dosim. 147 (2011) 62-67.
- [9] Muhogora W, et al. Patient doses in CT Examinations in 18 countries: initial results from international atomic energy agency projects, Radiat Prot Dosim 136 (2009) 118 – 126
- [10] Ciraj-Bjelac, O, et al. Mammography radiation dose: initial results from Serbia based on mean glandular dose assessment for phantoms and patients, Radiat Prot Dosim 140 (2010): 75-80
- [11] National Council on Radiation Protection And Measurements. Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States. NCRP Report 160. The National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, USA (2009).
- [12] International Commission on Radiological Protection. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. ICRP Publication 53, Annals ICRP, 18 (1987).
- [13] International Commission on Radiological Protection. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. ICRP Publication 80. 28 (1998).
- [14] <http://www.srbija.gov.rs>

POPULATION DOSE ASSESSMENT FROM MEDICAL EXAMINATIONS IN SERBIA

**Olivera CIRAJ-BJELAC^{1,2}, Danijela ARANĐIĆ^{1,2}, Predrag BOŽOVIĆ^{1,2},
Duško KOŠUTIĆ²**

1) University of Belgrade – School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia

2) Vinca Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia, ociraj@vinca.rs

ABSTRACT

The survey was aimed to assess the magnitude of exposure of Serbian population arising from medical exposures in terms of frequencies and doses for most frequent x-ray and nuclear medicine examinations. Effective doses from nuclear medicine and x-ray examination were assessed using conversion factor to convert activity to effective dose or to convert directly measured patient doses (in terms of entrance surface air kerma, kerma area product or dose-length product) to effective dose, for nuclear medicine and x-ray examination, respectively. Total number of nuclear medicine procedures was assessed to be 35000, with associated collective dose of 125 man Sv. Average effective per caput was estimated to be 17 μ Sv. Total number of x-ray procedures was assessed to be approximately 5 million, with associated collective dose of 4500 man Sv and average effective per caput of 0.6 mSv. CT is now responsible for 40% of the collective dose from medical x-rays. The presented preliminary results also indicate a need to establish a national system to monitor doses in medical exposures.

OPTIMIZACIJA PROTOKOLA KOD SNIMANJA GLAVE U CT DIJAGNOSTICI

**Danijele ARANDIĆ^{1,2}, Olivera CIRAJ-BJELAC^{1,2}, Predrag BOŽOVIĆ^{1,2},
Đorđe LAZAREVIĆ^{1,2}**

- 1) Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija
2) Institut za nuklearne nauke Vinča, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Beograd, Srbija, darandjic@vinca.rs

SADRŽAJ

U radu je prikazan jednostavan metod za optimizaciju protokola kod snimanja glave u CT dijagnostici. Rezultati su prikazani kao CTDI_{vol} i DLP vrednosti. Podaci o dozama dobijeni su očitavanjem vrednosti sa komandne konzole pre i posle optimizacije. Smanjivanjem proizvoda jačine struje i vremena rotacije i uvođenjem aksijalnog moda snimanja, umesto heličnog, DLP vrednost smanjena je za faktor 2. Optimizacija protokola vršena je u skladu sa preporukama datim u dokumentu EUR 16262.

1. Uvod

Doprinos CT snimanja ukupnoj dozi za populaciju raste još od uvođenja ove tehnike sedamdesetih godina prošlog veka. Na osnovu UNSCEAR izveštaja iz 2000. godine doprinos doze od CT snimanja ukupnoj dozi od medicinskih izlaganja iznosio je 34% (1). Istraživanja iz 2008. godine pokazuju da doprinos CT snimanja ukupnoj dozi za populaciju od medicinskih izlaganja sada iznosi 43%. Frekvencija CT snimanja varira u zavisnosti od stepena razvijenosti sistema zdravstvene zaštite neke zemlje. U najrazvijenijim zemljama iznosi 7.9% od svih medicinskih snimanja, dok u manje razvijenim od 2 do 14% (2).

Mnoga istraživanja u proteklih deset godina jasno su pokazala visok nivo pacijentnih izlaganja kod CT snimanja (3, 4, 5). Posebnu pažnju izazvalo je istraživanje Brenera i saradnika iz 2001 godine kojim je utvrđeno da rizik za nastanak fatalnog karcinoma kod dece podvrgnute CT snimanjima iznosi 1 u 1000 (6). Naučna i stručna javnost od tog perioda okupirana je istraživanjima vezanim za optimizaciju protokola snimanja (7, 8, 9), naročito u pedijatrijskoj radiologiji (10, 11, 12).

U ovom radu prikazan je jednostavan metod za optimizaciju protokola kod snimanja glave u CT dijagnostici.

2. Materijali i metod

Optimizacija protokola izvršena je na 16-slajsnom rendgen-aparatu za kompjuterizovanu tomografiju General Electric Bright Speed (Njujork, SAD). Kao opšteprihvaćene veličine u CT dozimetriji (3, 13), podaci o dozama prikupljeni su u formi CTDI_{vol} i DLP [14]. Vrednosti su očitavane sa komandne konzole. Pre očitavanja izvršeno je merenje veličine CTDI_{vol} koristeći cilindrični CT fantom za simulaciju snimanja glave (head CT fantom, dijametra 16 cm). Razlika u vrednostima dobijenim merenjem i onim prikazanim na konzoli bila je manja od 10 %. Podaci su prikupljeni za po 10 standardnih odraslih pacijenata, pre i posle optimizacije protokola. Protokol je optimizovan u skladu sa Evropskim preporukama datim u dokumentu EUR 16262 (15).

Optimizacija protokola sprovedena je kroz smanjivanje vrednosti proizvoda jačine struje i vremena rotacije i uvođenjem aksijalnog moda snimanja umesto heličnog. Sve slike, dobijene pre i posle optimizacije, korišćene su u dijagnostičke svrhe i zadovoljavale su uslove kvaliteta na osnovu subjektivne ocene lekara- radiologa.

3. Rezultati i diskusija

Rezultati istraživanja prikazani su u Tabelama 1 i 2. Parametri koji opisuju protokol snimanja pre i posle optimizacije prikazani su u Tabeli 1. Podaci o pacijentnim dozama prikazani su Tabeli 2.

Tabela 1. Parametri koji opisuju protokol snimanja

parametar	Pre optimizacije	Posle optimizacije
Napon (kV)	120	120
Struja (mA)	292	377
Vreme rotacije (s)	1	0.6
Aksijalno/helično	Helično	Aksijalno
Pitch faktor	0.938	/
Kolimacija (mm)	16 x 1.25	4i x 16

Tabela 2. CTDI_{vol} i DLP vrednosti za protokole pre i posle optimizacije

Veličina	Pre optimizacije	Posle optimizacije
	Sr vrednost ± sd (min – max)	
CTDI _{vol} (mGy)	55 ± 6 (44 – 63)	39 ± 1 (38 – 42)
DLP (mGy·cm ²)	925 ± 143 (658 – 1127)	498 ± 34 (468 – 554)

Iako je u optimizovanom protokolu vrednost jačine struje veća, proizvod struje i vremena rotacije je manji nego pre optimizacije. S obzirom na linearnu zavisnost veličine CTDI_{vol} od proizvoda struje i vremena očekivan je pad vrednosti ove veličine. Istraživanja u oblasti optimizacije protokola u CT dijagnostici pokazuju da smanjivanje vrednosti proizvoda struje i vremena rotacije ne dovodi do pogoršanja kvaliteta dijagnostičke informacije iako se objektivni kvalitet slike nešto pogorša (8, 9). Neretko, moguće je i dvostruko smanjiti CTDI vrednost a da kvalitet dijagnostičke informacije ostane nepromenjen (9).

DLP vrednost je smanjena za faktor 2. Dodatna ušteda u odnosu na CTDI posledica je činjenice da se u aksijalnom modu smanjuje dužina skenirane regije. Za adekvatnu rekonstrukciju slike kod heličnih snimanja neophodna je jedna dodatna rotacija, polovina rotacije na početku i polovina na kraju skenirane regije (pojava poznata kao overranging). Važeća preporuka jeste da se skeniranje glave vrši u aksijalnom modu pod određenim nagibom gentrija (15).

Pored prikazanih rezultata postoji i niz drugih metoda kojima se značajno može smanjiti izlaganje pacijenata tokom snimanja. Ograničavanjem regije snimanja samo na onu od interesa za dijagnostiku, povećavanjem vrednosti pitch faktora, sužavanjem širine snopa i smanjivanjem vrednosti napona doza za pacijenta može značajno da se smanji (16, 17, 18, 19).

4. Zaključak

Pacijentna doza u CT dijagnostici može da bude veoma visoka. Uzimajući u obzir i činjenicu da se broj CT pregleda u svetu svakodnevno povećava, potreba za optimizacijom protokola snimanja je neosporna. Najfrekventniji CT pregled jeste snimanje glave. U ovom radu prikazan je jednostavan metod za optimizaciju protokola čime je DLP vrednost dvostruko smanjena a kvalitet dijagnostičke informacije ostao zadovoljavajući. Pored toga, postoji i niz drugih metoda koje mogu dovesti do značajne uštede u pacijentoj dozi. Najvažnije je svakako da operater na određenom CT uređaju razume važnost optimizacije protokola kao i mogućnosti samog uređaja da se optimizovani protokol implementira u svakodnevnu praksu.

5. Literatura

- [1] UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Source and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly. United Nations, New York, 2000.
- [2] UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Source and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly. United Nations, New York, 2010.
- [3] W. E. Muhogora et al. Patient doses in CT examinations in 18 countries: initial results from International Atomic Energy Agency Projects. *Radiation Protection Dosimetry* 136 (2009) 118–126.
- [4] W. E. Muhogora et al. Pediatric CT examinations in 19 developing countries: frequency and radiation doses. *Radiation Protection Dosimetry* 140 (2010) 49–58.
- [5] P. C. Shrimpton, M. C. Hillier, M. A. Lewis and M. Dunn. National survey of doses from CT in the UK: 2003. *The British Journal of Radiology* 79 (2006) 968–980.
- [6] Brenner DJ, Elliston CD, Hall EJ, Berdon W. Estimated risks of radiation-induced fatal cancer from pediatric CT. *AJR Am J Roentgenol.* 176 (2001) 289–296.
- [7] A. J. Van Der Molen, W. J. H. Veldkamp and J. Geleijns. 16-slice CT: achievable effective doses of common protocols in comparison with recent CT dose surveys. *The British Journal of Radiology* 80 (2007) 248–255.
- [8] J.G. Ravenel, E.M. Scalzetti, W. Huda and W. Garrisi. Radiation Exposure and Image Quality in Chest CT Examinations. *AJR* 177 (2001) 279–284.
- [9] S.R. Prasad, C. Wittram, Jo-Anne Shepard, Th. McLoud and J. Rhea. *Standard- Dose and 50%-Reduced- Dose Chest CT: Comparing the Effect on Image Quality.* *AJR* 179 (2002) 461–465.
- [10] A. Paterson, D.P. Frush and L.F. Donnelly. Helical CT of the Body: Are Settings Adjusted for Pediatric Patients? *AJR* 176 (2001) 297–301.
- [11] D.P. Frush, L.F. Donnelly and N.S. Rosen. Computed Tomography and Radiation Risks: What Pediatric Health Care Providers Should Know *PEDIATRICS* 112 (4) (October 2003) 951–957.
- [12] B.L. Fricke, L. F. Donnelly, D. P. Frush, T. Yoshizumi, V. Varchena, S. A. Poe and J. Lucaya. In-Plane Bismuth Breast Shields for Pediatric CT: Effects on Radiation Dose and Image Quality Using Experimental and Clinical Data. *AJR* 180 (2003) 407–411.
- [13] Shrimpton PC, Hillier MC, Lewis MA and Dunn M. National survey of doses from CT in the UK: 2003. *Br. J. Radiol.* 79 (2006) 968–980.
- [14] International Electrotechnical Commission: Evaluation and routine testing in medical imaging departments— Part 2–6: Constancy tests—imaging performance of computed tomography X-ray equipment. International standard. IEC 61223-2-6. International Electrotechnical Commission (2006).
- [15] European Guidelines on quality criteria for computed tomography, EUR 16262 EN.
- [16] Siegel, M. J., Schmidt, B., Bradley, D., Suess, C. and Hildebolt, C. Radiation dose and image quality in pediatric CT: effect of technical factors and phantom size and shape. *Radiology* 233 (2004) 515–522.

- [17] Shah, R., Gupta, A. K., Rehani, M. M., Pandey, A. K. and Mukhopadhyay, S. Effect of reduction in tube current on reader confidence in pediatric computed tomography. *Clin. Radiol.* 60 (2005) 224–231.
- [18] Koller, C. J., Eatough, J. P. and Bettridge, A. Variations in radiation dose between the same model of multislice CT scanner at different hospitals. *Br. J. Radiol.* 76 (2003) 798–802.
- [19] Daniel, J. C. O., Stevens, D. M. and Cody, D. D. Reducing radiation exposure from survey CT scans. *Am. J. Rontgenol.* 185 (2005) 509–515.

OPTIMIZATION OF PROTOCOL IN HEAD CT EXAMINATIONS

**Danijela ARANDIĆ^{1,2}, Olivera CIRAJ-BJELAC^{1,2}, Predrag BOŽOVIĆ^{1,2},
Dorđe LAZAREVIĆ^{1,2}**

1) *University of Belgrade – School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia*

2) *Institut za nuklearne nauke Vinča, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Beograd, Srbija, darandjic@vinca.rs*

ABSTRACT

In this work a simple method for protocol optimization in head CT is presented. Results are presented in terms of $CTDI_{vol}$ i DLP. Data on doses are obtained from CT console, before and after protocol was implemented. By decreasing tube current and rotation time product and performing scans in axial, instead in helical mode, DLP value was decreased for factor 2. Optimization was performed according to recommendation given in EUR16262.

UTICAJ STEPENA UVEĆANJA SLIKE NA NIVO RASEJANOG ZRAČENJA U OKOLINI PACIJENTA U INTERVENTNOJ RADIOLOGIJI

**Daniijela ARANDIĆ^{1,2}, Olivera CIRAJ-BJELAC^{1,2}, Predrag BOŽOVIĆ^{1,2},
Vojislav ANTIĆ^{1,3} i Jelena STANKOVIĆ^{1,2}**

- 1) Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija
- 2) Institut za nuklearne nauke Vinča, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Beograd, Srbija, darandjic@vinca.rs
- 3) Klinički centar Srbije, Beograd, Srbija

SADRŽAJ

U radu su prikazani rezultati ispitivanja uticaja stepena uvećanja slike na nivo rasejanog zračenja u okolini pacijentnog stola. Ispitivanja su vršena na rendgen-aparatu za interventne procedure sa flat panelom kao prijemnikom slike. Utvrđeno je da se nivo rasejanog zračenja smanjuje sa porastom stepena uvećanja usled drastičnog smanjivanja vrednosti proizvoda doze i površine.

1. Uvod

Doza za medicinsko osoblje u interventnoj radiologiji može da bude veoma visoka (1, 2, 3, 4), naročito u kardiološkim procedurama. Doze koje primaju interventni kardiolozi daleko su najveće u poređenju sa ostalim profesionalnim izlaganjima u medicini (5, 6, 7). Pored toga, broj procedura u interventnoj radiologiji značajno se povećao u poslednjih 20 godina (8).

Doza za medicinsko osoblje potiče od zračenja rasejanog od pacijenta i curećeg zračenja iz kućišta rendgenske cevi. Nivo rasejanog zračenja u okolini pacijenta u interventnoj radiologiji zavisi od geometrije cev-prijemnik slike (9), karakteristika pacijenta (9, 10) i pacijentne doze (10) iskazane kroz proizvod doze i površine (DAP) (11).

Rendgen-aparati za interventne procedure novije generacije poseduju mogućnost uvećanja (zumiranja) određenih delova slike. Stepenn uvećanja slike iskazuje se kroz veličinu vidnog polja (FOV). Smanjivanjem veličine vidnog polja slika se zumira. Dosadašnja istraživanja (11) pokazala su da stepenn uvećanja slike ima značajan uticaj na ulaznu dozu na površini kože pacijenta (ESD). Sa porastom stepena uvećanja slike raste i ESD vrednost. Sa druge strane, utvrđeno je takođe da se nivo rasejanog zračenja povećava usled porasta ESD (12), odakle se može zaključiti da sa porastom stepena uvećanja raste i nivo rasejanog zračenja.

Tokom rutinskih dozimetrijskih merenja utvrđeno je, međutim, da sa povećavanjem stepena uvećanja na rendgen-aparatima sa flat panel detektorima kao prijemnicima slike, nivo rasejanog zračenja opada. Razlog za ovakvu neusaglašenost jeste činjenica da je u dosadašnjim istraživanjima zanemareno da ESD utiče na rasejano zračenje preko veličine DAP.

U ovom radu ispitano je uticaj stepena uvećanja na nivo rasejanog zračenja i DAP vrednost pri različitim parametrima ekspozicije.

2. Materijali i metod

Ispitivanje je vršeno na rendgen-aparatu za interventne procedure sa C-lukom, Siemens Axiom Artis dFC/dFA (Erlangen, Nemačka). Kao prijemnik slike na ovom aparatu koristi se flat panel detektor.

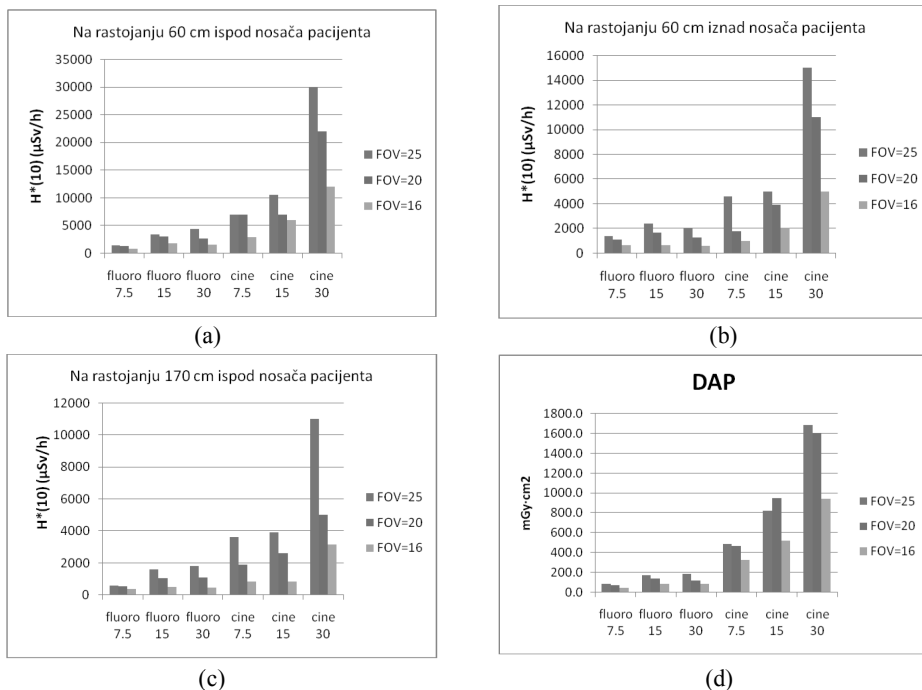
Merenja su izvršena u prisustvu fantoma postavljenog u izocentar C-luka (pri rastojanju fokus-prijemnik slike od 120 cm) u režimu automatske kontrole ekspozicije koristeći dostupne protokole snimanja. Kao fantom korišćene su ploče od polimetilmetakrilata, dimenzija 25cmx25cmx1cm i ukupne debljine 20 cm. Merenja su vršena u režimu prosvetljavanja i akvizicije slike (cine) za različite vrednosti imp/s (7.5, 15 i 30) i FOV (25, 20 i 16).

Nivo rasejanog zračenja meren je u vidu jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta H*(10) izražen u $\mu\text{Sv/h}$. Jačina ambijentalnog doznog ekvivalenta merena je na rastojanju 1m od sredine fantoma na

visinama 60 cm ispod pacijentog stola, 60 cm iznad pacijentnog stola i 170 cm mereno od poda. Za merenje je korišćena jonizaciona komora Victoreen 451P (Fluke, SAD). DAP vrednosti očitavane su sa komandne konzole. Prethodno merenjima izvršena je kalibracija DAP- metra.

3. Rezultati i diskusija

Rezultati ispitivanja prikazani su na Slici 1a – d. Kao i u dosadašnjim istraživanjima može se uočiti da nivo rasejanog zračenja raste sa porastom broja imp/s kao i da je značajno veće u režimu akvizicije slike nego u režimu prosvetljavanja. Veće vrednosti jačine ambijentalnog doznoeg ekvivalenta dobijene su kod merenja na rastojanju 60 cm ispod nosača pacijenta u poređenju sa druga dva merenja što iznova potvrđuje da je konfiguracija cev ispod nosača pacijenta pogodnija sa aspekta izlaganja medicinskog osoblja. Sva tri grafikona (Slika 1 a, b i c) pokazuju da doza usled rasejanog zračenja opada sa porastom stepena uvećanja (odnosno sa smanjivanjem veličine vidnog polja, FOV) nezavisno od vrednosti broja imp/s.



Slika 1. Rezultati ispitivanja uticaja stepena uvećanja (FOV) na nivo rasejanog zračenja i DAP: (a) na rastojanju 60 cm ispod pacijentog stola, (b) na rastojanju 60 cm iznad pacijentog stola, (c) na rastojanju 170 cm od poda i (d) DAP vrednost.

DAP vrednost raste sa porastom broja imp/s i veća je u režimu akvizicije (Slika 1d) što je i očekivano usled porasta ESD. Sa porastom stepena uvećanja (veličina vidnog polja se smanjuje) uočava se smanjivanje DAP vrednosti. S obzirom da je do sada utvrđeno da ESD raste sa porastom stepena uvećanja (11) može se zaključiti da DAP vrednost opada usled drastičnog smanjenja veličine ozračenog polja. U radu Vanoa i saradnika iz 2008.godine (9) zaključeno je da se sa porastom stepena uvećanja

veličina ozračenog polja smanjuje srazmerno sa povećavanjem ESD, te ukupna DAP vrednost ostaje nepromenjena. Merenja u tom istraživanju vršena su samo za jednu vrednost veličine vidnog polja (FOV). Rezultati u ovom radu svakako demantuju prethodni zaključak.

4. Zaključak

Doza za medicinsko osoblje u interventnoj radiologiji može da bude veoma visoka. Potiče od zračenja rasejanog od pacijenta i curećeg zračenja iz kućišta rendgenske cevi. Različiti faktori utiču na nivo rasejanog zračenja u okolini pacijenta. U ovom radu ispitan je uticaj stepena uvećanja na nivo rasejanog zračenja. Utvrđeno je da DAP vrednost opada sa porastom stepena uvećanja kao i nivo rasejanog zračenja.

Ukupan rizik za pacijenta za nastanak stohastičkog efekta procenjuje se na osnovu DAP vrednosti. Rizik za nastanak determinističkog efekta prati se kroz vrednost doze na koži pacijenta (ESD). S obzirom da sa porastom stepena uvećanja raste i ESD a DAP vrednost značajno opada, kao i nivo rasejanog zračenja u okolini pacijenta, mogućnost zumiranja slike tokom interventnih procedura treba oprezno koristiti. Ovde se ne može jednoznačno primeniti pravilo da se smanjivanjem pacijentne doze smanjuje i doza za profesionalno izložena lica.

5. Literatura

- [1] E. Vano, L. Gonzalez, F. Beneytez and F. Moreno. Lens injuries induced by occupational exposure in nonoptimized interventional radiology laboratories. *Br. J. Radiol.* 71 (1998) 728–733.
- [2] J.R. Williams. The interdependence of staff and patient doses in interventional radiology. *Br. J. Radiol.* 70 (1997) 498–503.
- [3] E. Kuon, M. Schmitt and J.B. Dahm. Significant reduction of radiation exposure to operator and staff during cardiac interventions by analysis of radiation leakage and improved lead shielding. *Am. J. Cardiol.* 89 (2002) 44–49.
- [4] M. Zuguchi, K. Chida, M. Taura, Y. Inaba, Ebata and S. Yamada. Usefulness of non-lead aprons in radiation protection for physicians performing interventional procedures. *Radiat. Prot. Dosim.* 131 (2008) 531–534.
- [5] A. J. Camm, J. Reid, M. Raphael, P. Wilde, R. Boyle, M. Clarke, S. Qureshi, M. Rothman and A. Shaw. Radiation hazards to the cardiologist: a report of a subcommittee of the British Cardiac Society. *Br. Heart. J.* 70 (1993) 489–496.
- [6] E. Vano, L. Gonzalez, E. Guibelalde, J.M. Fernandez and J.L. Ten. Radiation exposure to medical staff in interventional and cardiac radiology. *Br. J. Radiol.* 71 (1998) 954–960.
- [7] E. Vano, L. Gonzalez, J.M. Fernandez, F. Alfonso and C. Macaya. Occupational radiation doses in interventional cardiology: a 15-year follow-up. *Br. J. Radiol.* 79 (2006) 383–388.
- [8] M. Bhargavan. Trends in the utilization of medical procedures that use ionizing radiation. *Health Phys* 95 (2008) 612–627.
- [9] E. Vano, L. Gonzalez, J. M. Fernandez, Z. J. Haskal. Eye Lens Exposure to Radiation in Interventional Suites: Caution Is Warranted. *Radiology* 248 (2008) 945 - 953
- [10] E. Vano, C. Ubeda, F. Leyton, P. Miranda, L. Gonzalez. Staff Radiation Doses in Interventional Cardiology: Correlation With Patient Exposure. *Pediatr Cardiol* 30 (2009) 409–413.
- [11] V. Tsapaki, S. Kottou, N. Kollaros, P. Dafnomili, Z. Kyriakidis, V. Neofotistou, Dose performance evaluation of a charge coupled device and flat-panel digital fluoroscopy system recently installed in an interventional cardiology laboratory. *Radiation Protection Dosimetry.* 111(2004) 297–304.
- [12] K. Chida, Y. Morishima, Y. Inaba, M. Taura, A. Ebata, K. Takeda, H. Shimura, M. Zuguchi. Physician-received scatter radiation with angiography systems used for interventional radiology: comparison among many x-ray systems. *Radiation Protection Dosimetry* (2011) 1–6.

INFLUENCE OF MAGNIFICATION ON SCATTERED DOSE LEVEL AROUND PATIENT IN INTERVENTIONAL RADIOLOGY

**Danijela ARANDIĆ^{1,2}, Olivera CIRAJ-BJELAC^{1,2}, Predrag BOŽOVIĆ^{1,2},
Vojislav ANTIĆ^{1,3} i Jelena STANKOVIĆ^{1,2}**

1) University of Belgrade – School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia

2) Vinca Institut of Nuclear Sciences, Radiation and Environmental Protection Laboratory, Belgrade, Serbia,
darandjic@vinca.rs

3) Clinical center of Serbia, Belgrade, Serbia

ABSTRACT

In this work the influence of magnification level on scattered radiation around patient in interventional radiology was investigated. Measurements were performed on x-ray unit dedicated to interventional procedures with a flat panel detector. The results show that scatter level decreases as magnification increases due to the fact that DAP values decreases as well.

IZLAGANJE JONIZUJUĆEM ZRAČENJU U TOKU TEHNIČKOG ODRŽAVANJA I SERVISNE INTERVENCIJE LINEARNIH AKCELERATORA

**Dejan KRGA, Goran ĐORIĆ, Borislava PETROVIĆ, Milan TEODOROVIĆ, Milutin BAUCAL,
Laza RUTONJSKI, Ozren ČUDIĆ, Borko BASARIĆ,
Ljubica SMILJANIĆ**

Institut za onkologiju Vojvodine, Sremska Kamenica, Srbija, dejan.krga82@gmail.com

1. Uvod

Tehničko osoblje zaduženo za održavanje linearnih akceleratora, CT simulatora i simulatora spada u grupu profesionalno izloženih lica jonizujućem zračenju. Kao profesionalno izložena lica obavezni su da nose lične dozimetre [1-3]. Kako na registrovanu ekvivalentnu dozu značajno utiče i vreme boravka u blizini akceleratora u toku održavanja i servisnih intervencija, u ovom radu dat je pregled očitavanja TLD u određenom uzorkovanom vremenskom periodu. Izvori jonizujućeg zračenja su komponente linearnih akceleratora, čiji je opis dostupan u dokumentaciji o linearnim akceleratorima proizvođača Varian, tipovi CLINAC 2100C i 600DBX [4], a koji će biti ukratko opisani u tekstu koji sledi:

1.1 X-zraci i zračenje elektronskog snopa

Akcelerator može proizvesti visoke doze radijacije u veoma kratkom vremenskom intervalu. Strogo treba izbegavati manipulaciju X-zracima ili elektronskim snopom bez adekvatne zaštite. Treba imati u vidu da izloženost zračenju može uzrokovati ozbiljne posledice u vidu teških oboljenja ili smrtog ishoda. Neke retke servisne intervencije zahtevaju rad u polju jonizujućeg zračenja dok je akcelerator uključen.

1.2 Indukovano zračenje u komponentama akceleratora

Komponente od bakra, gvožđa, olova i tungstena mogu postati privremeno radioaktivne u slučaju da se ozrače X-zracima sa energijama iznad 10MV. Indukovana radioaktivnost prouzrokovana je fotonutronskom ili (c,n) reakcijom, koja proizvodi neutrone. Kada se proizvedeno jezgro ostavi u nestabilnom stanju, ono postaje radioaktivno.

Primarne radioaktivne komponente predstavljaju one koje absorbuju najveći deo energije X-zračenja:

- Mete
- Sklop kolimatora
- Kompenzacioni filteri
- Svi ostali zaštitni i strukturni materijali koji okružuju metu

Osim bakra, i drugi materijali postaju radioaktivni usled ozračivanja. Najveća koncentracija radioaktivnosti javlja se u meti (tungsten, bakar). Od trenutka kad se snop ugasi, na meti se može izmeriti i do 15% aktivnosti koju je akcelerator primarno proizveo. Meta pokazuje i do 20 puta veću radioaktivnost u odnosu na prvu sledeću aktivnu komponentu. Najveći deo merljivog zračenja potiče od primarnog kolimatora kao i širine zračnog polja. Bakarni energetske prorezi u magnetnom sistemu takođe mogu biti pobuđeni na visok stepen radioaktivnosti, iz razloga što dolaze u direktan kontakt sa zrakom i ponašaju se kao sekundarne mete. Obzirom na prethodno navedeno, proizvođač je konstrukciju optimizovao tako da je zračenje mete u značajnoj meri oklopljeno i usmereno, na isti način kao i primarni zrak.

Određen stepen radioaktivnosti indukuje se i u kolimatoru (tungsten), filteru za poravnanje snopa (flattening filter - tungsten ili gvožđe) kao i u gvozdenim i bakarnim komponentama magnetna. Najveći deo ove energije indukuje se unutar oklopa, na 30° od geometrijske ose zraka. Kolimacioni sistem je

takođe izložen visokoj gustini fluksa X-zračenja. Kako bi se vreme izloženosti smanjilo na minimum, neophodno je pridržavati se sledećih načela:

- Prilikom svake intervencije omogućiti maksimalno mogući vremenski interval neophodan za radioaktivni raspad. Veće energije proizvode veći stepen radioaktivnosti. Na primer, 18MV mašina zahteva duži period "rashlađivanja" od 15MV mašine.
- Izvršiti ispitivanje zračenja, u svrhu procene rizika (opasnosti). Koristeći merač brzine doze, otvoriti kolimacioni sistem i ispitati najbližu dostupnu oblast ispod kolimatora.
- Klinovi, kasete i ostala pomagala mogu postati radioaktivna nakon tretmana X-zracima visoke energije, te sa njima treba nastojati da se ostane u kontaktu u što kraćem vremenskom intervalu.
- Ispitati sve potencijalno radioaktivne otpadne komponente. Radioaktivne komponente zahtevaju odgovarajuće rukovanje i tehnike odlaganja otpada.

1.3 Rukovanje metom X-zraka

Sa metom X-zraka dolazi se u kontakt samo prilikom veće servisne intervencije ili popravke. Meta može postati radioaktivna u zavisnosti od energetskog nivoa CLINAC-a i vremenskog perioda isteklog nakon poslednjeg ozračivanja mete. Korišćenje aparata za merenje zračenja je jedini način da se utvrdi da li je bezbedno rukovati metom, te je neophodno istim ispitati nivo radioaktivnosti pre sprovođenja bilo kakve intervencije na istoj.

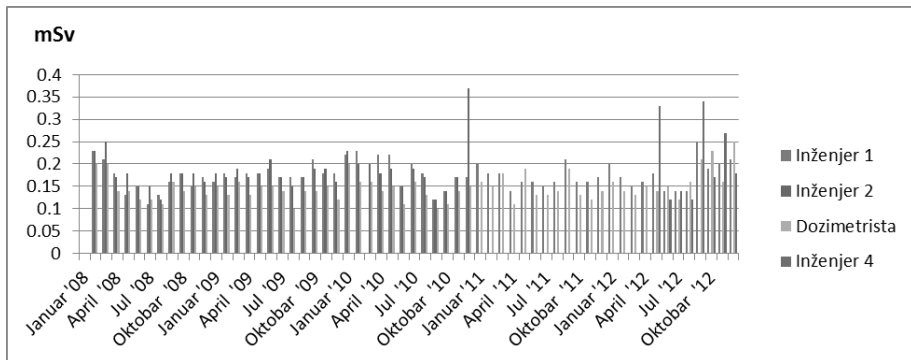
1.4 Ozon i oksidi azota (CLINAC visoke energije)

Interakcija elektronskog ili X-zraka linearnog akceleratora i vazduha, proizvodi ozon i okside azota obično u malim količinama, osim u slučajevima velikih brzina doza i dugotrajnih izlaganja. Zbog visokih radiolitičkih prinosa i hemijske reaktivnosti, ozon predstavlja najtoksičniji gas koji se javlja prilikom ove interakcije. Čist ozon je hemijski nestabilan, blago plav gas sa karakterističnim svežim prodirućim mirisom.

Prosečna osoba može osetiti ozon u koncentraciji približno jednakoj opšte prihvaćenom graničnom pragu vrednosti 0.1ppm. Ozon utiče na respiratorni sistem, iritira oči i sve sluzne membrane. Visoke koncentracije ozona poboljšavaju reaktivnost zapaljivih materijala.

2. Materijal i metode

Analizirani su izveštaji lične dozimetrije tehničkog osoblja Instituta za onkologiju Vojvodine (TLD) koje su dale akreditovane kuće (3 dipl. Ing. El. Teh i dozimetristu) u intervalu od 4 godine, i predstavljene na grafiku, slika 1.



Slika 1.

3. Rezultati

Na osnovu očitanih vrednosti TLD predstavljenih grafikom, može se zaključiti da se prosečna godišnja doza po zaposlenom kreće u opsegu od (1,75 – 2,13)mSv, s tim što se povećana očitavanja registruju u periodima u kojim se obavljaju servisne intervencije na težim kvarovima aparata (12.2010, 05.2012, 09.2012).

Prema **Pravilniku o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima, Član 6**, rizik se opisno klasifikuje kao umeren - procenjena godišnja efektivna doza veća od 1mSv, dok je efektivna doza profesionalno izloženih lica niska, ukoliko je manja ili jednaka 6 mSv za godinu dana.

4. Zaključak

Stepen izloženosti jonizujućem zračenju osoblja tehničke službe održavanja povećava se zbog neophodnosti brze popravke akceleratora za kliničku upotrebu, jer se ne može čekati de-aktivacija mete i komponenti izloženih jonizujućem zračenju.

Srednje doze tehničkog osoblja kreću se u dozvoljenim granicama propisanim Zakonom, ali ne treba izgubiti iz vida da se povećana očitavanja registruju u periodima u kojim se obavljaju servisne intervencije na težim kvarovima aparata (12.2010, 05.2012, 09.2012). Nisu registrovani akcidenti pa se i primljene doze ne razlikuju od doza koje primaju ostala prof. izložena lica na radioterapiji.

5. Literatura

- [1] Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti Srbije, (Sl. gl. RS 36/09 od 15.05.2009)
- [2] Pravilnik o evidenciji o izvorima jonizujućih zračenja, profesionalno izloženim licima, o izloženosti pacijenata jonizujućim zračenjima i radioaktivnom otpadu (Sl. Gl. RS 97/11 od 21.12.2011)
- [3] Pravilnik o primeni izvora jonizujućih zračenja u medicini (Sl. Gl. RS 1/12 od 11.01.2012)
- [4] VARIAN C-Series CLINAC accelerator system basics

ABSTRACT

EXPOSURE TO IONIZING RADIATION OF TECHNICAL STAFF DURING MAINTENANCE OF MEDICAL LINEAR ACCELERATORS

Dejan KRGA, Goran ĐORIĆ, Borislava PETROVIĆ, Milan TEODOROVIĆ, Milutin BAUCAL, Laza RUTONJSKI, Ozren ČUDIĆ, Borko BASARIĆ, Ljubica SMILJANIĆ

Institute of oncology Vojvodina, Radiotherapy department, Sremska Kamenica, Serbia

Introduction

Technical staff responsible for maintenance and service of linear accelerators, CT simulators, and simulators is categorized under group of persons professionally exposed to ionizing irradiation. By law, they are obligated to use personal dose meters [1-3]. Registered dose is significantly affected by the time spent in presence of accelerator's close environment, during maintenance and service actions. This is illustrated by review of personal dose meter records, sampled in a period of 4 years. Sources of ionized radiation are the linear accelerator components, briefly described in manufacturer's documents for available types of linear accelerators - CLINAC 2100C and 600DBX [4].

Methods and materials

Institute of oncology Vojvodina's technical staff personal dose meter records, issued by accredited laboratories, have been analysed for 3 engineers in electrotechnics, and one dosimetrist, sampled in a period of 4 years, and presented in form of chart A.

Results

Based upon personal dose meter annual records, illustrated on chart A, it can be concluded that average annual dose per employed person is within the range of (1,75 – 2,13)mSv, but the records with greater doses are to be expected within the time periods with service actions on more complicated faults of linac (12.2010, 05.2012, 09.2012).

According to provisions of the law of state of Serbia, risk is descriptively classified as moderate – if estimated annual effective dose is greater than 1mSv, while professionally exposed person's effective dose is low, if it is less than or equal to 6mSv per year.

Conclusion

Exposure degree of ionized radiation, at which technical staff is exposed to, increases due to necessity for quick service actions. In order to remove the faults and restore proper working (clinical) conditions of linear accelerator, there is no time necessary for "deactivation" of components exposed to ionized radiation, such as target, collimator, and other structural components surrounding the target.

Average doses of technical staff are within the range specified by provisions of the law of state of Serbia, but it shouldn't be disregarded that increased doses acquired from personal dose meter records, are to be increased during the time periods with service actions on more complicated faults of linacs (12.2010, 05.2012, 09.2012). Accidents have not been registered, so received doses do not differ from doses received by the other professionally exposed personel, employed on radiotherapy.

RENDGEN APARATI U DIJAGNOSTIČKOJ RADIOLOGIJI NA TERITORIJI SRBIJE U 2012. GODINI

Duško KOŠUTIĆ, Predrag BOŽOVIĆ

*Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Laboratorija za zaštitu od zračenja
i zaštitu životne sredine „Zaštita“, e-mail: kosdus@vinca.rs*

SADRŽAJ

U radu je prikazan broj konvencionalnih generatora rendgenskog zračenja koji se koriste u medicini u Srbiji, kao i generatori za posebne namene, kao što su uređaji za mamografiju, kompjuterizovanu tomografiju, stomatologiju. Pored povčanog broja uređaja, uočava se i veliki pomak u samom kvalitetu, odnosno tehnološkom nivou rendgen aparata. Posebno je značajno uvećanje broja uređaja za mamografiju kojih je do 2000-te godine bilo samo 10, a danas ih se u praksi koristi 96, i uređaja za kompjuterizovanu tomografiju koji su se do 2000-te godine koristili samo u 5 zdravstvenih ustanova, a danas se u privatnoj i državnoj praksi koristi 123, od kojih 12 šesdeset četvero slajсна uređaja.

1. Uvod

Do 1996. godine gotovo 75% generatora rendgenskog zračenja koji su se koristili u medicinskoj radiologiji bili su proizvedeni u fabrici „Jugorendgen“ u Nišu. Više od 70% generatora koji su tada bili u upotrebi bili su u upotrebi više od 15 godina. Uređaji za posebne namene su se vrlo malo koristili. Mamografskih uređaja je bilo samo 10, od koji 5 istočno nemačke proizvodnje tipa TUR DG, i uglavnom su bili u kvaru zbog nedostatka delova a uređaja za kompjuterizovanu tomografiju je bilo 10, od kojih je samo 5 bilo aktivno. Kada se koriste podaci o stomatološkim rendgen aparatima vidi se da je preko 80% korišćenih uređaja pre 1996. godine bilo u upotrebi više od 12 godina. Posle 2000-te godine došlo je do bržeg znavljanja generatora rendgenskog zračenja, kao i masovnije nabavke mamografa i CT-a. Ovome su u mnogome doprinele donacije. U njima su prednjačile EU i narod Japana. U ovom periodu je došlo i do masovnog otvaranja privatne prakse u kojoj su se nabavljali generatori rendgenskog zračenja.

2. Raspodela rendgen aparata po tipu i periodu instalacije

Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine „Zaštita“, Instituta za nuklearne nauke „Vinča“, je od 1999. godine vršila kontrolu u najvećem broju zdravstvenih ustanova koje koriste izvore jonizujućih zračenja, a smim tim imala i mogućnost formiranja najtačnije baze podataka o tim uređajima.

Tabela 1. Podela stacionarnih rendgen aparata za konvencionalnu dijagnostičku radiologiju

Tip uređaja	Monofazni	Trofazni šestoulsni	Trofazni dvanaestoulsni	Viskofrekvantni	Ukupno
Snimanje (S)	27	180	18	135	360
Prosvetljavanje (P)	2	6	1	11	20
(S) i (P)	16	123	47	151	337
UKUPNO	45	309	66	297	717

Od prve polovine 2012. godine postaje jedina ovlašćena instucija za ispitivanje rendgen aparata, što je u mnogome pomoglo da se zaokruži baza podataka o rendgen aparatima koji se koriste u medicini u Srbiji. U tabeli 1. su prikazani stacionarni generatori rendgenskog zračenja na osnovu tehnološkog nivoa. Ukupan broj stacionarni generatora rendgenskog zračenja u periodu od 1996. godine povećan je za oko 10%. Možemo na osnovu toga zaključiti da je njihov broj i ranije bio zadovoljavajući za potrebe

stanovništva u Srbiji. Međutim došlo je do bitnih promena u vrsti uređja koje su se koristile pre petnaest godina i onih koji se koriste danas. Tada su se najviše koristili uređaji koji su radili u monofaznom i trefaznom-šestopulsnom režimu (preko 80%).

Tabela 2. Podela pokretnih rendgen aparata za snimanje i prosvetljavanje

Tip uređaja	Monofazni	Visokofrekventni	Ukupno
Snimanje (S)	32	33	65
Prosvetljavanje (P)	10	3	13
(S) i (P)	5	6	11
UKUPNO	47	42	89

Danas je njihov broj manji od 50%, a broj dvopulsnih je sveden na oko 6 %. Ovi uređaji mnogo više doprinose izlaganju populacije, a samim tim i kolektivnoj dozi. Vidimo da je broj uređaja koji rade u visokofrekventnom režimu višestruko uvećan, što uz obavezu korišćenja kasete sa folijama retkih zemalja u mnogome doprinosi smanjenju izlaganja populacije. U tabeli 2. prikazani su pokretni generatori rendgenskog zračenja na osnovu tehnološkog nivoa

Tabela 3. Periodi instalacije rendgen-aparata za snimanje i prosvetljavanje

Godina postavljanja	Uređaj za snimanje	Uređaj za prosvetljavanje	Uređaj za snimanje i prosvetljavanje	Ukupno
Pre 2000.	215	9	183	407
2000 - 2005	70	2	81	153
2006 - 2012	75	9	73	157

Broj pokretnih generator rendgesknog zračenja je manji nego što je bio 1996. godine. Postoji i objašnjenje. U periodu devedesetih godina, zbog velike krize, bilo je jako teško održavati i postojeće uređaje. Kroz razne donacije stizali su najčešće pokretni i stomatološki uređaji, koje su u velikom broju slučajeva poklanjala privatna lica.

Tabela 4. Periodi instalacije pokretnih rendgen-aparata

Godina postavljanja	Uređaj za snimanje	Uređaj za prosvetljavanje	Uređaj za snimanje i prosvetljavanje	Ukupno
Pre 2000.	33	3	6	42
2000 - 2005	16	3	4	23
2006 - 2012	16	7	1	24

Veliki broj tih uređaja nikada nije ni ispunio uslove za korišćenje, ali su ipak evidentirani. Danas su mnogi od tih uređaja eliminisani iz upotrebe zbog neispunjavanja uslova pa je zato i smanjen broj. Ono što je bitno i kod njih jeste da jedna polovina radi u visokofrekventnom režimu što je mnogo povoljnije nego 8% koji se koristio u 1996-oj godini. U tabelama 3-7 su prikazani su periodi u kojima su instalirani rendgen aparati

Tabela 5. Periodi instalacije uređaja za kompjuterizovanu tomografiju

Godina postavljanja	CT
Pre 2000.	5
2000 - 2005	66
2006 - 2012	52

Tabela 6. Periodi instalacije uređaja za mamografiju

Godina postavljanja	Analogni	Digitalni	Ukupno
Pre 2000.	5	0	5
2000 - 2005	21	3	24
2006 - 2012	57	10	67

Ukoliko se uporedi broj uređaja za mamografiju pre 1996. godine i 2012., vidi se da je on neuporedivo veći. Prevažni razlog je doniranje od zemalja EU i Vlade Japana, radi uvođenja mamografskog skrininga. To je trebalo da zaživi početkom 2012. godine, ali je rok prolongiran usled malog broja kadra osposobljenog za tu vrstu posla.

Tabela 7. Periodi postavljanja stomatoloških rendgen aparata

Godina postavljanja	Intraoralni	Panoramski	Ukupno
Pre 2000.	508	53	562
2000 - 2005	67	45	112
2006 - 2012	66	38	104

Broj uređaja za CT je takođe doživio ekspanziju, pre svega u kliničkoj praksi, ali i dalje postoji dug period čekanja na ovu vrstu dijagnostike.

3. Zaključak

Ono što je jasno uočiti iz prethodnih podataka je da se masovno uvećao broj uređaja za mamografiju, što su svakako doprinele i donacije od zemalja EU i Vlade Japana jer je najveći broj tih uređaja doniran i predviđen za mamografski skrining. Broj CT je takođe uvećan kao posledica uvođenja novih tehnologija u dijagnostičkoj radiologiji. Što se tiče klasičnih generatora rendgenskog zračenja (stacionarnih i pokretnih), vidimo da se tu brojeke ne razlikuju mnogo u odnosu na one od pre 15 godina, ali se vidi napredak u kvalitetu tih uređaja. Ovde je znatno doprinelo i strogo poštovanje pravila u pogledu ispitivanja kvaliteta snopa kod ovih uređaja od strane naše ustanove i ne davanja pozitivnog mišljenja za uređaje kod kojih parametri kvaliteta ne mogu da zadovolje Zakonom predviđene vrednosti. Učinjen je i vidan napredak kod stomatoloških rendgen aparata jer smo tokom devedesetih bili preplavljeni raznim kombinacijama prastarih uređaja, pogotovo u privatnoj praksi. Vidi se znatan napredak u završavanju i popravljanju kvaliteta uređaja koji se koriste u zdravstvenim ustanovama u Srbiji, ali očekujemo da u narednom periodu taj pomak bude još veći, a sve u cilju dobijanja što kvalitetnijih dijagnostičkih informacija uz znatno smanjenje izlaganja populacije.

DISTRIBUTION OF X RAY UNITS IN SERBIA

Dusko KOŠUTIĆ, Predrag BOŽOVIĆ

*Vinca Institut of Nuclear Sciences, Radiation and Environmental Protection Laboratory, Belgrade,
Serbia, kosdus@vinca.rs*

ABSTRACT

Paper presents the distribution of x-ray units in Serbia in terms of number, type and year of installation, including units used for radiograph, fluoroscopy, mammography, computed tomography and dental x-ray units. The number of units has been increased, in particulars of units used for mammography and computed tomography.

DNEVNA KONTROLA KVALITETA ZRAČNOG SNOPA LINEARNOG AKCELERATORA

Goran ĐORIĆ, Laza RUTONJSKI, Borislava PETROVIĆ,
Milan TEODOROVIĆ, Milutin BAUCAL, Ozren ČUDIĆ, Borko BASARIĆ, Ljubica SMILJANIĆ

Institut za onkologiju Vojvodine, Sremska Kamenica, Srbija, e-mail: goran_pozdrav@yahoo.com

SADRŽAJ

QA u radioterapijskom procesu ima za cilj da obezbedi što viši kvalitet za svakog pacijenta, ali i visok nivo bezbednosti za pacijenta i osoblje. Kontrola kvaliteta zračnog snopa medicinskog linearnog akceleratora podrazumeva niz dnevnih, nedeljnih, mesečnih, kvartalnih i godišnjih testova ne samo zračnih parametara, već i mehaničkih, svetlosnih, električnih komponenti akceleratora koje utiču na formiranje zračnog snopa akceleratora. U radu su prikazani rezultati implementacije dnevnih testova kojima se proverava funkcionalnost aparata u Institutu za onkologiju Vojvodine. Uočena je dobra reproducibilnost svih relevantnih parametara

1. Uvod

Osiguranje kvaliteta (*Quality Assurance-QA*) podrazumeva sve planirane i sistematske radnje neophodne da bi se obezbedio adekvatan nivo poverenja da će proizvod ili usluga zadovoljiti zadane kriterijume kvaliteta. Osiguranje kvaliteta treba da obezbedi da postignuti rezultati odgovaraju postavljenim ciljevima, odnosno da ispunjavaju unapred zadate standarde.

Osiguranje kvaliteta u radioterapiji podrazumeva sve procedure koje obezbeđuju doslednost medicinske preskripcije i njeno bezbedno ispunjenje, u smislu doze koju treba dati na ciljnu zapreminu uz istovremeno davanje minimalne doze na normalno tkivo i adekvatno praćenje pacijenta u cilju određivanja rezultata tretmana [1-6]. Postoje dva razmatranja kada se govori o potrebi osiguranja kvaliteta: prvo se odnosi na smanjivanje mogućnosti dešavanja akcidenata i grešaka, i obezbeđivanja da će greške ukoliko se dogode, biti prepoznate i u najkraćem roku otklonjene, a drugo se odnosi na obezbeđivanje potrebnog nivoa tačnosti. QA u radioterapijskom procesu ima za cilj da obezbedi što viši kvalitet za svakog pacijenta, ali i visok nivo bezbednosti za pacijenta i osoblje. Njegova važnost u smislu preventivne nastanka greške, ranijeg uočavanja načinjene greške ili minimizacije greške je posebno očigledna kada se ima na umu da je potencijalna šteta koja može biti naneta pacijentu (ili osoblju) ireverzibilna i da je efekat prouzrokovan greškom vidljiv često tek nakon određenog vremenskog perioda.

Kontrola kvaliteta zračnog snopa medicinskog linearnog akceleratora podrazumeva niz dnevnih, nedeljnih, mesečnih, kvartalnih i godišnjih testova ne samo zračnih parametara, već i mehaničkih, svetlosnih, električnih komponenti akceleratora koje utiču na formiranje zračnog snopa akceleratora.

2. Metode

U okviru klinike za radiološku terapiju Instituta za onkologiju Vojvodine (IOV), postoje dva linearna akceleratora za sprovođenje zračne terapije. Svakog jutra se nizom testova proverava funkcionalnost aparata, prema Zakonu o zaštiti od jonizujućeg zračenja Republike Srbije, sistemu kvaliteta ustanove (IOV) i odseka za radiološku fiziku IOV-a. Jedan segment dnevnih testiranja čini dnevna kontrola doze, ravnoće i simetrije zračnog polja i energije. U svrhu provere kvaliteta zračenja, koristi se uređaj za proveru snopa, Daily QA check 2 koji se koristi za testiranje aparata za zračenje Clinac "Varian" 600DBX. Za istu proveru na drugom akceleratoru, Varian 2100C se koristi novija verzija uređaja Daily QA 3. Oba uređaja su američkog proizvođača Sun Nuclear.

Da bi se jedan ovakav uređaj uveo u upotrebu za kontrolu zračnog snopa na clinac-u, potrebno je da sam linac bude sa svim parametrima i tolerancijama u granicama propisanim od strane proizvođača akceleratora. Zatim se geometrija i osnovni parametri zračnog snopa, kao što su: doza, energija, ravnoća i simetrija, proveravaju uređajem za relativnu a kasnije i apsolutnu dozimetriju. Prethodno navedeni

procesi su veoma važni kako bi se kasnije pravilno kalibrisao uređaj za Daily QA, s obzirom da će se koristiti svakodnevno i pre puštanja akceleratora za rad sa pacijentima.

Kalibracija se vrši po uputstvu proizvođača u određenim koracima:

1. Kalibracija za pritisak i temperaturu
2. Kalibracija niza jonizacionih komora

Uređaj Daily QA 2 ima šest jonizacionih komora raspoređenih u određenoj geometriji na mernoj ploči samog uređaja:

- Jedna centralna komora;
- Dve komore po uzdužnoj osi udaljene po 8cm u odnosu na centralnu komoru;
- Dve komore po poprečnoj osi udaljene po 8cm u odnosu na centralnu komoru;
- Jedna komora kao detektor energije, dijagonalno od centralne udaljena 5,6cm.

Za razliku od prethodnog, uređaj Daily QA 3 ima 25 komora:

- 13 jonizacionih - jedna centralna komora, 4 primarna detektora za X i Y osu, 4 fotonske i 4 elektronske komore;
- 12 diodnih detektora – po tri detektora za svaku ivicu kvadratnog polja koji služe za merenje koincidencije polja.

Sva podešavanja i kalibracije Daily QA uređaja vrše radiološki fizičari. U podešavanja spadaju formiranje kalibracionih fajlova, kalibracija komora, pravljenje rasporeda merenja. U odnosu na te kalibracione podatke softver formira rezultate i računa odstupanja za svako buduće merenje.

U našem slučaju na mašini clinac 600DBX sa uređajem Daily QA 2 imamo merenja za:

- Fotonsku energiju 6MV;
- Napredni dinamički klin(EDW) za ugao 10°, 30°, 60°.

Za mašinu clinac 2100C sa uređajem Daily QA 3 imamo:

- Dve fotonske energije od 6MV i 15MV;
- Pet elektronskih energija od 6, 9, 12, 16, 20 MeV.

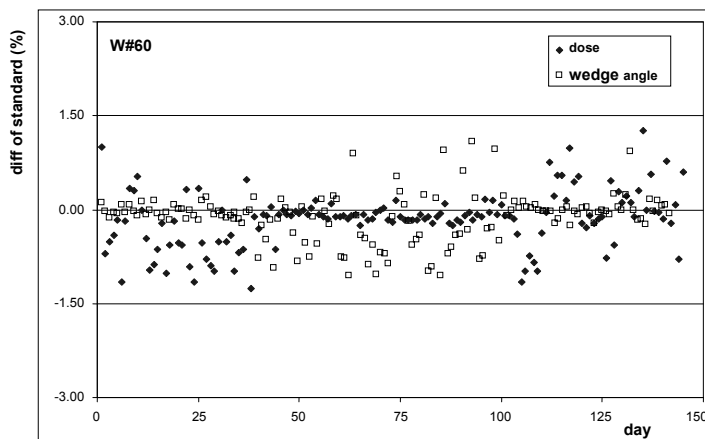
Svako merenje se vrši za polje dimenzija 20x20cm na FKD = 100cm. U toku ovih merenja a u okviru jutarnje provere mašine rade se i provera osnovnih komandi mašine kao što su:

- kretanje pacijent stola u svim pravcima
- osnovna kretanja mašine: pomeranje gentrinja, rotacija kolimatora, kretanje blendi itd.

Merenje je važno vršiti uvek u istim uslovima i pod nadzorom iste osobe kako ne bi dolazilo do drastičnih odstupanja u rezultatima. Pod istim uslovima podrazumeva se da nema promene temperature (jedan od uslova) u odnosu na dan formiranja kalibracionih fajlova uređaja Daily QA.

3. Rezultati i zaključak

U okviru dnevne kontrole kvaliteta se pomoću *Sun Nuclear*-ovog *Daily QA Check 2* meri doza na centralnoj osi za EDW ugao od 10^0 , 30^0 i 60^0 , kao i *flatness* na osnovu koga se dobija vrednost EDW ugla za sva tri ugla klina. Merenja doze na centralnoj osi i merenje ugla klina su sprovedena u periodu od šest meseci. Na Slici 1. su predstavljeni rezultati merenja za ugao klina od 60^0 . Sa Slike se može primetiti reproducibilnost u granicama $\pm 1.5\%$ tokom šest meseci.



Slika 1. Rezultati merenja pomoću Daily QA za ugao klina od 60^0

Na drugom akceleratoru, Varian 2100C, se koristi Daily QA Check 3 za proveru dnevne kontrole kvaliteta. Pored osnovnih provera, doze, energije, simetrije i ravnoce polja, imamo i rezultate za kvalitet snopa i poklapanje svetlosnog polja sa zračnim poljem (koincidencija polja), koja je izražena u milimetrima.

4. Literatura

- [1] IAEA International Atomic Energy Agency, Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practise for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water, Technical Report Series no.398, Iaea, Viena, May 2001
- [2] IAEA TEC DOC 989, Quality assurance in radiotherapy, 1995
- [3] Task Group 142 report: Quality assurance of medical accelerators, EE Klein, J. Hanley, J Bayouth et al, Med. Phys. 36 (9), Sept 2009
- [4] E. B. Podgorsak. Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005.
- [5] Faiz M. Kahn, The Physics of Radiation Therapy, 2th edition. 1994
- [6] Parham Alaei, Patrick D. Higgins. Performance evaluation and quality assurance of Varian enhanced dynamic wedges. Journal of applied clinical medical physics, Volume 7 (1), 2006

QUALITY ASSURANCE AND CONTROL OF THE MEDICAL LINEAR ACCELERATOR
Goran ĐORIĆ, Laza RUTONJSKI, Borislava PETROVIĆ,
Milan TEODOROVIĆ, Milutin BAUCAL, Ozren ČUDIĆ, Borko BASARIĆ, Ljubica SMILJANIĆ

Institute of Oncology Vojvodina, Sremska Kamenica, Serbia

ABSTRACT

Clinical implementation of daily quality assurance/control programme is necessary by law and recommended by professional societies. In this work, we presented the results of six-month evaluation of Varian accelerators installed at the department. The Sun Nuclear Daily QA Check 2 and QA 3 were used for QA purpose on both machines. The QA program included daily checks of central axis dose, symmetry, flatness and energy of the beam. Within the monthly QA program wedge factors were checked. Our daily QA measurements of dose and wedge angle showed the reproducibility error less than $\pm 1.5\%$. On the other hand, monthly QA measurements of wedge factor the reproducibility error was less than $\pm 0.5\%$. During the six-month quality control we observed a good reproducibility of the beam parameters. Also, both Sun Nuclear Daily QA Check 2 and 3 showed to be very satisfying in QA of the linear accelerators.

NEKOLIKO REZULTATA BRAHITERAPIJSKE GINEKOLOŠKE *IN VIVO* DOZIMETRIJE

Irena ALIGRUDIĆ

Klinički centar Crne Gore, Podgorica, Crna Gora, airena@t-com.me

SADRŽAJ

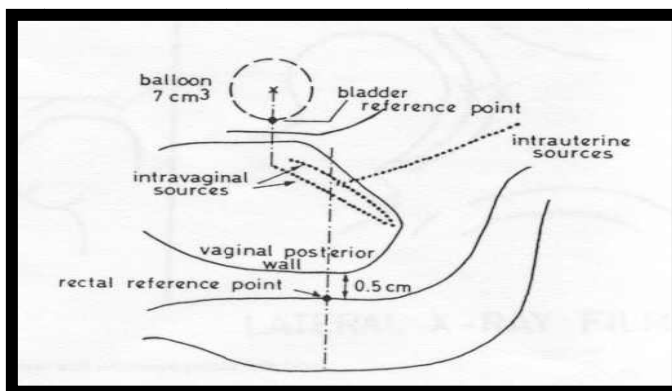
U radu su prezentovani rezultati in vivo dozimetrije za tri ginekološke brahiterapijske aplikacije. Da bi se dobili željeni rezultati u kontroli tumora na nivou koji je moguć, a komplikacije održavale na prihvatljivom nivou, in vivo dozimetrija – kao jedna od procedura QA u brahiterapiji, ima veliki značaj.

1. Uvod

Brahiterapija predstavlja najstariji radioterapijski modalitet koji je omogućio terapiju tumora bez hiruške intervencije. Lokalizovana terapijska doza jonizujućih zračenja omogućuje tretiranje tumora uz minimalno ozračivanje okolnih struktura. Intrakavitarna brahiterapija, kao jedan od oblika savremene radiološke brahiterapije, sprovodi se tako što se radioaktivni izvori putem raznih katetera-aplikatora unose u tjelesne šupljine i tako dovode u neposredni kontakt sa oboljelim organom, odnosno tumorom. Ova tehnika se najčešće koristi kod zračenja karcinoma grlića i tijela materice, bronha, jednjaka, anusa [1]. Uvođenjem *in vivo* dozimetrije u brahiterapiji omogućena je komparacija dozne opterećenosti na organima od rizika prilikom planiranja i tretmana zračenja, što je prezentovano u ovom radu.

2. ICRU preporuke

Prema ICRU 38 preporukama, prilikom sprovođenja ginekološkog brahiterapijskog tretmana, za organe od rizika (tj. bešiku i rektum) definiše se nekoliko tačaka za izvještaj tretmana: „ICRU-referentna tačka za bešiku“ i „ICRU-referentna tačka za rektum“ (slika 1)[2]. Iako su ove tačke reproducibilne i pouzdane, one ne reprezentuju uvijek maksimum doze na organima od rizika pa, prema tome, više tačaka indikuje različite doze na organima od rizika, kao i srednju i maksimalnu dozu [3].



Slika 1. ICRU referentne tačke za bešiku i rektum, lateralni presjek

Komparacijom fizičkih parametara brahiterapije (intenziteta doze u aplikatorskim tačkama, apsorbovanim dozama u organima i tkivima od interesa, kao i zapreminama obuhvaćenim određenim izodozama), sa kliničkim parametrima kvaliteta i kvantiteta života, dolazi se do korekcija u protokolima koji se koriste u brahiterapiji.

3. Mjerna oprema i planiranje zračnog tretmana

U savremenoj brahiterapiji, upotrebom sistema za planiranje i savremenim imidžingom (CT i MR), postiže se visok stepen individualizacije i preciznosti kod tretiranja svih lokalizacija[4]. Svi pacijenti predviđeni za tretman, za svaku aplikaciju radioaktivnih izvora, obrađuju se pomoću odgovarajućeg programskog modula, tako da se svaka frakcija terapije evidentira, a preciznost je, u funkciji tačnosti izabranih referentnih tačaka, u odnosu na pacijenta, i u odnosu na aplikator. Prezentovani rezultati dobijeni su 2010. godine na univerzitetskoj klinici u Virzburgu, Njemačka. Od mjerne opreme upotrebene su *afterloading diode* za *in vivo* dozimetriju (PTW Freiburg), kao i *MULTIDOS in vivo* dozimetar (PTW Freiburg). Sistem za planiranje je HDR plus, a u aparatu za zračenje (*HDR Multisource, Eckert&Ziegler Bebig*) je izotop Co-60, čije je vrijeme poluživota 1925.2 d. Pacijentkinje predviđene za ginekološki brahiterapijski tretman snimane su na CT-u, tako da je planiranje zračne terapije urađeno preko CT snimaka.

Sistem za planiranje definiše tri koordinatne ose (x, y, i z), tako da se y-osa poklapa sa cervikalnom osom, x je normalna na y osu i ima lateralni pravac, a z je normalna na prethodne dvije i ima anterio-posteriorni pravac. Koordinatni početak je tačka koja se bira tako da se nalazi u centru aplikatora [3]. U nastavku planiranja obilježavaju se i definišu tačke, i u odnosu na aplikatore i odnosu na pacijenta. Referentne tačke A lijevo i A desno su definisane kao tačke udaljene 20 mm od centra koordinatnog sistema duž y-ose tj. cervikalne ose, i po 20 mm lijevo i desno duž x-ose. Tačke u odnosu na pacijenta su ustvari najbliže tačke kritičnih organa prilikom zračenja. S obzirom da su pacijentkinje u ležećem položaju, balon *Foley*-ovog katetera leži na dnu mokraćne bešike i tačka dodira je najbliža tačka sluzokože mokraćne bešike samom izvoru zračenja prilikom zračnog tretmana. Za određivanje najbliže tačke anteriornog zida rektuma obilježava se pet najbližih kuglica sa rektalnom markerom.

Planovi zračne terapije su, između ostalih neophodnih parametara za evidenciju i sprovođenje zračnog tretmana, sadržali vrijednosti 4-5 kontrolnih tačaka za rektum, i po jednu kontrolu tačku za bešiku, a propisana doza po jednoj frakciji je 8.5 Gy. U toku zračnog tretmana mjerene su doze koje primaju bešika i rektum u određenim tačkama, i vršena je njihova komparacija sa dozama iz plana (kontrolne tačke). U bešici i rektumu pacijentkinja postavljeni su i poluprovodnički detektori (diode) koji su sa druge strane konektovani sa detektorskom konekcijom kutijom koja je spojena sa elektrometrom koji je smješten u kontrolnoj sobi. Takođe, postoji veza i sa računarom i softverom za pacijentnu dozimetriju.

4. Rezultati

U tabelama 1, 2 i 3 su prikazane apsolutne vrijednosti doza [Gy] u kontrolnim tačkama planiranih zračenja, i izmjerene vrijednosti doza [Gy] – upotrebom dioda za *in vivo* dozimetriju, kao i njihove procentualne vrijednosti u odnosu na preskripciju.

Tabela 1. Rezultati prve frakcije*Kontrolne tačke za rektum*

	X-pos [cm]	Y-pos [cm]	Z-pos [cm]	Doza [Gy]	Doza % R _x
1	2.48	-3.50	6.97	2.11	35.9
2	1.04	-2.98	6.90	3.13	23.7
3	-0.96	-2.45	6.97	4.12	15.3
4	-0.92	1.45	7.64	4.97	9.8

Referentna tačka za rektum

	X-pos [cm]	Y-pos [cm]	Z-pos [cm]	Doza [Gy]	Doza % R _x
1	-0.76	-1.26	7.37	6.24	73.4

Kontrolna tačka za bešiku

	X-pos [cm]	Y-pos [cm]	Z-pos [cm]	Doza [Gy]	Doza % R _x
1	-0.48	3.75	2.11	2.69	31.6

Referentna tačka za bešiku

	X-pos [cm]	Y-pos [cm]	Z-pos [cm]	Doza [Gy]	Doza % R _x
1	0.04	3.73	3.83	3.39	39.9

Tabela 2. Rezultati druge frakcije*Kontrolne tačke za rektum*

	X-pos [cm]	Y-pos [cm]	Z-pos [cm]	Doza [Gy]	Doza % R _x
1	1.12	-1.63	-3.86	1.88	22.1
2	1.38	-2.27	-2.73	2.29	26.9
3	1.61	-3.14	-1.48	2.31	27.2
4	1.64	-4.31	-0.14	1.74	20.4
5	1.61	-5.27	0.85	1.26	14.8

Referentna tačka za rektum

	X-pos [cm]	Y-pos [cm]	Z-pos [cm]	Doza [Gy]	Doza % R _x
1	1.58	-2.50	-1.65	2.85	33.5

Kontrolna tačka za bešiku

	X-pos [cm]	Y-pos [cm]	Z-pos [cm]	Doza [Gy]	Doza % R _x
1	0.13	2.45	3.71	3.42	40.2

Referentna tačka za bešiku

	X-pos [cm]	Y-pos [cm]	Z-pos [cm]	Doza [Gy]	Doza % R _x
1	0.16	1.25	3.04	5.28	62.1

Tabela 3. Rezultati treće frakcije*Kontrolne tačke za rektum*

	X-pos [cm]	Y-pos [cm]	Z-pos [cm]	Doza [Gy]	Doza % R _x
1	1.48	-2.24	2.04	3.05	35.9
2	1.39	-2.16	3.46	2.02	23.7
3	1.23	-2.25	4.88	1.30	15.3
4	1.08	.2.28	6.28	0.83	9.8

Referentna tačka za rektum

	X-pos [cm]	Y-pos [cm]	Z-pos [cm]	Doza [Gy]	Doza % R _x
1	1.45	-2.05	0.03	5.34	62.8

Kontrolna tačka za bešiku

	X-pos [cm]	Y-pos [cm]	Z-pos [cm]	Doza [Gy]	Doza % R _x
1	-0.22	5.49	-0.20	2.45	28.8

Referentna tačka za bešiku

	X-pos [cm]	Y-pos [cm]	Z-pos [cm]	Doza [Gy]	Doza % R _x
1	-0.09	3.14	0.54	5.22	61.4

4. Zaključak

Prilikom upotrebe dioda u kliničkim uslovima za brahiterapijski tretman postoje razlike između izmjerenih i planiranih vrijednosti apsorbovanih doza u organima od rizika. Kako je broj prikazanih rezultata veoma mali, ove činjenice ne dozvoljavaju izvođenje konačnih zaključaka. Ipak, ne uzimajući u obzir kalibraciju dioda i faktore koji utiču na njihov odziv, dobijeni rezultati upućuju na to da tačnost i reproducibilnost dioda su dovoljne za kliničku upotrebu, a za tačnost *in vivo* dozimetrije geometrijski uslovi predstavljaju najveći stepen važnosti.

5. Reference

- [1] Ervin B. Podgorsak.: Radiation Oncology Physics A Handbook for Teachers and Students, 371-373, IAEA,2005.
- [2] International Commissioning on Radiation Units and Measurement ICRU No.38:Dose and Volume Specification for Reporting Intracavitary Therapy in Gynaecology ,Bethesda,1985.
- [3] Alain Gerbaulet, Richard Potter, Jean-Jacques Mazon, Harm Meertens, Erik Van Limbergen.: The GEC ESTRO Handbook of Brachytherapy,60-63,340-345, ESTRO,2002.
- [4] Claudia Waldhausl, Andre Wambersie, Richard Potter, Dietmar Georg: In vivo dosimetry for gynaecological brachytherapy:Physical and clinical considerations, *Radiotherapy and Oncology* .Vol77, 310-317,2007.

SOME RESULTS OF GYNAECOLOGICAL BRACHYTHERAPY *IN VIVO* DOSIMETRY

Irena ALIGRUDIC*Clinical Centre of Montenegro, Podgorica, Montenegro*

ABSTRACT

The results of in vivo dosimetry for three gynaecological brachytherapy applications are presented in this work. For obtaining desirable results in a control of tumors on the level which is possible, and to keep complications on an acceptable level, in vivo dosimetry – as one of the QA procedures in brachytherapy, has high importance.

ПРОРАЧУН МЕРА ЗАШТИТЕ ЗА МDCT СИСТЕМ

Иван ГЕНЦЕЛ¹, Наташа ТОДОРОВИЋ², Мирослав ВЕСКОВИЋ²

1) Војномедицинска академија, Београд, Србија, ivan_gencel@yahoo.com

2) Природно-математички факултет, Нови Сад, Србија

САДРЖАЈ

Ради процене садашње заштите просторије за СТ уређај, измерена је јачина амбијенталног еквивалента дозе у околним просторијама Сиенсовог Multiple Row СТ система. Урађена је и процена дебљине олова и бетона неопходне за заштиту особља у командној соби. Мерене вредности односиле се на радна места у командној соби, уласку у СТ салу, ходник и купатило. Вредности јачине амбијенталног еквивалента дозе су се кретале у зависности од места мерења од 0,12 $\mu\text{Sv/h}$ до 17 $\mu\text{Sv/h}$. Утврђено је да је довољно свега 1,2m олова или 110mm бетона да би се лица заштитила тако да примају дозу која је дозвољена за становништво. На основу добијених резултата урађена је процена изложености особља и утврђено је да дозе не прелазе законски прописане границе. С обзиром на тренутни обим посла и могућност смеђивања особља на радном месту, дозе су знатно испод дозвољене границе. У случају да се обим посла повећа, могуће је додатно се заштити скраћеним боравком у командној соби или додатним облагањем просторије у којој је смештен СТ систем.

1. Увод

С обзиром на повећање потребе за квалитетнијом дијагностичком сликом, развијала се и технологија дијагностичке опреме, уз коју се повећавала доза којом се излажу пацијенти. Што је пацијентна доза већа и што сте ближи пацијенту, то је и доза медицинског особља већа [3]. На многим местима нови уређаји постављани су у постојеће просторије са раније пројектованом заштитом. У овом раду је измерен амбијентални еквивалент дозе у просторијама у којима бораве професионално изложена лица и у околним просторијама dual source СТ система, како би могли да прерачунамо дебљину бетона и олова која је довољна да се доза коју професионално изложена лица могу примити, сведе на ниво препоручен за становништво, односно 0,02 mSv у току седмице. У таквим условима према NCRP извештају 147 могу да раде и жене у току трудноће [4].

2. Методе

Вршено је мерење у Институту за кардиоваскуларне болести Војводине, на СТ систему Somatom Definition Flash произвођача SIEMENS, модел 10430603, чији је серијски број 73389. Тип скенера који се користи је Multiple Row Detector CT (MDCT) са две рендгенске цеви (dual source) и два детекторска система (2 x 128 слајсни). Процедура у просеку траје 9,14 секунди, при напону од 120 kV. Мерења јачине амбијенталног еквивалента дозе су вршене уређајем Radiagem Canberra 2000 са опсегом мерења од 0,3 $\mu\text{Sv/h}$ до 100 $\mu\text{Sv/h}$. Мерења су вршена на различитим местима која су приказана у табели 1. Површина СТ сале износи 36m², висина је 3m и има ојачање зидова и врата. Рендгенска цев је удаљена од зидова 2,5m. Због расејања икс зрака од пацијента при практичној употреби, при мерењу коришћен је фантом. Дневно се скенира од 3 до 8 пацијената, уз напомену да се најчешће врше по две процедуре за сваког пацијента. По 50% процедура чине скенирања главе и тела. За уређајем ради 5 техничара и 3 лекара који се равноправно смењују. Потребна заштита рачуната је помоћу методе која се односи на рачунање помоћу вредности CTDI-а [4]. За ту методу је потребно знати дистрибуцију расејаног зрачења, односно расејану керму у ваздуху по пацијенту на раздаљини од једног метра (K_s^1). Та величина се може апроксимирати из следеће једначине из [4]:

$$K_s^1 = k DLI \approx k N_R T_b CTDI_{100} \quad (1)$$

Где је DLI аналогно производу дозе и дужине, али се односи само на централну осу. T_b представља номиналну ширину снопа на оси ротације, а N_R број ротација рендгенске цеви око пацијента. Дужина озраченог дела пацијента се рачуна као:

$$L = N_R b \quad (2)$$

где b представља дужину пута за време једне ротације. K_S^1 се пише као:

$$K_S^1 = k \frac{L}{p} \text{CTDI}_{100} \quad (3)$$

и добија се изотропна дистрибуција расејаног зрачења. Удео расејаног зрачења по центиметру за периферну осу фантома главе и тела у које је урачуната и мала количина цурећег зрачења која се јавља према [4] износи:

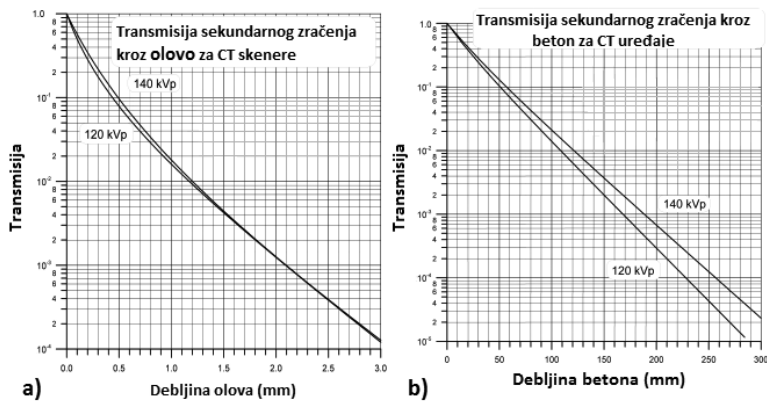
$$k_{\text{glava}} = 9 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$$

$$k_{\text{telo}} = 3 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$$

Рачуната вредност CT дозног индекса $n\text{CTDI}_{100}$ је дефинисана као CTDI_{100} нормирана на mAs:

$$K_S^1 = k \text{DLI} \approx k N_R T_b \text{ mAs } n\text{CTDI}_{100} = k \frac{L}{p} \text{ mAs } n\text{CTDI}_{100} \quad (4)$$

Након коришћења ове методе добијене су вредности трансмисије помоћу којих се (слика 1 под а) и б)) из [4] читавају потребне дебљине за различите материјале.



Слика 1 Атенуациона крива – а) олово б) бетон

3. Резултати

Премерена је јачина амбијенталног еквивалента дозе и резултати су приказани у Табели 1:

Табела 1. Резултати мерења јачине амбијенталног еквивалента дозе

Место мерења	Јачина амбијенталног еквивалента дозе
Командна соба Оловно стакло	3,15-12,5 $\mu\text{Sv/h}$
Улаз у командну собу	6,24 $\mu\text{Sv/h}$
Место техничара	2,3 $\mu\text{Sv/h}$
Место лекара	4,3 $\mu\text{Sv/h}$
Улаз у КТ салу Врата ка СТ-у	17 $\mu\text{Sv/h}$
Чекаоница	2,7 $\mu\text{Sv/h}$
Ходник Врата од СТ-а	6,3 $\mu\text{Sv/h}$
Купатило	0,12 $\mu\text{Sv/h}$

За једну процедуру је просечно потребно 9,14s, а на основу навода запослених на том радном месту, обаве у просеку 80 процедура седмично. Коришћен је конзервативнији приступ у случају да се обим посла повећа и коришћен је податак од 100 процедура седмично (Proc). На основу тих података израчуната је јачина амбијенталног еквивалента дозе (U) на месту лекара код којег је премерена већа вредност (D_2) него код места техничара.

$$T = t \times Proc = 914 \frac{s}{\text{sedmica}} = 0,25 \frac{h}{\text{sedmica}}$$

$$U = T \times D_2 = 1,075 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{sedmica}} = 0,001 \frac{\text{mSv}}{\text{sedmica}}$$

NCRP извештај 147 [4] предлаже да јачина амбијенталног еквивалента дозе за надгледану зону буде $0,02 \frac{\text{mSv}}{\text{sedmica}}$ а за контролисану зону $0,1 \frac{\text{mSv}}{\text{sedmica}}$. Из предходног прорачуна је утврђено да садашња заштита испуњава законом прописане границе[5]. Рачунањем секундарне керме у ваздуху, израчуната је и дозвољена транспаренција баријере. На основу формуле (4) израчуната је секундарна керма у ваздуху по пацијенту на раздаљини од 1 метра за главу и тело, с обзиром да се од укупног броја процедура спроводи по пола за главу и исто толико за тело, добијено је:

$$K_{\text{sec}}^1(\text{glava}) = 9 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1} \frac{20 \text{cm}}{0,55} 221 \text{mAs} = 0,223 \text{mGy mAs}^{-1} = 0,16 \text{mGy pacijent}^{-1}$$

$$K_{\text{sec}}^1(\text{telo}) = 3 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1} 50 \text{cm} 117 \text{mAs} = 0,138 \text{mGy mAs}^{-1} = 0,24 \text{mGy pacijent}^{-1}$$

Вредност укупне секундарне керме на 3 метра од изоцентра, колика је раздаљина између изоцентра и професионално изложених лица, где је окупациони фактор једнак јединици, без баријере у току седмице за 100 процедура, износи:

$$K_{\text{sec}} = \left(\frac{1\text{m}}{3\text{m}}\right)^2 (50 \times 0,16 + 50 \times 0,24) = 2,22 \text{mGy sedmica}^{-1}$$

И дозвољена транспаренција за надгледану зону:

$$B = \frac{0,02 \text{ mGy sedmica}^{-1}}{2,22 \text{ mGy sedmica}^{-1}} = 9 \times 10^{-3}$$

Из атенуационих крива (слика 1 под а) и б)) читавају се дебљине олова и бетона. 110mm бетона или 1,2mm олова је довољно да се особље заштити и да њихов ниво излагања буде у складу са препорукама за надгледане зоне.

4. Дискусија и закључак

Утврђено је да тренутна заштита на dual source CT систему задовољава захтеве постављене националним правилником[5] и NCRP извештајем 147[4]. При повећању обима посла, могуће је додатно се заштити скраћеним боравком у командиј соби додатним облагањем просторије.

5. Литература

- [1] Golding SJ, Shrimpton PC. Commentary. Radiation dose in CT: are we meeting the challenge? Br J Radiol 2002; 75:1–4.
- [2] Naaga JR. Radiation dose management: weighing risk versus benefit. AJR Am J Roentgenol 2001; 177:289–291.
- [3] Младен Вукчевић, Дозиметријске величине и поља зрачења у дијагностичкој радиологији, Институт за нуклеарне науке „Винча“ Београд
- [4] NCRP REPORT No. 147, (Национални Савет за Заштиту од Зрачења и Мерења) Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities, 2005.
- [5] Правилник о границама излагања јонизујућим зрачењима и мерењима ради процене нивоа излагања јонизујућим зрачењима, Члан 28, 29., 2011

ESTIMATION OF RADIATION SAFETY GOALS FOR MDCT SYSTEM

Ivan GENCEL¹, Nataša TODOROVIĆ², Miroslav VESKOVIĆ²

1) Military Medical Academy, Belgrade, Serbia, ivan_gencil@yahoo.com

2) Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia

ABSTRACT

Regarding to evaluation of current protection areas for CT device, it is measured the intensity of the ambient equivalent dose in the surrounding areas of Siemens Multiple Row CT system Somatom Definition Flash, in the Institute of Cardiovascular Diseases of Vojvodina. Estimation of thickness of lead and concrete necessary for the protection of personnel in the control room, was also performed. The measured values were related to different locations surrounding CT room. The measurement of the ambient dose equivalent ranged depending on the location of 0.12 $\mu\text{Sv} / \text{h}$ to 17 $\mu\text{Sv} / \text{h}$. It has been found that it is sufficient only 1.2 mm of lead or 110mm concrete to protect such persons to receive a dose that is allowed for the population. Based on the gain results it was performed an assessment of exposure of staff and it was established that doses do not exceed the statutory limits. In the case of increased workload, it is possible additional protection by reduction the time of of staying in control room or additional coating facilities at which the CT system is.

ODREĐIVANJE KVALITETA SNOPA X-ZRAČENJA UPOTREBOM SPEKTROMETRA U DIJAGNOSTIČKOJ RADIOLOGIJI

Milojko KOVAČEVIĆ², Jelena STANKOVIĆ^{1,2}, Predrag BOŽOVIĆ^{1,2}, Danijela ARANĐIĆ^{1,2},
Predrag MARINKOVIĆ¹, Zoran RAJOVIĆ^{1,3}

1) Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

2) Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija, jelena.stankovic@vinca.rs

3) Elektrodistribucija, Beograd

SADRŽAJ

Poznavanje spektra X-zračenja je veoma važno u oblasti kontrole kvaliteta u dijagnostičkoj radiologiji radi optimizacije pacijentne doze. Cilj ovog rada je proračun osnovnih parametara snopa X-zračenja pomoću spektrometra X-123CdTe. Proračunati parametri napon, deljina poluslabljenja, srednja energija i faktor homogenosti snopa su u saglasnosti sa lokalnim pravilnikom o kvalitetu dijagnostičkih rendgen aparata kao i sa do sada publikovanim vrednostima.

1. Uvod

Poznavanje spektra X-zračenja je veoma bitno u oblasti kontrole kvaliteta u dijagnostičkoj radiologiji [1]. U dozimetrijskim ispitivanjima, spektar X zračenja može biti korišćen za procenu izlaganja jonizacionom zračenju, kerme u vazduhu i distribuciji absorbovane doze, prevazilazeći problem energetske zavisnosti odziva dozimetra (detektora u čvrstom stanju i jonizacionih komora) koji se uobičajeno koriste u merenjima. Takođe, postizanje maksimalnog kontrasta pri minimalnoj dozi ne može biti ostvareno bez optimizacije spektra X-zračenja.

U ovom radu je predstavljen spektrometrijski metod određivanja: napona (kVp), prve i druge debljine poluslabljenja (HVL), srednje energije snopa i faktora homogenosti.

HPGe predstavlja zlatni standard u ftonskoj spektrometriji [2] sa rezolucijom od 0.1% ali je vrlo skup i nepraktičan u kliničkom okruženju jer zahteva i kriogeno hlađenje. U ovom radu je korišćen portabilni spektrometar od CdTe koji je lak za upotrebu usled malih dimenzija i hlađenja pomoću Peltier-ovog elementa. Rezolucija CdTe detektora je uporediva sa Ge detektorima, tako da uspešno može biti korišćen u kliničkom okruženju.

2. Materijali i metod

Detektor koji je korišćen u ovom radu je X-123CdTe, prozveden od strane AMPTEK Inc. Sastoji se od detektora X i gama zračenja, pretpojačavača, sistema za hlađenje, DP5 - digitalnog procesora impulsa, višekanalnog analizatora i napajanja [3].

Kako bi kalibrisali detektor koristili smo gama zračenje emitovano pri raspadima jezgara elemenata ²⁴¹Am (59.5 keV), ¹³³Ba (80.9 keV), ¹³⁷Cs (32 keV) [4].

Izvor X zračenja je Philips MCN320 cev nominalnog napona 320 kV, anode od volframa, anodnog ugla od 40° i inherentne filtracije 4 mm Al. Rastojanje fokus detektor je 1 m [5]. Jačina struje cevi je podešena na 0.58 mA i fluks X-zračenja je redukovan filtracijom (0.2mm Cu) kako bi se smanjio efekat nagomilavanja impulsa.

Posmatran je spektar X-zračenja rendgenske cevi pri naponima od 55 kV do 70 kV sa korakom 5 kV koji se koriste u dijagnostičkoj radiologiji.

Standardizovana tehnika za određivanje kVp parametra nije još predložena [2]. Postoje određeni tipovi kVp-metra, ali njihova očitavanja su jako zavisna od brojnih parametara. Direktnim merenjem spektra se može odrediti kVp kao presečna tačka kraja spektra i horizontalne linije fona.

Uobičajeno je da se prvi HVL određuje eksperimentalno redanjem tankih folija aluminijuma ili bakra između fokusa rendgenske cevi i jonizacione komore. U ovom radu primenjujemo spektrometrijsku metodu i proračun prema (1):

$$\frac{1}{2} = \frac{\sum_i (\mu_{tr} / \rho)_V N_i E_i e^{-\mu_{Al} HVL} e^{-\mu_V d}}{\sum_i (\mu_{tr} / \rho)_V N_i E_i e^{-\mu_V d}} \quad (1)$$

gde je: $(\mu_{tr} / \rho)_V$ - maseni koeficijent transfera energije u vazduhu, N_i - broj impulsa u i-tom energetskom intervalu, E_i - i-ti energetski interval, μ_{Al} (μ_V) - linearni koeficijent atenuacije u aluminijumu (tj. u vazduhu), d- udaljenost spektrometra od fokusa rendgena.

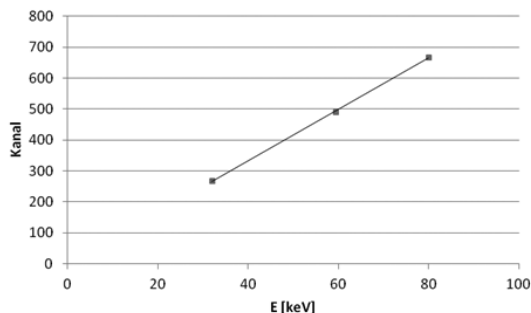
Drugi HVL dobijamo tako što levu stranu u (1) umesto $\frac{1}{2}$ zamenimo sa $\frac{1}{4}$. Deljenjem prvog i drugog HVL-a dolazimo do faktora homogenosti. Za dati spektar važno je znati srednju energiju spektra koja nam ukazuje na tvrdoću spektra. Srednja energija snopa se računa prema (2).

$$\bar{E} = \frac{\sum_i N_i E_i}{\sum_i N_i} \quad (2)$$

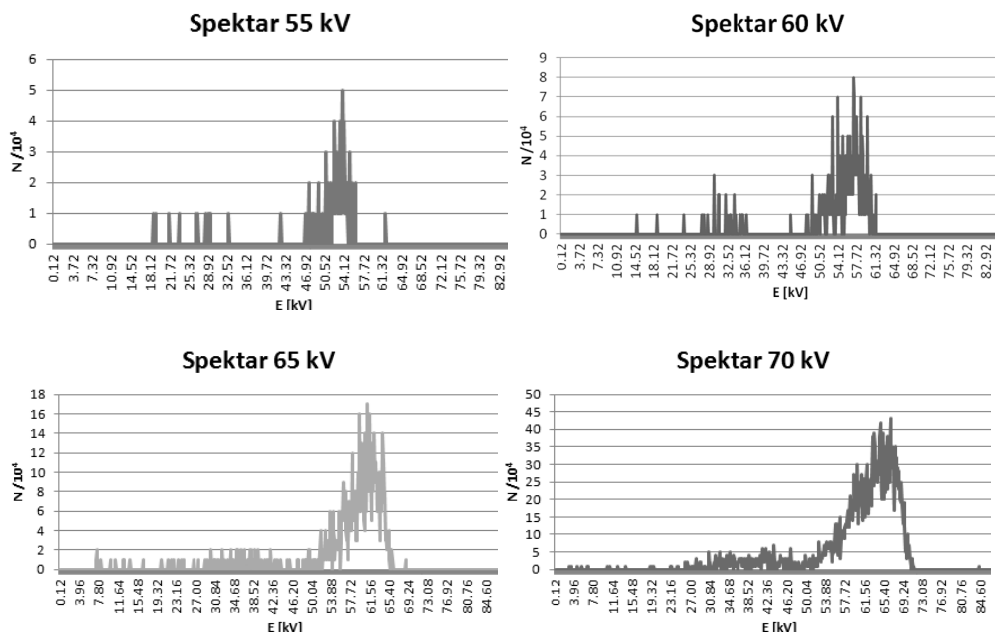
Za proveru reproducibilnosti merenja spektra koristili smo izvore ^{241}Am (59.5 keV) i ^{133}Ba (80.9 keV) čije energije se nalaze u opsegu energija koje se javljaju u dijagnostičkoj radiologiji.

3. Rezultati i diskusija

Rezultat kalibracije je prikazan na sl. 1 na kojoj se može uočiti dobra linearnost kalibracione krive sa osetljivošću koja je jednaka 0.12 keV/kanal. Osetljivost je u saglasnosti sa rezultatima studija u [6]. Rezolucija u smislu FWHM je dobijena primenom centaroidnog proračunom pika. Izračunat FWHM je iznosio 576 eV tj. približno 1% na 59.5 keV je, dok je na 80.9 keV iznosio 910 eV tj. približno 1.1 %. Standardna devijacija pri proveru reproducibilnost spektrometra je iznosila 12% za Am i 16% za Be. Dobijeni spektri su prikazani na sl. 2.



Slika 1. Kalibracija spektrometra



Sl. 2. Izmereni spektri za napone Rö-cevi: 55 keV, 60 keV, 65 keV, 70 keV

U Tabeli 1 su date osnovne karakteristike spektra X-zračenja za napone od 55 kV, 60 kV, 65 kV i 70 kV.

Tabela 1. Karakteristike spektra X-zračenja

Karakteristika snopa	Napon cevi[kV]			
	55	60	65	70
HVL_prvi[mm Al]	4.7	5.9	6.9	7.8
HVL_drugi[mm Al]	11.6	13	15	16.3
Faktor homogenosti	0.405	0.454	0.460	0.479
Srednja energija[keV]	50.73	53.78	57.02	60.54
Radni napon[kV]	56.4	61.58	66.4	71.58

Izračunate vrednosti za prvi i drugi HVL su u saglasnosti sa do sada publikovanim rezultatima [7]. Napon rendgenskih cevi treba redovno kontrolisati, pošto mala promena u kVp može uticati i na apsorbovanu dozu i na kontrast dijagnostičkog snimaka. Dozvoljano odstupanje izmerene vrednosti od zadate je 10% [8]. Za posmatrane napone ovo odstupanje ne prelazi 3%.

4. Zaključak

U ovom radu je prikazana primena spektrometra u kontroli kvaliteta dijagnostičkih rendgen aparata. Rezultati su u saglasnosti sa dosadašnjim studijama. Zbog svojih malih dimenzija dobre rezolucije spektrometar od CdTe je pogodan za rad u kliničkim uslovima.

Na izmereni spektar u daljem radu treba primeniti metod unfoldinga kako bi se izbegli neželjeni efekti poput fotonske interakcije sa materijalom detektora i promene efikasnosti elektronskih uređaja.

5. Reference

- [1] Quality Control in Diagnostic Radiology, Diagnostic X-ray Imaging Committee Task Group No. 12, AAPM Report 74 (2002).
- [2] M. Krmar et al., Possible use of CdTe detectors in kVp monitoring of diagnostic X-ray tubes, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 622 (2010) 256–260.
- [3] R. Redus et al., Design and performance of the X-123 compact X-ray and Gamma-ray spectroscopy system, 2006 Symposium on Room Temp. Detectors, October 29 - November 5, 2006, San Diego.
- [4] M.-M. Be et al, Table of radionuclides, Bureau international des poids et mesures, 2004.
- [5] International Atomic Energy Agency (IAEA). *Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice, Technical Reports Series No 457*; Vienna, Austria, 2007.
- [6] L. Abbene et. al., X-ray spectroscopy and dosimetry with a portable CdTe device, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 571, 373-377, 2007.
- [7] A Querol et al., Application of the Tikhonov Unfolding Method for Reconstruction of Primary X-Ray Spectra from X-Ray Equipments, Progress in nuclear science and technology, Vol. 2, pp.219-225 (2011).
- [8] Pravilnik o primeni izvora jonizujućih zračenja u medicini (Sl. glasnik RS 1/12).

6. Zahvalnost

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva za Nauku i Tehnološki razvoj Republike Srbije projektom III43009.

DETERMINATION OF BEAM QUALITY USING X-RAY SPECTROMETER IN DIAGNOSTIC RADIOLOGY

Milojko KOVACEVIC¹, Jelena STANKOVIC¹, Predrag BOZOVIC¹, Danijela ARANDJIC¹,
Olivera CIRAJ-BJELAC¹, Predrag MARINKOVIC², Zoran RAJOVIC^{1,3}

1) University of Belgrade – School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia

2) Vinča Institute of nuclear sciences, Belgrade, Serbia, jelena.stankovic@vinca.rs

3)Electrodistribution, Belgrade, Serbia

ABSTRACT

In order to optimize patient dose, it is useful to know the X-ray spectrum when performing quality control of diagnostic X-ray device. The purpose of this paper is to calculate basic parameters of X-ray spectra using X-123CdTe spectrometer. Calculated parameters, kVp, HVL, mean photon energy and homogeneity factor are in accordance with local reference values on diagnostic X-ray device quality control, as well as published data.

ОЦЕНА РАДНЕ СПОСОБНОСТИ ЛИЦА ПРОФЕСИОНАЛНО ИЗЛОЖЕНИХ ЈОНИЗУЈУЋИМ ЗРАЧЕЊИМА – ПРИКАЗ СЛУЧАЈА

В. ГЛИШИЋ¹, Д. СТОЖИНИЋ¹, Г. ПАПОВИЋ – ЂУКИЋ²

1) 3333Р Крагујевац

2) Дом здравља Врбас

САДРЖАЈ

Циљ рада је указати на значај оцене здравственог стања запослених у зони јонизујућих зрачења у складу са пратећом законском регулативом. Неопходни су контролни прегледи, циљани, оцена инвалидитета и промена радног места уколико дође до оштећења здравља и поред примењених мера превенције и поштовања основних принципа радиолошке заштите. Циљ заштите је спречавање штетних ефеката јонизујућих зрачења. С тим у вези континуирани здравствени мониторинг лица запослених у зони јонизујућих зрачења је област регулисана Законом о заштити од јонизујућих зрачења. Такође је неопходна и адекватна едукација, која је најбоља превенција како за ране, тако и за касне последице утицаја јонизујућих зрачења.

1. Увод

Оцена радне способности је поступак који служи да се на основу биолошких функција организма неке особа и биолошких захтева одређеног посла и карактеристика радног места утврди да ли је испитивана особа способна за тај посао или групу послова. (1)

Радна места запослених у зони јонизујућих зрачења се код нас и у већини земаља у свету сматрају радним местима са повећаним ризиком по здравље и као таква се помињу у више закона и подзаконских аката. Код нас су то: Закон о заштити од јонизујућих зрачења, Закон о безбедности и здрављу на раду и Закон о пензијском и инвалидском осигурању.

У професионалним условима ризик од експозиције јонизујућем зрачењу постоји у области нуклеарне медицине, у индустрији светлећих боја, у индустрији сатова, истраживачким лабораторијама где радници раде са отвореним изворима. Спољашњем зрачењу као ризику радници су изложени при раду са затвореним радиоактивним изворима и то у медицини и индустрији (рендген апарати, дефектоскопи).

Основу биолошких ефеката јонизујућих зрачења чини стварање врло реактивних слободних радикала насталих приликом излагања овим агенсима воде која чини 60% до 80% састава организма. На зрачење су најосетљивије нуклеинске киселине које су носиоци генетских информација.(2)

2. Циљ рада

Циљ рада је указати на значај оцене и праћења здравственог стања запослених у зони јонизујућих зрачења у складу са пратећом законском регулативом.

3. Материјал и метод рада

Коришћени су здравствени картони периодичних прегледа запослених у зони јонизујућих зрачења у здравственој установи, подаци личне дозиметрије, криве исијања, подаци дозиметрије извора зрачења као и подаци биодозиметријског теста. Очитавање термолуминисцентних дозиметара заснива се на ефектима јонизације и екситације који настају у дозиметру као последица озрачивања

Појава термолуминесценције састоји се у томе што се у току озрачивања један део ослобођених носилаца наелектрисања зароби у материјалу дозиметра. Криве исијања су јако важне у случајевима када се обрадом личног дозиметра радника добије вредност значајно већа од очекиване према радним условима.

Када сви напори да се открије разлог озрачивања не доведу до циља корисници личних дозиметара тврде да се ради о грешци у обради дозиметра.

Архивирани подаци добијени читавањем дозиметара стоје као доказни материјал.

4. Резултати рада и дискусија

Здравствени радник, виши рентген техничар, запослен на пословима рентген дијагностике, упућен на редовни периодични преглед 10.10.2012.године. У складу са законском регулативом извршен је преглед истог. До тог датума, подаци личне дозиметрије су били у границама референтних вредности.

Налаз интернисте: Hypertensio arterialis. HLP (5.12.2012).

Офталмолошки налаз: VOU 1,0. FOU PNO b.o. Makula b.o. Sočivo providno. Lako pojačani refleksi na arterijama.(6.12.2012.)

Спирограм: без инсуфицијенције плућне вентилације.

Крвна слика: WBC 7,37, RBC 5,24, HGB 139, HCT 46,2, Neut 47, Lymph 42, Mono 5,4, Eos 1,7, Baso 0,8, Luc 3,0, Rtc 1,19.

Биохемијске анализе: гликемија 6,8, ТГЛ 3,3, холестерол 6,0. Други биохемијски параметри у границама референтних вредности.

Закључак периодичног прегледа : Способан за рад у зони јонизујућег зрачења уз адекватан дијететски режим.

У међувремену је од Института за медицину рада Србије „Др Драгомир Карајовић“, Београд, достављен здравственој установи извештај о испитивању личног дозног еквивалента Hp (10-253) окт.01- 2012. С обзиром да је код запосленог добијена вредност знатно већа од очекиване, одговорно лице за спровођење мера заштите од јонизујућих зрачења у најкраћем року писменим путем доставило све релевантне информације којима би се могла објаснити доза знатно већа од очекиване. Одељење за дозиметрију је као овлашћени дозиметријски сервис било у обавези да овај случај пријави Агенцији за заштиту од јонизујућих зрачења и нуклеарну сигурност Србије.

Ефективна доза за текућу годину (2012) запосленог износила је 47,43 mSv, док је за остале запослене била знатно испод MDD за професионално изложена лица. (7)

Урађен је биодозиметријски тест, с обзиром да је апсорбована доза била знатно већа од очекиване (рађен 14.12.2012.).

Закључак цитогенетског испитивања: У испитиваном узорку није нађена повећана учесталост хромозомских аберација (утврђен један изохроматидни прекид).

Уколико је запослени примио дозу 47,43 mSv за текућу 2012. годину, треба очекивати промене на генетичком материјалу, али то није утврђено цитогенетским испитивањем.

Апсорбована доза од 20 mSv узрокује појаву бар једног дицентрика у испитиваном генетичком материјалу. Како ове промене нису нађене, а биле су очекиване, лице за безбедност и здравље на раду, од Лабораторије за личну дозиметрију и контролу извора зрачења, доставља захтев за криве исијања свих запослених у здравственој установи. Све криве исијања су правилног облика, те се с тим у вези не може говорити ни о каквој грешци у кристалној структури самих дозиметара.(5)

На основу тумачења криве исијања запосленог, чији је дозиметар показао знатно већу дозу од очекиване, утврђено је да је дошло до једнократног озрачивања дозиметра тридесетак дана пре читавања вредности истог. Дозиметри су очитани 21.11.2012.

Запослени је након добијања резултата личне дозиметрије уклоњен из зоне зрачења и премештен је да обавља административне послове у оквиру своје службе.

С обзиром да су резултати биодозиметријског теста, резултати лабораторијских показатеља и прегледи лекара консултаната показали да није дошло до оштећења здравља запосленог, именовани је оспособљен за рад у зони јонизујућег зрачења од 1.1.2013.године, а повећана апсорбована доза је резултат „намерног“ озрачивања дозиметра, што је доказано на основу крива исијања, што повлачи за собом даље испитивање у циљу утврђивања одговорности запосленог.

Имајући у виду све наведене чињенице, неопходна је редовна контрола свих запослених у зони зрачења ради предузимања одговарајућих и правовремених мера превенције, али и адекватна расподела радних задатака.(3,6)

Неопходни су контролни прегледи, циљани, оцена инвалидитета и промена радног места уколико дође до оштећења здравља и поред примењених мера превенције и поштовања основних принципа радиолошке заштите.(4)

5. Закључак

Професионална експозиција је посебно деликатна због хроничног излагања малим дозама јонизујућег зрачења, где је због кумулативног ефекта зрачења важно сагледати и биолошки одговор организма на дате услове експозиције.

Стога највећи значај за превенцију оштећења здравља и сходно томе адекватну оцену радне способности имају контролно-периодични прегледи свих запослених, који су изложени повећаном радијационом ризику услед рада са отвореним и затвореним изворима зрачења.

Циљ заштите је спречавање штетних ефекта јонизујућих зрачења. С тим у вези, здравствени мониторинг лица запослених у зони јонизујућих зрачења је област регулисана Законом о заштити од јонизујућих зрачења. Такође је неопходна и адекватна едукација, која је најбоља превенција како за ране, тако и за касне последице утицаја јонизујућих зрачења.

6. Референце

- [1] Павловић М. Општи принципи оцењивања радне способности. У: Павловић М, Видаковић А, ур. Оцењивање радне способности - Лазаревац: Елвод принт; 2003. п. 23-32..
- [2] Милачић С. Болести изазване јонизујућим зрачењима : У Медицина рада II, Видаковић А., ур.622-39, Удружење за медицину рада Југославије, Београд, 1997.
- [3] Р.Ковачевић и сарадници. Специфичности здравственог стања здравствених радника у зони јонизујућих зрачења. Зборник радова XXI југословенског друштва за заштиту од зрачења, 2001, Кладово, 299-302.
- [4] В. Спасојевић Тишма, Г. Јоксић, Д.Челекетић. Неопходност здравствене контроле здравствених радника у зони јонизујућих зрачења. Зборник радова XXIII југословенског друштва за заштиту од зрачења, 2005, Доњи Милановац, 277-279.
- [5] В. Глишић. Промене на генетичком материјалу као биомаркери ефеката јонизујућих зрачења.Рад уже специјализације, Медицински факултет, Београд, 2002.
- [6] В. Глишић и ост. Морбидитет запослених у зони јонизујућих зрачења. Зборник радова XXVI Симпозијума друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе, 2011, Тара, стр. 282 – 286.
- [7] Правилник о границама излагања јонизујућим зрачењима и мерењима ради процене нивоа излагања јонизујућим зрачењима РС број 86/2011).

EXPERTISE OF WORKING ABILITY OF PERSONS OCCUPATIONALLY EXPOSED TO IONIZING RADIATION – A CASE REPORT

V. GLIŠIĆ¹, D. STOŽINIĆ¹, G. PAPOVIĆ – ĐUKIĆ²

1) ZZZZR Kragujevac

2) Dom zdravlja Vrbas

ABSTRACT

The aim of this paper is to point out the significance of health monitoring of employees working in ionizing radiation zone according to legislation. It is necessary to carry out checkups, disability evaluation and change of working place if health damage occurs despite preventive measures and respecting the basic principals of radiological protection. Protection objective is to prevent harmful effects of ionizing radiation. In this respect continuous health monitoring of employees working in ionizing radiation zone is regulated by the Law on ionizing radiation protection. Proper education is also necessary, which is the best prevention both for early and for late effects of ionizing radiation.

RAZVOJ WEB APLIKACIJE ZA OSIGURANJE KVALITETA RENDGEN APARATA U MEDICINSKIM USTANOVAMA U SRBIJI

Vlade UROŠEVIĆ¹, Olga RISTIĆ¹ i Duško KOŠUTIĆ²

1) Fakultet Tehničkih Nauka Čačak Univerzitet u Kragujevcu, Čačak, Srbija

2) Institut za Nuklearne nauke VINČA, Beograd, Srbija

SADRŽAJ

U radu su dati osnovni principi i zahtevi koje treba ispuniti pri projektovanju od jednostavnog Web (eksperimenta), pa do daljinske kontrole i nadzora složenih tehničkih uređaja. Predloženi principi su nezavisni sa aspekta korišćenog hardvera, softvera i oblasti primene tj. vrste eksperimenta, odnosno uređaja. Sistem omogućava daljinski pristup eksperimentu ili tehničkom uređaju. Pored toga, sistem omogućava njegovo pokretanje, kontrolu u realnom vremenu i dobijanje rezultata u numeričkoj ili grafičkoj formi, korišćenjem Web browser-a. U ovom radu je opisana Web aplikacija koja je kreirana za prijemnu i periodičnu kontrolu i testiranje uređaja koji za svoj rad koriste rendgensko zračenje. Softver daje potpune informacije (uključujući evropske standarde) kojim odgovarajuće institucije i pojedinci mogu da procene i kontrolišu radijacionu bezbednost i sprovode QA dijagnostičkih rendgen-aparata. Program se sprovodi da bi se smanjila izloženost zračenju i optimizuje kvalitet slike u dijagnostičkoj radiologiji. Cilj programa je da se institucijama i pojedincima obezbedi da u proces QA mogu biti uključeni i odgovorni u svakom trenutku sa bilo koje lokacije. Testna verzija programa može se naći na adresi: <http://ionstat.eu01.aws.af.cm>.

1. Uvod

Razvoj informacionih tehnologija i računarskih sistema u velikoj meri je uticao na sve oblasti ljudskog delovanja. Pod uticajem ovih tehnologija javili su se novi modaliteti daljinskog pristupa i kontrole rada datog tehničkog sistema.

Razvoj web baziranih aplikacija sa daljinskim pristupom datom tehničkom sistemu omogućava korisnicima da pristupe opremi, izvode merenja i vrše upravljanje i nadzor u bilo koje vreme i sa bilo kog mesta.

Sa tehničke strane potrebno je razviti hardversko-softversku platformu, koja može da omogućiti upravljanje različitim opremom. Pored Univerziteta učešće u razvoju web sistema mogu uzeti i organizacije i partneri iz privrede, bilo da te web pristupe koriste kao dopunu i osavremenjavanje postojećih informacionih sistema ili za kontrolu sistema osiguranja i upravljanja kvalitetom.

Da bi izgradili i održali bezbednu okolinu u medicinskim i drugim ustanovama koje u okviru svoje delatnosti koriste uređaje sa x- zračenjem potrebno je da znamo nivo izlaganja zračenju za vreme njihovog rada. Poznavajući jačinu doze i vreme izlaganja pri svakom izlaganju ovoj vrsti zračenja možemo sprovesti mere radijacione zaštite i tako smanjiti uticaj na stanovništvo i životnu sredinu.

U ovom radu kreirana je Web aplikacija za kontrolu i testiranje uređaja koji za svoj rad koriste x- zračenje. Softver se koristi za ispitivanje različitih parametara ovog uređaja i pruža mogućnost grafičkog prikazivanja i obrade podataka za različite vrste merenja. Aplikacija, takodje, omogućava različitim grupama korisnika selektivan pristup shodno ovlašćenjima i potrebama tih grupa.

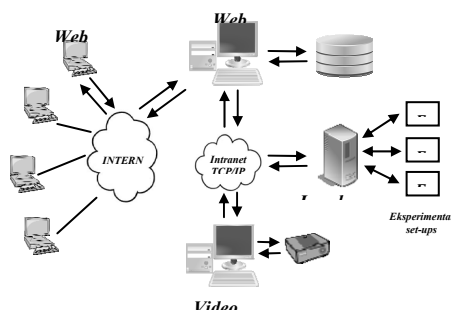
2. Projektovanje Web bazirane kontrole rada tehničkih sistema

Pri projektovanju web pristupa i kontrole rada tehničkih sistema, potrebno je ispuniti sledeće zahteve [1,2,3]:

- Potrebno je izabrati odgovarajuću serversku platformu i odgovarajuću politiku zaštite. Ovo je često ostvareno izborom *open source* okruženja, Apache, Tomcat... servera i formiranjem modula za kontrolu pristupa, koji ima zadatak da definiše i usmeri korisnike prema nivou autorizacije. Pri ovome se mogu formirati više grupa korisnika.
- Potrebno je da sistem funkcioniše sa klijent strane na svim raspoloživim platformama. Jedna od osnovnih stvari je da sistem bude platformski nezavistan sa klijent strane, što se omogućava time što je standardni browser najčešće klijent. Time se postiže bitan cilj da klijent, a prema prethodno navedenom i server, strana budu besplatni, a u isto vreme se omogućava da instalacija klijenta bude krajnje jednostavna, a sigurnost klijent platforme razumno kvalitetna.
- Sistem mora da ima modularnu i otvorenu arhitekturu tako da se nove komponente dodaju što jednostavnije. Sam sistem je potrebno projektovati na modularnom i otvorenom principu, tako da bude jednostavno da se doda novi eksperiment ili nov sadržaj. Web kontrola mora biti otvorena i visoko modularan sistem, koji ima mogućnost da se dalje i širi i razvija zajedno sa napretkom softverskih i drugih tehnologija.

Da bi se odgovorilo napred navedenim zahtevima potrebno je projektovati odgovarajuću softversku arhitekturu.

Softverska arhitektura se suštinski sastoji iz dva dela: prvi deo koji kontroliše fizičke procese (na strani servera - Control Server) i drugi deo koji generiše korisnički interfejs i definiše pristup korisnika i koji je orijentisan ka servisu korisnika (Web server) (slika 1). Na lokalnom *Control Server*-u potrebno je implementirati softverski modul upravljački interfejs, koji ostvaruje algoritam upravljanja i komunicira sa web serverom. Sistem za akviziciju podataka i D/A konvertor su povezani za ovaj server. Klijent strana je bazirana na nekoj od tehnologija za kreiranje dinamičkih web strana.



Slika 1. Softverska arhitektura.

Savremena računarska tehnologija omogućava rad Web kontrole korišćenjem standardnog hardvera i softvera opšte namene, programabilnih uređaja i mrežnih tehnologija koje se koriste za Internet. Uopšteno rečeno arhitektura sistema za izvođenje Web kontrole sastoji se iz tri osnovna sloja koji su prikazani na UML dijagramu klasa [4].

Sistem za izvođenje Web kontrole je dizajniran, razvijen i implementiran sa osnovnim ciljem da omogući daljinski pristup i kontrolu na datom tehničkom sistemu. Svaka od klasa odgovara jednom sloju sistema za izvođenje Web kontrole.

3. Daljinska kontrola i nadzor rendgen-aparata

Medicinska izlaganja jonizujućim zračenjima su izlaganja pacijenata u dijagnostičke ili terapijske svrhe i osoba koje pomažu pacijentima tokom dijagnostičkog ili terapijskog postupka. Medicinska izlaganja sprovode se u skladu sa ALARA (*As Low As Reasonable Achievable*) principom odnosno uz najmanju moguću dozu za pacijenta dok kvalitet dijagnostike ostaje zadovoljavajući. Da bi se osiguralo da je izlaganje u skladu sa ovim principom potrebno je sprovesti proceduru osiguranja kvaliteta, uključujući kontrolu kvaliteta dijagnostičkih generatora koji proizvode jonizujuća zračenja i ostalih uređaja sa kojima se vrši data dijagnostika. Od medicinskih uređaja koji proizvode x-zračenje, 85% su rendgen-aparati.

Osiguranje kvaliteta rendgen-aparata i drugih izvora jonizujućih zračenja koji se koriste u dijagnostičke i terapijske svrhe podrazumevaju prijemna i periodična ispitivanja.

4. Prijemna i periodična ispitivanja izvora jonizujućih zračenja u medicinskoj praksi

Prijemna i periodična ispitivanja rendgen-aparata, akceleratora i drugih uređaja koji proizvode jonizujuća zračenja u medicini i stomatologiji obuhvataju sledeće:

- proveru podataka o rendgen-aparatu ili akceleratoru;
- vizuelni pregled prostorija u kojima je smešten rendgen-aparat ili akcelerator u smislu bezbednosti njihovog korišćenja;
- ispitivanja funkcionalne ispravnosti sigurnosnih uređaja rendgen-aparata ili akceleratora naročito za uključivanje i isključivanje rada, signalnih uređaja i uređaja za daljinsko upravljanje, mogućnost korišćenja u skladu sa specifikacijama proizvođača i
- ispitivanja određenih parametara rendgen-aparata ili akceleratora u cilju provere da li je obezbeđen zadovoljavajući kvalitet dijagnostičke informacije ili terapijskog efekta uz minimalno izlaganje pacijenta.

5. Ispitivanje parametara rendgen-aparata

Merenje parametara dijagnostičkih generatora koji proizvode jonizujuća zračenja vrši se uz pomoć složenih detektorskih sistema čiji je rad podržan sa HC ili PC (Handled Computer ili Personal Computer). Jedan od kvalitetnijih i u svetu korišćenih sistema je multimetar Barracuda (RTI Electronics AB, Švedska korporacija) [5].

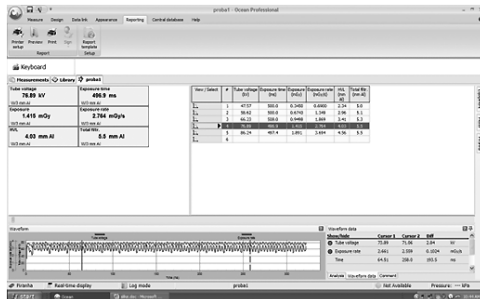
Ovim sistemom mogu se meriti svi značajni parametri rendgen aparata kao što su: napon rendgenske cevi, vreme ekspozicije, doza i jačina doze, debljina poluslabljenja i ukupna filtracija snopa. Uređaj se može koristiti za ispitivanje parametara rendgen aparata za različite namene: rendgen-aparata za snimanje, rendgen-aparata za mamografiju, rendgen-aparata za prosvetljavanje, rendgen-aparata za kompjuterizovanu tomografiju i stomatoloških rendgen-aparata.

Pregled i opis sistema Barracuda

Osnovni delovi sistema Barakuda su višenamenski poluprovodnički detektor MPD (Multi Purpose detector), Ručni računar HC (Handled Computer) ili PC Kabinet (Cabinet) i centralni deo koji povezuje jedan ili više modula ovog sistema.

Da bi se izvršila merenja parametara dijagnostičkih generatora koji proizvode jonizujuća zračenja, najpre treba višenamenski detektor MPD (Multi Purpose detector) povezati sa centralnim delom i PC computerom. Zatim startovati Ocean software. Ocean je softverski alat za kontrolu kvaliteta dijagnostičkih generatora koji proizvode jonizujuća zračenja. U zavisnosti od tipa merenja potrebno je izabrati modalitete i parametere svojstvene datom sistemu. Izabrati odgovarajući template koji odgovara datom merenju i tipu detektora. Za svaki tip merenja može se odbrati željena kalibracija sistema. Nakon toga Ocean program je u *real time display modu* i spreman je za merenje koje ste odabrali. Ocean sistem je sada spreman da očitava izabrane parametre nakon ekspozicije. Na slici 2 su prikazani rezultati periodičnog ispitivanja rendgen-aparata koji se nalazi u Centru za radiologiju i magnetnu rezonancu,

klinike za ginekologiju i akušerstvo Kliničkog Centra Srbije. Vršena su merenja napona rendgenske cevi, doze i jačine doze, vremena ekspozicije i debljine poluslabljenja. Dobijeni podaci su prikazani tabelarno i u talasnom obliku. Web aplikacija razvijena u ovom radu, omogućava da se izvrši transfer ovako dobijenih podataka u MySQL bazu podataka i tako budu raspoloživi za dalju obradu u Web okruženju.



Slika 2. Rezultati periodičnog ispitivanja rendgen-aparata koji se nalazi u Centru za radiologiju i magnetnu rezonancu, klinike za ginekologiju i akušerstvo Kliničkog Centra Srbije.

Pored toga, web aplikacija omogućava administraciju i selektivnu dostupnost podataka o periodičnim ispitivanjima izvora zračenja. Ova selektivnost zasnovana je pre svega na različitom nivou ovlašćenja i kompetentnosti za pristup ovim podacima. Web aplikacija je realizovana u open-source okruženju (Java/MySQL/TomCat) u cilju otvorenosti koda i mogućnosti jednostavne razmene podataka. Aplikacija omogućava:

- Administriranje podataka dobijenih merenjem: unos vrednosti sa uređaja za merenje uz mogućnost definisanja lokacije, objekta, prostorije i aparata koji se ispituje.
- Transfer podataka iz aplikativnog softvera Ocean izvozom u excel format i potom uvozom Excel podataka u web aplikaciju.

Na slici 3 je prikazana forma za pregled i izmenu podataka dobijenih merenjem parametara na određenoj lokaciji (site) i uređaju. Prilikom ispitivanja uređaja ovlašćeni ispitivač ima mogućnost slanja podataka dobijenih merenjem u aplikaciju, čime se obezbeđuje jedinstvena baza podataka sa rezultatima ispitivanja i statusu svih izvora zračenja u medicinskim ustanovama.

Aplikacija će u narednim verzijama biti unapređena kako bi omogućila generisanje izveštaja po šablonima koje ispitivač može definisati, u skladu sa obavezujućim zakonskim regulativama.

Site Name	Session Date	Var	Var	Var	Result
1	3/4/2012				
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

Slika 3. Forma za pregled i izmenu podataka dobijenih merenjem parametara rendgen aparata na jednoj od lokacija.

6. Zaključak

U radu su dati osnovni principi i zahtevi koje treba ispuniti pri projektovanju WEB aplikacija od izvođenja eksperimenta na daljinu pa do kontrole i nadzora složenih tehničkih sistema.

Razvoj, tako projektovanih, web aplikacija sa daljinskim pristupom omogućava korisnicima da pristupe opremi, izvode merenja i vrše upravljanje i nadzor u bilo koje vreme i sa bilo kog mesta na datom tehničkom sistemu.

U ovom radu kreirana je Web aplikacija koja može da se koristi za prenos i podataka dobijenih kod ispitivanja različitih parametara rendgen-aparata, bilo da su u pitanju prijemna ili periodična ispitivanja. Aplikacija, takođe omogućava različitim grupama korisnika selektivan pristup shodno ovlasćenjima i potrebama tih grupa.

7. Literatura

- [1] Bonivento, L. Gentili, L. Marconi, L. Rapapini, "A web based laboratory for control enginee education <http://www-lar.deis.unibo.it/woda/data/deis-lar-publications/b60c.document.pdf>
- [2] M. Casini, D. Prattichizzo, A. Vicino.: "The Automatic Control Telelab", IEEE Control Systems Magazine, 0272-1708/04 .2004 IEEE
- [3] Y. Guran-Postlethwaite, N. D. Pocock, D. Dutton: "web-Based Real Electronics Laboratories", Proceeding of the 2005 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition 2005, American Society for Engineering Education 2005
- [4] M. O'Docherty "Object-Oriented Analysis & Design, Understanding System Development with UML2.0". ISBN -13978-0-470-09240-8 John Wiley & Sons Ltd The atrium Southern Gat, chichester 2005.
- [5] <http://www.rti.se/products/barracuda/> 2013

WEB APPLICATION FOR QUALITY ASSURANCE (QA) PROGRAM IN X-RAY UNITS IN SERBIAN MEDICAL INSTITUTIONS

Vlade UROŠEVIĆ¹, Olga RISTIĆ² i Duško KOŠUTIĆ¹

1) Faculty of Technical Science University of Kragujevac, Cacak, Serbia

2) VINCA Institut of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia

ABSTRACT

The basic principles and requirements which have to be fulfilled, when projection, from a simple Web experiment, to remote control and supervision of complex technical systems, are given. The proposed principles are flexible and independent of the hardware and software used and the area of application, that is, meaning a kind of experiment or device. The system allows access to experiments or technical systems using a Web browser, experimental parameters setup, start of the experiment in real-time, and reviewing of the obtained results in numerical and graphical form. A Web application created for the acceptance and periodical control and testing of X-ray devices is described in this paper. The software gives complete information (using European standards) with which the corresponding institution and individuals can evaluate and control a facility's Radiation Safety and Quality Assurance (QA) program.

This program has been implemented to reduce radiation exposure and to optimize diagnostic x-ray image quality. Our goal is to help institutions and individuals to be constantly involved in and responsible for QA in their operations from a remote distance (online). A test (pilot) version of the application can be found at <http://ionstat.eu01.aws.af.cm>.

DOZA OD PROFESIONALNIH IZLAGANJA U NUKLEARNOJ MEDICINI SA PET/CT PRAKSOM U SRBIJI

Vojislav ANTIĆ¹, Olivera CIRAJ-BJELAC², Danijela ARANDIĆ², Jelena STANKOVIĆ², Nataša TODOROVIĆ³, Silvija LUČIĆ⁴

1) Klinički centar Srbije, Beograd

2) Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd

3) Departman za fiziku, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad

4) Institut za onkologiju Vojvodine, Sremska Kamenica

e-mail: ociraj@vinca.rs

SADRŽAJ

U radu su prikazani rezultati procene doze za profesionalno izložena lica u nuklearnoj medicini u dva centra sa PET/CT praksom u Srbiji. Individualni monitoring je ostvaren pomoću termoluminescentnih dozimetara za celo telo koji mere veličinu Hp(10) i dozimetra za ekstremitete (kožu) putem veličine Hp(0.07) a rezultati s odnose na sedmomesečni period. Srednja vrednost doze za celo telo po jednoj proceduri bila je 5.5 μ Sv i 21 μ Sv, u dva centra respektivno, dok je doza za ekstremitete u jednom centru bila 159 μ Sv/procedura dok u drugom centru monitoring ekstremiteta nije bio na raspolaganju. Srednja procenjena doza na godišnjem nivou iznosila je 2.4 mSv i 3.4 mSv, dok je odgovarajuća doza za ekstremitete 26 mSv. Iako su procenjene doze u skladu sa propisanom granicom, velike varijacije između centara ukazuju na potrebu za detaljnim preispitivanjem prakse i radnih procedura.

1. Uvod

Metode hibridnog snimanja, PET/CT podrazumevaju aplikaciju radiofarmacetika u ljudski organizam. Najčešće korišćen radiofarmaceutik u PET/CT dijagnostici jeste fluorodeoksiglukoza obeležena radionuklidom ¹⁸F (FDG) [1-3]. Radionuklid ¹⁸F je pozitronski emiter (630 keV), koji proizvodi i anihilacione fotone energije 511 keV, što ima za posledicu značajno izlaganje profesionalno izloženih lica. Doza za profesionalno izložena lica zavisi od aplikovane aktivnosti radiofarmaceutika i vremena izlaganja [4-6]. Izmerena jačina doze za celo telo u različitim fazama manipulacije radiofarmaceutikom iznosi 500-800 μ Sv/h [7,8], dok referisane doze za profesionalno izložena lica, uključujući sve faze PET/CT procesa iznose od 9 do 21.6 μ Sv po jednoj proceduri [9].

Cilj ovog rada je procena i analiza doze za profesionalno izložena lica u PET/CT dijagnostici u smislu doze za celo telo i doze za ekstremitete kao i procena doze za celo telo i ekstremitete po jedinici aplikovane aktivnosti radionuklida.

2. Metode

PET/CT dijagnostika se trenutno sprovodi u dva centra u Srbiji i to koristeći isključivo ¹⁸F-FDG kao radiofarmaceutik. Radno opterećenje na godišnjem nivou u oba centra iznosi oko 2000 procedura. U jednom od centara se koristi automatski sistem za separaciju i aplikaciju radiofarmaceutika, dok se u drugom centru ovaj proces obavlja poluautomatski.

Tokom sedmomesečnog perioda koji obuhvata ova studija u centru A obavljeno je ukupno 516 procedura, dok je broj procedura u centru B iznosi 564. Tipična aktivnost aplikovanog radiofarmaceutika u centru A iznosila je 185 MBq za pregled glave i 185-444 MBq za pregled trupa. Odgovarajuće vrednosti u centru B bile su 111 MBq i 167-370 MBq, respektivno.

U centru A preglede obavljaju timovi koji se sastoje od 2 lekara, jednog radiološkog tehničara i radiohemičara. Lekar je ovde uključen u sve faze koje uključuju prijem radiofarmaceutika i njegovu separaciju i primenu. Tokom primene radiofarmaceutika prisutni su i ostali članovi tima koji dele

odgovornost u fazama procesa. U ovom centru radno opterećenje jednog tima iznosi 10 pacijenata nedeljno. U centru B isključivo šest radioloških tehničara obavlja aktivnosti vezane za radiofarmaceutika a radno opterećenje iznosi oko 12 procedura na dnevnom nivou. Lekari u ovom slučaju ne obavljaju aktivnosti sa radiofarmaceutikom.

Tabela 1. Doze za celo telo i ekstremitete (kožu) u smislu $H_p(10)$ i $H_p(0.07)$ na mesečnom nivou tokom sedmomesečnog perioda u centru A i B

Centar	A	B	
	$H_p(10)$ [mSv]	$H_p(10)$ [mSv]	$H_p(0.07)$ [mSv]
Mesec	Sednja vrednost \pm sd (min – max)		
I	0.24 \pm 0.07 (0.18-0.35)	0.18 \pm 0.02 (0.14-0.20)	2.5 \pm 4.6 (0.13 – 12)
II	0.24 \pm 0.05 (0.18-0.35)	0.76 \pm 1.20 (0.15-3.44)	8.9 \pm 9.7 (0.94 – 27)
III	0.21 \pm 0.06 (0.17-0.29)	0.18 \pm 0.03 (0.13-0.22)	1.3 \pm 2.0 (0.12 – 5.3)
IV	0.21 \pm 0.04 (0.16-0.31)	0.16 \pm 0.02 (0.12-0.21)	0.36 \pm 0.21 (0.13 – 0.63)
V	0.20 \pm 0.10 (0.17-0.27)	0.17 \pm 0.02 (0.14-0.20)	0.53 \pm 0.43 (0.19 – 1.3)
VI	0.22 \pm 0.04 (0.16-0.39)	0.15 \pm 0.01 (0.13-0.17)	0.78 \pm 0.86 (0.17 – 2.4)
VII	0.18 \pm 0.02 (0.15-0.24)	0.17 \pm 0.01 (0.15-0.18)	0.53 \pm 0.47 (0.19 – 1.38)

U oba centra, monitoring doza za profesionalno izložena lica realizovan je pomoću termoluminescentnih dozimetara (TLD). U centru A obezbeden je isključivo monitoring doza za celo telo, dok je u centru B monitoring obezbeden i za celo telo i za ekstremitete. Dozimetri -100H (LiF: Mg, Cu, P) bili su u upotrebi u centru A, dok su u centru B korišćeni dozimetri tipa TLD-100 (LiF: Mg, Ti) za celo telo i DXT-100 (LiF: Mg, Ti) za ekstremitete. Dozimetri su etalonirani u dozimetrijskim veličinama $H_p(10)$ i $H_p(0.07)$ u Sekundarnoj standardnoj dozimetrijskoj laboratoriji Instituta za nuklearne nauke Vinča, čime je obezbedena sledljivost do primarnog etalona.

3. Rezultati

Rezultati merenja doza prikazani su u Tabeli 1. Srednja vrednost doze za celo telo po jednoj procedure bila je 5.5 μ Sv i 21 μ Sv, u dva centra respektivno, dok je doza za prste u jednom centru bila 159 μ Sv/procedura. Srednja procenjena doza na godišnjem nivou iznosi 2.4 mSv i 3.4 mSv, dok je odgovarajuća doza za ekstremitete 26 mSv.

Tokom posmatranog sedmomesečnog perioda, ukupna aplikovana aktivnost radiofarmaceutika bila je 95 GBq i 35 GBq u centru A i B, respektivno. Srednje vrednosti $H_p(10)$ i $H_p(0.07)$ i normirane vrednosti doze po jedinici aplikovane aktivnosti za period od sedam meseci u dva PET-CT centra prikazane su Tabeli 2.

Tabela 2. Srednje vrednosti $H_p(10)$ i $H_p(0.07)$ i normirane vrednosti doze po jedinici aplikovane aktivnosti za period od sedam meseci u dva PET-CT centra

Centar	A	B
$H_p(10)$ [mSv]	1.4±0.36 (1.2-2.1)	2.0±1.3 (1.3-4.7)
$H_p(0.07)$ [mSv]	/	15 ± 13 (4.1 – 40)
Ukupna aplikovan aktivnost po jednom operateru [GBq]	95	35
$H_p(10)/A$ [μ Sv/GBq]	15	57
$H_p(0.07)/A$ [μ Sv/GBq]	/	429

4. Zaključak

PET/CT zahteva posebnu pažnju u pogledu zaštite od zračenja. Nivoi doza za celo telo i ekstremitete u dva PET/Ct centra u Srbiji prikazani su u ovom radu. Iako individualne doze nisu veće od usvojenih granica, svako povećanje radnog opterećenja uslovalo bi i porast doze. Rezultati ukazuju na neophodnost kontrole i smanjenja doze u oba centra, posebno u centru B, dok velike varijacije između centara ukazuju na potrebu za detaljnim preispitivanjem prakse i radnih procedura

5. Literatura

- [1] Rohren, E. M., Turkington, T. G., Coleman, E. Clinical applications of PET in oncology. *Radiology* 231, 305–332 (2004).
- [2] Kumar, S. Pandey, A.K., Sharma, P., Shamim, S.A., Malhotra, A., Kumar, R. Instantaneous exposure to nuclear medicine staff involved in PET-CT imaging in developing countries: experience from a tertiary care centre in India. *Jpn. J. Radiol.* 30, 291-295 (2012).
- [3] Dalianis, K. Malamitsi, J., Gogou, L., Pagou, M., Efthimiadou, R., Andreou, J., Louizi, A., Georgiou, E. Dosimetric evaluation of the staff working in a PET/CT department. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.* 569, 548–550 (2006).
- [4] Demir, M., Demir, B., Yaşar, D., Sayman, H., Halac, M., Ahmed, A., Özcan, K., Uslu, I. Radiation doses to technologies working with 18F-FDG in a PET caenter with high patient capacity. *Nukleonika* 55, 107-112 (2010).
- [5] Quinn, B., Holahan, B., Aime, J., Humm, J., St Germain, J, Dauer, LT. Measured dose rate constant from oncology patients administered 18F for positron emission tomography. *Med Phys* 39, 6071-9 (2012)
- [6] AAPM Task Group 108. PET and PET/CT shielding requirements. *Med. Phys.* 2006;33(1):4-15.
- [7] Pant, G.S., Senthamizhchelvan, S. Radiation Exposure to Staff in a PET/CT Facility. *Indian Journal of Nuclear Medicine*, 21, 100-103 (2006).
- [8] Vargas Castrilloon, S., Cutanda Henriquez, F. A study on occupational exposure in a PET/CT facility, *Radiat. Prot. Dosim.* 147 247–249 (2007).
- [9] Peet, D.J., Morton, R., Hussein, M., Alsafi, K., Spyrou, N. Radiation protection in fixed PET/CT facilities-design and operation. *Br. J. Radiol.* 85, 643-646 (2012).

RADIATION EXPOSURE TO NUCLEAR MEDICINE STAFF INVOLVED IN PET/CT PRACTICE IN SERBIA

Vojislav ANTIĆ¹, Olivera CIRAJ-BJELAC², Danijela ARANĐIĆ², Jelena STANKOVIĆ², Nataša TODOROVIĆ³, Silvija LUČIĆ⁴

- 1) University Clinical Centre of Serbia, Belgrade, Serbia
- 2) Vinca Institute of Nuclear Science, University of Belgrade, Belgrade, Serbia
- 3) Faculty of Science, Department for Physics, Novi Sad, Serbia
- 4) Oncology Institute of Vojvodina, Sremska Kamenica, Novi Sad, Serbia
e-mail: ociraj@vinca.rs

ABSTRACT

The purpose of this work is to assess the radiation exposure to nuclear medicine staff in two positron emission tomography-computed tomography (PET/CT) centres in Serbia. Individual monitoring was performed using thermoluminescent dosimeterdosemeters for whole body and extremity dose assessment. Dose levels in terms of Hp(10) for whole body and Hp(0.07) for hands of nuclear medicine staff were analyzed during seven-month period. The average dose per procedure in terms of Hp(10) was 5.5 μ Sv and 21 μ Sv, in two centres respectively, whereas the extremity dose in terms of Hp(0.07) in the later centre was in one of the centres 159 μ Sv/procedure. Mean estimated annual whole body doses in two centres were 2.4 mSv and 3.4 mSv, while corresponding extremity dose in the later one was 26 mSv. Although the individual doses are within the recommended regulatory limits, large variations between two centres indicate that practice should be optimised.

DOZIMETRIJA

ПРОЦЕНА ЈАЧИНЕ ДОЗНОГ ЕКВИВАЛЕНТА НЕУТРОНА CR-39 ДЕТЕКТОРОМ

Биљана МИЛЕНКОВИЋ¹, **Ненад СТЕВАНОВИЋ¹**, **Драгослав НИКЕЗИЋ¹** и **Душко КОШУТИЋ²**

1) *Универзитет у Крагујевцу, Природно математички факултет, Крагујевац, Србија, bmlenkovic@kg.ac.rs*

2) *Институт за нуклеарне науке Винча, Београд, Србија*

САДРЖАЈ

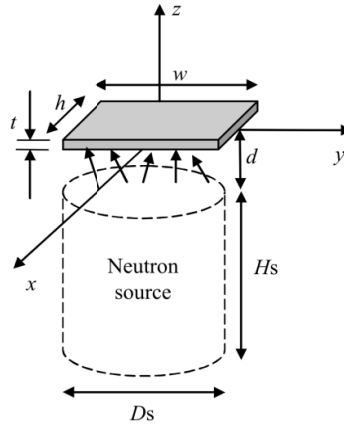
У овом раду је коришћен претходно развијен компјутерски програм *Neutron_CR-39.F90* за прорачун јачине дозног еквивалента неутрона као и густине трагова при озрачивању CR-39 детектора неутронима из Am-Be извора. У циљу поређења резултата упоредо са симулацијом извођен је експеримент озрачивања и нагривања детектора за исте услове. Јачина дозног еквивалента неутрона мерена активном методом користећи неутронски монитор добро се слаже са рачунатим вредностима. Добро слагање резултата је добијено и за израчунату и измерену густину трагова.

1. Увод

CR-39 је веома распрострањен лични дозиметар за термалне и брзе неутроне. При интеракцији брзих неутрона са атомима CR-39 детектора ($C_{12}H_{18}O_7$) производе се узмакнута језгра (водоник, кисеоник и угљеник) услед расејања као и секундарне наелектрисане честице (α честице, протони) у нуклеарним реакцијама. Секундарне наелектрисане честице и узмакнута језгра остављају оштећења при проласку кроз детекторски материјал, која се називају “латентни трагови”. Траг се може визуелизирати под оптичким микроскопом, ако се делује агресивним хемијским агенсом, као што је на пример водени раствор NaOH или KOH. Латентна ефикасност се дефинише као однос броја латентних трагова и броја упалих неутрона, а ефикасност нагривања (или ефикасност детекције) као однос броја видљивих трагова и броја упалих неутрона. Густина трагова представља број видљивих трагова (после нагривања) по јединичној детекторској површини окренутој неутронском извору. Бројањем видљивих трагова, тј. одређивањем густине, процењује се неутронска доза знајући калибрациони коефицијент.

2. Теоријски модел

У овом раду је коришћен претходно развијен компјутерски програм *Neutron_CR-39.F90* [1] за прорачун јачине дозног еквивалента неутрона као и густине трагова при озрачивању CR-39 детектора неутронима из Am-Be извора. Симулација интеракције неутрона са CR-39 детектором врши се за Am-Be неутронски извор цилиндричног облика, чији је положај приказан на слици 1. Центар предње стране детектора је у координатном почетку у $z = 0$ равни. Димензије детектора су: $h \times w \times t$ (2 cm x 1 cm x 0.1 cm). Димензије извора су: дијаметар, $D_s = 2.25$ cm; висина $H_s = 3.1$ cm. Растојање између детектора и извора је d . Симулирани неутронски извор има активност $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq и константан неутронски флукс од $2.2 \cdot 10^6$ n/s у 4т.



Слика 1. Геометрија детектора и извора.

У програму се разматрају трагови протона као доминантних секундарних честица у односу на трагове алфа честица створених при интеракцији неутрона са детектором. Излазни резултати програма су латентна ефикасност, ефикасност нагризања, депонована енергија као и јачина дозног еквивалента неутрона.

3. Експеримент

Упоредо са симулацијом извођен је експеримент озрачивања и нагризања детектора за исте услове. За озрачивање је коришћен CR-39 детектор, произвођача TASTRAK[®], TASL Track Analysis Systems Ltd., Bristol UK. Озрачивање детектора Am-Be извором спроведено је у Лабораторији за заштиту од зрачења у Институту за нуклеарне науке у Винчи. Хемијско третирање и читавање детектора, спроведено је према стандардним процедурама у Лабораторији за Радијациону физику ПМФ-а у Крагујевцу. Озрачени детектори су хемијски нагризани у 6.25 N раствору NaOH на температури 70 °C у трајању од 5 h и 10 h.

Јачина дозног еквивалента неутрона из извора мерена је неутронским монитормом DINEUTRON, произвођач Canberra Industries, USA (http://www.canberra.com/products/hp_radioprotection/pdf/Dineutron-SS-C38294.pdf).

4. Резултати и дискусија

Дозни еквивалент по јединичном неутронском флуенсу може изразити као

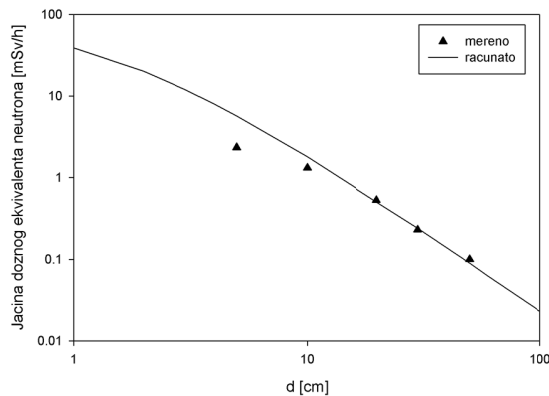
$$h_{\varphi} = \frac{H}{\left(\frac{N}{S}\right)} \quad (1)$$

где је са H означен укупни дозни еквивалент, добијен као сума дозних еквивалената свих емитованих неутрона, N је број емитованих неутрона, а S површина детектора. При прорачуну дозних еквивалената неутрона коришћене су вредности радијационих тежинских фактора дате у ICRP 60.

Симулацијом је добијена вредност $h_{\varphi} = 3.7 \times 10^{-14} \text{ Sv} \cdot \text{m}^2$, што представља добро слагање са вредностима датим у литератури [2,3]. Конверзиони коефицијент h_{φ} омогућава рачунање јачине дозног еквивалента (mSv/h) на основу једначине

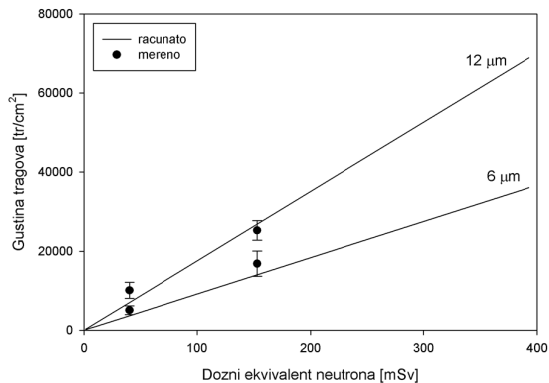
$$\dot{H} = \frac{h_{\varphi} \varphi}{t} \quad (2)$$

где је φ неутронски флуенс (m^{-2}), а t је време излагања (h) [2]. Користећи Монте Карло метод, неутронски флуенс је одређен као функција растојања извор-детектор, а јачина дозног еквивалента је рачуната на основу једначине (2). Резултати су представљени на слици 2 заједно са резултатима добијеним мерењем неутронским монитором DINEUTRON. Са слике се види добро слагање измерених и рачунатих вредности осим на малим растојањима где се јавља одступање услед непоузданости инструмента, што је и наглашено у спецификацији монитора. Са слике се види да повећањем растојања долази до смањења јачине дозног еквивалента услед смањења флукса неутрона.



Слика 2. Јачина дозног еквивалента неутрона у функцији растојања детектор-извор. Мерење обављено неутронским монитором DINEUTRON

Дозни еквивалент неутрона и густина трагова су рачунати за различита растојања детектора од извора тј. различите неутронске флуксе, слика 3.



Слика 3. Мерење и рачунате густине трагова у функцији дозног еквивалента неутрона за различите скинуте слојеве.

CR-39 детектор је озрачиван 17 h на растојањима $d = 5$ и $d = 10$ cm. Након нагризања детектора у трајању од 5 и 10 h мерене густине трагова су представљене на слици 3. Са слике се види добро слагање између мерених и рачунатих густина трагова. Повећањем скинутог слоја детектора расте број видљивих трагова тј. густина трагова.

Као резултат фитовања података са слике 3 добијена је следећа једначина

$$T_D = k \cdot H \quad (3)$$

где је T_D густина трагова [tracks/cm²], k је калибрациони коефицијент који има вредност $k = 15 \cdot h$ [tracks/(cm²·mSv)], а H је дозни еквивалент неутрона [mSv]. Калибрациони коефицијент, k , мења се са временом нагризања детектора тј. са скинутим слојем h . Једначина (3) важи у области $6 \mu\text{m} < h < 24 \mu\text{m}$. Калибрациони коефицијент одређује везу између густине трагова са једне стране и дозног еквивалента неутрона са друге стране.

5. Закључак

Израчуната вредност за конверзиони коефицијент флуенса у дозни еквивалент добро се слаже са вредностима датим у литератури [2,3]. Густина трагова је линеарно зависна од дозног еквивалента неутрона за различите скинуте слојеве, чиме је одређен калибрациони коефицијент. Добро слагање експериментаних и симулационих резултата сугерише потенцијал CR-39 детектора за дозиметрију брзих неутрона.

6. Литература

- [1] B. Milenkovic, N. Stevanovic, D. Nikezic and M. Ivanovic. Computer program Neutron_CR-39 for simulation of neutrons from an Am–Be source and calculation of proton track profiles. *Comput. Phys. Commun.* 182 (2011) 1536-1542.
- [2] G. Burger and R.B., Schwaster. TRS, 285, IAEA, Vienna, 1988.
- [3] International standard ISO/DIS 8529, Reference Neutron Radiations – Part 1: *Characteristics and Methods of Production*, 2000

7. ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад је подржан од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја, кроз пројекат N₀ 171021

ESTIMATION OF THE NEUTRON DOSE EQUIVALENT RATE FROM AM-BE SOURCE WITH CR-39 DETECTOR

Biljana MILENKOVIĆ¹, Nenad STEVANOVIĆ¹, Dragoslav NIKEZIĆ¹ and Duško KOŠUTIĆ²

1) University of Kragujevac, Faculty of Science, Kragujevac, Serbia, bmilenkovic@kg.ac.rs

2) Vinca Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia

ABSTRACT

Comparison of experimental and calculated response of CR-39 detector to neutron spectra of Am–Be source is presented in this paper. Previously developed code named Neutron_CR-39.F90 has been used to calculate the neutron dose equivalent rate for CR-39 detector as well as track density. Neutron equivalent dose rate was measured by active device, and compared with calculated one. Good agreement was found between calculated and measured track density.

STUDY OF THE TIME-TEMPERATURE PROFILES OF LiF: Cu, P PELLETS

**Biljana PETROVIC¹, Jovica PRASKALO¹, Jelena MARINKOVIC¹, Panayiotis ASKOUNIS²,
Eleftheria CARINOU²**

1) Public Health Institute of Republic of Srpska, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina,
biljana.kocic@phi.rs.ba

2) Greek Atomic Energy Commission, Athens, Greece, ecarinm@eeae.gr

ABSTRACT

This paper presents a comparison between time-temperature profiles (TTP) of TL dosemeters from different companies (GR-200A/China, MCP-N/ TL Poland, TLD-100H/Thermo) used by the Personal Dosimetry Department of the Greek Atomic Energy Commission (GAEC) for the purposes of extremity dosimetry, more specifically ring dosemeter, as well as compliance with the International Standard, Nuclear Energy – Radiation Protection – individual thermoluminescence dosemeters for extremities and eyes (ISO 12794).

1. Introduction

Monitoring of radiation doses received by staff that uses ionizing radiation is of great importance to the occupationally exposed personnel in their effort to protect themselves, patients and general public. It is crucial for those involved in the use of radiation to have an estimation of the possible risks involved.

In order to estimate doses for occupationally exposed personnel passive personal dosemeters are recommended. It is possible to use single whole body dosemeter for uniform fields, more than one dosemeter in case of significantly non-uniform fields and extremity dosemeters in cases of non-uniform fields where extremity doses are likely to be a significant percentage of the annual limit. Operational quantity for equivalent dose of extremity and skin is $H_p(0.07)$ and the unit is Sievert (Sv) [1].

2. Materials and Methods

In GAEC the MCP-N material is used for ring dosemeters for photon beams and in conjunction with MCP-Ns they are used for ring dosemeters in mixed beta-gamma fields. Both of these materials are from the same company and same size (4.5-mm diameter and 0.9-mm thickness) [2].

All readout processes have been performed with an automatic Rados reader using nitrogen gas for heating. In routine monitoring TTP (time-temperature profile) that is used is: pre-heat 170°C for 50s, and readout process of 250°C for 28s. In order to decrease time of routine monitoring, materials of three different companies have been tested. A set of 10 TLDs have been used for each group. All TLDs have followed the cycle of annealing, irradiation and measurement. In addition, a group of TLDs were used for reader stability. Their signal was used to correct the stability of the reader.

After annealing process, all pellets were irradiated at 5 pulls in a TLD irradiator with $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ source and measured with the routine monitoring TTP. While observing the peaks after the pre-heat phase and the glow curves of the readout process it has been noticed that the TTP for GR-200A could be reduced without affecting the dose which is shown in the Figures 1-6.

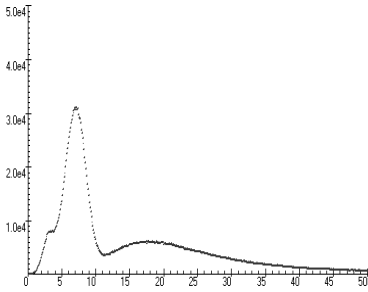


Figure 1. Pre-heat signal of MCP-N material

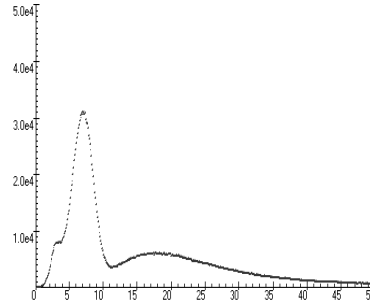


Figure 2. Pre-heat signal of TLD-100H material

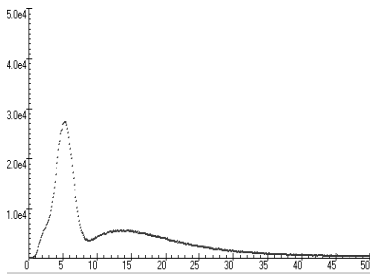


Figure 3. Pre-heat signal of GR-200A material

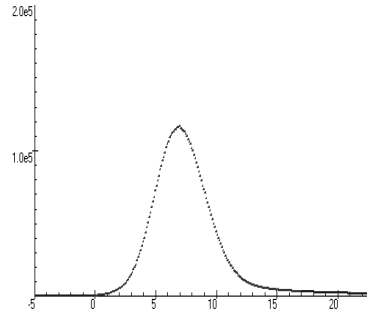


Figure 4. Readout signal of MCP-N material

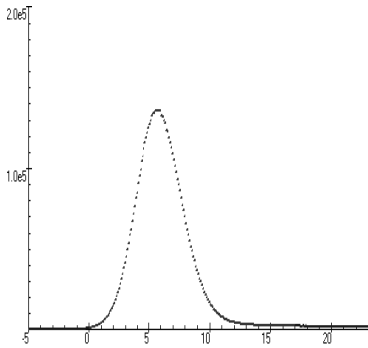


Figure 5. Readout signal of TLD-100H

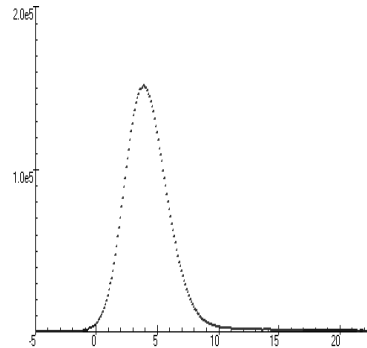


Figure 6. Readout signal of GR-200A

By comparing the TL signals measured at various time intervals it was concluded that for GR-200A material the time could be reduced from 50s to 30s, and from 28s to 20s for the pre-heat phase and the readout phase, respectively keeping the temperature of pre-heat phase and readout process the same. The signal of the new selected TTP is shown in Figures 7 and 8.

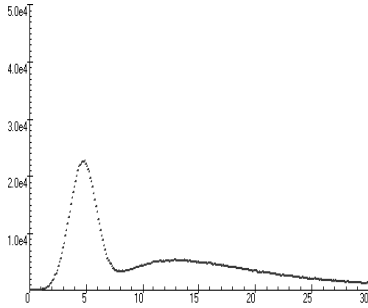


Figure 7. Pre-heat signal of GR-200A with reduced anneal time for 20s

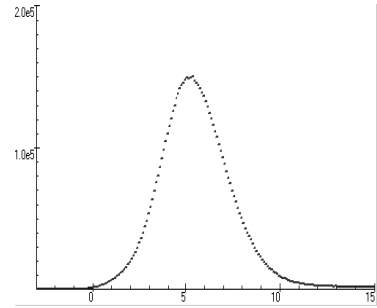


Figure 8. Readout signal of GR-200A with reduced readout time for 8s

3. Results and discussion

3.1. Performance requirements for extremity dosimeters

In order to put a new material in use it is strongly recommended to ensure that material meet certain criteria given by the adequate ISO standard [3]. Tests performed and results are shown in Table 1.

Table 1. Tests of performance requirements

Test performed	ISO Recommendation	Results	
Batch Homogeneity	$V < 15\%$	1.26%	
Reproducibility test	≤ 10	1.50 to 3.23	
Linearity test	$0.90 \leq V \leq 1.10$	V_{upp} 0.91 to 1.05	V_{low} 0.91 to 1.02
Detection Threshold	< 10	< 1.01	
Effect on detection threshold	≤ 10	1.00 to 2.06	
Effect on response test	$0.90 \leq V \leq 1.10$	V_{upp} 1.09	V_{low} 1.07
Isotropy (photons) measurements	$0.85 \leq V \leq 1.15$	V_{up} 1.07	V_{low} 0.91
Energy response (photons)	$0.50 \leq V \leq 1.50$	V_{upp} 0.86 to 1.31	V_{low} 0.75 to 1.12

3.2. Fading characteristics

Since fading behavior depends also from the type of TL material, post-irradiation fading effects have been observed, varying the time interval between irradiation and measurement for the time intervals of 1, 2, 7, 10, 21 and 39 days. In order to compare measured signal from different time intervals, the signals were normalized to the signal of the first day. Figure 9 presents the fading in the signal with respect to the time intervals.

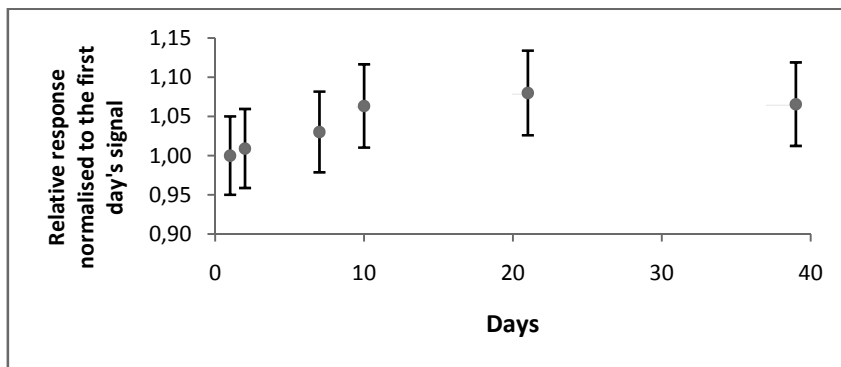


Figure 9. Post-fading phase for the GR-200A

3.3. Discussion of results and conclusion

All tests given by the ISO standard are within the expected values. Moreover, energy response is also within the ISO limits. Relative response lies within $\pm 25\%$ for all energies which was stated by some authors [4].

From the Figure 9, it is notable that GR-200A pellets have quite stable behavior with increase of the signal up to 7% for 39 days, which is corrected using an appropriate algorithm.

The LiF: Cu, P (GR-200A/China) material that was presented in this paper is suitable for extremity dosimetry system. The TTP of 170°C and 30s for annealing and 250°C and 20s for readout processes that were examined can reduce the time spent during annealing and readout process. This can be very helpful in heavy work load conditions. Moreover, the cost of this material is much lower than the other two considered.

4. References

- [1] RP No160 Technical Recommendations for Monitoring Individuals Occupationally Exposed to External Radiation
- [2] E. Carinou, P. Askounis, F. Dimitropoulou, G. Kiranos, H. Kyrgiakou, E. Nirgianaki, E. Papadomarkaki, and V. Kamenopoulou. Pre- and post- irradiation fading effect for LiF:Mg, Ti and LiF:Mg, Cu, P materials used in routine monitoring, *Radiation Protection Dosimetry* (2011), pp 1-4
- [3] International Standard ISO 12794:2000. Nuclear Energy – Radiation Protection- Individual Thermoluminescence Dosimeters for Extremities and Eyes
- [4] P. J. Gilvin, S. T. Baker, T. J. Daniels, J. D. Eakins, D. R. McClure, D. T. Bartlett and C. Boucher Radiation Protection Division, Health Protection Agency, Chilton, Didcot, OXON OX11 0RQ, UK. Type testing of a new TLD for the UK Health Protection Agency, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 128, No1 (2008), pp 36-42

JONIZACIJA I EKSCITACIJA MOLEKULA VODE U ČELIJAMA USLED PROLASKA ALFA ČESTICE

Danijela BOGAVAC¹, Nenad STEVANOVIĆ², Vladimir M. MARKOVIĆ², Dragoslav NIKEZIĆ², Jelena STAJIĆ²

1) Institut za fiziku, 11000 Beograd, Srbija

2) Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno matematički fakultet, R. Domanovica 12, 34000 Kragujevac, Srbija, danijelabogavac88@gmail.com, nstevanovic@kg.ac.rs, vmarkovic@kg.ac.rs, nikezic@kg.ac.rs, jbozovic@kg.ac.rs

SADRŽAJ

U ovom radu razvijen je program za simulaciju traga alfa čestice kroz ćeliju, smatrajući da se ćelija sastoji iz vode. Program se bazira na Monte Karlo metodu. Cilj rada je da se odredi srednji broj jonizovanih i ekscitovanih molekula vode u ćeliji u zavisnosti od energije alfa čestice i dimenzije ćelije. Broj jonizovanih i ekscitovanih molekula vode u ćeliji su veoma značajni ulazni parametri u daljem istraživanju produkata radiolize vode i njihovom uticaju na samu ćeliju.

1. Uvod

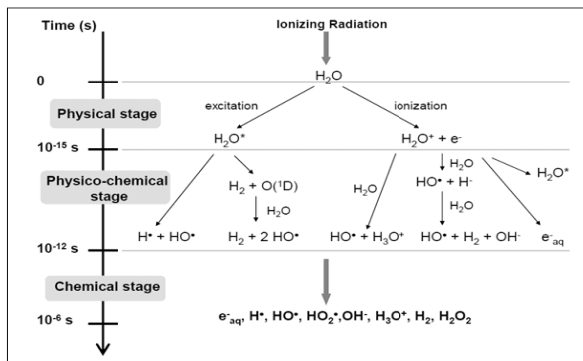
U cilju boljeg razumevanja fizičkih, hemijskih i bioloških efekata jonizujućeg zračenja na ćelije, potrebno je opisati njihovu interakciju sa vodom, koja je glavni sastojak živih organizama i ćelija. Proces koji nastaje posle jonizacije molekula vode naziva se „radioliza vode“. Kao rezultat radiolize vode nastaje veliki broj produkata, slobodnih hemijskih radikala, koji su hemijski veoma aktivni. Oni mogu difuzijom da dospeju do molekula DNK (dezoksiribonukleinska kiselina) i da hemijski interaguju sa njegovim delovima što dovodi do njegovog oštećenja. Takvo dejstvo jonizujućeg zračenja na DNK je indirektno dejstvo. Oštećenje DNK, i same ćelije, jonizujućim zračenjem je uglavnom putem indirektnog dejstva, s obzirom da je veoma mala verovatnoća da lanac DNK bude direktno pogođen primarnom česticom zračenja. Razlog za ovu malu verovatnoću je mala veličina DNK od nekoliko nanometara.

Da bi se opisao prolazak jonizujućeg zračenja kroz vodu, potrebno je simulirati kretanje naelektrisanih čestica i odrediti energetske i prostorne strukture njihovih tragova. Od interesa je prostorna, energetska i ugaona raspodela produkata interakcije primarne čestice jonizujućeg zračenja i molekula vode (fizička faza). Monte Karlo metod je najmoćniji alat u rešavanju takvog problema.

U ovom radu izvršena je simulacija prolaska alfa čestice kroz ćeliju, oblika sfere. Energije alfa čestice razmatrane u ovom radu su od 0.1 MeV do 9 MeV. Pri ovim energijama procesi koji se dešavaju prolaskom alfa čestice kroz vodu su jonizacija i ekscitacija molekula vode. Programski kod - razvijen u ovom radu - je baziran na Monte Karlo metodi i daje detaljne podatke o produktima interakcije alfa čestice i molekula vode. Ovi rezultati omogućuju dalje izučavanje nastalih produkata unutar ćelije i procenu njihovog uticaja na DNK.

2. Osnovna struktura ćelije i radioliza vode

Ćelija je osnovna gradivna i funkcionalna jedinica svih živih bića. Ljudsko telo se sastoji od 100 biliona ćelija. One izgrađuju telo, koriste hranljive materije i vrše neke specifične funkcije. Ćelije sadrže nasledni materijal i mogu da naprave sopstvene kopije (ćelijska deoba). Najveća ljudska ćelija je veličine prečnika ljudske dlake, dok je uobičajena veličina ćelije 10 μm . Voda predstavlja jednu od glavnih komponenti živih sistema, koja čini čak 50-95% mase ćelije. Osim u samoj ćeliji, voda se nalazi u međućelijskim prostorima. Oko dve trećine, odnosno, oko 60% mase odraslog čoveka čini voda (kod embriona oko 80%).



Slika 1. Radioliza vode

Pri interakciji zračenja sa molekulima organske materije može doći do jonizacije i ekscitacije molekula, što može dovesti do raspada molekula na atome, jone i slobodne radikale. Dejstvo jonizujućih zračenja na ćelijske strukture može biti direktno i indirektno. U direktnoj interakciji dolazi do kidanja postojećih veza između molekula i stvaranja novih veza između molekula i lanaca molekula i na taj način dolazi do oštećenja ćelija i tkiva. Indirektna interakcija se odvija preko mehanizama reakcije slobodnih radikala, koji nastaju radiolizom vode. Radioliza vode je razlaganje molekula vode zbog jonizujućeg zračenja. U toku radiolize vode dolazi do niza hemijskih transformacija koje dovode do stvaranja slobodnih radikala. Slobodni radikali su hemijski visoko reaktivne čestice koje imaju jedan ili više nesparenih elektrona u spoljašnjem elektronskom omotaču. Da bi postigli elektronsku stabilnost, slobodni radikali reaguju sa prvim susednim stabilnim molekulom uzimajući njegov elektron. "Napadnuti" molekul i sam postaje radikal i reaguje sa susednim molekulom, uzimajući njegov elektron i pretvarajući ga u radikal. Na taj način, pokreće se lančana reakcija i jednom pokrenuta kaskada procesa može da se propagira sve do oštećenja, pa i smrti ćelije. Radioliza vode se odvija u tri faze: fizička, fizičko-hemijska i hemijska faza. U fizičkoj fazi dolazi do formiranja jonizovanih molekula vode, ekscitovanih molekula vode i niže-ekscitovanih elektrona. U toku fizičko-hemijske faze se formiraju visoko reaktivni slobodni radikali, odnosno slobodni radikal vodonik, hidroksilni slobodni radikal i hidroperokilni radikal. Pored slobodnih radikala formiraju se i pozitivni i negativni joni. Tokom hemijske faze vrste slobodni radikali reaguju na stazama, a zatim difunduju u rastvoru. Oni tako mogu da reaguju jedni sa drugima i sa okolnim molekulima.

3. Efikasni preseki jonizacije i ekscitacije molekula vode

Molekul vode sadrži pet elektronskih nivoa jonizacije- orbitala $1b_1$, $3b_1$, $1b_2$, $2a_1$ i $1a_1$, kome mogu da budu prisutna po dva elektrona. Polu-empirijski izraz za parcijalni diferencijalni efikasni presek jonizacije molekula vode protonom dat je izrazom (1) [1,2]

$$\frac{d\sigma_{j,i}}{d\omega} = \frac{S_i}{I_i} \frac{F_1(\nu) + \frac{W}{I_i} F_2(\nu)}{\left(1 + \frac{W}{I_i}\right)^2 \left\{1 + \exp\left[\alpha\left(\frac{W}{I_i} - \omega_{ci}\right)/\nu\right]\right\}} \quad (1)$$

Prema Rudd-u [3] postoje tri ekscitaciona nivoa molekula vode, a to su AB, BA i plazmena ekscitacija. Parcijalni diferencijalni efikasni presek za ekscitaciju je dat u obliku:

$$\frac{d\sigma_{s,i}}{dW} = \rho(W) \cdot W \cdot f_i(W) \cdot \ln\left(\frac{4T}{W}\right) \quad (2)$$

Detalji izraza (1) i (2) su dati u [1-5].

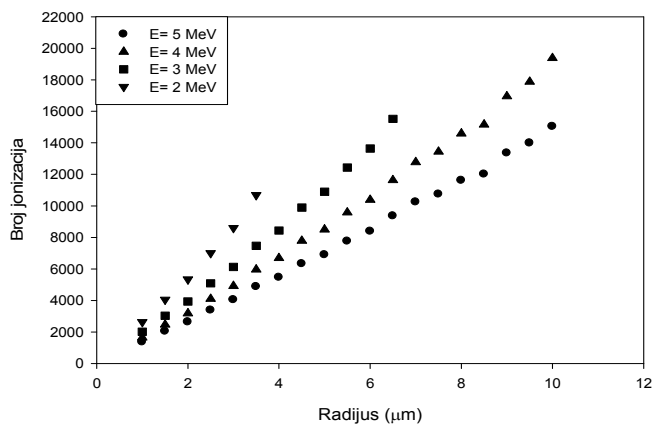
Efikasni preseći za jonizaciju i ekscitaciju molekula vode prikazani u ovoj glavi se odnose na proton. Da bi se ovi izrazi primenili za alfa česticu, potrebno je pomnožiti efikasne preseke sa z^2 i skalirati energije projektila prema masi, izražene u atomskim jedinicama [4,5]:

$$\frac{d\sigma_{\alpha}(E)}{dW} = z^2 \frac{d\sigma_p(E/m_p)}{dW} \quad (3)$$

4. Rezultati

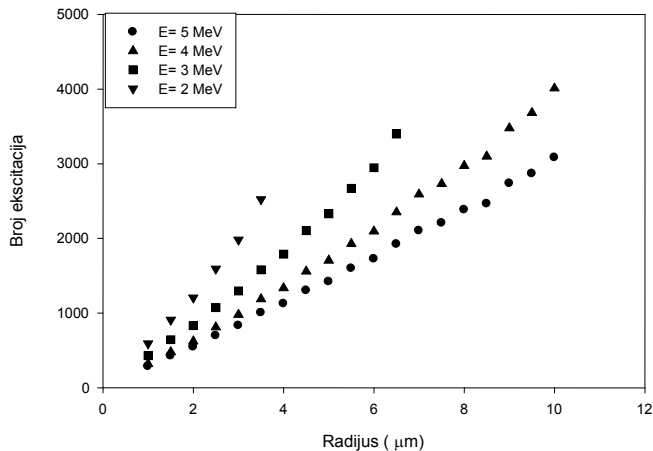
U ovom radu razvijena su dva programa. Prvi program obavlja simulaciju kretanja alfa čestice kroz vodu. Simulacija se vrši na osnovu prikazanih efikasnih preseka. Kao rezultat dobija se izlazni fajl u kome se beleže energija čestice duž traga posle svake interakcije, ukupan pređeni put, ukupan broj jonizacija i ekscitacija na tom putu. Simulacija se odvija dok čestica ne napusti ćeliju ili dok njena energija ne bude manja od 0.1 MeV. Ispod ove energije nastaju dodatni procesi pri interakciji alfa čestice i molekula vode. Drugi program je razvijen sa ciljem da se izračuna srednji broj jonizacija i ekscitacija molekula vode unutar ćelije određenog radijusa, pri datoj energiji alfa čestice. Smatrano je da se ćelija sastoji samo iz vode i da se alfa čestica emituje sa površine ćelije. S obzirom da je putanja alfa čestice pravolinijska, ovaj program je odrađen na sledeći način. Odabere se startna pozicija i energija alfa čestice. Zatim se odabere njen pravac kretanja i pri tome se odredi tačka izlaska čestice iz ćelije i rastojanje koje će preći. Na osnovu toga i fajle koju je kreirao prethodni program, odredi se broj jonizacija i ekscitacija na tom putu alfa čestice. Ovakav postupak se ponovi više puta i odredi srednji broj jonizacije i ekscitacije molekula vode za datu dimenziju ćelije i energiju alfa čestice.

Na slici 2. prikazan je broj jonizacija u funkciji radijusa ćelije, sa različitim upadnim energijama alfa čestice. Sa smanjenjem energije projektila zavisnost broja jonizovanih molekula vode i radijusa ćelije nije linearna. Za energije od 3 MeV i 2 MeV, razmatrane su ćelije manjeg radijusa da bi se ispoštovao uslov da najmanja energija sa kojom projektil može da izađe iz ćelije je 0.1 MeV. Sa smanjenjem energije projektila, i u ovom slučaju raste broj jonizovanih molekula.



Slika 2. Broj jonizacija u funkciji radijusa ćelije i energije alfa čestice

Na slici 3 prikazan je broj ekscitacija u funkciji radijusa ćelije, sa različitim upadnim energijama alfa čestice. Oblik grafika je sličan graficima jonizacije pri istim energijama. I u ovom slučaju pri nižim energijama projektila zavisnost broja ekscitovanih molekula nije linearna. Sa smanjenjem energije projektila i porastom radijusa ćelije, raste i broj ekscitovanih molekula vode.



Slika 3. Broj ekscitacija u funkciji radijusa ćelije i energije alfa čestice

4. Zaključak

U ovom radu ukratko je predstavljen program kojim se simulira kretanje alfa čestice kroz ćeliju. Taj program omogućuje računanje srednjeg broja jonizacija i ekscitacija molekula vode usled prolaska alfa čestice. Pokazano je da broj jonizovanih molekula vode raste sa radijusom ćelije, ali opada sa porastom energije alfa čestice.

5. Literatura:

- [1] M. Dingfelder, D. Hantke, M. Inokuti, H. G. Paretzke. Electron inelastic-scattering cross sections in liquid water. *Radiation Physics and Chemistry* 53 (1998) 1-18.
- [2] M. Dingfelder, M. Inokuti, H. G. Paretzke. Inelastic-collision cross sections of liquid water for interactions of energetic protons. *Radiation Physics and Chemistry* 59 (2000) 255-275.
- [3] M. E. Rudd, Y-K. Kim, D.H. Medison, T.J. Gay. Electron production in proton collisions with atom and molecules: energy distributions. *Rev Mod. Phy.* 64, (1992) 441-490.
- [4] S. Uehara and H. Nikjoo. Monte Carlo simulation of Water Radiolysis for Low-energy charged particles. *J. Radiat. Res.*, 47(2006) 69-81.
- [5] S. Uehara and H. Nikjoo. Monte Carlo Track Structure Code for Low-Energy Alpha-Particles in Water. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2002.

JONIZATION AND EXCITATION OF WATER MOLECULES IN CELLS DUE TO ALPHA PARTICLES

Danijela BOGAVAC¹, Nenad STEVANOVIĆ², Vladimir M. MARKOVIĆ², Dragoslav NIKEZIĆ², Jelena STAJIĆ²

1) Institut of physics, 11000 Beograd, Serbia

*2) University of Kragujevac, Faculty of Science, R. Domanovica 12, 34000 Kragujevac, Serbia
danijelabogavac88@gmail.com, nstevanovic@kg.ac.rs,
vmarkovic@kg.ac.rs, nikezic@kg.ac.rs, jbozovic@kg.ac.rs*

ABSTRACT

In this paper the program for simulation of alpha particle track through cell was developed by assuming that cell is composed from the water molecules. The program code is based on Monte Carlo method. The results of the program are numbers of ionized and excited water molecules in the cell. It was shown that the number of ionized and excited molecules increases with cell radius and decrease with alpha particle energy, as might be expected.

PROVERA DOZA U RADIOTERAPIJSKIM USTANOVAMA SRBIJE U 2013. GODINI

Đorđe LAZAREVIĆ^{1,2}, Srboľjub STANKOVIĆ^{1,2} i Miloš ŽIVANOVIĆ²

1) Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

2) Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Laboratorija „Zaštita“ - Laboratorija za etaloniranje,
djordje.lazarevic@vinca.rs

SADRŽAJ

U radu su predstavljeni rezultati provere apsorbovanih doza u vodi za Co-60 i visokoenergetske snopove fotona na linearnim akceleratorima postignute u radioterapijskim ustanovama u Srbiji u sklopu Programa IAEA/WHO TLD postal dose quality audit. Program je sproveden u februaru 2013. godine preko koordinatora za Srbiju – SSDL INN Vinča, Laboratorija „Zaštita“. U Programu su učestvovali radioterapijski centri iz Beograda, Sremske Kamenice, Kragujevca, Niša i Kladova. Program ima za cilj da se prati i po potrebi vrši revizija dozimetrijskih procedura u radioterapiji za procenu pacijentnih doza.

1. Uvod

Cilj radioterapijske procedure jeste da se osigura da tkivo pacijenta sa patološkim promenama kao radioterapijska meta dobije propisanu apsorbovanu dozu jonizujućeg zračenja (u daljem tekstu-doza), a da pritom raspodela doza za okolna zdrava tkiva i organe bude minimalna. Uspeh ili neuspeh radioterapijske procedure zavisi od tačnosti sprovođenja metode za isporučivanje doze obolelom tkivu pacijenta. Tačnost primene metode za isporučivanje doze zavisi od postupka određivanja doze, preko lokalizacije tumora, planiranja lečenja, pa sve do ozračivanja pacijenta. Ono predstavlja najvažniju stavku u terapiji zračenjem i kao takvo zahteva razradu kompleksne metodologije, definisanje prihvatljivih nivoa za pojedine parametre koji doprinose kumulativnom efektu radioterapijskih procedura, kao i učešće u eksternim poređenjima. [1]

Opšte je prihvaćeno da se proverom karakteristika snopa zračenja i doze u odnosu na zadate uslove na megavoltažnim sistemima, može ključno uticati na smanjenje ukupne neizvesnosti ostvarenja cilja u radioterapiji i da za te provere značajnu ulogu ima sekundarna standardna dozimetrijska laboratorija (SSDL). [2, 3]

Laboratorija za etaloniranje kao sastavni deo Laboratorije „Zaštita“ u okviru INN „Vinča“ je postala članica međunarodne mreže SSDL 1998. godine i od tada je učestvovala u svim interkomparacijama doza u radioterapiji u organizaciji IAEA. Laboratorija za etaloniranje kao SSDL je od 2010. godine organizaciono prisutna u okviru Laboratorije za Radijaciona Merenja (LRM) iz Laboratorije „Zaštita“ INN „Vinča“ i pritom je dobila status akreditovane laboratorije prema standardu ISO 17025 od strane Akreditacionog Tela Srbije (ATS). U svom obimu akreditacije sadrži, između ostalih, merne metode za etaloniranje dozimetara u radioterapiji. SSDL INN Vinča po potrebi ili na zahtev međunarodnih institucija vrši superviziju dozimetrijskih procedura korišćenih u ovdašnjim radioterapijskim centrima, odnosno preuzima odgovornost za organizovanje revizija, otklanjanje odstupanja dobijenih rezultata koji su izvan prihvatljivih nivoa, preduzimanje korektivnih mera i obavljanje novih merenja i proračuna doze. Takođe, od posebnih aktivnosti SSDL INN „Vinča“ izdvajaju se učešće u projektovanju mera radijacione sigurnosti i bezbednosti bunkera radioterapijskih centara, etaloniranje dozimetara svih radioterapijskih centara, koordinacija u organizaciji i sprovođenju Programa IAEA/WHO TLD postal dose quality audit (u daljem tekstu-Program) za ustanove sa zračnom terapijom, kao i učešće u izradi protokola i preporuka za dozimetriju u radioterapiji.

Program služi kao provera radioterapijskih procedura i karakteristika snopova zračenja u zdravstvenim ustanovama u zemljama u razvoju. Osnovni cilj Programa je da obezbedi nezavisne provere kvaliteta primene metode za isporučivanje doze na megavoltažnim aparatima za radioterapijski tretman, koristeći prenosne termoluminiscentne dozimetre. U ovom Programu je do sada učestvovalo preko 1000

radioterapijskih centara širom sveta i u mnogim slučajevima u toku realizacije Programa su otkrivene značajne greške, čime je sprečeno dalje pogrešno tretiranje pacijenata. [4]

Program za radioterapijske ustanove u Srbiji sproveden je u redovnom terminu koji se periodično održava na 2 godine i svi postojeći centri su prihvatili poziv za učešće koje je besplatno i dobrovoljno. Ovogodišnji Program isključivo se odnosio na kliničke teleterapijske fotonske snopove, dok elektronski, brahiterapija i ortovoltazni rendgenski snopovi nisu bili obuhvaćeni.

2. Materijali i metoda

U Programu se koriste termoluminiscentni dozimetri (skraćeno: TLD), koji izgledaju kao kapsule u obliku cilindra od polietilena ispunjene litijum-fluorid praškom (LiF) i koji su vodootporni. [4, 5]

Svaki učesnik na Programu dobija:

- kodirani paket od tri TLD-a za svaki snop koji je prijavljen - dva za ozračivanje i treći za prikupljanje okolnog zračenja,
- akrilni držač sa postoljem u koji se postavljaju TLD za ozračivanje,
- uputstvo za sprovođenje procedure ozračivanja dozimetara,
- odštampanu verziju blanko izveštaja (putem elektronske pošte se dobija i elektronska verzija) o podacima za korišćenu mernu opremu i metodu za proračun apsorbirane doze u vodi, za korišćene koeficijente i faktore, za rezultate merenja doze, kao i za druge detalje značajne za ozračivanje TLD. Na osnovu ovih podataka može se utvrditi da li je dozimetrijski protokol ispravan, kao i da se otkriju eventualne greške u proračunu doze. [5]

U uputstvu je naznačeno da se prilikom ozračivanja TLD kapsule postavljaju u vodeni fantom na postolju sa predviđenim držačem i da je neophodno da se odvojeno ozrače dva TLD, što je moguće približnije vrednosti apsorbirane doze u vodi od 2 Gy. U izveštaju se navodi utvrđena doza kojom su ozračeni dozimetri – prijavljena doza (D_{User}). Apsorbirana doza u vodi u tački koja predstavlja geometrijski centar TLD kapsule određuje se odgovarajućim merenjima uz korišćenje mernog sklopa sa jonizacionom komorom u vodenom fantomu prema standardima IAEA. [6, 7]

Pojedinačni paket svakog učesnika je označen posebnim kodom zbog očuvanja poverljivosti rezultata interkomparacije. [2, 5] Broj paketa po ustanovi odgovarao je broju prijavljenih različitih kliničkih fotonskih snopova korišćenih za teleterapiju kojih nije moglo biti više od tri po centru u ovom ciklusu. U Tabeli 1 navedeni su svi učesnici, kao i prijavljeni visokoenergetski fotonski snopovi.

Dozimetri su ozračivani u terminu u toku propisanog intervala (tzv. vremenski prozor), koji se odnosi na sve učesnike iz Srbije. Ozračeni dozimetri u radioterapijskim centrima vraćeni su u roku od 6 nedelja nakon završetka vremenskog prozora u jednom paketu u IAEA, gde je rezervisan termin za referentni TLD čitač radi očitavanja dozimetara. Kada centar nije u mogućnosti da ozrači dozimetre u propisanom intervalu, obavezan je da o tome obavesti IAEA dozimetrijsku laboratoriju, kao i da zakaže termin u kome je moguće ozračivanje zbog rezervacije čitača. U ovakvim prilikama, evaluacija rezultata radi se individualno.

Konačne rezultate poređenja dobijenih doza očitavanjem TLD ozračenih u centrima, IAEA učesnicima šalje u roku od 8 nedelja od prijema svih paketa u svojoj laboratoriji. Učesnici dobijaju sertifikate sa rezultatima za svaki snop zračenja pojedinačno na kom su ozračivani TLD.

Tabela 1. Spisak učesnika i prijavljenih snopova.

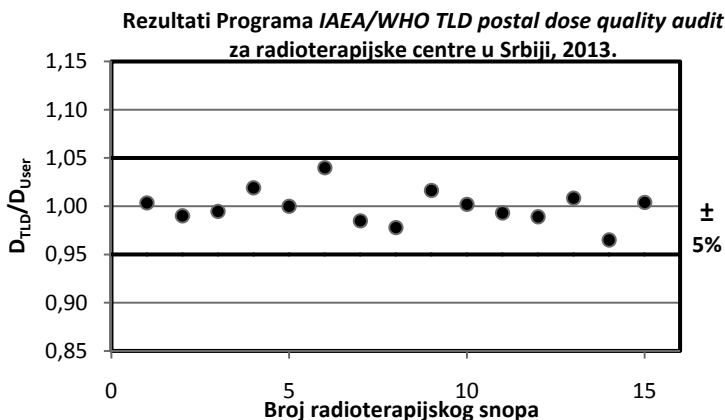
Radioterapijski centar	Generator visokoenergetskog snopa	Zračni snop
ZC Kladovo	Cobaltron	Co-60
KC Kragujevac	Precise	6 MV
	Synergy	10 MV
	Precise	18 MV
Institu za onkologiju Vojvodine	Clinac 600	6 MV
	CI 2100 C	6 MV
	CI 2100 C	15 MV
KC Niš - Klinika za onkologiju	Oncor Imp.	6 MV
	Oncor Imp.	15 MV
	Primus	18 MV
Institut za onkologiju i radiologiju Srbije	Synergy Platform	6 MV
	Synergy Platform	15 MV
VMA - Institut za radiologiju	Synergy Platform	4 MV
	Synergy Platform	10 MV
	Synergy Platform	18 MV

3. Rezultati i diskusija

Na grafiku 1 slučajnim redosledom učesnika prikazani su rezultati Programa za 2013. godinu za radioterapijske centre u Srbiji. Tačke na grafiku prikazuju odnos očitane doze sa ozračenih TLD (D_{TLD}) i doze koja je prijavljena (D_{User}). Svaka tačka odgovara srednjoj vrednosti doze dobijene od očitanih doza sa oba ozračena dozimetra.

Rezultati u granicama $\pm 5\%$ odstupanja od prijavljene doze smatraju se prihvatljivim. Ako je rezultat u ovim granicama, preporučuje se sledeće učestvovanje na istom programu za 2 godine. Kada rezultat nije u okviru prihvatljivih granica, učesniku se šalje novi paket TLD i potrebno je da u najkraćem mogućem roku sprovede ozračivanje dozimetara. Ukoliko i nakon novog ozračivanja, rezultat nije u prihvatljivim granicama odstupanja, IAEA obaveštava SSDL INN Vinča o potrebi da se izvrši provera procedure u konkretnom radioterapijskom centru, utvrdi uzrok i daju preporuke za rešavanje problema u otklanjanju prevelikog odstupanja od referentne doza. U dosadašnjoj praksi, pokazalo se da se ovi problemi mogu otkloniti konsultacijama sa SSDL, ali je uobičajeno da se obavi poseta radioterapijskom centru u kome je ustanovljeno odstupanje izvan prihvatljivog nivoa i obave merenja doza referentnim memnim sklopom iz SSDL sa sledljivim sertifikatom do primarnog etalona. Mogući uzroci nastalih grešaka najčešće su nedostatak iskustva medicinskog fizičara, pogrešno očitavanje podataka ili nerazumevanje dozimetrijskog protokola, a nekad i nestabilnost u radu linearnog akceleratora. Detaljan izveštaj koji se popunjava prilikom ozračivanja dozimetara omogućava da se proceni uticaj eventualnih proceduralnih grešaka na konačni rezultat. Sve utvrđene greške ili pogrešne interpretacije se u razgovoru sa učesnicima razjašnjavaju i ispravljaju. Za učesnike kod kojih je doza izvan prihvatljivog nivoa, preporučuje se da na istom programu učestvuju i naredne godine. [2, 8]

Rezultati pojedinačnih učesnika povereni su na čuvanje od strane organizatora (IAEA/WHO) nacionalnom koordinatoru (za Srbiju, SSDL INN Vinča).



Slika 1. Rezultati IAEA/Who interkomparacije 2013

4. Zaključak

Program *IAEA/WHO TLD postal dose quality audit* na dobrovoljnoj bazi pokazao se do sada vrlo efikasnim u obezbeđivanju kvaliteta određivanja doza u radioterapiji.

Rezultat ovogodišnjeg Programa pokazao je da su odstupanja u okviru prihvatljivih granica, što navodi na zaključak da se ispravno sprovodi dozimetrijski protokol, pažljivo vrše merenja i proračun doza u u svim radioterapijskim centrima u Srbiji.

5. Literatura

- [1] Izewska J, Bera P, Vanitsky S. IAEA/WHO TLD postal dose audit service and high precision measurements for radiotherapy level dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, pp. 387-392, 2002.
- [2] Scientific Committee of the IAEA/WHO Network of Secondary Standard Dosimetry Laboratory. Report of the ninth meeting of the SSDL Scientific Committee. *SSDL Newsletter* 44, pp. 6-19, 2001.
- [3] Groth S, Meghzi A, Tatsuzaki H et al. Quality assurance in radiotherapy. *Proceedings of the International Conference on Radiological Protection of Patients in Diagnostic and Interventional Radiology, Nuclear Medicine and Radiotherapy*, pp. 618-624, Malaga, 2001.
- [4] Izewska J, Andreo P. The IAEA/WHO TLD postal programme for radiotherapy hospitals. *Radiotherapy and Oncology* 54, pp. 65-72, 2000.
- [5] IAEA, Principles of operation of the IAEA/WHO TLD postal dose audit service for radiotherapy centers, *SSDL Newsletter* No. 58, Vienna: IAEA, 2010.
- [6] IAEA, Absorbed dose determination in external beam radiotherapy. An international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. *Technical reports series* No. 398. Vienna: IAEA, 2000.
- [7] IAEA. Absorbed dose determination in photon and electron beams. An international code of practice. *Technical Reports Series* No 277, 1987.
- [8] IAEA, Comprehensive audits of radiotherapy practices: a tool for quality improvement. Vienna: IAEA, 2007.

DOSIMETRY AUDIT IN RADIOTHERAPY CENTERS IN SERBIA IN 2013

Djordje LAZAREVIC^{1,2}, Srbojub STANKOVIC^{1,2}, Milos ZIVANOVIC²

1) University of Belgrade – School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia

2) Institute Vinca, Radiation Protection Laboratory, Belgrade, Serbia, djordje.lazarevic@vinca.rs

ABSTRACT

The purpose of this paper is to present the results of TLD absorbed doses in water for Co-60 and high-energy photon beams on linacs in radiotherapy centers in Serbia in the framework of the IAEA/WHO TLD Postal Dose Quality Audit Program. This program was carried out in February 2013, coordinated by SSDL INN Vinča Laboratory for Radiation Protection - country coordinator for Serbia. Radiotherapy centers from Belgrade, Sremska Kamenica, Kragujevac, Nis and Kladovo took part in this program. The aim of the program is to follow and, if needed, audit dosimetry procedures for estimation of patient dose in radiotherapy treatment.

РАЧУНАЊЕ АПСОРБОВАНЕ ДОЗЕ У ПЛУЋИМА ORNL ФАНТОМА ЗА BNCT ТЕРАПИЈУ

**Драгана КРСТИЋ¹, Биљана МИЛЕНКОВИЋ¹, Владимир МАРКОВИЋ¹, Драгослав
НИКЕЗИЋ¹ и Јовица АТАНАЦКОВИЋ²**

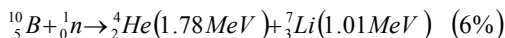
- 1) Универзитет у Крагујевцу, Природно-математички факултет, dragana@kg.ac.rs
2) Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River Laboratories, Chalk River, Ontario, Canada K0J 1J0

САДРЖАЈ

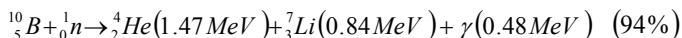
Монте Карло симулације су извршене за процену дозе за могуће терапеутско коришћење неутрона базирано на њиховом захвату на бору, BNCT (Boron Neutron Capture Therapy). Овај метод се базира на способности термалних неутрона да изазову реакцију са језгрима ¹⁰B унетим у ћелије тумора. Математички ORNL модел људског тела је коришћен као фантом за симулацију тумора у плућима. Прорачуни су вршени помоћу MCNP5/X програма. У овој симулацији су коришћена два супротно оријентисана снопа неутрона у циљу добијања равномерне расподеле неутронског флукса унутар плућа. Добијени резултати указују да се за канцер плућа BNCT терапијом може применити сноп епитермалних неутрона.

1. Увод

Убрзо након открића неутрона [1] 1936. године, биофизичар Др Gordon Locher [2,3] разматрао је могуће терапеутско коришћење неутрона базирано на њиховом захвату на бору, BNCT (Boron Neutron Capture Therapy). Овај метод је једноставан и добро дизајниран у концепту, али је сложен и тежак за извршење. Он се базира на способности термалних неутрона да изазову реакцију са ¹⁰B језгрима унетим у ћелије тумора формирајући сложено језгро (ексцитовани ¹¹B) које се тренутно распада на ⁷Li и алфа честицу [4]



(1)



Оба продукта, алфа честица и јон ⁷Li, су енергетске честице које прелазе приближно 4 и 8 μm у ткиву, респективно, тако да се сва енергија из реакције депонује локално у дијаметру ћелије (10 μm), [4]. Ови продукти узрокују непоправљива оштећења ДНК ланца која доводе до смрти ћелије. Ова техника је корисна јер се радијациона оштећења јављају на малом растојању од места интеракције са језгром бора, и тако је здраво ткиво поштеђено. Постоје и други разлози за коришћење ¹⁰B, као што је екстремно велика вероватноћа захвата нискоенергетских неутрона (ефикасни пресек је $3837 \cdot 10^{-24} \text{cm}^2$) и што ¹⁰B није токсичан.

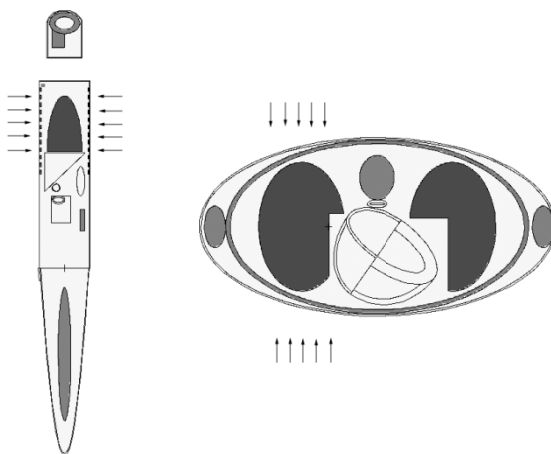
Пре третмана BNCT није неопходно прецизно знати где леже границе тумора чиме се превазилазе недостаци оперативног и конвенционалног зрачног приступа. Постоји теоријска предност над хемотерапијом при којој се обимне дозе лекова испоручују систематски и понекад резултују разарајућим ефектом на здраво ткиво. Са друге стране при BNCT бором означен лек је неактиван док се не активира неутронским снопом.

Једињења бора која се користе при BNCT су BSH (sodium borocaptate), и BPA (boronophenylalanine), хемијске формуле су $\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{12}\text{S}_1$ и $\text{C}_9\text{H}_{12}\text{O}_4\text{BN}$, респективно, [4]. Ова једињења се називају тражиоци тумора јер они при уношењу у организам пролазе баријере и везују се за ћелије тумора. BSH се клинички користи за лечење тумора мозга, док се BPA користи за лечење малигнућ ћелија.

2. Материјал и метод

Симулације су извршене коришћењем MCNP5/X програма [5] и ORNL фантома [6]. Монте Карло MCNP5/X програм је коришћен за симулацију транспорта неутрона од извора до органа мете - плућа. Улазне датотеке за MCNP са инпут фајлама ORNL фантома су раније објављене у раду Крстић и Никезић [7]. Ове датотеке су доступне у библиотеци CPC часописа [7] и Medical Physics Geometry database of Los Alamos National Laboratory [8].

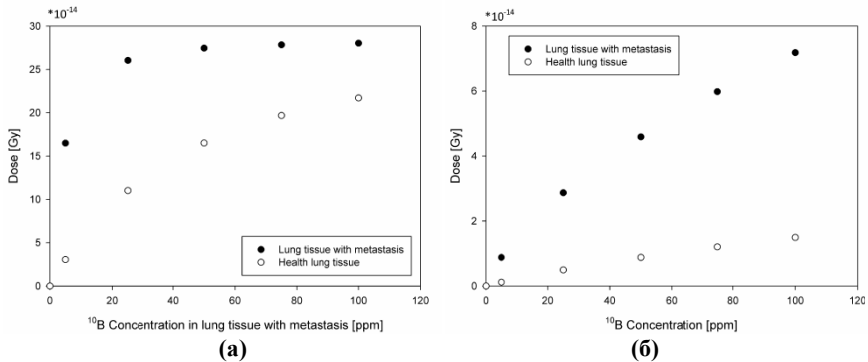
Фантом је описан коришћењем три материјала: плућа, костију и меких ткива. Претпостављено је да се зрачење извора састоји од два виртуелна неутронска снопа који симулира АП (напред-назад) и ПА (позади-напред) геометрије у циљу добијања равномерне расподеле неутронског флукса унутар целих плућа (слика 1). Димензије неутронског снопа су $11 \times 25 \text{ cm}^2$, тако изабране да покрије целу десну запремину плућа. Резултати су добијени за термалне и епитермалне неутроне енергије 0.025 eV и 1 keV, респективно. Укупно 10^7 симулација је примењено, да добије "добра", статистика. MCNP energy deposition tally-f6 је коришћен за израчунавање дозе у *Su* по емитованој честици, неутрону.



Слика 1. Уздужни и попречни пресек ОРНЛ фантома, добијени као графички излаз MCNP програма

3. Резултати и дискусија

У раду су извршене две групе симулација: прва је везана за плућа са метастазама за различит садржај бора ^{10}B у ppm (parts per million), а друга за нормално, здраво ткиво плућа. Претпостављено је да здраво ткиво плућа апсорбује једну десетину концентрације бора у односу на плућа са метастазама [9]. На слици 2 приказани су дозе за нормално ткиво и плућа са метастазама, где су на слици 1а, извор термални, а на слици 1б епитермални неутрони.



Слика 2. Дозе у ткиву здравих плућа и ткива плућа са метастазама у зависности до концентрације бора за термалне (а) и епитермалне неутроне (б)

Може се видети са слике 2а да чак и мале концентрације бора у плућима изазивају далеко веће дозе. Са повећањем концентрације бора у ткиву плућа са метастазама, доза се повећава до неке тачке, а затим долази до zasiћења. Са даљим повећањем концентрације бора у болесном ткиву доза се веома споро повећава, а разлика у дозама се смањује. Овај резултат је неповољан јер је циљ да доза у здравом ткиву буде што је могуће мања. Исти прорачуни су вршени за епитермалне неутроне са енергијама 1 keV. Резултати су сасвим другачији него за термалне неутроне; на слици 2б приказане су дозе од епитермалних неутрона за здрава и ткива плућа са метастазама. Ситуација је повољнија, јер је разлика у дозама између здравог ткива и ткива плућа са метастазама већа, при чему је тај однос око 5, што се слаже са подацима из литературе [9]. Са повећањем концентрације бора разлика између те две дозе се повећава што резултира већим дозама у болесном ткиву, а здраво ткиво може бити поштеђено. Недостатак у односу на термалне неутроне је да су за исту концентрацију бора дозе од епитермалних неутрона мање.

4. Закључак

BNCT се може применити за терапију канцера плућа епитермалним неутронима. Са повећањем концентрације бора разлика између доза у ткиву плућа са метастазама и здравом ткиву се повећава што резултира већим дозама у болесном ткиву, а здраво ткиво може бити поштеђено.

5. Захвалница

Овај рад је спроведен уз подршку Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије, у оквиру пројеката ОИ 171021 и ИИИ 43011.

6. Литература

- [1] J. Chadwick. The Existence of a Neutron. *J. Roy. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sc.* 136, (1932) 692-708.
- [2] R.V. Dorn. Boron neutron capture therapy (BNCT): a radiation oncology perspective. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 28, (1994) 1189–1201.
- [3] K. Yokoyama, S.I. Miyatake, Y. Kajimoto, S., Kawabata, A. Doi, T. Yoshida, T. Asano, M. Kirihaata, K. Ono and T. Kuroiwa. Pharmacokinetic study of BSH and BPA in simultaneous use for BNCT. *J. Neuro-Oncol.* 78, (2006) 227–232.
- [4] C. Voyant, R. Roustit, J. Tatje, K. Biffi, D. Leschi, J. Brianc and C. L. Marcovici. Therapeutic potential of atmospheric neutrons. *Rep. Pract. Oncol. Radiother.* 16, (2011) 21–31.
- [5] X-5 Monte Carlo Team. MCNP—a General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Vol. I: Overview and Theory. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory; LA- UR- 03- 1987, (2003).
- [6] K.F. Eckerman, M. Cristy and J.C. Ryman. The ORNL mathematical phantom series (1996).
- [7] D. Krstic and D. Nikezic. Input files with ORNL-mathematical phantoms of the human body for MCNP-4B. *Comp. Phys. Commun.* 176, (2007) 33-37.
- [8] T. Goorley. MCNP Medical Physics Geometry Database. LANL. http://mcnp-green.lanl.gov/publication/pdf/MP_DataBase_March2008-LA-UR-08-2113-release.pdf Also available on <http://www.pmf.kg.ac.rs/radijacionafizika/Products.html>
- [9] T. Matsumoto. Monte Carlo simulation of depth–dose distribution in several organic models for boron neutron capture therapy. *Nucl. Instrum. Meth. A* 580, (2007) 552-557.

MONTE CARLO CALCULATIONS OF LUNG DOSE IN ORNL PHANTOM FOR BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY

**Dragana KRSTIĆ¹, Biljana MILENKOVIĆ¹, Vladimir MARKOVIĆ¹, Dragoslav NIKEZIĆ¹,
Jovica ATANACKOVIĆ²**

1) *University of Kragujevac, Faculty of Science, R. Domanovica 12, 34000 Kragujevac, Serbia, dragana@kg.ac.rs*

2) *Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River Laboratories, Chalk River, Ontario, Canada K0J 1J0*

ABSTRACT

Monte Carlo simulations were performed to evaluate dose for possible treatment of cancers by boron neutron capture therapy (BNCT). Calculations have been performed by means of the MCNP5/X code and the computational model of male ORNL to simulate tumors in the lungs. In this simulation two opposite beams were considered, in order to obtain uniform thermal and epithermal neutron flux distribution inside the lungs. The obtained results indicate that the lung cancer could be treated by BNCT.

SPECIFIČNA AKTIVNOST ^{137}Cs I ^{60}Co U URINU KOD PROFESIONALNO IZLOŽENIH LICA PRILIKOM PREPAKIVANJA OZRAČENOG NUKLEARNOG GORIVA

Ivan KNEŽEVIĆ, Nevena ZDJELAREVIĆ, Luka PERAZIĆ i Nataša LAZAREVIĆ

Javno preduzeće "Nuklearni objekti Srbije", Vinča, Srbija, ivanknezevic@vinca.rs

SADRŽAJ

U radu su prikazani rezultati merenja specifične aktivnosti radionuklida ^{137}Cs , ^{60}Co i ^{40}K u uzorcima urina profesionalno izloženih lica angažovanih na prepakivanju i privremenom smeštanju ozračenog nuklearnog goriva istraživačkog reaktora RA u Vinči. Analiza uzoraka je urađena metodom spektrometrije gama zračenja. Određene vrednosti specifičnih aktivnosti radionuklida ^{137}Cs i ^{60}Co u ispitivanim uzorcima su bile ispod minimalnih detektabilnih aktivnosti, što znači da nije konstatovana interna kontaminacija ovim nuklidima usled profesionalnog izlaganja. U ispitivanim uzorcima izmerene su vrednosti specifične aktivnosti prirodnog izotopa ^{40}K koji se nalazi u telu.

1. Uvod

Efektivna operacija prepakivanja i privremenog smeštanja ozračenog nuklearnog goriva (ONG) reaktora RA u Vinči je vršena u periodu od decembra 2009. do aprila 2010. godine. Na osnovu razrađenog tehnološkog postupka, operacija je izvedena na potpuno siguran i bezbedan način, kako po osoblje koje je bilo direktno uključeno u izvršavanje konkretnih aktivnosti, tako i po samo postrojenje reaktora RA, stanovništvo i životnu sredinu. U okviru planiranih aktivnosti izvršena je jasna organizacija rada, sa definisanim operativnim uslovima i ograničenjima, merama zaštite od zračenja i analizom mogućih incidenata i prihvatljivosti rizika. Na osnovu pregleda mogućih incidentnih i akcidentnih situacija, koje su mogle nastati prilikom izvođenja planiranih operacija prepakivanja ozračenog nuklearnog goriva, pokazano je da čak i u slučaju najtežih mogućih situacija, uz primenu svih planiranih interventnih mera, radijacione posledice eventualnog akcidenta neće premašiti propisane norme [1].

Prilikom planiranja rada, utvrđeno je da se poslovi na prepakivanju ONG organizuju u tri četvoročasovne smene na dan. Pet smena se rotiralo svakog dana, tako da su se radovi obavljali u petodnevnom ciklusu. Jednu smenu su sačinjavali sledeći članovi radnog tima: 1 rukovodilac smene, 1 vođa smene, 4 operatora, 1 dispečer, 2 dozimetrista, 1 stručnjak iz ruske firme "Sosny" i 1 prevodilac za ruski jezik. Rukovodilac i vođa smene su rukovodili radom smene i kretali su se unutar odlagališta i hale reaktora. Dispečeri su obavljali poslove isključivo u kontrolnoj sobi odlagališta ONG u objektu reaktora RA. Dva operatora su radila po dva sata na radnoj platformi, u zoni bazena odlagališta i u hali reaktora [1].

Rizik od unutrašnjeg izlaganja članova radnog tima u toku rada bila je uglavnom uslovljena aerosolima koji se oslobađaju sa površine vode odlagališta ONG i radionuklidima koji dospevaju u vazduh sa kontaminiranih površina bazena, opreme i alata u radnoj sredini. Zaštita osoblja od unurašnjeg izlaganja je bila obezbeđena efikasnim sistemom ventilacije, kao i primenom individualnih sredstava respiratorne zaštite. Procena individualnih doza unutrašnjeg izlaganja jonizujućim zračenjima zasnovana je na maksimalnoj mogućoj specifičnoj aktivnosti aerosola na radnom mestu. Glavni mehanizam, odgovoran za širenje radioaktivnih aerosola u radnu sredinu jeste isparavanje vode koja je kontaminirana nuklidom ^{137}Cs iz bazena odlagališta ONG [1].

Procena doza primljenih usled internog izlaganja profesionalno izloženih lica ima svrhu da sa jedne strane pruži informaciju potrebnu da bi se dokazala usaglašenost primljenih doza sa propisanim granicama, i sa druge strane da se dobiju informacije o efikasnosti programa kontrolisanja nivoa internog izlaganja. Tipično je da se prilikom merenja uzoraka biološkog materijala odabere samo jedna tehnika za rutinski monitoring, što je u slučaju prepakivanja ONG bilo merenje aktivnosti celog tela. Međutim, radi procene potencijalnog značajnijeg izlaganja uspostavljena je kontrola radioaktivnosti urina na gama emitere [1].

Cilj ovog rada je bio da se analiziraju urini profesionalno izloženih lica angažovanih na prepakivanju i smeštanju ONG u objektu reaktora RA, radi procene potencijalnog internog izlaganja. Određena je specifična aktivnost radionuklida ^{137}Cs , ^{60}Co i ^{40}K . Radionuklidi ^{137}Cs i ^{60}Co su potencijalni kontaminanti radne sredine, a ^{40}K je prirodni radionuklid koji se nalazi i u ljudskom organizmu.

2. Metode merenja

Uzeti su 24-časovni uzorci urina sledećih članova radnog tima na prepakivanju i privremenom smeštanju ONG u zgradi reaktora RA: 1 rukovodilac smene, 1 vođa smene, 24 operatora, 1 dozimetrista, 4 dispečera i 3 prevodioca za ruski jezik – ukupno 34 uzorka. Uzorci urina su uzeti tri dana nakon završene operacije prepakivanja ONG, u zapremini od 500 ml i stavljeni su bez prethodnog tretmana u marineli posude iste zapremine.

Merenje aktivnosti radionuklida u uzorcima urina vršeno je metodom spektrometrije gama zračenja, korišćenjem HPGe detektora ORTEC GMX50-S, npn tipa sa Be prozorom relativne efikasnosti 50%, rezolucije 1.81 keV na 1332.5 keV.

Kao standard za kalibraciju efikasnosti korišćen je ORTEC MIX standard tip CBSS 2, *Inspectorate for Ionizing Radiation, Czech Metrological Institute*, marineli geometrije, zapremine 500 ml, čiji je matriks silikonska smola u čijoj zapremini se nalaze radionuklidi: ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{113}Sn , ^{85}Sr i ^{88}Y [2]. Gustina matriksa standarda iznosi $0.98 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$, što je blisko gustini uzoraka urina koja iznosi $1.00 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$, pa je opravdano korišćenje pomenutog standarda za kalibraciju efikasnosti.

Spektri su snimani i analizirani pomoću softverskog paketa *Gamma Vision* [3], dok je proračun specifičnih aktivnosti pojedinih radionuklida vršen pomoću programa *MatLab 7.11*. Vreme merenja je bilo 25000 s, a dobijeni rezultati su prikazani u Tabeli 1.

Aktivnosti ispitivanih radionuklida su određene na osnovu njihovih gama linija: ^{137}Cs (662 keV), ^{60}Co (1173 keV i 1332 keV) i ^{40}K (1460 keV) [4]. Relativna merna nesigurnost svih rezultata je bila do 10%. Minimalna detektabilna koncentracija (MDC) za specifičnu aktivnost nuklida ^{137}Cs iznosi 4 Bq/l, dok za ^{60}Co iznosi 2.5 Bq/l za zapreminu od 0.5 l.

3. Rezultati i diskusija

Rezultati merenja su prikazani u Tabeli 1. Iz prikazanih vrednosti se može videti da su kod sva 34 uzorka urina specifične aktivnosti radionuklida ^{137}Cs i ^{60}Co bile ispod vrednosti minimalnih detektabilnih koncentracija. Vrednosti specifične aktivnosti ^{40}K za uzorke urina se kreću u opsegu od 14 do 96 Bq/l.

Tabela 1. Rezultati merenja specifične aktivnosti gama aktivnih nuklida (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{40}K) u uzorcima urina ispitanika.

Zaposleni	Funkcija na prepakivanju ONG	Specifična aktivnost uzorka urina [Bq/l]		
		^{137}Cs	^{60}Co	^{40}K
Z1	prevodilac	<MDC ^I	<MDC ^{II}	22.5
Z2	prevodilac	<MDC	<MDC	23.1
Z3	prevodilac	<MDC	<MDC	77.4
Z4	dozimetrista	<MDC	<MDC	67.8
Z5	dispečer	<MDC	<MDC	16.9
Z6	dispečer	<MDC	<MDC	50.2
Z7	dispečer	<MDC	<MDC	95.5
Z8	dispečer	<MDC	<MDC	77.9
Z9	operator	<MDC	<MDC	47.0
Z10	operator	<MDC	<MDC	65.4
Z11	operator	<MDC	<MDC	34.6
Z12	operator	<MDC	<MDC	28.3
Z13	operator	<MDC	<MDC	28.3
Z14	operator	<MDC	<MDC	46.7
Z15	operator	<MDC	<MDC	35.4
Z16	operator	<MDC	<MDC	40.8
Z17	operator	<MDC	<MDC	24.5
Z18	operator	<MDC	<MDC	47.7
Z19	operator	<MDC	<MDC	77.3
Z20	operator	<MDC	<MDC	60.7
Z21	operator	<MDC	<MDC	67.3
Z22	operator	<MDC	<MDC	21.0
Z23	operator	<MDC	<MDC	20.1
Z24	operator	<MDC	<MDC	14.7
Z25	operator	<MDC	<MDC	47.4
Z26	operator	<MDC	<MDC	42.3
Z27	operator	<MDC	<MDC	37.2
Z28	operator	<MDC	<MDC	47.4
Z29	operator	<MDC	<MDC	49.8
Z30	operator	<MDC	<MDC	14.5
Z31	operator	<MDC	<MDC	33.2
Z32	operator	<MDC	<MDC	26.2
Z33	rukovodilac smene	<MDC	<MDC	68.3
Z34	voda smene	<MDC	<MDC	60.2

^I MDC(^{137}Cs)=4Bq/l, ^{II} MDC(^{60}Co)=2.5Bq/l

4. Zaključak

Dobijeni rezultati ukazuju na to da su izmerene vrednosti specifičnih aktivnosti radionuklida ^{137}Cs i ^{60}Co ispod minimalnih detektabilnih koncentracija, što znači da nije konstatovana interna kontaminacija ovim nuklidima usled profesionalnog izlaganja. U ispitivanim uzorcima su izmerene vrednosti specifične aktivnosti prirodnog izotopa ^{40}K prisutnog u telu. Dobijene vrednosti odgovaraju prosečnim vrednostima specifične aktivnosti ^{40}K kod odraslog čoveka u stanovništvu [4].

5. Literatura

- [1] Istraživačka i razvojna organizacija “Sosny”, Institut za nuklearne nauke “Vinča” – Centar za nuklearne tehnologije i istraživanja “NTI” i Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, *Konačni izveštaj o sigurnosti za prepakivanje i privremeni smeštaj ozračenog nuklearnog goriva reaktora RA*, Vinča, jun 2009.
- [2] Certificate, Type: CBSS2, , *Inspectorate for Ionizing Radiation, Czech Metrological Institute*, 25.02.2008.
- [3] ORTEC Gamma Vision – 32 *Gamma Ray Spectrum Analysis and MCA Emulator for Microsoft Windows 95, 98, 2000 and NT A66-B32*, Software User’s Manual, USA 2002.
- [4] *Naturally Occurring Radioactive Material (NORM V)*, Proceedings of an international symposium Seville, Spain, 19–22 March 2007.

SPECIFIC ACTIVITY OF ^{137}Cs AND ^{60}Co IN URINE SAMPLES OF PROFESSIONALS DURING THE REPACKAGING OF SPENT NUCLEAR FUEL

Ivan KNEŽEVIĆ, Nevena ZDJELAREVIĆ, Luka PERAZIĆ and Nataša LAZAREVIĆ
Public Company “Nuclear Facilities of Serbia”, Vinca, Serbia, ivanknezevic@vinca.rs

ABSTRACT

This paper presents specific activity measurements of ^{137}Cs , ^{60}Co i ^{40}K radionuclides in urine samples of professionals during the repackaging and temporary storage of spent nuclear fuel at the RA research reactor in Vinca. Gamaspectrometry was the method used for sample analysis. The obtained values for specific activities of ^{137}Cs and ^{60}Co radionuclides in examined samples were under minimum detectable activities, which implies that internal contamination of professionals did not occur. Specific activity of natural isotope ^{40}K , which is present in human body, was measured.

OPTIMIZACIJA FILTRA TERMOLUMINESCENTNOG DOZIMETRA SIMULACIJOM MONTE KARLO

Jelena STANKOVIĆ^{1,2}, Jelica KALJEVIĆ², Danijela ARANĐIĆ^{1,2} i Olivera CIRAJ-BJELAC^{1,2}

- 1) Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija
- 2) Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija, jelena.stankovic@vinca.rs

SADRŽAJ

U ovom radu je predstavljen relativan odziv TLD-100 materijala, u zavisnosti od energije upadnog fotonskog zračenja i različite debljine i materijala filtra. Podaci o odzivu su sakupljeni u numeričkom eksperimentu koristeći softverski paket MCNP5. Posmatrane su energije upadnih fotona od 16 keV do 1.25 MeV, dok su materijali korišćeni za filtraciju ABS plastika i aluminijum. Najoptimalniji odziv dozimetra je dobijen korišćenjem 0.6 mm Al i 8.1 mm ABS plastike.

1. Uvod

Termoluminescentni dozimetri (TLD) se rutinski koriste u monitoringu lica profesionalno izloženih zračenju i drugim oblastima dozimetrije [1].

Najčešće korišćen TL materijal koji se koristi i u Servisu za ličnu dozimetriju Instituta za nuklearne nauke "Vinča" (INNV) je baziran na litijum fluoridu (LiF), dopiran magnezijumom (Mg) i titanijumom (Ti) u malim količinama i komercijalno je poznat pod oznakom TLD-100. TLD-100 je približno ekvivalentan materijal tkivu jer poseduje efektivni atomski broj 8.2, dok je 7.4 za tkivo [2].

Relativan odziv TLD-a, R , je predstavljen u (1):

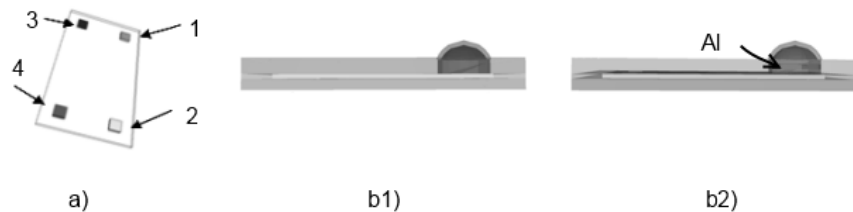
$$R = \left[\frac{K(\theta, E)_{TLD} / K(\theta, E)_{AIR}}{K(0, Cs)_{TLD} / K(0, Cs)_{AIR}} \right] \times \frac{h(0, Cs)}{h(\theta, E)} \times \eta'(E) \quad (1)$$

gde je: $K(\theta, E)_M$ - apsorbovana doza izjednačena sa kermom za materijal M (npr. TLD ili vazduh (AIR)), koja zavisi od energije izvora E , i upadnog ugla snopa, θ , $h(\theta, E)$ - koeficijent konverzije kerme u vezduhu u lični ekvivalent doze, pri energiji E i upadnom uglu θ , $\eta'(E)$ - koeficijent TL relativne efikasnosti koji zavisi od TL materijala i energije fotona. Uvedena aproksimacija kerme i apsorbovane doze predstavlja opravdanu aproksimaciju pod određenim uslovima [3] koji su ispunjeni u ovom radu. Vrednosti za $h(\theta, E)$ i $\eta'(E)$ su dobro dokumentovane [3, 4] i rezultati predstavljeni u ovom radu su analizirani prema ISO 4037-3 koeficijentima konverzije. Rezultati su normirani prema odzivu na energiji od 662 keV (^{137}Cs). Apsorbovana doza jonizujućeg zračenja u materijalu, $K(\theta, E)_M$, se može proceniti pomoću Monte Karlo programa MCNP5 i "F6 talije". MCNP5 je "Monte Carlo N-Particle" program sa kojim se simulira transport neutrona, fotona, elektrona, ili uparen transport neutrona/fotona/elektrona u trodimenzionalnoj geometriji [5]. Cilj ovog rada je da se primenom MCNP5 programa proveri uticaj dizajna filtra TLD-a na odziv, a pri različitim energijama fotonskog zračenja prema (1).

2. Metod

Simulacija ozračivanja TLD-100 je izvedena monoenergetskim fotonima, energije od 16 keV do 1.25 MeV u skladu sa specifikacijom proizvođača Harshaw [6]. Numerički eksperiment je izvršen pomoću "Dell Inspiron" računara sa "Intel(R) Core(TM) i5" procesorom koji rad na 2.66 GHz i raspolaže sa 4GB RAM-a. Program MCNP5 verzije 1.60 je instaliran na "Windows 7 Ultimate" operativnom sistemu.

U INNV koristi dozimetar sa dve tablete, ali u ovom radu je razmatrana konfiguracija sa četiri tablete prema [7]. Četiri tablete koje su napravljena od TLD-100 materijala, postavljene su u aluminijumski nosač i zatvorene u kaseti od polietilena, dimenzija $3.5 \text{ cm} \times 6.5 \text{ cm} \times 0.6 \text{ cm}$ sa dodatnim polusfernim delom debljine 0.4 cm iznad tablete 1, u kome se nalazi filter.



Slika 1. a) Izgled TL tableta na nosaču; b) presek dozimetra: b1) sa ABS filtrom, b2) sa ABS + Al filtrom.

Na sl. 1a je prikazan dozimetara van kasete koji se sastoji od aluminijumskog nosača dimenzija $2.5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 0.09 \text{ cm}$ i četiri tablete dimenzija $0.32 \text{ cm} \times 0.32 \text{ cm} \times 0.09 \text{ cm}$ [8], dok je na sl. 1b prikazan presek dozimetra u kaseti. Koncentracija Mg u TLD-100 je 180 ppm, dok je Ti- 10 ppm [9]. Usled ovako niske koncentracije, uticaj Mg i Ti je zanemarujući prilikom same apsorpcije zračenja u TL materijalu, tako da je dozimetar modelovan samo pomoću preseka za interakciju fotona za Li i F. Pomoću tablete 1 procenjuje se lični ekvivalent doze $H_p(10)$ jer se tableta nalazi iza filtra koji daje odgovarajuću atenuaciju fotona i odziv dozimetra koji je ekvivalentan tkivu [3]. Debljina filtra omogućava ekvivalentnu gustinu tkivu merenu u mg/cm^2 i kreće se u opsegu od $330 \text{ mg}/\text{cm}^2$ do $1100 \text{ mg}/\text{cm}^2$ i može se sastojati od jednog ili dva materijala [10]. Materijali korišćeni u ovom radu su plastika akrilonitril butadien stiren, ABS i aluminijum. Posmatrana su četiri različita dizajna filtra koji su predstavljeni u Tabeli 1 i označena slovima od A do D.

Tabela 1. Posmatrani dizajni filtra (A-D)

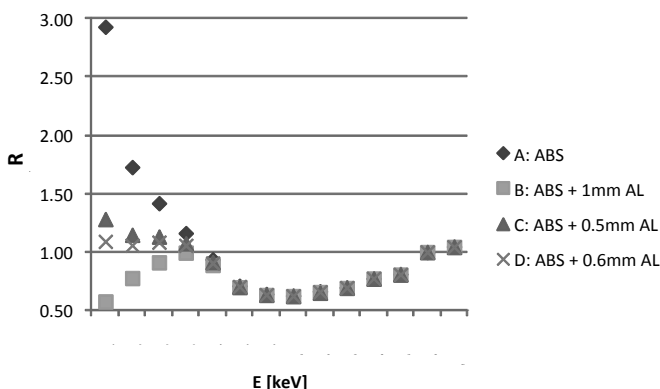
Karakteristike	A	B	C	D
Al debljina [cm]	-	0.1	0.05	0.06
ABS debljina [cm]	0.87	0.77	0.82	0.81
Površinska gustina [mg/cm^2]	1001	1167	1085	1100

Dozimetar se nalazi na prednjem delu ISO fantoma, ispunjenog vodom dimenzija $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ [1, 3], koji se nalazi u vakumu, sa dužom ivicom usmerenom u pravcu vertikalne ose. Prednji zid fantoma je debljine 0.25 cm od polimetil metakrilata, PMMA, dok su ostali zidovi 1 cm široki napravljeni takođe od PMMA. Fotoni su emitovani iz kvadratnog izvora debljine 1 cm, i dimenzija $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ aktivne površine. Aktivna površina izvora je paralelna prednjoj strani fantoma. Fotoni su orjentisani u pravcu i smeru normale aktivne površine izvora.

MCNP5 je pokrenut u TTB transportnom modu za fotone i u simulaciji je korišćena "F6 talija" koja daje procenu apsorobane energije u jedinici mase prema ACE tabela preseka za fotonske interakcije koja je korišćena u ovoj simulaciji je "04p". Ukupan broj simuliranih istorija u eksperimentu je bio 50 miliona. Da bi se dobila vrednost kerme u vazduhu, $K(\theta, E)_{AIRs}$, ista simulacija je pokrenuta, sa vazduhom kao materijalom koji ispunjava definisanu geometriju.

3. Rezultat

Relativan odziv dozimetra je prikazan na sl. 2, za energije upadnog fotonskog zračenja od 16keV, 20keV, 24keV, 33keV, 48keV, 65keV, 83keV, 100keV, 118keV, 164keV, 208keV, 250keV, 662keV i 1.25 MeV, i za slučajeve A-D . Energije su izabrane na osnovu preporuke IAEA izveštaja za kalibraciju detektora u fotonskom polju [11].



Slika 2. Relativan odziv TLD-a u zavisnosti od energije i dizajna filtra

4. Diskusija

Na sl. 2 je prikaz odziv TLD-a pri različitim energijama i četiri različita dizajna filtra. Idealan odziv je ravna horizontalna linija vrednosti 1. Maksimalno odstupanje od idealnog odziva je zabeleženo u slučaju A i iznosilo je 2.9. U [12] je dokumentovano da plastični filteri kakvi su ABS i polipropilen daju precenjene vrednosti, dok metalni filteri daju podcenjene vrednosti. Ova činjenica je iskorišćena u dizajnu filtra, tako da je u slučaju B dodat 1 mm Al. U ovom slučaju je Al doveo do podcenjene vrednosti čak do 50%, a površinska gustina je van granica koje su dozvoljene za modelovanje tkiva. Smanjenjem debljine Al u slučaju C na 0.5 mm dobijen je precenjen odziv od 28% pri energijama ispod 40 keV. Naknadnim povećanjem debljine Al za 0.1 mm, u slučaju D dobijen je poželjan približno idealan odziv sa maksimalnim odstupanjem od 9 %. Odziv TLD-a prema IEC 61066 [13] treba da se nalazi u opsegu odstupanja od -29% do 67%. Za energije veće od 40 keV odziv je identičan u svim slučajevima. Za energije od 83 keV do 164 keV vrednosti su manje od jedinice i odstupanje odziva je veće od dozvoljenog IEC standardom sa maksimumom na ~100 keV i iznosi -37%. Za vrednosti energije veće od 164 keV odstupanje je u okviru dozvoljenog i odziv se približava idealnom za energije veće od 662 keV.

5. Zaključak

Softerskim paketom MCNP5 je modelovan relativan odziv TLD-a u zavisnosti od energije i dizajna filtra. Posmatranjem odziva za različite dizajne moguće je optimizovati filtraciju. Najoptimalniji odziv je zabeležen za 0.6 mm Al i 8.1 mm ABS plastike. U daljem radu potrebno je isprobati druge materijale koji će omogućiti bolji odziv u opsegu energija od 83 keV do 164 keV.

6. Literatura

- [1] “Technical Recommendations for Monitoring Individuals Occupationally Exposed to External Radiation”, European Commission, Luxembourg, RP no. 160, 2009.
- [2] Gad Shani, *Radiation Dosimetry: Instrumentation and Methods*, 2nd ed., New York, USA, CRC Press, 2001.
- [3] J. S. Eakins et al., The MCNP-4C2 Design of a Two Element Photon/ Electron Dosimeter that Uses Magnesium/Copper/Phosphorus Doped Lithium Fluoride, *Radiat. Prot. Dosim.*, vol. 128 no. 1 (2008), 21–35.
- [4] *Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation*, Publication 74, ICRP, New York, USA, Pergamon, 1996.
- [5] *MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code: Overview and Theory, Ver. 5*, LANL, Los Alamos, USA, 2008.
- [6] Harshaw TLD Model 6600 Plus: Automated TLD Reader, Thermo Fisher Scientific Inc., 2007. (www.envinet.cz/pt/files/thermo/TLDModel6600.pdf)
- [7] Material and Assemblies for Thermoluminescent Dosimetry, Thermo Fisher Scientific Inc., 2007. (www.envinet.cz/pt/files/thermo/TLDMaterials.pdf)
- [8] <http://www.thermoscientific.com>
- [9] E. S. Moura et al., About TLD-100 Glow Curve Manipulation to Achieve Dosimetric Parameters of I-125 Seeds Used For Brachytherapy, INAC 2009, Rio de Janeiro, Brazil, Sept. 27- Oct. 2, 2009.
- [10] P. Olko et al., Thermoluminescent Detectors Applied in Individual Monitoring of Radiation Workers in Europe — A Review Based on the Eurados Questionnaire, *Radiat. Prot. Dosim.*, vol. 120, no. 1–4 (2006), 298–302.
- [11] “Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments”, IAEA, Vienna, Austria, Safety Reports Series No. 16, 2000.
- [12] J. W. E van Dijk, Uncertainties in Personal Dosimetry for External Radiation: A Monte Carlo Approach, *Radiat. Prot. Dosim.*, vol. 121 no. 1 (2006), 31-39.
- [13] B.Obryk et al., Energy Response of different types of RADOS personal dosimeters with MTS-N (LiF:Mg,Ti) and MCP-N (LiF:Mg,Cu,P) TL detectors, *Radiat. Prot. Dosim.*, Vol. 144 No. 1-4 (2011), 211-214.

FILTER OPTIMISATION OF THERMOLUMINESCENT DOZEMETERS WITH MONTE CARLO SIMULATION

**Jelena STANKOVIC^{1,2}, Jelica KALJEVIC², Danijela ARANDJIC^{1,2},
Olivera CIRAJ-BJELAC^{1,2}**

1) *University of Belgrade – School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia*

2) *Institute of nuclear sciences Vinca, University of Belgrade, Serbia, jelena.stankovic@vinca.rs*

ABSTRACT

In this paper a relative response of TLD-100 material, depending on the energy of incident photon radiation and various materials and filtration thickness. Data on the response are collected in numerical experiments using a software-package MCNP5. Energies from 16 keV to 1.25 MeV of incident photons were observed, while materials used for filtration were ABS plastic and aluminum. The most optimal response was obtained with 0.6 mm Al and 8.1 mm ABS plastic.

SIMULACIJA NISKOENERGETSKIH PROTONA KROZ ČELIJE

**Jelena ŽIVKOVIĆ RADOVANOVIĆ¹, Nenad STEVANOVIĆ²,
Vladimir M. MARKOVIĆ², Dragoslav NIKEZIĆ², Biljana MILENKOVIĆ²**

1) Univerzitet u Prištini, Prirodno matematički fakultet, Kosovska Mitrovica

jln_zivkovic@yahoo.com,

2) Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno matematički fakultet, R. Domanovica 12, 34000 Kragujevac,

nstevanovic@kg.ac.rs, vmarkovic@kg.ac.rs,

nikezic@kg.ac.rs, bmilenkovic@kg.ac.rs

SADRŽAJ

U ovom radu opisani su procesi koji se javljaju pri interakciji protona sa molekulom vode. Izdvojeni su procesi koji su dominantni pri nižim energijama protona i analitički su ispisani efikasni preseci za te procese. Ti efikasni preseci mogu da posluže u simulaciji traga niskoenergetskih protona.

1. Uvod

Struktura traga čestice je još uvek otvoren problem u radijacionoj fizici. S obzirom da kretanje čestice kroz neku sredinu veoma komplikovan proces, za izučavanje njenog traga koriste se simulacije bazirane na Monte Karlo metodu. Da bi se primenio Monte Karlo metod u simulaciji kretanja čestice, potrebno je poznavanje efikasnih preseka koji opisuju interakcije čestice sa atomima sredine kroz koju se kreće. U radijacionoj fizici od velikog je interesa izučavanje prolaska naelektrisanih čestica (protona, alfa čestica) kroz vodu, jer je voda osnovni sastojak živih organizama i ćelija. [1]

Procesi koji se dešavaju pri kretanju čestice kroz vodu, a samim tim i vrednosti efikasnih preseka, zavise od energije čestice. Pri većim energijama projektila procesi koji se dešavaju su jonizacija i ekscitacija molekula vode. Pri nižim energijama nastaje i razmena naelektrisanja projektila sa molekulima vode, pa su procesi i složeniji. [2,3]

U ovom radu predstavljeni su efikasni preseci koji opisuju razmenu naelektrisanja pri prolasku protona kroz vodu. Data je njihova analiza i funkcionalni zapis što omogućuje primenu u razvoju simulacija baziranih na Monte Karlo metodi.

2. Metodologija

Kada naelektrisane čestice prolaze kroz materiju, one gube energiju prvenstveno usled sudara, odnosno interakcije sa elektronima u atomu mete. Za praćenje traga projektila potrebno je poznavanje efikasnih preseka interakcije projektila sa datom sredinom.

Pri usporavanju brzog projektila, procesi zahvata elektrona i gubitka elektrona od strane projektila postaju sve važnije komponente procesa gubitka energije. Razmena naelektrisanja može dovesti do pojave ostatka jona projektila, bez formiranja slobodnih elektrona. Proces koji nastaje pri interakciji protona sa molekulom vode su prikazanu u tabeli 1 [1,4]:

Tabela 1. Procesi pri interakciji protona sa molekulom vode

Jonizacija protonom	$p+H_2O \rightarrow p+ H_2O^+ + e^-$
Ekscitacija protonom	$p+H_2O \rightarrow p+ H_2O^*$
Zahvat elektrona	$p+H_2O \rightarrow H+ H_2O^+$
Zahvat elektrona	$p+H_2O \rightarrow (p+e^-)+ H_2O^+$
Gubitak elektrona	$H+H_2O \rightarrow p+e^- + H_2O^*$
Jonizacija vodonikom	$H+H_2O \rightarrow H+ H_2O^- + e^-$

Pored jonizacije i ekscitacije, koji postaju zanemarljivi kod energija ispod 100 keV, razmena naelektrisanja postaje dominantan proces. U zahvatu elektrona, elektron iz molekula vode prenosi se u pokretu sporog protona, da se formira neutralan atom vodonika H, gde se elektron najde vezan u bilo kojem stanju (osnovnom ili pobuđenom). Drugi vid zahvata je da elektron putuje zajedno sa protonom istom brzinom. Nakon procesa zahvata elektrona neutralni atom vodonika može da pri interakciji sa molekulom vode izgubi elektrona (gubitak elektrona) ili da jonizuje molekul vode.

Efikasni preseki razmene naelektrisanja su označeni sa σ_{if} gde je i početno, a f konačno stanje projektila. Efikasni presek zahvata elektrona pri interakciji protona sa molekulom vode se označava σ_{10} , gde 1 označava da je projektil bio naelektrisan pre interakcija, a 0 da je projektil postao neutralan posle interakcije. Slično tome, efikasni presek gubitka elektrona pri interakciji protona sa molekulom vode se označava sa σ_{01} .

Efikasni presek za zahvat elektrona je preuzet iz rada [1] i može se predstaviti sledećom funkcijom

$$\sigma_{10} = 10^{Y(x)} \quad (1)$$

Pri čemu je $x = \log(E_p)$. E_p je energija protona u eV, a funkcija Y ima oblik

$$Y(x) = (a_0x + b_0 - c_0(x - x_0)^{d_0})U(x - x_0) + (a_1x + b_1)U(x - x_1)$$

koja je definisana preko U -step funkcije. Vrednosti za konstante koje figurišu u funkciji su:

$$a_0 = -0.18, b_0 = -18.22, c_0 = 0.215, d_0 = 3.55; a_1 = -3.6, b_1 = -1.997, x_0 = 3.45, x_1 = 5.251.$$

Efikasni presek za gubitak elektrona, koji je dat eksperimentalno u radovima [1,3] fitovan je u ovom radu i može se predstaviti sledećom relacijom.

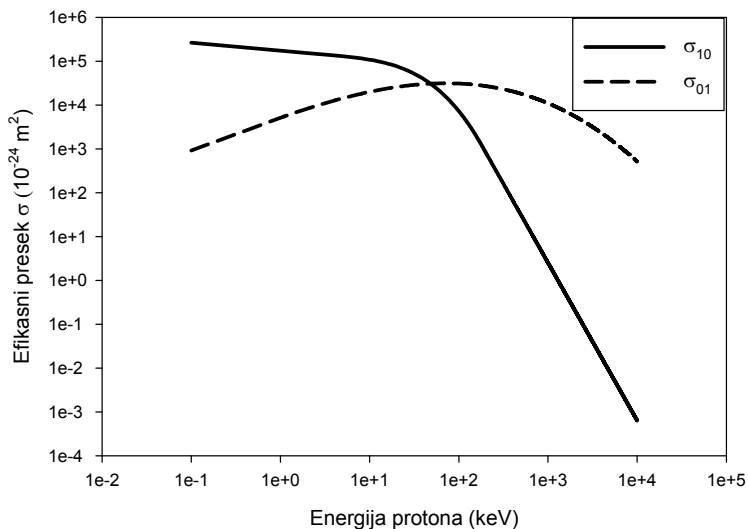
$$\sigma_{01} = 10^{0.71 + 0.71 \log E_p - 0.08 (\log E_p)^2 - 0.04 (\log E_p)^3} \quad (2)$$

pri čemu je energija projektila u keV, dok je vrednost efikasnog preseka u 10^{-21} m^2 .

3. Rezultati i diskusija

Efikasni preseki zahvata i gubitka elektrona, dati relacijama (1) i (2) su predstavljeni grafički na slici 1 u funkciji od energije protona. Vrednosti efikasnih preseka su dati za energije projektila od 0.1 keV pa do 10 MeV. Ovi procesi su dominantni za niskoenergetske protone (protoni čije su energije manje od 500 keV). Sa slike 1 se vidi da maksimalne vrednosti efikasnih preseka zahvata i gubitka elektrona su sa energijama protona od 100 keV.

Sa nižim energijama povećava se verovatnoća zahvata elektrona, jer tada do izražaja dolazi Kulonova interakcija između protona (projektila) i elektrona u atomima mere. Istovremeno, ukoliko je pri nižim energijama proton zahvatio elektron, tada je manja verovatnoća da taj elektron se oslobodi od projektila. Pri višim energijama Kulonova interakcija je manja, pa je situacija obrnuta.



Slika 1. Efikasni preseki zahvata i gubitka elektrona pri interakciji projektla sa molekulom vode.

4. Zaključak

Efikasni preseki zahvata i gubitka elektrona pri interakciji protona sa molekulima vode su dominantni pri energijama protona od nekoliko stotina keV. Pri nižim energijama dominira proces zahvata, jer tada do izražaja dolazi Kulonova interakcija projektla i elektrona u atomima mete. Pri višim energijama, efikasni presek zahvata elektrona naglo isčezava. Pored procesa jonizacije i ekscitacije, procese zahvata i gubitka elektrona treba uzeti u obzir kada su protoni sa energijama ispod jednog MeV.

5. Literatura:

- [1] M. Dingfelder, D. Hantke, M. Inokuti, H. G. Paretzke. Electron inelastic-scattering cross sections in liquid water. *Radiation Physics and Chemistry* 53 (1998) 1-18.
- [2] M. Dingfelder, M. Inokuti, H. G. Paretzke. Inelastic-collision cross sections of liquid water for interactions of energetic protons. *Radiation Physics and Chemistry* 59 (2000) 255-275.
- [3] M. E. Rudd, Y-K. Kim, D.H. Medison, T.J. Gay. Electron production in proton collisions with atom and molecules: energy distributions. *Rev Mod. Phy.* 64, (1992) 441-490.
- [4] S. Uehara and H. Nikjoo. Monte Carlo simulation of Water Radiolysis for Low-energy charged particles. *J. Radiat. Res.*, 47(2006) 69-81.

SIMULATION OF LOW-ENERGETIC PROTONS THROUGH CELLS

**Jelena ŽIVKOVIĆ RADOVANOVIĆ¹, Nenad STEVANOVIĆ²,
Vladimir M. MARKOVIĆ², Dragoslav NIKEZIĆ², Biljana MILENKOVIĆ²**

- 1) University of Pristina, Faculty of Science, Kosovska Mitrovica jln_zivkovic@yahoo.com
2) University of Kragujevac, Faculty of Science, R. Domanovica 12, 34000 Kragujevac, Serbia,
nstevanovic@kg.ac.rs, vmarkovic@kg.ac.rs,
nikezic@kg.ac.rs, bmilenkovic@kg.ac.rs

ABSTRACT

In this paper processes during interaction of proton with water molecule were described. Types of interactions at lower proton energy were described separately and their cross sections were presented in analytical forms.

PRIMENA DOZIMETARA SA OPTIČKI STIMULISANOM LUMINESCENCIJOM (OSL) U LIČNOJ DOZIMETRIJI

Luka PERAZIĆ, Nevena ZDJELAREVIĆ i Ivan KNEŽEVIĆ
JP „Nuklearni objekti Srbije“, Beograd, Srbija, lukaperazic@nuklearniobjekti.rs

SADRŽAJ

U ovom radu opisan je dozimetrijski sistem zasnovan na dozimetrima sa optički stimulisanom luminescencijom (OSL) u Odeljenju za ličnu dozimetrijsku kontrolu u JP „Nuklearni objekti Srbije“. Predstavljena su dva tipa dozimetra (Inlight i nanoDot), čitač dozimetara microStar i prikazane osnovne karakteristike mernog sistema kao i praktične osobine istog.

1. Uvod

Postupak lične dozimetrijske kontrole sprovodi se za sva profesionalno izložena lica i zahteva upotrebu ličnih dozimetara u cilju merenja operativnih dozimetrijskih veličina (npr. Hp(10), Hp(0,07)) koje kasnije služe za procenu ukupnog izlaganja pojedinca (efektivna doza). U ličnoj dozimetriji se već godinama koriste termoluminescentni dozimetri (TLD) koji zagrevanjem emituju svetlost čiji je intenzitet proporcionalan apsorbovanoj energiji (dozi) u polju zračenja. Metoda koja se sve više razvija i primenjuje u ličnoj dozimetrijskoj kontroli je bazirana na optički stimulisanom luminescenciji (OSL)[1,2].

U Odeljenju za ličnu dozimetrijsku kontrolu Javnog preduzeća „Nuklearni objekti Srbije“ (JP NOS) uvedena je i akreditovana metoda za merenje operativnih dozimetrijskih veličina OSL dozimetrima.

2. Optički stimulisana luminescencija (OSL)

Prilikom izlaganja određenih vrsta materijala (kristalnih dielektrika) jonizujućem zračenju dolazi do vezivanja sekundarnog naelektrisanja u kristalnoj rešetki (diskretna energetska stanja) kao posledica prisusva različitih nečistoća (kontaminanata) koji formiraju nesavršenu strukturu. Mehanizmi vezivanja naelektrisanja kod OSL je dosta sličan mehanizmima kod termoluminescencije (TL) [1]. Nakon izlaganja zračenju materijal se osvetljava stabilnim izvorom svetla, LE diodama (LED) ili laserima odgovarajućeg intenziteta i talasne dužine (532 nm). Na ovaj način se oslobađaju „zarobljena“ naelektrisanja u materijalu koja u procesu rekombinacije emituju svetlost talasne dužine 410–420 nm (plavi spektar) [2]. Ovakvo stimulisana luminescencija iz materijala se meri u funkciji od vremena, a integral ove funkcije je proporcionalan apsorbovanoj dozi zračenja u materijalu [3]. Odgovarajućom kalibracijom OSL signala poznatom dozom lako se može proračunati nepoznata vrednost operativne dozimetrijske veličine od interesa. Ovaj mehanizam stimulacije ne zagreva kristal kao u slučaju TLD pa se stoga stimuliše samo deo vezanih naelektrisanja (zavisi od trajanja stimulacije), što omogućava OSL dozimetrima (OSLD) da budu očitani više puta bez značajnijeg gubitka signala [1].

3. OSL dozimerijski sistem u JP NOS

OSL dozimetrijski sistem u JP NOS, američkog proizvođača Landauer, obuhvata: konvencionalne OSRD tipa InLight™, OSRD tipa nanoDOT™ i čitač dozimetara tipa microStar® sa prenosnim računarom i barkod skenerom (Slika 1).



Slika 1. OSL dozimetrijski sistem u JP NOS. MicroStar čitač sa računarom (a), dozimetri tipa Inlight (b), NanoDot (c,d) i komponenta za imidžing (e).

3.1. Dozimetri tipa InLight™

OSLD ovog tipa imaju opštu primenu u ličnoj dozimetrijskoj kontroli profesionalno izloženih lica i monitoringu okoline. Bedž tipa Inlight se sastoji od detektora, plastičnog nosača i plastičnog kućišta (Slika 1b). Detektor je sačinjen od tankog sloja (0,2 mm) kristalnog praha aluminijum oksida dopiranog ugljenikom (Al₂O₃:C) koji je smešten između dva sloja poliesterskih folija (0,1 mm) [2]. Detektor je fiksiran u plastičnom nosaču (Slika 1b), sa četiri kružna otvora dijametra 5 mm. Nosač se postavlja u odgovarajuće plastično kućište (Slika 1b) koje ima zaštitnu ulogu od spoljašnjeg uticaja na detektor (svetlo, prljavština, itd.). Na kućištu se nalaze tri filtra različitih materijala (plastika, aluminijum i bakar) i debljina [4], kao i jedan otvor bez filtra, koji omogućavaju softveru da što pouzdanije proračuna nepoznatu dozu. Filtri su pozicionirani tako da odgovaraju pozicijama kružnih otvora na detektoru. Konačno, plastično kućište se pozicionira u plastični nosač sa štipalnikom kao dodatna zaštita od spoljašnje kontaminacije (Slika 1b).

Bedž ovog tipa može opciono sadržati i komponentu za „imidžing“ (Slika 1e) čijom se analizom može dobiti informacija o uslovima izlaganja dozimetra u poljima beta i niskoenergetskog fotonskog zračenja (manje od 150 keV) [5]. Ovom analizom se pravi razlika između „dinamičkog“ i „statičkog“ izlaganja dozimetra. Dinamičko izlaganje je izlaganje u normalnim uslovima nošenja dozimetra, dok statičko ukazuje da je dozimetar bio nepokretan tokom izlaganja relativno u odnosu na izvor zračenja. Ovo može ukazati npr. da dozimetar nije bio nošen u akcidentalnim situacijama ili da je zloupotrebljen (namerno izložen prevelikoj dozi). Takođe se može desiti da je dozimetar bio parcijalno ili kompletno zaklonjen teškim materijalom usled neadekvatnog nošenja bedža, što kao posledicu daje očitavanje doze koja je manja od očekivane.

3.2. Dozimetri tipa nanoDOT™

Ovaj tip OSLD (Slike 1c i 1d) nalazi najčešću primenu u poznatim poljima gde se zahteva merenje u tački, zatim u medicini (dijagnostičkoj radiologiji i terapiji) [2], kao i merenjima radi procene doze na koži, mada se koriste i u monitoringu okoline [6].

Dozimetar se sastoji od detektora Al₂O₃:C oblika diska prečnika 6 mm i debljine 0,2 mm smeštenog u plastično kućište dimenzija 10mm x 10mm x 2mm. Ovako mala dimenzija dozimetra omogućava pozicioniranje na ograničenom prostoru i teže dostupnim mestima.

3.3. Čitač OSL dozimetara microStar

MicroStar čitač (Slika 1a) je mali prenosivi čitač OSL dozimetara dimenzija 30 cm x 20 cm x 10 cm i težak svega 15 kg. Čitač je USB kablom povezan sa prenosivim računarom koji poseduje softver pomoću koga se kontrolišu sva podešavanja, analize i upis u internu bazu podataka. Očitavanje

dozimetrova vrši se pomoću niza od 36 LED koje stimulišu dozimetar na svakoj od četiri pomenute pozicije zasebno. Ovakav proces stimulacije značajno doprinosi ponovljivosti merenja [2]. Vreme očitavanja jednog dozimetra je aproksimativno 10-15 sekundi (važi za oba tipa). Signal koji se izmeri automatski se obrađuje i uz prethodnu kalibraciju sistema [7] softver proračunava dozu i automatski je beleži u internu bazu podataka.

4. Karakteristike mernog sistema u JP NOS

Karakteristike opisanog dozimetrijskog sistema pored ostalog ogledaju se u uslovima koje jedan ovakav sistem treba da ispunjava u cilju što pouzdanijeg merenja operativnih dozimetrijskih veličina. Kako su OSLD kraće u upotrebi od TLD u ličnoj dozimetriji, pri ispitivanju karakteristika sistema koriste se zahtevi iz međunarodnih standarda vezanih za TL dozimetriju (npr. IEC 61066).

Kontrola kvaliteta koja osigurava pouzdano očitavanje dozimetara čitačem uključuje: proveru odziva fotomultiplikatora (FM) merenjem kalibracionog izvora male jačine (beta standard ^{14}C fiksiran unutar čitača); proveru minimalnog signala koji se može detektovati FM-om („dark current“); proveru LED-a (merenjem odziva na FM); i očitavanje QC dozimetara (poznata doza) u cilju periodičnog testiranja sistema.

Jedna od značajnijih karakteristika OSL sistema je da se pri svakom ponovljenom očitavanju OSLD korisna informacija o apsorbovanoj dozi značajno ne gubi (svega 0,05% po očitavanju) [1]. Ovo praktično daje mogućnost očitavanja dozimetra više puta i uz karakteristiku malog fedinga ovih dozimetara (gubitak signala do 4% za 120 dana i više) [8] daje mogućnost očitavanja i odlaganja dozimetara za naknadnu analizu (trajni zapis izmerene doze). Takođe, mogućnost uzastopnog očitavanja dodatno smanjuje mernu nesigurnost i u tom smislu eliminiše potrebu za većim brojem dozimetara u jednom merenju, što nije slučaj kod TLD.

Energetska i ugaona zavisnost OSLD (na fantomu) je praktično zanemarljiva u opsegu energija 1-20 MeV (terapijska polja) [1,9,10]. Kod polja X zračenja tipičnih za medicinsku dijagnostiku (30 kVp-120 kVp) odziv detektora sačinjenog od aluminijum oksida ($Z_{\text{eff}} \sim 10$) je oko 3 puta veći [10]. U tom smislu, uz odgovarajuću kalibraciju sistema i unos odgovarajućih korektivnih faktora u softver microStar čitača [2], moguće je smanjiti grešku očitavanja. Na nižim energijama upadnog zračenja ugaoni odziv za uglove do 60° varira do 10% u odnosu na referentni upadni ugao od 90° [2].

Sledeća značajna karakteristika je linearnost odziva sistema na promenu apsorbovane doze. U opsegu apsorbovane doze od 1-300 cGy odziv sistema je linearan dok se iznad vrednosti od 300 cGy javlja mala supralinearnost [1,10]. MicroStar čitač predviđa ovakav odziv i omogućava programsku aproksimaciju nelinearnosti odziva polinomom drugog stepena za doze veće od 300 cGy [7].

Osetljivost OSL dozimetara ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$) sa porastom apsorbovane doze se ne menja za dozu akumuliranu do 20 Gy, a za veće doze opada oko 4% za dodatnih 10 Gy [1].

Pored toga, čitač OSL dozimetara je prenosiv (prednost trenutnog očitavanja na terenu), lagan i prilično jednostavan za upotrebu bez dodatnih delova kao što je boca za azot kod TLD i dodatne mehanike, što prilično smanjuje dimenzije uređaja i olakšava rukovanje i održavanje opreme.

5. Zaključak

Zbog jednostavnosti izrade i činjenice da očitavanje nije zasnovano na zagrevanju detektora, prenosni MicroStar OSL sistem je pogodan za kontolu izlaganja profesionalno izloženih lica i pacijenata na terenu. Između ostalih, sve predstavljene karakteristike sistema ukazuju na to da je, uz odgovarajuću kalibraciju, ovaj sistem pouzdan i primenljiv kako u poljima niskih energija (medicinska dijagnostika) tako i u poljima visokih energija (primena na nuklearnim objektima, terapijska polja). Dodatna prednost su dozimetari tipa NanoDot koji su zbog svojih malih dimenzija posebno pogodni za merenja na teško dostupnom i ograničenom prostoru (tzv. „merenja u tački“).

6. Literatura

- [1] P. A. Jursinic. Characterization of optically stimulated luminescent dosimeters, OSLDs, for clinical dosimetric measurements. *Med.Phys.* 34 (2007).
- [2] C. A. Perks, C. Zahnke and M. Million. Medical dosimetry using Optically Stimulated Luminescence dots and microStar[®] readers. *12th Congress of the International Radiation Protection Association*, Buenos Aires, 19-24 October 2008.
- [3] S. W. S. McKeever. Optically stimulated luminescence dosimetry. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* 184 (2001) 29-54.
- [4] C. A. Perks, G. L. Roy and B. Prugnaud. Introduction of the InLight monitoring service. *Radiation Protection Dosimetry.* 125 (2007) 220-223.
- [5] M. S. Akselrod, N. A. Larsen and S. W. S. McKeever. A procedure for the distinction between static and dynamic exposures of personal radiation badges using pulsed optically stimulated luminescence. *Radiation measurements.* 32 (2000) 215-225.
- [6] B. Timilsina and T. F. Gesell. Independent evaluation of optically stimulated luminescence(OSL) 'DOT' dosimeters for environmental monitoring. *Radiation Protection Dosimetry.* 143 (2011) 27-32.
- [7] C. J. Yahнке. Calibrating the microStar. *Landauer inc.* Rev.3, August 7, 2009.
- [8] J.F. Aguirre, P. Alvarez, C. Amador, A. Tailor, D. Followill and G. Ibbott. Commissioning of an Optically-Stimulated Luminescence (OSL) system for remote dosimetry audits. *Med. Phys.* 36, (2009).
- [9] V. Schembri and B. J. M. Heijmen. Optically stimulated luminescence (OSL) of carbon-doped aluminium oxide (Al₂O₃:C) for film dosimetry in radiotherapy. *Med. Phys.* 34, (2007).
- [10] C. S. Reft. The energy dependence and the dose response of a commercial optically stimulated luminescent detector for kilovoltage photon, megavoltage photon, and electron, proton, and carbon beams. *Med. Phys.* 36, (2009).

APPLICATION OF OPTICALLY STIMULATED LUMINESCENCE (OSL) DOSIMETERS IN PERSONAL DOSIMETRY

Luka PERAZIĆ, Nevena ZDJELAREVIĆ i Ivan KNEŽEVIĆ

JP „Nuklearni objekti Srbije“, Beograd, Srbija, lukaperazic@nuklearniobjekti.rs

ABSTRACT

This paper presents personal dosimetry system based on optically stimulated luminescence(OSL) dosimeters in the Department of personal dosimetry in PC "Nuclear Facilities of Serbia". Two types of dosimeters (Inlight and nanoDot), microStar reader, basic characteristics and the practical features of the measuring system were presented.

ODREĐIVANJE MERNE NESIGURNOSTI ETALONSKIH POLJA U METROLOGIJI DOZE ZRAČENJA

**Miloš ŽIVANOVIĆ, Đorđe LAZAREVIĆ, Olivera CIRAJ-BJELAC,
Srboľjub STANKOVIĆ**

Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Univerzitet u Beogradu, Srbija, milosz@vinca.rs

SADRŽAJ

Cilj ovog rada je identifikacija relevantnih veličina koje doprinose ukupnoj mernoj nesigurnosti kalibracionog koeficijenta, a koje korišćenje etalonskog polja unosi u proces etaloniranja dozimetara u oblasti zaštite od zračenja. Na primeru je pokazano računanje kombinovane merne nesigurnosti za slučaj etalonskog polja generisanog radioaktivnim izvorom ⁶⁰Co. Ovako izračunata merna nesigurnost iznosi 4.6% (k=2). Merna nesigurnost ovog reda veličine je adekvatna za etaloniranje velikog broja uređaja koji se koriste u zaštiti od zračenja, a čija je tačnost značajno manja od navedene vrednosti.

1. Uvod

Merna nesigurnost, za razliku od greške merenja, je relativno nov koncept. Uvedena je kao rezultat verovanja da čak i kada su svi poznati izvori greške uzeti u obzir i kada su primenjene sve potrebne korekcije, još uvek postoji sumnja (nesigurnost) u ispravnost prikazanog rezultata merenja. Način izražavanja merne nesigurnosti je stvar konvencije, a njegoVa standardizacija bi omogućila lakše poređenje rezultata istraživanja, bez obzira na to u kojoj su instituciji ili delu sveta rezultati nastali.

Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) i International Organization for Standardization (ISO) su donele čitav niz dokumenata [1, 2] sa ciljem da se standardizuje način izražavanja merne nesigurnosti. Pored toga, specijalizovani vodiči za primenu standarda su dostupni u različitim oblastima. Kada je u pitanju zaštita od zračenja, International Atomic Energy Agency (IAEA) donosi takve vodiče [3].

Sekundarna Standardna Dozimetrijska Laboratorija (SSDL) je laboratorija koja poseduje sekundarne standarde relevantne za dozimetriju. IAEA i World Health Organization (WHO) organizuju sistem SSDL-ova, u cilju uspostavljanja globalnog sistema sledljivosti rezultata merenja, od svakog korisnika pojedinačno pa do primarnih standarda.

U ovom radu je prikazan proračun merne nesigurnosti u skladu sa preporukama IAEA, ISO i BIPM pri etaloniranju etalonskih polja kakva se koriste u SSDL.

2. Merna nesigurnost

Merna nesigurnost u ovom radu je izražena u skladu sa relevantnim dokumentima [1-3]. Merna nesigurnost može biti tipa A, ukoliko je dobijena kao rezultat statističkih razmatranja ili tipa B, u svim ostalim slučajevima.

Za potrebe ovog rada, pretpostavljeno je da važi Gausova ili normalna funkcija raspodele ukoliko je neka vrednost određena statističkim putem. Nasuprot Gausovoj, pravougaona raspodela podrazumeva da se tačna vrednost nalazi sa verovatnoćom 1 u ograničenom intervalu i to sa podjednakom verovatnoćom bilo gde u intervalu. U najvećem broju slučajeva, u ovom radu je pretpostavljeno da mernim nesigurnostima tipa B odgovara pravougaona raspodela.

Propagacija merne nesigurnosti je izračunata korišćenjem jednačine (1), gde je $f = f(q_1, q_2, \dots, q_n)$, q_i ima mernu nesigurnost s_i a f ima mernu nesigurnost s . Identična formula je korišćena i u starijoj teoriji grešaka [1, 4]:

$$s^2 = \sum \left(\frac{\partial f}{\partial q_i} \right)^2 s_i^2 \quad (1)$$

3. Korišćenje etalonskih polja

U dokumentu [5] su opisana četiri postupka etaloniranja dozimetara u poljima fotonskog zračenja. Pored postupaka koji podrazumevaju korišćenje referentnih instrumenata, moguće je etaloniranje vršiti i uz korišćenje etalonskog polja.

Etalonsko polje predstavlja polje radioaktivnog izvora zračenja koje je etalonirano upotrebom odgovarajućih referentnih instrumenata (na primer, sekundarnih standarda). Korišćenje etalonskih polja se zasniva na pretpostavci da je na osnovu etaloniranja moguće predvideti dozu zračenja u određenoj tački, što je moguće isključivo uz praćenje određenog broja parametara, kao što su ambijentalni uslovi, širina snopa, geometrija prostorije, radioaktivni raspad radioizotopa itd.

Korišćenje etalonskog polja ubrzava i pojednostavljuje proces etaloniranja korisničkih uređaja. Međutim, zbog više aproksimacija koje se uvode, među kojima je najznačajnija pretpostavka da doza od primarnog zračenja opada sa kvadratom rastojanja od izvora, merna nesigurnost višestruko raste u odnosu na metode koje koriste referentni instrument, što ograničava upotrebu ove metode.

4. Model etaloniranja etalonskog polja

Model etaloniranja etalonskog polja se zasniva na sledećem razmatranju: ako doza opada sa kvadratom rastojanja, to znači da je proizvod qr^2 nezavisan od rastojanja (u ovom slučaju q predstavlja jačinu kerme u vazduhu, a r rastojanje od izvora) [7]. Pošto u realnim merenjima dolazi do odstupanja od navedene aproksimacije, potrebno je izmeriti jačinu doze na više rastojanja i izračunati srednje qr^2 . Ovakav pristup omogućava utvrđivanje opsega rastojanja u kome je navedena aproksimacija opravdana, poboljšanje procene srednje vrednosti i garanciju da će merna nesigurnost biti realistična (merenjem u samo jednoj tački bi došlo do značajnog potcenjivanja merne nesigurnosti).

Daljim razmatranjem se mogu prepoznati i drugi izvori merne nesigurnosti. Naime, pod uslovom da je referentni instrument jonizaciona komora, veličina q se računa kao $N_k k_{tp} q/t$, gde je N_k kalibracioni faktor referentnog instrumenta pri referentnim uslovima, k_{tp} faktor korekcije zbog razlike referentnih ambijentalnih uslova od uslova u toku merenja, q količina naelektrisanja razdvojena u referentnom instrumentu za vreme merenja t . Takođe važi $k_{tp} = P_{ref} T / (T_{ref} P)$, gde je T apsolutna temperatura, P vazdušni pritisak a supskript „ref“ označava referentne uslove [2, 5]. Pošto se traži srednja vrednost qr^2 , biće izmereno nekoliko serija vrednosti naelektrisanja na različitim rastojanjima, pa se uvodi indeks „i“ za pojedinačne vrednosti.

Vrednost koju je potrebno poznavati je jačina doze u određenoj tački u određenom trenutku, s tim što jačina doze ne mora obavezno da se izražava kao kerma u vazduhu, već se može koristiti neka druga dozimetrijska veličina. Srednju vrednost qr^2 je zbog toga neophodno pomnožiti recipročnim kvadratom rastojanja tačke za koju se računa jačina doze ($1/r_k^2$), konverzionim faktorom između odgovarajućih dozimetrijskih veličina (h_k) i faktorom korekcije na vreme poluraspada, $\exp(-\ln(2)\Delta t/t_{1/2})$, gde je $t_{1/2}$ vreme poluraspada korišćenog radioizotopa, a Δt vreme proteklo od etaloniranja do korišćenja etalonskog polja [5, 7]. Konačno, model etaloniranja u skladu sa navedenim razmatranjem se može predstaviti jednačinom (2).

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\overline{(q_i r_i^2)} N_k T P_{ref}}{t_i T_{ref} P} e^{-\frac{\ln(2)\Delta t}{t_{1/2}}} \frac{1}{r_k^2} h_k \quad (2)$$

5. Budžet merne nesigurnosti

Merna nesigurnost koju etalonsko polje unosi u etaloniranje se manifestuje kroz jačinu doze na rastojanju r . Zbog toga će budžet merne nesigurnosti biti predstavljen za jačinu doze u tački u kojoj se vrši kalibracija korisničkog dozimetra. Budžet je predstavljen po uzoru na [6] u tabeli 1.

Tabela 1. Budžet merne nesigurnosti; sve merne nesigurnosti su izražene kao standardne merne nesigurnosti (k=1)

Izvor nesigurnosti	Tip	Oznaka	Očekivana vrednost	Standardna nesigurnost	Raspodela
Proizvod naelektrisanja i kvadrata rastojanja	A	qr^2	45,92 nCm ² /h	2,10%	Gausova
Ostale nesigurnosti vezane za proizvod qr^2	B	-	-	0,06%	Gausova
Kalibracioni faktor jonizacione komore	B	N_k	47,9 mGy/nC	0,84%	Gausova
Temperatura	B	T	293,15 K	0,05%	pravougaona
Pritisak	B	P	1000 mbar	0,03%	pravougaona
Korekcija na vreme poluraspada	B	$\exp(-\ln(2)\Delta t/t_{1/2})$	0,7687	0,01%	pravougaona
Konverzioni faktor	B	h_k	1,16	0,25%	pravougaona
Kombinovana merna nesigurnost: 2,3%					

U ovom primeru je izračunata jačina ambijentalne doze, $H^*(10)$, dve godine od etaloniranja polja radioaktivnog izotopa ^{60}Co , zajedno sa pridruženim mernim nesigurnostima.

Prostim posmatranjem jednačine (2) je moguće identifikovati skoro sve značajne doprinose mernoj nesigurnosti. Na ovom mestu je potrebno napomenuti da se proizvod $q_i r_i^2$ tretira kao jedna veličina, zbog jednostavnijeg matematičkog aparata.

Osim mernih nesigurnosti koje direktno slede iz jednačine (1), postoji i čitav niz drugih veličina koje doprinose kombinovanoj mernoj nesigurnosti. Takve veličine su kalibracioni koeficijent termometra i barometra, rezolucija svih korišćenih instrumenata, vlažnost vazduha, promena položaja izvora pri ponovnim ekspozicijama, stabilnost jonizacione komore itd. Za slabija polja, značajan uticaj mogu imati fon i struja curenja. Za navedene uticajne veličine je procenjena merna nesigurnost značajno manja od 0.1%, pa nisu unete u budžet merne nesigurnosti.

Standardna merna nesigurnost računanja datuma je procenjena 0,29 dana (tj. sa $p=1$, tačna vrednost razlike datuma se nalazi u $\Delta t \pm 0.5$ dana, a važi pravougaona raspodela).

Pored merne nesigurnosti tipa A proizvoda qr^2 , značajan doprinos daje i rezolucija očitavanja rastojanja, koja je uključena u budžet merne nesigurnosti pod stavkom „Ostale nesigurnosti vezane za proizvod qr^2 “.

Uobičajeno je da se kombinovana merna nesigurnost prikazuje sa nivoom poverenja 95%. Pretpostavljeno je da kombinovanoj mernoj nesigurnosti u ovom slučaju približno odgovara Gausova raspodela, pa je odgovarajući koeficijent proširenja $k=2$. Budući da su u tabeli 1 navođene isključivo standardne merne nesigurnosti, konačan rezultat je: $u_c(p=0,95) = 4.6\%$. Potrebno je napomenuti da je u ovom slučaju veličina r_k bez merne nesigurnosti, jer predstavlja parametar u proračunu koji zadaje metrolog. Međutim, u toku samog etaloniranja, korisnički uređaj se postavlja u tačku r_k pri čemu je potrebno razmotriti mernu nesigurnost koju unosi pozicioniranje.

6. Zaključak

U ovom radu su identifikovani doprinosi ukupnoj mernoj nesigurnosti koje korišćenje etalonskog polja unosi u proces etaloniranja dozimetara u oblasti zaštite od zračenja. Na primeru je pokazano računanje kombinovane merne nesigurnosti za slučaj etalonskog polja generisanog radioaktivnim izvorom. Ovako izračunata merna nesigurnost iznosi 4.6% ($k=2$). Merna nesigurnost ovog reda veličine je adekvatna za etaloniranje velikog broja uređaja koji se koriste u zaštiti od zračenja, a čija je tačnost značajno manja od navedene vrednosti.

7. Literatura

- [1] BIPM, JCGM. JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008
- [2] ISO, IEC. ISO/IEC Guide 98-1:2009, Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement, 2009
- [3] IAEA. Measurement uncertainty: A practical guide for secondary standards dosimetry laboratory, 2008
- [4] H.H.Ku. Notes on the use of propagation of error formulas, *Journal of research of the national bureau of standards – C. Engineering and instrumentation*, Vol. 70C, No.4, 1966, pp. 263 - 273
- [5] IAEA. IAEA Safety Report Series No. 16: Calibration of radiation protection monitoring instrument, 2000
- [6] Predrag Osmokrović, Kovičljka Stanković, Miloš Vujisić, Merna nesigurnost, Akademska misao, Beograd i Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2009
- [7] G.F. Knoll. Radiation Detection and Measurement, 4th edition. USA, John Wiley & Sons, Inc, 2010

UNCERTAINTY OF CALIBRATION IN THE FIELD OF RADIATION PROTECTION

Miloš ŽIVANOVIĆ, Đorđe LAZAREVIĆ, Olivera CIRAJ-BJELAC,
Srboljub STANKOVIĆ

„Vinča“ Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Serbia, milosz@vinca.rs

ABSTRACT

The purpose of this paper is the identification of the relevant influence quantities contributing to the combined measurement uncertainty of calibration coefficient, that are introduced by using reference radiation qualities in the field of radiation protection. An example calculation of combined measurement uncertainty is shown for a ^{60}Co radiation source. The calculated measurement uncertainty is 4.6% ($k=2$), and it is adequate for the purposes of calibration of many dosimeters used in the field of radiation protection, which have bad accuracy compared to the calculated value.

RADIOLOŠKA KARAKTERIZACIJA TRANSPORTNOG PAKOVANJA TIPA TUK-19 PRILIKOM UTOVARA I TRANSPORTA OZRAČENOG NUKLEARNOG GORIVA IZ ISTRAŽIVAČKOG REAKTORA RA U RUSKU FEDERACIJU

**Nevena ZDJELAREVIĆ, Ivan KNEŽEVIĆ, Luka PERAZIĆ i
Nataša LAZAREVIĆ**

Javno preduzeće "Nuklearni objekti Srbije", Vinča, Srbija, nena_flo@hotmail.com

SADRŽAJ

U sklopu međunarodnog RRRFR programa, Srbija je 2010. godine transportovala ozračeno nuklearno gorivo iz istraživačkog reaktora RA u Rusku Federaciju. Za transport ozračenog goriva korišćena su dva tipa transportnih kontejnera: ŠKODA VPVR/M i TUK-19, po 16 od oba tipa, koji su pakovani u standardne ISO kontejnere. U radu su prikazani rezultati radiološke karakterizacije transportnih pakovanja tipa TUK-19 i ISO kontejnera, pri čemu je ustanovljeno da su bili ispunjeni svi dozimetrijski uslovi za transport nuklearnog materijala prema međunarodnim konvencijama i standardima.

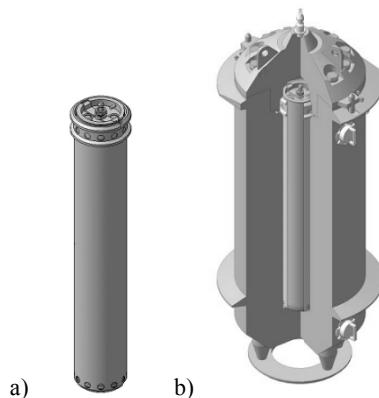
1. Uvod

Ruska Federacija, SAD i Međunarodna agencija za atomsku energiju (MAAE) pokrenule su 1999. godine tzv. RRRFR program (eng. *Russian Research Reactors Fuel Return Programme*), u okviru koga su pozvane sve zemlje koje koriste ili su koristile gorivne elemente ruskog porekla da vrate svoje ozračeno nuklearno gorivo (ONG) u Rusku Federaciju [1,2].

U toku 25 godišnjeg rada istraživačkog reaktora RA proizvedeno je više od 2.5 tona ozračenih gorivnih elemenata koji su privremeno čuvani u bazenima za ozračeno nuklearno gorivo koji se nalaze u sastavu zgrade reaktora. Avgusta 2002. godine vraćeno je sveže nuklearno gorivo u Rusku Federaciju, a 2010. vraćeno je i ozračeno nuklearno gorivo. Gorivni elementi su se nalazili u aluminijumskim burićima i čeholima od nerđajućeg čelika, pri čemu su gorivni elementi niskog obogaćenja (2% ^{235}U) bili pakovani i u aluminijumske buriće i u čehole, dok su se gorivni elementi visokog obogaćenja (80% ^{235}U) nalazili samo u čeholima od nerđajućeg čelika. Pre transporta, gorivni elementi su prepakovani u kanistere tipa TS1 i TS2, pri čemu su samo kanisteri tipa TS1 pakovani u kontejnere tipa TUK-19 i to po jedan kanister u jedan kontejner. Kako je bilo 16 kanistera tipa TS1, bilo je potrebno 16 kontejnera TUK-19. Za transport kontejnera TUK-19 korišćeno je 6 specijalnih ISO kontejnera, u svaki ISO kontejner bilo je spakovano dva ili najviše tri TUK-19 [3,4].

TUK-19 sastoji se od tela kontejnera i poklopca (slika 1). Kontejner je cilindar sa debelim zidom unutrašnjeg prečnika od 22 cm, i visinom od 2.17 m. Kontejneri su tako konstruisani da omogućavaju da sistem absorbuje mehaničke udare u samom kontejneru kao i u slučaju pada kontejnera [1]. Pod transportnim pakovanjem podrazumeva se transportni kontejner sa napunjenim ozračenim gorivnim elementima.

U ovom radu prikazani su rezultati radiološke karakterizacije transportnog pakovanja tipa TUK-19 sa ozračenim nuklearnim gorivom, kao i ISO kontejnera.



**Slika 1. Transportni kontejner
a) kanister tipa TS1, b) TUK-19sa kanisterima**

2. Metoda merenja

Radiološka karakterizacija rađena je u dve faze. Prva od njih je podrazumevala radiološku pretragu i detektovanje eventualnih vrućih tačaka (eng. *hot spot*), merenjem jačine ekvivalentne doze gama i neutronskog zračenja na površini kontejnera. Druga faza je predstavljala određivanje vrednosti nivoa prenosne površinske kontaminacije metodom uzimanja brisa sa površine ispitivanog predmeta prema unapred, standardom utvrđenoj, metodologiji uzorkovanja [5-7].

Za merenje prenosne površinske kontaminacije korišćena je indirektna metoda merenja, korišćenjem vlažanog brisa, pri čemu je uzeto da faktor prenosa kontaminacije na bris iznosi 10%. Uređaj Canberra Radiagem 2000 sa sondama SABG15 i SAB100 je korišćen za merenje beta/gama i alfa kontaminacije, respektivno. Efikasnost uređaja za merenje beta/gama kontaminacije iznosi 35 % za radionuklid ^{60}Co , dok je efikasnost uređaja za merenje alfa kontaminacije 37% za većinu alfa emitera.

Merenje jačine ekvivalentne doze gama zračenja izvršeno je Canberrinim uređajem InSpector 1000 sa NaI sondom IPROS-2, osetljivosti 1300cps/(mSv/h) za ^{137}Cs , dok je za merenje jačine ekvivalentne doze neutronskog zračenja korišćen ruski uređaj ASPECT MKC-A03 sa ^3He detektorom termičkih neutrona.

Greške merenja površinske kontaminacije metodom uzimanja brisa su bile $\pm 25\%$, dok su greške merenja jačine gama doze bile $\pm 20\%$, a jačine neutronske doze $\pm 40\%$.

Dozimetrijski uslovi koje su transportni kontejneri morali da ispune su[8]:

- Maksimalna jačina ekvivalentne doze ne sme biti veća od 2 mSv/h u bilo kojoj tački na površini kontejnera,
- Maksimalna jačina ekvivalentne doze ne sme biti veća od 0.1 mSv/h u bilo kojoj tački na 2m od kontejnera,
- Nevezana kontaminacija na površini kontejnera ne sme preći 4.0 Bq/cm^2 za beta i gama radionuklide, kao i za alfa radionuklide sa malom toksičnošću, i
- Nevezana kontaminacija na površini kontejnera ne sme preći 0.4 Bq/cm^2 za alfa radionuklide sa velikom toksičnošću.

3. Rezultati i diskusija

Tabela 1 prikazuje rezultate merenja prenosne površinske kontaminacije (beta/gama i alfa) i gama i neutronske jačine ekvivalentne doze za transportne kontejnere tipa TUK-19 sa kanisterima tipa TS1. Prenosna površinska kontaminacija beta/gama i alfa emiterima je bila u okviru prihvatljivih vrednosti za ovaj tip transportnog pakovanja [8]. Ekvivalentne doze gama zračenja na površini, kao i na 1 m od kontaktkontejnera tipa TUK-19, bile su za oko red veličine veće nego u slučaju kontejnera tipa ŠKODA VPVR/M, i maksimalne vrednosti na kontaktu su se kretale od 26.1 do 52.1 $\mu\text{Sv/h}$, dok su se na 1 m od kontakta kretale od 3.3 do 9.0 $\mu\text{Sv/h}$. Izmerene maksimalne jačine ekvivalentne neutronske doze na površini paketa su bile u opsegu od 2.52 do 4.61 $\mu\text{Sv/h}$. Kako su vrednosti jačine doza na 1 m od pakovanja bile ispod vrednosti zahtevanih za transport, i vrednosti na 2 m su zadovoljile transportne uslove.

Tabela 1. Izmereni parametri prilikom radiološke karakterizacije kontejnera tipa TUK-19

Oznaka kontejnera	Maksimalna prenosna površinska kontaminacija β/γ [Bq/cm^2]	Maksimalna prenosna površinska kontaminacija α [Bq/cm^2]	Maksimalna jačina ekvivalentne doze gama (γ) i neutronske (n) zračenja [$\mu\text{Sv/h}$]			
			Na kontaktu sa kontejnerom		Na 1 m od kontejnera	
			γ	n	γ	n
001	< 0.6	< 0.4	52.10	2.90	8.00	0.90
002	< 0.6	< 0.4	41.10	4.30	9.00	0.90
003	2.0	< 0.4	26.10	2.74	3.60	< 0.5
004	< 0.6	< 0.4	39.70	2.66	4.20	< 0.5
005	< 0.6	< 0.4	44.60	2.52	4.90	0.72
006	1.30	< 0.4	41.30	4.61	4.40	0.72
007	2.14	< 0.4	49.60	4.11	4.30	0.72
008	0.9	< 0.4	44.40	3.66	3.30	0.72
009	< 0.6	< 0.4	39.90	4.25	3.40	0.58
010	2.27	< 0.4	47.70	3.96	5.90	0.94
011	0.8	< 0.4	40.20	4.32	4.70	0.65
012	< 0.6	< 0.4	50.10	3.70	6.67	1.20
013	1.37	< 0.4	50.60	3.70	8.30	1.20
014	0.94	< 0.4	50.60	3.80	7.00	0.90
015	2.34	< 0.4	49.00	3.80	7.02	0.80
016	1.07	< 0.4	44.40	3.60	7.44	0.90

U tabeli 2 prikazane su izmerene vrednosti radioloških parametara za ISO kontejnere sa upakovanim TUK-19. Nije ustanovljeno prisustvo prenosne kontaminacije ni beta/gama ni alfa emiterima. Maksimalna ekvivalentna doza gama zračenja za ISO kontejnere sa TUK-19 su bile u opsegu od 8.1 do 16.50 $\mu\text{Sv/h}$ na kontaktu, od 3.0 do 6.8 na 1 m i od 1.9 $\mu\text{Sv/h}$ do 4.60 $\mu\text{Sv/h}$ na 2 m od kontaktne površine.

Tabela 2. Izmereni parametri prilikom radiološke karakterizacije ISO kontejnera sa TUK-19 kontejnerima

Oznaka kontejnera		Maksimalna prenosna površinska kontaminacija β/γ [Bq/cm ²]		Maksimalna prenosna površinska kontaminacija α [Bq/cm ²]		Maksimalna jačina ekvivalentne doze gama zračenja [μ Sv/h]		
ISO	TUK-19	up ⁽¹⁾	sp ⁽²⁾	up ⁽¹⁾	sp ⁽²⁾	k ⁽³⁾	1 m ⁽⁴⁾	2 m ⁽⁵⁾
POMU 0000065	01	< 0.6	< 0.6	< 0.4	< 0.4	10.20	4.05	3.05
	02							
POMU 0000044	12	< 0.6	< 0.6	< 0.4	< 0.4	16.50	6.80	4.60
	13							
	14							
POMU 0000023	06	< 0.6	< 0.6	< 0.4	< 0.4	8.90	3.50	2.10
	07							
	08							
POMU 0000039	09	< 0.6	< 0.6	< 0.4	< 0.4	8.10	3.80	2.10
	10							
	11							
POMU 0000050	15	< 0.6	< 0.6	< 0.4	< 0.4	10.50	4.90	4.10
	16							
POMU 0000018	03	< 0.6	< 0.6	< 0.4	< 0.4	8.30	3.00	1.90
	04							
	05							

⁽¹⁾ unutrašnja površina, ⁽²⁾ spoljašnja površina, ⁽³⁾ na kontaktu sa kontejnerom, ⁽⁴⁾ na 1 m od površine kontejnera, ⁽⁵⁾ na 2 m od površine kontejnera

4. Zaključak

Rezultati merenja prenosne površinske kontaminacije alfa i beta/gama emitera, kao i jačina ekvivalentne doze neutronskog i gama zračenja na kontaktu, na 1m i na 2m od transportnog pakovanjaukazuju da su bili ispunjeni uslovi za transport nuklearnog materijala, što je i potvrđeno u merenjima na granicama država kroz koje se kretao transport[9].Na osnovu izmerenih radioloških parametaraprilikom procesa transporta ONG iz Srbije u Rusku Federaciju, a prema međunarodnim konvencijama i standardima,može se zaključiti da je eventualni radijacioni uticaj na stanovništvo i životnu sredinu sveden na prihvatljiv nivo [10,11].

5. Literatura

- [1] IAEA-TECDOC-1632, *Experience of Shipping Russian-Origin Research Reactor Spent Fuel to the Russian Federation*, IAEA, Vienna, 2009
- [2] S.Tozser, et al. *Ten Years of IAEA Cooperation with the Russian Research Reactor Fuel Return Programme*, RERTR 2011-33rd International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Chile
- [3] Technical Specifications, *Spent fuel assemblies of the Vinca RA Reactor (Republic of Serbia). Delivery to the Russian radiochemical plant at FSUE "PA "Mayak"*, No 1011/3, 2009.
- [4] Istraživačka i razvojna organizacija "Sosny", Institut za nuklearne nauke "Vinča" – Centar za nuklearne tehnologije i istraživanja "NTI" i Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, *Konačni izveštaj o sigurnosti za prepakivanje i privremeni smeštaj ozračenog nuklearnog goriva reaktora RA*, Vinča, jun 2009.
- [5] ISO 7503-1, *Evaluation of surface contamination-beta-emitters (maximum beta energy greater than 0.15 MeV) and alpha-emitters*, 1988
- [6] ISO 7503-3, *Evaluation of surface contamination-Isomeric transition and electron capture emitters, low energy beta emitters ($E_{\beta\max} < 0,15 \text{ MeV}$)*, 1988
- [7] NUREG 1575, *Multy-Agency Radiation Survey and Site Investigation*, 2001
- [8] IAEA, TS-R-1, *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, Vienna, 2009
- [9] *Primopredajni dokument za radiološki nadzor*, 01/2010-Vinca-Koper
- [10] *Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije*, Službeni glasnik Republike Srbije 38/11, 2011
- [11] IAEA, Safety Standards Series No. SF-1, *Funfamental Safety Principles*, Vienna, 2006

RADIOLOGICAL SURVEY OF TRANSPORT CASK TUK-19 WITH SPENT NUCLEAR FUEL FROM RESEARCH REACTOR RA TO THE RUSSIAN FEDERATION

Nevena ZDJELAREVIĆ, Ivan KNEŽEVIĆ, Luka PERAZIĆ and Nataša LAZAREVIĆ
Public Company "Nuclear Facilities of Serbia", Vinca, Serbia, nena_flo@hotmail.com

ABSTRACT

In the end of 2010, the spent nuclear fuel was transported to the Russian Federation from Serbia, under the frame of the so-called Russian Research Reactor Fuel Return Programme (RRFR). Sixteen casks TUK-19 have been used for the transport of spent nuclear fuel. The casks were loaded into ISO-containers. The radiological survey of the transport cask TUK-19 and ISO-containers has been conducted before the transport. It has been found that all necessary conditions for the transport of nuclear material were fulfilled.

RADIOLOŠKA KARAKTERIZACIJA TRANSPORTNOG PAKOVANJA TIPRA ŠKODA VPVR/M PRILIKOM UTOVARA I TRANSPORTA OZRAČENOG NUKLEARNOG GORIVA IZ ISTRAŽIVAČKOG REAKTORA RA U RUSKU FEDERACIJU

Nevena ZDJELAREVIĆ, Ivan KNEŽEVIĆ, Luka PERAZIĆ i Nataša LAZAREVIĆ

Javno preduzeće "Nuklearni objekti Srbije", Vinča, Srbija, nena_flo@hotmail.com

SADRŽAJ

U sklopu međunarodnog RRRFR programa, Srbija je 2010. godine transportovala ozračeno nuklearno gorivo iz istraživačkog reaktora RA u Rusku Federaciju. Za transport ozračenog goriva korišćena su dva tipa transportnih kontejnera: ŠKODA VPVR/M i TUK-19, po 16 od oba tipa, koji su pakovani u standardne ISO kontejnere. Rezultati radiološke karakterizacije transportnog pakovanja tipa ŠKODA VPVR/M i ISO kontejneraukazuju da su bili ispunjeni svi propisani uslovi za transport nuklearnog materijala prema međunarodnim konvencijama i standardima.

1. Uvod

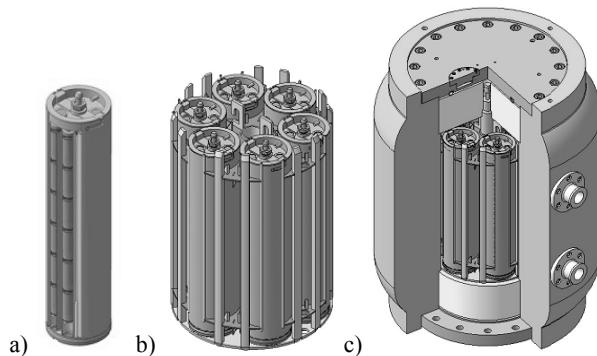
Ruska Federacija, SAD i Međunarodna agencija za atomsku energiju (MAAE) pokrenule su 1999. godine tzv. RRRFR program (eng. *Russian Research Reactors Fuel Return Programme*), u okviru koga su pozvane sve zemlje koje koriste ili su koristile gorivne elemente ruskog porekla da vrate svoje ozračeno nuklearno gorivo (ONG) u Rusku Federaciju. Od 2006. ostvareno je ukupno 22 transporta ONGsa oko 987 kg visoko obogaćenog uranijuma, pri čemu je transport ozračenog nuklearnog goriva iz Srbije predstavljao najveću pošiljku ove vrste i ovaj projekat je predstavljao najveći i najkompleksniji TC (eng. *Technical Cooperation*) projekat u istoriji rada MAAE [1,2].

Prilikom transporta ONG iz istraživačkog reaktora RA u Rusku Federaciju, prenešeno je ukupno 110 kanistera sa ukupno 8030 ozračenih gorivnih elemenata, od kojih je 6656 gorivnih elemenata niskog obogaćenja (2% ²³⁵U), a 1374 gorivnih elementa visokog obogaćenja (80% ²³⁵U). Zbog stanja gorivnih elemenata kao i burića u kojima su se nalazili bilo je potrebno izraditi posebne korpe u koje su smešteni kanisteri, a zatim su te korpe pakovane u transportne kontejnere.

Uzimajući u obzir tehnološke i ekonomske aspekte, kao i uslov da su svi gorivni elementi morali biti vraćeni u isto vreme, odlučeno je da se koriste kontejneri tipa TUK-19 i tipa ŠKODA VPVR/M [4]. Kako bi kompletno ozračeno nuklearno gorivo iz istraživačkog reaktora RA moglo da bude transportovano odjednom u Rusku Federaciju bilo je potrebno 32 transportna kontejnera (po 16 od oba tipa). Postojala su dva tipa kanistera: TS1 i TS2. Samo kanisteri tipa TS2 su pakovani u ŠKODA VPVR/M kontejnere (po 6 u svakoj korpi, odnosno transportnom kontejneru) [3,4].

Za transport ozračenog nuklearnog goriva korišćeno je ukupno 15 specijalnih ISO kontejnera: u 14 je bilo upakovano 32 transportna kontejnera, a u jednom ISO kontejneru je bila upakovana oprema za rukovanje transportnim kontejnerom TUK-19.

ŠKODA VPVR/M je masivni čelični cilindrični kontejner debljine 0.3 m i visine 2.155 msa konvergentnim donjim i gornjim delovima (slika 1). Unutrašnja površina kontejnera je prekrivena aluminijumskim slojem, a ceo paket je zatvoren sistemom od dva gornja i dva donja poklopca [1].



Slika 1. Transportni kontejner
a) kanister tipa TS2, b) korpa sa kanisterima, c) ŠKODA VPVR/M

Pod transportnim pakovanjem podrazumeva se transportni kontejner sa napunjenim ozračenim gorivnim elementima.

U ovom radu prikazani su rezultati radiološke karakterizacije transportnog pakovanjatipa ŠKODA VPVR/M i ISO kontejnerasa ozračenim nuklearnim gorivom.

2. Metoda merenja

Radiološka karakterizacija rađena je u dve faze. Prva faza je podrazumevala radiološku pretragu i detektovanje eventualnih vrućih tačaka (eng. *hot spot*), merenjem jačine ekvivalentne doze gama i neutronsog zračenja na površini kontejnera. Druga faza je predstavljala određivanje vrednosti nivoa prenosne površinske kontaminacije metodom uzimanja brisa sa površine ispitivanog predmeta prema unapred, standardom utvrđenoj, metodologiji uzorkovanja [5-7].

Merenje jačine ekvivalentne doze gama zračenja izvršeno je Canberra uređajem InSpector 1000 sa NaI sondom IPROS-2, osetljivosti 1300cps/(mSv/h) za ^{137}Cs , dok je za merenje jačine ekvivalentne doze neutronsog zračenja korišćen ruski uređaj ASPECT MKC-A03 sa ^3He detektorom termičkih neutrona. Za merenje prenosne površinske kontaminacije korišćena je indirektna metoda merenja, korišćenjem vlažanog brisa, pri čemu je uzeto da faktor prenosa kontaminacije na bris iznosi 10%. Uređaj Canberra Radiagem 2000 sa sondama SABG15 i SAB100 je korišćen za merenje beta/gama i alfa kontaminacije, respektivno. Efikasnost uređaja za merenje beta/gama kontaminacije iznosi 35 % za radionuklid ^{60}Co , dok je efikasnost uređaja za merenje alfa kontaminacije 37% za većinu alfa emitera.

Greške merenja površinske kontaminacije metodom uzimanja brisa su bile $\pm 25\%$, dok su greške merenja jačine gama doze bile $\pm 20\%$, a jačine neutronske doze $\pm 40\%$.

Propisani uslovi koje transportni kontejner mora da ispuni je da maksimalna jačina ekvivalentne doze ne sme biti veća od 2 mSv/h u bilo kojoj tački na površini kontejnera, i 0.1 mSv/h u bilo kojoj tački na 2m od kontejnera. Nevezana kontaminacija na površini kontejnera ne sme preći 4.0 Bq/cm² za beta i gama radionuklide, kao i za alfa radionuklide sa malom toksičnošću, i 0.4 Bq/cm² za alfa radionuklide sa velikom toksičnošću [8].

3. Rezultati i diskusija

U tabeli 1 prikazani su rezultati merenja prenosne površinske kontaminacije (beta/gama i alfa) i gama i neutronske jačine ekvivalentne doze za transportne kontejnere tipa ŠKODA VPVR/M u koje su pakovani samo kanisteri tipa TS2. Kao što se vidi, na spoljašnjoj površini paketa tipa ŠKODA VPVR/M, nije otkriveno prisustvo prenosne površinske kontaminacije, kako beta/gama tako ni alfa emitera.

Maksimalne jačine ekvivalentne doze gama zračenja na kontaktu bile su u opsegu od 0.17 do 1.40 $\mu\text{Sv/h}$, dok su za neutrone bile od 2.30 do 8.88 $\mu\text{Sv/h}$. Na 1 m od pakovanja, maksimalne jačine ekvivalentne doze kretale su se od 0.09 do 0.89 $\mu\text{Sv/h}$ za gama emitere i od 0.65 do 2.91 $\mu\text{Sv/h}$, za neutrone. Kako su vrednosti jačine doza na 1 m od pakovanja bile ispod vrednosti zahtevanih za transport, i vrednosti na 2 m su zadovoljile transportne uslove[8].

Tabela 1. Rezultati radiološke karakterizacije kontejnera tipa ŠKODA VPVR/M

Oznaka kontejnera	Maksimalna prenosna površinska kontaminacija β/γ [Bq/cm^2]	Maksimalna prenosna površinska kontaminacija α [Bq/cm^2]	Maksimalna jačina ekvivalentne doze gama (γ) i neutronskog (n) zračenja [$\mu\text{Sv/h}$]			
			Na kontaktu sa kontejnerom		Na 1 m od kontejnera	
			γ	n	γ	n
001	< 0.6	< 0.4	0.63	5.84	0.12	2.74
002	< 0.6	< 0.4	0.63	8.00	0.13	1.80
003	< 0.6	< 0.4	0.53	6.77	0.12	2.16
004	< 0.6	< 0.4	0.77	5.84	0.17	0.86
005	< 0.6	< 0.4	1.40	8.50	0.18	2.45
006	< 0.6	< 0.4	0.42	8.88	0.099	2.91
007	< 0.6	< 0.4	0.61	7.42	0.14	1.37
008	< 0.6	< 0.4	0.55	5.76	0.14	0.79
009	< 0.6	< 0.4	0.66	6.56	0.12	2.31
010	< 0.6	< 0.4	0.63	2.60	0.13	0.70
011	< 0.6	< 0.4	0.66	2.30	0.13	0.80
012	< 0.6	< 0.4	0.95	2.30	0.75	0.65
013	< 0.6	< 0.4	0.17	5.84	0.092	0.79
014	< 0.6	< 0.4	0.49	5.91	0.89	0.94
015	< 0.6	< 0.4	0.75	5.98	0.22	0.86
016	< 0.6	< 0.4	0.82	6.41	0.12	0.86

U tabeli 2 prikazane su izmerene vrednosti radioloških parametra za ISO kontejnere sa upakovanim ŠKODA VPVR/M. Nije ustanovljeno prisustvo prenosne kontaminacije ni beta/gama ni alfa emiterima. Maksimalna ekvivalentna doza gama zračenja se kretala u opsegu od 0.17 do 0.57 $\mu\text{Sv/h}$, na kontaktu, od 0.065 do 0.35 na 1 m i od 0.055 do 0.3 $\mu\text{Sv/h}$, na 2m od kontaktne površine.

Tabela 2. Rezultati radiološke karakterizacije ISO kontejnera sa ŠKODA VPVR/M kontejnerima

Oznaka kontejnera		Maksimalna prenosna površinska kontaminacija β/γ [Bq/cm ²]		Maksimalna prenosna površinska kontaminacija α [Bq/cm ²]		Maksimalna jačina ekvivalentne doze gama zračenja [μ Sv/h]		
ISO	ŠKODA VPVR/M	up ⁽¹⁾	sp ⁽²⁾	up ⁽¹⁾	sp ⁽²⁾	k ⁽³⁾	1 m ⁽⁴⁾	2 m ⁽⁵⁾
DSTU 0000087	003	< 0.6	< 0.6	< 0.4	< 0.4	0.26	0.090	0.070
	006							
DSTU 0000132	001	< 0.6	< 0.6	< 0.4	< 0.4	0.24	0.084	0.065
	005							
DSTU 0000111	009	< 0.6	< 0.6	< 0.4	< 0.4	0.21	0.089	0.059
	011							
DSTU 0000066	010	< 0.6	< 0.6	< 0.4	< 0.4	0.17	0.081	0.065
	012							
DSTU 0000024	002	< 0.6	< 0.6	< 0.4	< 0.4	0.26	0.083	0.076
	004							
DSTU 0000092	007	< 0.6	< 0.6	< 0.4	< 0.4	0.30	0.065	0.055
	016							
DSTU 0000030	013	< 0.6	< 0.6	< 0.4	< 0.4	0.25	0.110	0.110
	014							
DSTU 0000050	015	< 0.6	< 0.6	< 0.4	< 0.4	0.57	0.350	0.300
	008							

¹⁾unutrašnja površina, ²⁾spoljašnja površina, ³⁾na kontaktu sa kontejnerom, ⁴⁾na 1 m od površine kontejnera, ⁵⁾na 2 m od površine kontejnera

4. Zaključak

Na osnovu ispitivanja prenosne površinske kontaminacije alfa i beta/gama emitera, kao i jačina ekvivalentne doze neutronskog i gama zračenja na kontaktu, na 1m i na 2m od transportnog pakovanja može se zaključiti da su bili ispunjeni uslovi za transport nuklearnog materijala, što je i potvrđeno u merenjima na granicama država kroz koje se kretao transport[9]. Prema međunarodnim konvencijama i standardima, za izmerene vrednosti radijacionih parametara može se zaključiti da prilikom procesa transporta ONG iz Srbije u Rusku Federaciju, eventualni radijacioni uticaj na stanovništvo i životnu sredinu je sveden na prihvatljiv nivo [10,11].

5. Literatura

- [1] IAEA-TECDOC-1632, *Experience of Shipping Russian-Origin Research Reactor Spent Fuel to the Russian Federation*, IAEA, Vienna, 2009
- [2] S.Tozser, et al. *Ten Years of IAEA Cooperation with the Russian Research Reactor Fuel Return Programme, RERTR 2011-33rd International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Chile*
- [3] Technical Specifications, *Spent fuel assemblies of the Vinca RA Reactor (Republic of Serbia). Delivery to the Russian radiochemical plant at FSUE "PA "Mayak"*, No 1011/3, 2009.
- [4] Istraživačka i razvojna organizacija "Sosny", Institut za nuklearne nauke "Vinča" – Centar za nuklearne tehnologije i istraživanja "NTI" i Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, *Konačni izveštaj o sigurnosti za prepakivanje i privremeni smeštaj ozračenog nuklearnog goriva reaktora RA*, Vinča, jun 2009.
- [5] ISO 7503-1, *Evaluation of surface contamination-beta-emitters (maximum beta energy greater than 0.15 MeV) and alpha-emitters*, 1988
- [6] NUREG 1575, *Multy-Agency Radiation Survey and Site Investigation*, 2001
- [7] IAEA, TS-R-1, *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, Vienna, 2009
- [8] *Primopredajni dokument za radiološki nadzor*, 01/2010-Vinca-Koper
- [9] *Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije*, Službeni glasnik Republike Srbije 38/11, 2011
- [10] IAEA, Safety Standards Series No. SF-1, *Funfamental Safety Principles*, Vienna, 2006

RADIOLOGICAL SURVEY OF TRANSPORT CASK SKODA VPVR/M WITH SPENT NUCLEAR FUEL FROM RESEARCH REACTOR RA TO THE RUSSIAN FEDERATION

Nevena ZDJELAREVIĆ, Ivan KNEŽEVIĆ, Luka PERAZIĆ and Nataša LAZAREVIĆ
Public Company "Nuclear Facilities of Serbia", Vinca, Serbia, nena_flo@hotmail.com

ABSTRACT

In the end of 2010, the spent nuclear fuel was transported to the Russian Federation from Serbia, under the frame of the so-called Russian Research Reactor Fuel Return Programme (RRRFR). For the transport of spent nuclear fuel two types of the casks were used; ŠKODA VPVR/M and TUK-19, 16 of each kind. The casks were loaded into ISO-containers. The radiological survey of the transport casks ŠKODA VPVR/M and ISO-containers has been conducted and it has been found that all necessary conditions for the transport of nuclear material were fulfilled.

PROCENA DOZE PRILIKOM DEKOMISIJE I INSTALACIJE IZVORA ZRAČENJA ^{60}Co U UREĐAJU ZA TELETERAPIJU

Slaviša STANIŠIĆ, Rajko DOBRIJEVIĆ, Duško KOŠUTIĆ, Olivera CIRAJ-BJELAC
Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, ociraj@vinca.rs

SADRŽAJ

U radu su prikazani rezultati dozimetrijskih merenja i procene doze od spoljašnjeg izlaganja za učesnike operacija dekomisije i instalacije izvora zračenja u uređaj za teleterapiju poljima gama zračenja ^{60}Co . Sve operacije izvedene su bez značajnih problema i u skladu sa osnovnim principima zaštite od zračenja a najveća pojedinačna doza iznosila je 170 μSv za celo telo i 227 μSv za ekstremitete, uzimajući u obzir sve faze operacije.

1. Uvod

Uređaj za eksternu terapiju snopovima gama zračenja sa ugrađenim radioaktivnim izvorom ^{60}Co korišteni su u prošlosti za terapiju površinskih tumora i tumora lociranih u predelu glave i vrata, ali imajući u vidu veću efikasnost i niz drugih prednosti, radioterpijski uređaji sa kobaltom su u mnogim cenrma zamenjeni linearnim akceleratorima [1]. Usled smanjenja aktivnosti radionuklida sa vremenom, uređaji sa ugrađenim izvorom zračenja ^{60}Co zahtevaju povremenu zamenu izvora, odnosno dekomisiju i instalaciju novog izvora ^{60}Co veće aktivnosti. U ovom radu prikazini su rezultati procene doze za učesnike operacije dekomisije i instalacije novog izvora zračenja ^{60}Co u uređaj za terapiju eksternim snopovima gama zračenja. Dozimetrijska merenja se odnose na aktivnosti sprovedene prilikom demontaže izvora ^{60}Co aktivnosti 15.63 TBq i na aktivnosti tokom instalacije novog izvora ^{60}Co aktivnosti 81.40 TBq.

2. Merenje doze, jačine doze i procena izlaganja

Operacija dekomisije i instalacije izvora zračenja zahteva dugotrajan boravak operatera u blizini izvora, i samim tim pažljivo evaluaciju primljenih doza [2]. Jačina ambijentalnog ekvivalenta doze $H^*(10)$ merena je pomoću kalibrisane jonizacione komore Cardinal Health, model 451P (Slika 1) u svim fazama operacija i u različitim pozicijama u odnosu na izvor zračenja o čemu je sačinjen detaljan izveštaj (Izveštaj o ispitivanju jačine ambijetalnog doznog ekvivalenta $H^*(10)$ u okolini izvora jonizujućih zračenja). Pored toga, svim licima koja učestvuju u demontaži i instalaciji izvora, podeljeni su elektronski dozimetri sa trenutnim očitavanjem (ADOS, Automess, Germany) pomoću kojih je izmerena vrednost ličnog doznog ekvivalenta $H_p(10)$ u pojedinim fazama operacije. Sva lica su koristila i pasivni termoluminescentni dozimetar (TLD) namenjen proceni individualne doze od spoljašnjeg izlaganja. U pripremljenoj fazi definisana je operativne granice izlaganja (OSL) iskazana kao doza za profesionalno izloženih lica koja može biti primljena u toku jednog dana. Ova vrednost bila je 100 μSv .

3. Dekomisija izvora zračenja

Sve operacije su pažljivo isplanirane. Pre početka demontaže izvora izvršen je detaljan dogovor u vezi redosleda operacija i dinamike rada a obavljena je i „hladna“ proba, odnosno uvežbavanje radnih operacija u odsustvu izvora zračenja. Redosled (sa približnm dužinom trajanja) operacija bio je sledeći:

- Demontaža kolimatora u trajanju od 2 min;
- Demontaža zaštitnog prstena i poklopca u trajanju od 5 min;
- Pozicioniranje transportnog kontejnera u odnosu na osu kobaltne glave u čemu je učestvovalo 4 operatera; Sama operacija je trajala 5 min;
- Pozicioniranje izvora (priprema kontejnera, postavljanje elektromotora) izvela su četiri operatera a operacija je trajala je 7 min;
- Prepakivanje i demontažu izvora izvršila su dva radnika u trajanju od 2 min;

- Zatvaranje kontejnera i stavljanje zaštitnog poklopca koristeći manipulator, u čemu su učestvovala dva operatera u trajanju od 2 min;
- Unutrašnji transport kontejnera i utovar u vozilo za transport (20 min, četiri operatera);
- Transport izvora zračenja uz dozimetrijsku pratnju i pratnju organa Ministarstva unutrašnjih poslova. Prevoz izvora je trajao oko 5 časova a izvor je nakon toga predat operateru skladišta za radioaktivni otpad.

Tabela 1. Rezultati procene doze za učesnike u demontaži izvora ⁶⁰Co aktivnosti 15.63 TBq iz uređaja za eksternu terapiju gama zračenjem

Redni broj	Operater	Deo tela	Doza na osnovu merenja jačine H*(10) [μSv]	Doza izmerena elektronskim dozimetrom Hp(10) [μSv]
1.	RD	ruke	8	5
		grudi	5	
		glava	4	
2.	TO	ruke	9	5
		grudi	6	
		glava	5	
3.	LJO	ruke	10	8
		grudi	8	
		glava	7	
4.	ĐP	ruke	7	4
		grudi	5	
		glava	4	
5.	DD	ruke	1	-
		grudi	0.7	
		glava	0.7	
6.	DF (vozač)	ruke	/	1
		grudi	2	
		glava	/	
7.	SS (dozimetri sta)	ruke	8.5	8
		grudi	5	
		glava	4	

4. Instalacija izvora zračenja

Slično operaciji dekomisije, pre početka demontaže i prepakivanja izvora izvršen je detaljan dogovor oko redosleda operacija kao i dinamici rada. Izvršena je i „hladna“ proba a redosled operacija bio je sledeći:

- Transport izvora zračenja uz dozimetrijsku pratnju i pratnju službenika Ministarstva unutrašnjih poslova. Prevoz je obavljen je u toku jednog dana;
- Istovar kontejnera i transport to radioterpijskog centra. U operaciji je učestvovalo tri radnika. Operacije su trajale oko 4 min – 2 min (odvezivanja unutar prikolice kamiona i transport kontejnera do bunkera);
- Montiranje elektromotora na transportni kontejner. Ovu operaciju obavila su dva operatera u trajanju od 3 minuta;

- Skidanje gornjeg zaštitnog poklopca transportnog kontejnera i odvijanje zavrtnja radi oslobađanja gornje ploče (dva operatera, skidanje poklopca je trajalo oko 45 sekundi dok je odvijanje šrafova trajalo 1 min);
- Pozicioniranje i centriranje transportnog kontejnera u odnosu na osu kobaltne glave. Ova operacija trajala je 5 min a učestvovalo je pet operatera;
- Prenos izvora iz transportnog kontejnera u kobaltnu glavu (četiri radnika, u grupama po dva, smenjujući se radi raspodele primljenih doza). Ukupno je bilo pet pokušaja u trajanju od 30 do 50 sekundi;
- Montaža kolimatora, u trajanju 2 min a učestvovala su dva operatera;
- Celokupna operacija trajala je dva dana. Prvog dana operacija je prekinuta zbog prekoračenja operativne granice izlaganja koja iznosi 100 μSv .

Tabela 1. Rezultati procene doze za učesnike u instalaciji izvora ^{60}Co aktivnosti 81.40 TBq iz uređaja za eksternu terapiju gama zračenjem (prvi i drugi dan rada)

Redni broj	Operater	Deo tela	Doza na osnovu merenja jačine $\text{H}^*(10)$ [μSv]	Doza izmerena elektronskim dozimetrom $\text{Hp}(10)$ [μSv]	Doza na osnovu merenja jačine $\text{H}^*(10)$ [μSv]	Doza izmerena elektronskim dozimetrom $\text{Hp}(10)$ [μSv]
			Prvi dan		Drugi dan	
1.	RD	ruke	154	100	37	20
		grudi	97		17	
		glava	65		10	
2.	TO	ruke	110	76	37	15
		grudi	82		82	
		glava	70		70	
3.	LJO	ruke	47	28	47	4
		grudi	40		30	
		glava	29		17	
4.	ĐP	ruke	110	73	110	1.5
		grudi	81		81	
		glava	75		75	
5.	DD	ruke	1	/	1	-
		grudi	0.7		0.7	
		glava	0.7		0.7	
6.	DF (vozač)	ruke	-	4	-	-
		grudi	5		-	
		glava	-		-	
7.	SS (dozimetrista)	ruke	41	36	-	1
		grudi	37		1	
		glava	21		-	

5. Rezultati

Rezultati procene doze za lica koja su učestvovala u demontaži izvora ^{60}Co aktivnosti 15.63 TBq iz uređaja za eksternu terapiju gama zračenjem dati su u Tabeli 1. Rezultati procene doze za lica koja su učestvovala u procesu instalacije izvora ^{60}Co aktivnosti 81.40 TBq u uređaj za eksternu terapiju gama zračenjem dati su u Tabeli 2. Procena je izvršena na osnovu rezultata merenja jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta i informacije o trajanju pojedinih faza operacije, pri čemu je izmerena jačina doze na mestu operatera bila u intervalu 0.25-100 $\mu\text{Sv/h}$ a u nivou ruku i do 1 mSv/h prilikom demontáže izvora. Prilikom instalacije jačina doze bila je u intervalu od dela $\mu\text{Sv/h}$ pa do 27 mSv/h. Tipično, vrednosti doza bile su nekoliko stotina $\mu\text{Sv/h}$. S obzirom da su u procesu dekomisije i instalacije učestvovala ista lica, najveća ukupna procenjena doza za pojedinca bila je 227 μSv za ekstremitete i 170 μSv za celo telo, kao što je prikazano u Tabeli 1 i Tabeli 2.



Slika 1. Dozimetrijska merenja prilikom instalacije izvora ^{60}Co aktivnosti 81.40 TBq iz uređaja za eksternu terapiju gama zračenjem

6. Zaključak

U radu su prikazani rezultati dozimetrijskih merenja i procene doze od spoljašnjeg izlaganja za učesnike operacija dekomisije i instalacije izvora zračenja u uređaj za teleterapiju poljima gama zračenja ^{60}Co . Sve operacije izvedene su bez značajnih problema i u skladu sa osnovnim principima zaštite od zračenja a najveća pojedinačna doza iznosila je 170 μSv za celo telo i 227 μSv za ekstremitete.

7. Literatura

- [1] Lin KH, Lin JP, Liu MT, Chu TC. Decommissioning of a ^{60}Co unit and estimation of personal doses. Radiat Prot Dosimetry. 2003;106(1):77-80.
- [2] Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima, Sl. glasnik RS br. 86/11

**DOSE ASSESSMENT DURING DECOMMISSIONING AND INSTALLATION OF
⁶⁰Co RADIATION SOURCE IN THE TELETHERPY UNIT**

Slaviša STANIŠIĆ, Rajko DOBRIJEVIĆ, Duško KOŠUTIĆ, Olivera CIRAJ-BJELAC
Vinca Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia

ABSTRACT

This paper describes the dismantling and installation of radiation source used in a ⁶⁰Co teletherapy unit, as well as assessment of radiation doses received by exposed workers during these operations. The workers received whole body doses up to 170 μSv and extremity doses up to 227 μSv. The ⁶⁰Co machine was smoothly dismantled and installed using planned and controlled radiation protection measures.

PODEŠAVANJE INPUT FAJLA ZA VOXEL FANTOME U MCNP PROGRAMU

Zoran JOVANOVIĆ, Dragoslav NIKEZIĆ i Dragana KRSTIĆ

Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet, nikezic@kg.ac.rs

SADRŽAJ

Za određivanje apsorbovane doze u organima ili tkivima koriste se fantomi, koji predstavljaju približne fizičke ili virtualne aproksimacije ljudskog tela i samih organa. Monte Carlo MCNP simulacije omogućavaju praćenje transporta primarnih i sekundarnih čestica (neutrona, fotona, protona, alfa čestica...) kroz složene sisteme i geometrije opisane pomoću input fajl-ova. Primarni zadatak ovog rada je da se predstavi geometrija i konfiguracija vokselu u input fajlu za MCNPX verziju, radi njegove lakše primene i manipulacije tokom procesa same vokselizacije.

1. Uvod

Pri koriscenju MCNP (Monte Carlo Neutron Particle) softvera [1] svi input fajl-ovi moraju generalno sadržati 3 glavne sekcije i to: karticu ćelije (*cell card*), karticu površine (*surface card*), karticu podataka (*data card*), karticu definisanja izvora (*sdef*) i karticu izlaza (*tally*). Kartice ćelije se koriste da bi definisali zapreminu od interesa, a kartice površine daju specifikaciju površina koje definišu posmatranu zapreminu. MCNP omogućava korisniku upotrebu mnogih različitih opcija i modela pri definisanju samog input-a, pri čemu je veoma bitno voditi računa o primarnom redosledu unosenja parametara potrebnih za definisanje problema u svakom input fajlu. Prostorna rešetka (lattice) je centralni deo definisanja problema vokselizacije fantoma. Definisanjem u input fajlu $lat = 1$ dobija se pravougaona rešetka, a sa $lat = 2$ heksagonalna (šestougaona) rešetka. Formiranje 3D rešetke je zasnovano na veoma korisnoj karakteristici MCNP tj. dozvoljena je upotreba ponovljenih struktura u input fajlu, u kojima je precizirana zadata geometrija rešetke, a koja se može ispuniti (fill) različitim materijalima od strane korisnika, poznati pod imenom univerzumi (universe). Parametar fill ima 3 ulaza, nakon čega se vrši popunjavanje po pravougaonim koordinatama, ako je definisana pravougaona rešetka, ili po cilindričnim koordinatama, ako je definisana heksagonalna rešetka.

2. Makro - tela

Još jedan način da se istovremeno odredi više površina od interesa se dobija upotrebom makro-tela (macro bodies). MCNP sadrži različite varijacije makro-tela [2] koja su unapred definisane kao što su: kutija (box), pravougaoni paralelepiped (rpp) i sl. Jedno od takvih makro tela je kutija (box) i ona se uopšteno može prikazati kao:

$$\text{BOX } V_x V_y V_z A_{1x} A_{1y} A_{1z} A_{2x} A_{2y} A_{2z} A_{3x} A_{3y} A_{3z} \quad (1)$$

gde su V prostorne koordinate definisanja kutije (box) po x , y i z osi, a A (1, 2 i 3) su vektori koji definišu veličinu kutije. U zavisnosti koju vrstu matematike koristimo za definisanje zapremine od interesa, upotreba makro-tela može predstavljati veoma korisno i elegantno rešenje za definisanje multi površina koje ograničavaju datu zapreminu od interesa.

3. Modelovanje i geometrija vokselu

Primarni korak u procesu vokselizacije predstavlja korišćenje procedure ponavljanja strukture [3]. U kartici površine pod rednim brojem 3. definiše se površina kutije (box) koji sadrži voksel i on je u input fajlu definisan kao:

$$3 \text{ box } -1 -1 -1 1 1 0 0 1 0 0 1 \quad (2)$$

Korisnik MCNP u zavisnosti od problematike i geometrije problema, može definisati npr. veću kutiju koju može ispuniti sa manjom. Proces formiranja veće kutije se takodje obavlja u kartici površine, a u našem input fajlu je definisana u kartici površine pod rednim brojem 2. U sledecem obliku:

$$2 \text{ box} - 5 - 5 - 10 \ 10 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10 \ 0 \ 0 \ 0 \ 20 \quad (3)$$

Veličina kutije može predstavljati numeričku vrednost veličine fantoma. Iz navedenog dela inputa se može videti da je mala kutija centrirana u veću kutiju. Sledeći korak jeste definisanje rešetke (lattice) u kartici ćelije (prvi blok), koja ima oblik:

$$\begin{array}{l} 2 \ 2 - 1.0 - 3 \quad u = 1 \text{ lat} = 1 \quad \text{imp: n} = 1 \\ \text{fill} = 0: 0 \ 0: 0 \ 0: 0 \\ 1 \end{array} \quad (4)$$

Prilikom vokselizacije fantoma, treba voditi računa o položaju i geometriji pojedinih organa. Svaki organ za sebe predstavlja svoju celinu i ima drugaciji identifikacioni broj univerzuma. Mogu se definisati različiti identifikacioni brojevi univerzuma pojedinih ćelija koje se popunjavaju sa već definisanim vokselima:

$$\begin{array}{l} 3 \ 0 - 3 \text{ fill} = 1 \ u = 2 \text{ lat} = 1 \quad \text{imp: n} = 1 \\ 4 \ 0 - 2 \text{ fill} = 2 \quad \text{imp: n} = 1 \end{array} \quad (5)$$

Dobijanje traženog rezultata i zahtevanje pokretanje i pracenja simulacije se obavlja naredbama u novom bloku (tally):

$$f4: n (2 < 3[-4: 5 - 4: 5 - 9: 10] < 4) \quad (6)$$

Gornjom naredbom u tally bloku se definisao monitoring ćelije 2. koja se nalazi u ćeliji 3., a koje se zajedno nalaze u ćeliji 4.

4. Primer primene vokselizacije

Glavne razlike između vokseli i MIRD tipa fantoma su sažeti u tabeli 1. Realizam organa je prikazan na slici 1., gde je voksel fantom Golema prikazan u zajedničkom preseku sa MIRD tipom fantoma Adama [4].

Tabela 1. Razlike između voksel i MIRD fantoma

	Matematički	Tomografski/Voksel
Oblik organa	Redukovana pojednostavljena forma	Realna
Oblik	Precizno definisana forma	Varijabilna
Topologija organa	Često nerealna	Realna
Skelet	Homogena mešavina svih skeltnih komponenti; varijacije distribucije crvene koštane srži među kostima na različitim uzrastima	Iznos koštane srži je procenjen na osnovu podataka iz CT snimaka, kao i za svaku kost vokseli pojedinačno



Slika1. Poređenje vokal fantoma Golema (desno) i odgovarajućeg matematičkog fantoma Adama (levo)

5. Zaključak

Primenom Monte Carlo tehnika, vokal fantomi se koriste za računanje apsorbovane doze u ljudskim organima u zaštiti od zračenja, radiografiji i dozimetriji. Vokal fantomi su ljudski modeli bazirani na kompjuterskoj tomografiji (CT) ili na magnetnoj rezonanci (MRI). Najvažnija prednost vokal fantoma u odnosu na MIRD je realizam anatomske prikaza organa i njihove lokacije.

6. Literatura

- [1] Xs-5 Monte Carlo Team. MCNP—a General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Vol. I: Overview and Theory. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory; LA- UR- 03- 1987, (2003).
- [2] Criticality Calculations with MCNP5: A Primer, LA-UR-04-0294
- [3] MCNPX User's Manual Version 2.6.0, April 2008 LA-CP-07-1473
- [4] The GSF family of voxel phantoms , Nina Petoussi-Henss, Maria Zankl, Ute Fill and Dieter Regulla, Phys. Med. Biol. 47 (2002) 89–106

ADJUSTING THE INPUT FILE FOR VOXEL PHANTOMS BY MCNP PROGRAM

Zoran JOVANOVIĆ, Dragoslav NIKEZIĆ and Dragana KRSTIĆ
University of Kragujevac, Faculty of Science, Serbia, nikezic@kg.ac.rs

ABSTRACT

For determination of the absorbed dose in organs or tissues are used phantoms, which represent the approximate physical or virtual approximation of the human body and the bodies themselves. MCNP Monte Carlo simulations enable the monitoring of transport of primary and secondary particles (neutrons, photons, protons, alpha particles ...) through complex systems and geometry described by the input-file. The primary aim of this paper is to present the geometry and configuration of voxels in the input file for MCNP5/X version, to assist in the implementation and manipulation during the process of voxelisation.

**BIOLOŠKI EFEKTI
JONIZUJUĆEG ZRAČENJA**

CITOGENETIČKE PROMENE U LIMFOCITIMA PERIFERNE KRVI OSOBA PROFESIONALNO IZLOŽENIH RADIONUKLIDIMA

Dubravka JOVIČIĆ¹, Boban RAKIĆ², Jelena PAJIĆ²

1) Fakultet za primenjenu ekologiju "FUTURA", Univerzitet Singidunum, Beograd, Srbija,
djovicic@singidunum.ac.rs

2) Institut za medicinu rada Srbije "Dr Dragomir Karajović", Beograd, Srbija, rakicboban@yahoo.uk,
jejapajic@gmail.com

SADRŽAJ

Zdravstveni rizik pri hroničnoj ekspoziciji jonizujućim zračenjima uključuje promene u genomu koje povećavaju hromozomsku nestabilnost. Nestabilne strukturne hromozomske aberacije (CA), kao i mikronukleusi (MN), su promene koje uzrokuju jonizujuća zračenja (JZ). Pored njih, postoje i drugi fenomeni za koje je utvrđeno da se sa većom učestalošću pojavljuju u metafazama osoba izloženih JZ, nego u neizloženim grupama. Jedna od njih svakako je prevremena centromerna deoba (PCD). Grupu izloženih ispitanika u studiji sačinjava 50 osoba profesionalno izloženih radionuklidima. Kontrolna grupa sačinjena je od 40 ispitanika koji na radnom mestu, niti u životnom okruženju nisu izloženi fizičkim ni hemijskim mutagenim agensima. CA, PCD i MN u limfocitima periferne krvi analizirani su u skladu sa standardnim protokolom (IAEA, WHO, 2011). Za statističku obradu podataka korišćen je softver Statistical Package for Social Sciences (SPSS 17.0). Prosečne vrednosti analiziranih citogenetičkih promena bile su znatno veće u eksponovanoj u odnosu na neeksponovanu grupu. Pozitivna korelacija između CA, PCD i MN pronađena je u grupi izloženih ispitanika. Parametar PCD5-10 označen je kao posebno pogodan za razdvajanje grupa na izložene i neizložene. Identifikacija ostalih fenomena (kakav je PCD) povezanih sa izlaganjem JZ, osim dobro proučenih, CA i MN, mogla bi razjasniti aktuelne probleme u radiobiologiji povezane sa biološkim odgovorom na izlaganje malim dozama zračenja. Ova studija navela je da razmotrimo PCD kao moguć parametar genotoksičnog rizika za osobe profesionalno izložene malim dozama jonizujućih zračenja.

1. UVOD

Mnoge osobe su u toku radnog veka izložene jonizujućim zračenjima (JZ). Citogenetičke studije limfocita periferne krvi zdravstvenih radnika izloženih malim dozama JZ uvek su dobra prilika za proučavanje bioloških efekata, kako prilikom eksterne, tako i prilikom interne ekspozicije. Radnici nuklearne medicine posebno su interesantni za biodozimetrijske studije, kako zbog izlaganja izuzetno nehomogenim poljima JZ, tako i zbog povećanog rizika od interne kontaminacije.

Dobro je poznato da JZ indukuju hromozomske rearanžmane. Rizik pri hroničnoj ekspoziciji JZ, tako, uključuje promene u genomu koje se mogu detektovati metodama citogenetike, a koje povećavaju hromozomsku nestabilnost - strukturne hromozomske aberacije (CA) i mikronukleuse (MN) [1,6]. Pored njih, postoje i drugi fenomeni za koje je utvrđeno da se sa većom učestalošću pojavljuju u metafazama osoba izloženih u odnosu na neizložene grupe. Jedna od njih svakako je prevremena centromerna deoba (PCD).

Ovaj fenomen, pronađen u limfocitima periferne krvi, karakteriše se razdvojenim hromatidama hromozoma već u metafazi ćelijskog ciklusa. Poremećaj funkcije centromera u vidu preranog centromernog razdvajanja (engl.-centromere splitting, centromere spreading), predstavlja zapravo manifestaciju poremećaja mehanizma prostorne i vremenske regulacije procesa mitoze što dalje vodi genomskoj nestabilnosti [2,3,4]. Učestalost ovog fenomena, uočenog u metafaznim figurama osoba izloženih JZ nije detaljno proučavana. Zato svako istraživanje koje u obzir uzima proučavanje PCD-a dobija poseban značaj.

Uzevši u obzir sve prethodno pomenute rezultate istraživanja, cilj ove studije bio je utvrđivanje korelacije u učestalostima CA, MN i PCD u limfocitima periferne krvi ispitanika profesionalno izloženih radionuklidima, kao i poređenje srednjih vrednosti posmatranih parametara u grupama izloženih i neizloženih

ispitanika. Ukoliko se pokaže postojanje korelacije između citogenetičkih promena, može li se PCD posmatrati kao novi biomarker ekspozicije i koje su to tačke preseka u vrednostima ovog parametra koje mogu razdvojiti ispitanike u grupe u odnosu na izloženost?

2. MATERIJAL I METODE

Istraživanja su obuhvatila grupu od 50 ispitanika profesionalno izloženih radionuklidima – jodu I^{131} i jodijumu Y^{90} (C), i 40 ispitanika kontrolne grupe (K) koji nikada nisu bili izlagani fizičkim ili hemijskim agensima na svojim radnim mestima (Tab.1). Efektivne doze zračenja merene su termoluminiscentnim dozimetrom (TLD) jednom mesečno za vreme profesionalne izloženosti. Biološka dozimetrija izvedena je pomoću modifikovane mikrometode za limfocite periferne krvi i konvencionalne citogenetičke tehnike za analizu hromozomskih aberacija i mikronukleusa [5,6]. Analiza hromozomskih aberacija (CA) i prevremene centromerne deobe (PCD) praćena je na 200 metafaznih ćelija, dok su broj i distribucija mikronukleusa praćeni na 1000 binuklearnih limfocita. Za statističku obradu podataka korišćen je softverski paket Statistical Package for Social Sciences (SPSS) 17.0.

Tabela 1. Opšte karakteristike ispitivane populacije

	Grupe	N	Mean	SD	Min-Max
Starost (godine)	eksponovani	50	45.24	8.37	27.00-59.00
	kontrola	40	44.40	6.21	34.00-60.00
URS (godine)	eksponovani	50	21.94	8.00	5.00-35.00
	kontrola	40	19.67	6.17	13.00-36.00
ERS (godine)	eksponovani	50	17.96	8.12	5.00-35.00
	kontrola	40	0.00	0.00	0.00
ED₅ (mSv)	eksponovani	50	9.87	6.84	0.16-47.38
	kontrola	0	.	.	0.00
ED₁ (mSv)	eksponovani	50	2.19	1.41	0.00-10.10
	kontrola	0	.	.	0.00

URS – ukupni radni staž; ERS – ekspozicioni radni staž; ED₅ – efektivne doze poslednjih 5 godina; ED₁ – efektivne doze zadnjih godinu dana

3. REZULTATI

U studiji je analizirano ukupno 18000 metafaznih ćelija za CA i PCD, 8000 u kontrolnoj i 10000 u grupi izloženih (200 po ispitaniku) i 90 000 binuklearnih limfocita CBMN testom: 40000 u kontrolnoj i 50000 u grupi eksponovanih (1000 po ispitaniku). Rezultati analize prikazani su u Tabeli 2.

Tabela 2. Deskriptivni statistički parametri i statistička značajnost za CA, PCD i MN u limfocitima kontrolnih i eksponovanih ispitanika

CAs, PCDs, MN	Kontrola Mean ± SD Min-Max	Eksponovani Mean ± SD Min-Max	P
tAC	0.85 ± 1.00 0.00-4.00	4.06 ± 1.04 2.00-7.00	0.00
DIC	0.12 ± 0.33 0.00-1.00	0.66 ± 0.74 0.00-2.00	0.00
RING	/	0.12 ± 0.33 0.00-1.00	
ACE	0.37 ± 0.54 0.00-2.00	2.64 ± 1.17 0.00-5.00	0.00
CB	0.32 ± 0.47 0.00-1.00	0.68 ± 0.47 0.00-1.00	0.00
iCB	0.17 ± 0.38 0.00-1.00	0.5 ± 0.5 0.00-1.00	0.01
tPCD	0.25 ± 0.54 0.00-2.00	2.12 ± 1.76 0.00-7.00	0.00
PCD₁₋₅	4.05 ± 1.57 1.00-7.00	8.5 ± 2.90 2.00-14.00	0.00
PCD₅₋₁₀	1.72 ± 1.39 0-5	4.64 ± 1.65 2-9	0.00
ΣMN	8.52 ± 2.93 4.00-14.00	20.72 ± 5.92 12-36	0.00
MN₁	6.83 ± 2.11 4.00-12.00	13.53 ± 3.17 6.00-22.00	0.00
MN₂	0.78 ± 0.80 0.00-2.00	2.34 ± 1.42 0.00-7.00	0.00
MN₃	0.05 ± 0.22 0.00-1.00	0.68 ± 0.82 0.00-3.00	0.00
MN₄	/	0.12 ± 0.33 0.00-1.00	

DIC – dicentrični hromozom, ACE - acentrični fragment, RING – ring hromozom, CB – hromatidni prekid, iCB – izohromatidni prekid, tPCD – broj metafaza po ispitaniku sa 11 ili više hromozoma sa razdvojenim hromatidama, PCD₁₋₅ – broj metafaza po ispitaniku sa 1 do 5 hromozoma sa PCD, PCD₅₋₁₀ – broj metafaza po ispitaniku sa 6-10 hromozoma sa PCD, ΣMN – ukupan broj MN

Srednje vrednosti parametara koji opisuju genetička oštećenja (CA, MN, PCD) statistički su značajno veće u grupi izloženih u odnosu na neizložene. Uočena je i povećana incidenca nekih parametara kod pušača u odnosu na nepušače (ukupan broj aberantnih ćelija, hromatidni i izohromatidni prekidi, ukupan broj MN, kao i parametri distribucije MN – MN₁, MN₂ i MN₃). Nije utvrđena statistički

značajna razlika posmatranih parametara u odnosu na pol. Spearman-ov test pokazao je postojanje pozitivne korelacije između parametara genetičkih oštećenja u eksponovanoj grupi (Tab.3).

Tabela 3. Spearman-ove korelacije (eksponovana grupa)

	tAC	DIC	RING	ACE	CB	iCB	tPCD	PCD ₁₋₅	ΣMN	MN ₁	MN ₃
iCB	0.448										
tPCD		0.515	0.293	0.556	0.318						
PCD ₁₋₅				0.348			0.524				
PCD ₅₋₁₀		0.330			0.295		0.437	0.388			
ΣMN	0.312					0.539					
MN ₁						0.408			0.749		
MN ₂	0.345					0.355			0.533		
MN ₃			0.298			0.296			0.592		
MN ₄							0.364		0.438		0.449

* prikazane su samo statistički značajne korelacije

Logistička regresija primenjena je u cilju određivanja varijabli koje bi najbolje mogle predvideti pripadnost ispitanika grupi izloženih odnosno neizloženih. Kriterijum za klasifikaciju u grupe bila je vrednost Wald-ovog koeficijenta veća od 1. Od parametara koji opisuju PCD, PCD₅₋₁₀ se pokazao kao najbolji (ROC analiza je izdvojila vrednost od 3,5 ćelija sa dijagnostikovanim PCD5-10 na 200 pregledanih kao tačku preseka za razdvajanje na grupe, sa senzitivnošću od 75% i specifičnošću od 87,5%).

Dalja analiza je utvrdila da ne postoji pozitivna korelacija između izmerenih efektivnih doza kod ispitanika i učestalosti hromozomskih aberacija, prevremene centromerne deobe i mikronukleusa [11]. Analize su pokazale da je učestalost PCD daleko manja u kontrolnoj nego u izloženoj grupi, što potvrđuje pretpostavku da ekspozicija JZ može dovesti do ove pojave. Prisustvo PCD u manjoj meri i u kontrolnoj grupi, upućuje na zaključak da je PCD mogao nastati i kao posledica delovanja faktora spoljašnje sredine. Sprovedeno istraživanje sugerise da PCD sagledamo u svetlu mogućeg citogenetičkog biomarkera kod lica profesionalno izloženih delovanju radionuklida. Ovi rezultati uključuju preliminarna istraživanja na relativno malom uzorku, te je potrebno i neophodno potvrditi dobijene rezultate novim istraživanjima koja će uključiti veći broj ispitanika u kombinaciji sa *in vitro* eksperimentima, u cilju boljeg razumevanja ovog fenomena i eventualnog definisanja referentnih vrednosti.

4. LITERATURA

- [1] Jovičić D., Milačić S., Milić N., Bukvić N., Vukov D.T. Chromosomal Aberrations in Subjects Exposed to Ionizing Radiation. *Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Onkology* 28 (1) (2009) 75- 82.
- [2] Garaj-Vrhovac V., Kopjar N. and Poropat M. Evaluation of cytogenetic damage in nuclear medicine personnel occupationally exposed to low-level ionising radiation. *Arh. Hig. Rada Toksikol.* 57 (2006) 31-8.
- [3] Vig B.K. and Wodnicki J. Separation of sister centromeres in some chromosomes from cultured human leukocytes. *J. Hered.* 65 (1974) 149-152.
- [4] Litmanovic T., Altras M.M., Dotana A. and Avivi L. Asynchronous replication of homologous alfa-satellite DNA loci in man is associated with nondisjunction. *Cytogen.Cell.Genetics*. 81 (1998) 26-35.
- [5] Moorhead P.S. and Heyman A. Chromosome studies of patients with Alzheimer disease. *Am. J. Hum. Genet.* 14 (1983) 545-556.
- [6] IAEA. Biological dosimetry: chromosomal aberration analysis for dose assessment. Technical reports series No. 260 (1986). Vienna.
- [7] Bühler E.M., Fessier R., Beutler C. and Gargano G. Incidental finding of double minutes (DM), single minutes (SM), homogenously staining regions (HSR), premature chromosome condensation (PCC) and premature centromere division (PCD). *Ann. Génét. (Paris)*. 30 (1987) 75-79.
- [8] Chung H.W., Eun K.R., Yung J.K. and Sung W.H. Chromosome aberrations in workers of nuclear-power plants. *Mutat. Res.* 350 (1996) 307-314.
- [9] Lovreglio P., Bukvic N., Fustinoni S., Ballini A., Drago I., Foa V., Guanti G. and Soleo L. Lack of genotoxic effect in workers exposed to very low doses of 1,3-butadiene. *Arch. Toxicol.* 80 (2006) 378-81.
- [10] Sierra-Torres M.S., Arboleda-Moreno Y.Y, Hoyos L.S. and Sierra-Torres C.H. Chromosome aberrations among cigarette smokers in Colombia. *Mutat. Res.* 562 (2004) 67-75.
- [11] Andreassi M.G., Foffa I., Manfredi S., Botto N., Cioppa A., Picano E. Genetic polymorphisms in XRCC1, OGG1, APE1 and XRCC3 DNA repair genes ionizing radiation exposure and chromosomal DNA damage in interventional cardiologists. *Mutat. Res. Fundamental and Molecular Mechanisms of mutagenesis*. 666 (2009) 57-63.

DA LI SE EFEKTI USLED ZRAČENJA PRIRODNIH RADIOIZOTOPA I CEZIJUMA-137 KOD DVE VRSTE RIBA IZ JUŽNOG JADRANSKOG MORA (*MUGIL CEPHALUS* LINNAEUS, 1758 I *LIZA SALIENS* RISSO, 1810) MOGU OČEKIVATI?

Ivanka ANTOVIĆ¹, Mirzeta HADŽIBRAHIMOVIĆ¹, Gordana LAŠTOVIČKA-MEDIN²

1) Departman za biomedicinske nauke, Državni univerzitet u Novom Pazaru, Srbija,
Ivanka_Antovic@yahoo.com

2) Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica, Crna Gora

SADRŽAJ

Procenjene su jačine doza zračenja (usled prirodnih radioizotopa ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th , kao i veštačkog ^{137}Cs), kojima su izložene cele jedinke dve vrste cipola iz južnog Jadranskog mora. Maksimalna jačina doze (spoljašnje i unutrašnje ozračivanje) za *M. cephalus* ($0.253 \mu\text{Gy h}^{-1}$) i *L. saliens* ($0.222 \mu\text{Gy h}^{-1}$), ukazuje da se efekti ne mogu očekivati, s obzirom na literaturne podatke i nivoe doza za biološke/ekološke efekte (koji su znatno iznad dobijenih vrednosti).

1. Uvod

Analize doza zračenja kojima su izložene pojedine biljne i životinjske vrste od velike su važnosti, osobito zato što se u zaštiti od zračenja, kao delu zaštite životne sredine, neretko pretpostavlja da je nehumana biota zaštićena pri jačinama doza koje su, kao „sigurne“, propisane za čoveka. Međutim, ona živi i u uslovima/sredinama u kojima ne živi čovek, zbog čega bi se određeni/specifični efekti mogli javiti kod pojedinih vrsta [1]. U ovom radu predstavljene su doze kojima su izložene dve vrste cipola iz južnog Jadranskog mora – *Mugil cephalus* Linnaeus, 1758 i *Liza saliens* Risso, 1810. Razmatrani su ^{137}Cs i prirodni radioizotopi ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th (procenjen preko produkata njegovog raspada ^{228}Ac i ^{208}Tl). Iako su neka istraživanja na vrsti *M. cephalus* rađena i prethodno [2,3], ovde su date prve procene ukupnih jačina doza za navedene vrste cipola iz južnog Jadranskog mora (obala Crne Gore), i predstavljaju početne rezultate šireg istraživanja ove akvatične životne sredine (koje se trenutno realizuje u okviru projekta Ministarstva nauke Crne Gore – 01-683/2013).

2. Materijal i metodi

U analizu je uključeno po pet jedinki *M. cephalus* i *L. saliens* (zaliv Boka Kotorska – Tivat). Koncentracije aktivnosti radioizotopa u površinskoj vodi tog područja (u jednom uzorku, ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th : 0.05 ± 0.02 , 7.91 ± 0.65 , 0.08 ± 0.02 i $0.10 \pm 0.03 \text{ Bq L}^{-1}$, respektivno) i celim jedinkama, dobijene prethodno pomoću višedetektorskog spektrometra PRIPJAT, sa 6 NaI(Tl) detektora i geometrijom merenja $\sim 4\pi$ (PRIPJAT-2M u Podgorici, konstruisan na Institutu za fiziku u Minsku, prvobitno namenjen ekspresnom merenju ^{137}Cs i ^{40}K , a na kome su kasnije razvijeni koincidentni metodi merenja ^{226}Ra i ^{232}Th), iskorišćene su za analize koje su predmet ovog rada, uključujući podatke za *M. cephalus* – ^{226}Ra [2] i ^{232}Th [3]. Korišćen je metod za merenje navedenih izotopa u uzorcima različite prirode i porekla [4]. Ukratko, prateći softver PRIP se koristi za snimanje i analizu spektara i, dok se, na primer, pik ^{40}K (1460 keV) razmatra lako u integralnom i nekoincidentnom režimu (i, uz ostalo, softver računa aktivnost/koncentraciju aktivnosti, uz grešku), dotle ostali radioizotopi zahtevaju dodatne analize – na primer, pik na 662 keV (^{137}Cs) (zbog čega softver i „pita“ da li u analizu uključivati i, na primer, ^{214}Bi – nakon čijeg β -raspada se emituje gama zrak energije 609 keV, čiji se pik, zbog energetske rezolucije uređaja, preklapa sa cezijumskim pikom – u integralnom i nekoincidentnom režimu, a u režimu dvostrukih koincidencija sa pikom gama zraka iz raspada ^{208}Tl – 583 keV [4]).

S obzirom na cilj rada, iskorišćeni su rezultati (koncentracije aktivnosti) iz nekoliko serija merenja (vršenih tokom različitih živih vremena – u prvom redu da bi se u nekim uzorcima testiralo prisustvo cezijuma), a jačina doze (D) procenjena je po formuli [5]:

$$D = \sum_i \left| DK_{\text{spolj},i} \cdot A_{\text{voda},i} + DK_{\text{unut},i} \cdot A_{\text{riba},i} \right|, \quad (1)$$

gde su $DK_{\text{spolj},i}$ i $DK_{\text{unut},i}$ dozni (konverzioni) koeficijenti za spoljašnje i unutrašnje ozračivanje za radioizotop i , respektivno (u $\mu\text{Gy h}^{-1}$ po Bq kg^{-1}), $A_{\text{voda},i}$ je koncentracija aktivnosti radioizotopa i u vodi (u Bq L^{-1}), a $A_{\text{riba},i}$ je koncentracija njegove aktivnosti u celoj jedinki (u Bq kg^{-1}).

Ozračivanje iz sedimenta u ovom slučaju nije razmatrano, pošto se radi o pelagijskim vrstama riba, zbog čega spoljašnje ozračivanje dominantno dolazi od vode.

U proračunu su korišćeni dozni koeficijenti koje preporučuje USNCEAR ($\mu\text{Gy h}^{-1}$ po Bq kg^{-1}): za ^{137}Cs , ^{226}Ra i ^{232}Th , $DK_{\text{spolj}} - 2.7 \cdot 10^{-4}$, $9.1 \cdot 10^{-4}$, $1.5 \cdot 10^{-7}$, respektivno, a $DK_{\text{unut}} - 1.9 \cdot 10^{-4}$, $1.4 \cdot 10^{-1}$, $2.3 \cdot 10^{-2}$, respektivno [5]. Za ^{40}K , korišćene su vrednosti $DK_{\text{spolj}} - 2.6 \cdot 10^{-6}$ Gy y^{-1} po Bq kg^{-1} i $DK_{\text{unut}} - 3.4 \cdot 10^{-6}$ Gy y^{-1} po Bq kg^{-1} [6].

3. Rezultati i diskusija

Rezultati su dati u tabeli 1, dok su i na slici 1 predstavljene procenjene jačine doze za jedinke *M. cephalus* i *L. saliens* poređane po masi – od najmanje ka najvećoj. Srednja vrednost aktivnosti ^{40}K u vrsti *L. saliens* je 124 Bq kg^{-1} , sa standardnom devijacijom oko 17 Bq kg^{-1} , a u vrsti *M. cephalus* – 122 Bq kg^{-1} i 47 Bq kg^{-1} , respektivno. Za ^{226}Ra , ove vrednosti su 0.73 Bq kg^{-1} i 0.21 Bq kg^{-1} , respektivno (*L. saliens*), i 1.15 Bq kg^{-1} i 0.18 Bq kg^{-1} , respektivno (*M. cephalus*); a za ^{232}Th – 1.34 Bq kg^{-1} i 0.18 Bq kg^{-1} , respektivno (*L. saliens*), i 0.87 Bq kg^{-1} i 0.21 Bq kg^{-1} , respektivno (*M. cephalus*).

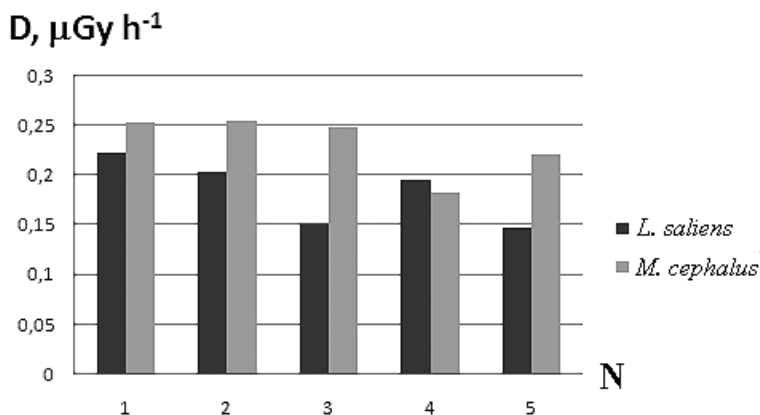
Tabela 1. Koncentracije aktivnosti i procenjene jačine doze (D)

N	Ukupna dužina, cm	Masa svežeg uzorka, kg	^{137}Cs , Bq kg^{-1}	^{40}K , Bq kg^{-1}	^{226}Ra , Bq kg^{-1}	^{232}Th , Bq kg^{-1}	D, $\mu\text{Gy h}^{-1}$
<i>M. cephalus</i>							
1	29.2	0.163	–	205 ± 8	1.10 ± 0.31	0.67 ± 0.18	0.252
2	26	0.177	–	99 ± 9	1.35 ± 0.39	1.02 ± 0.28	0.253
3	27.6	0.188	–	108 ± 7	1.27 ± 0.26	1.11 ± 0.26	0.248
4	27.5	0.190	0.18 ± 0.06	105 ± 6	0.89 ± 0.42	0.63 ± 0.16	0.182
5	37.9	0.530	1.09 ± 0.22	91 ± 5	1.15 ± 0.21	0.90 ± 0.21	0.220
<i>L. saliens</i>							
1	25	0.161	2.03 ± 0.39	112 ± 7	1.02 ± 0.21	1.43 ± 0.44	0.222
2	28.9	0.170	1.47 ± 0.28	144 ± 9	0.79 ± 0.14	1.44 ± 0.32	0.202
3	29.5	0.187	–	117 ± 9	0.55 ± 0.11	1.07 ± 0.28	0.149
4	32.7	0.285	–	139 ± 7	0.78 ± 0.17	1.25 ± 0.27	0.194
5	32.6	0.318	–	107 ± 5	0.49 ± 0.13	1.50 ± 0.26	0.147

Minimum, maksimum, srednja vrednost i standardna devijacija za procenjene jačine doza su: $0.147 \mu\text{Gy h}^{-1}$, $0.222 \mu\text{Gy h}^{-1}$, $0.183 \mu\text{Gy h}^{-1}$ i $0.033 \mu\text{Gy h}^{-1}$, respektivno (*L. saliens*) i $0.182 \mu\text{Gy h}^{-1}$, $0.253 \mu\text{Gy h}^{-1}$, $0.231 \mu\text{Gy h}^{-1}$ i $0.03 \mu\text{Gy h}^{-1}$, respektivno (*M. cephalus*). Maksimalna doza za vrstu *M. cephalus* procenjena je u slučaju jedinke 2 (tabela 1), dominantno zbog doprinosa ^{226}Ra unutrašnjoj dozi (oko 75 %). Najveća doza za vrstu *L. saliens* (jedinka 1) uzrokovana je takođe prirodnim radioizotopima (doprinos ^{40}K , ^{232}Th i ^{226}Ra kumulativnoj unutrašnjoj dozi – 20 %, 15 %, 65 %, respektivno). Ovo je u

saglasnosti sa prethodnim procenama doza od unutrašnjih i spoljašnjih izvora (prirodni i veštački radioizotopi), koje su pokazale da je doza obično rezultat prirodnih radioizotopa [npr. 7]. Minimum, maksimum, srednja vrednost i standardna devijacija za samo unutrašnje ozračivanje (jačinu doze) su oko: 0.144 $\mu\text{Gy h}^{-1}$, 0.219 $\mu\text{Gy h}^{-1}$, 0.180 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ i 0.033 $\mu\text{Gy h}^{-1}$, respektivno (*L. saliens*) i 0.180 $\mu\text{Gy h}^{-1}$, 0.251 $\mu\text{Gy h}^{-1}$, 0.228 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ i 0.030 $\mu\text{Gy h}^{-1}$, respektivno (*M. cephalus*).

Sa slike 1 vidi se da su procenjene jačine doze uglavnom veće za vrstu *M. cephalus*, u odnosu na vrstu *L. saliens*. Rezultati su saglasni sa jačinama doza koje su procenjene za vrstu *Liza ramada* Risso, 1826, takođe iz južnog Jadranskog mora [8].



Slika 1. Jačine doze zračenja za jedinke vrsta *M. cephalus* i *L. saliens*

Treba napomenuti da su navedene procene doza učinjene podrazumevajući da je aktivnost radioizotopa ravnomerno raspoređena u organizmu, iako to, jasno, nije tako. Prethodna istraživanja (i na vrsti *M. cephalus*) pokazuju, na primer, znatno veću bioakumulaciju (koncentracione faktore) ^{226}Ra u kostima, nego u mišiću, škragama, perajima [2], zbog čega su (i u tom smislu) neophodna dalja istraživanja i analize. Tim pre što, za nehumanu biotu, biološki efekti niskih (a dugoročnih) doza zračenja nisu do kraja poznati, a i sam koncept doze, kao i odgovarajući težinski faktori, i dalje se razmatraju. Ipak, kako sledi iz ranijih studija (npr. [9]), početna provera da li se bilo kakvi efekti mogu očekivati, može se ostvariti upoređivanjem procenjenih doza sa doznim limitima za određene efekte ozračivanja. Ako su doze iznad definisane granice, onda je neophodno vršiti dalja specifična istraživanja (fizioloških i/ili genetskih) efekata.

Prema izveštaju UNSCEAR, maksimum jačine doze od 400 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ koju prima mali deo populacije akvatičnih organizama, ne bi trebalo da ima bilo kakav ozbiljan efekat na populacijskom nivou [5], pa tim pre ni mnogo manje doze koje su ovde predstavljene.

National council on radiation protection and measurements (NCRP) ranije je propisao granicu od 10 mGy d^{-1} (hronična doza) za maksimalno izloženu jedinku u populaciji akvatičnih organizama [10]. Doze ispod naznačene vrednosti osiguravaju zaštitu populacije (u smislu da ne postoje ekološki značajni efekti na jedinkama).

Sve u okviru ovog rada procenjene jačine doza značajno su ispod navedenih graničnih vrednosti, tako da bi se moglo zaključiti (bez obzira što su neophodna dalja istraživanja) da se efekti usled radioaktivnog zračenja ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{137}Cs , u jedinkama vrsta *M. cephalus* i *L. salines* iz južnog Jadranskog mora, ne mogu očekivati. Takođe, procenjene vrednosti D značajno su niže i od jačine doze

koja, kao granična, može da sledi iz novije literature ($10 \mu\text{Gy h}^{-1}$), gde se i pri jačinama doze između 10 i $100 \mu\text{Gy h}^{-1}$ (hronično izlaganje) kao moguće navode anomalije u reprodukciji [11].

4. Literatura

- [1] T. J. Jaison, A. K. Patra, P. C. Verma, A. G. Hegde, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 285 (2010) 573–578.
- [2] I. Antovic, N. M. Antovic, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 290/1 (2011) 31-37.
- [3] N. M. Antovic, I. Antovic, N. Svrkota, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 284/3 (2010) 605-614.
- [4] N. M. Antovic, V. Popovic, I. Antovic, N. Svrkota, P. Vukotic, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 290/1 (2011) 81-88.
- [5] UNSCEAR (2008). Sources and effects of ionizing radiation. Annex E: Effects of ionizing radiation on non-human biota, United Nations, New York, 2011.
- [6] B. D. Amiro, *J. Environ. Radioact.* 35 (1997), 37-51.
- [7] F. P. Carvalho, J. M. Oliveira, M. Malta, *ICES J. Mar. Sci.* 68/2 (2011) 333-340.
- [8] I. Antovic, N. M. Antovic, *RAD 2012*, Nis, Serbia, April 25-27 (2012) 263-266.
- [9] B. G. Blaylock, M. L. Frank, B. R. O'Neal. Methodology for estimating radiation dose rates to freshwater biota exposed to radionuclides in the environment. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory; ES/ER/TM-78, 1993.
- [10] *Effects of Ionizing Radiation on Aquatic Organisms*. National council on radiation protection and measurements (NCRP) – Report No. 109, MD, USA, 1991.
- [11] <http://www.iur-uir.org>, *Current research directions and trends for the future*.

CAN EFFECTS DUE TO RADIATION OF NATURAL RADIOISOTOPES AND CESIUM-137 TO TWO FISH SPECIES FROM THE SOUTH ADRIATIC SEA (*MUGIL CEPHALUS* LINNAEUS, 1758 AND *LIZA SALIENS* RISSO, 1810) BE EXPECTED?

Ivanka ANTOVIC¹, Mirzeta HADZIBRAHIMOVIC¹, Gordana LASTOVICKA-MEDIN²

1) Department for Biomedical Sciences, State University in Novi Pazar, Serbia

2) Faculty of Natural Sciences and Mathematics, University of Montenegro, Podgorica

ABSTRACT

Radiation dose rates (due to natural radioisotopes ^{40}K , ^{226}Ra and ^{232}Th , as well as artificial ^{137}Cs) to whole individuals of two mullet species from the South Adriatic Sea have been assessed. Maximum dose rate (external and internal radiation exposure) for *M. cephalus* ($0.253 \mu\text{Gy h}^{-1}$) and *L. saliens* ($0.222 \mu\text{Gy h}^{-1}$), indicates that effects cannot be expected, according to the data found in literature and the biological/ecological effects dose levels (which are significantly above obtained values).

INTERINDIVIDUALNA VARIJABILNOST U EVALUACIJI GENOTOKSIČNIH EFEKATA JONIZUJUĆIH ZRAČENJA

Jelena PAJIĆ¹, Boban RAKIĆ¹, Dubravka JOVIČIĆ²

1) Institut za medicinu rada Srbije "Dr Dragomir Karajović", Beograd, Srbija,

jejapajic@gmail.com, rakicboban@yahoo.uk

2) Fakultet za primenjenu ekologiju "FUTURA", Univerzitet Singidunum, Beograd, Srbija,

djovicic@singidunum.ac.rs

SAŽETAK

Jonizujuća zračenja (JZ) su potentni genotoksični agensi sposobni da indukuju širok spektar oštećenja molekula DNK. Promene na hromozomima vezane za delovanje JZ (CA i MN) služe u biodozimetrijske svrhe za procenu apsorbovane doze zračenja. Pri proceni doze, iz bioloških razloga, uvek je značajno istražiti interindividualne razlike u radiosenzitivnosti, posebno pri niskim dozama. Iz mehanicističkih razloga može biti interesantno ispitati povezanost između formiranja dicentričnih hromozoma u odgovoru na zračenje (metodom dicentrik test) i učestalosti mikronukleusa formiranih u istim eksperimentalnim uslovima (CBMN testom); ovo poređenje omogućava procenu stepena varijabilnosti u odgovoru na različite doze JZ. Cilj ove studije bio je procena interindividualnih razlika u odgovoru na genotoksični efekat X zračenja, utvrđivanje povezanosti doza-odgovor i senzitivnosti primenjenih testova u utvrđivanju ovog odgovora. Rezultati su pokazali da postoji interindividualna varijabilnost u odgovoru na zračenje, izražena H odnosom (donor 1 imao je najveće vrednosti H odnosa 93,75%, a donori 9 i 14 najmanje - po 18,75%). Bez obzira na ova odstupanja, trend povećanja učestalosti hromozomskih promena uočava se kod svih donora, u oba testa i pri svim dozama, što je dalo osnova za konstruisanje krive doza – odgovor. Jednačine krive za dicentrik i CBMN test su, redom, $Y = 0.0009 (+/- 0.0003) + 0.0487 (+/- 0.0038) * D + 0.0612 (+/- 0.0028) * D^2$; $Y = 0.0092 (+/- 0.0029) + 0.0837 (+/- 0.0178) * D + 0.0052 (+/- 0.0103) * D^2$

1. UVOD

Jonizujuća zračenja (JZ) su potentni genotoksični agensi sposobni da indukuju širok spektar oštećenja molekula DNK, koja uključuju oštećenja baza, DNK-DNK i DNK-proteinske ukrštene veze, jednolančane i dvolančane prekide DNK [1]. Pogrešno ispravljanje ovih oštećenja može dovesti do nastanka strukturnih hromozomskih mutacija, od kojih su neke ekskluzivno vezane za delovanje zračenja (dicentrični hromozomi) [2,4]

Kao klastogeni agens, JZ može takođe indukovati nastanak mikronukleusa (MN), koji nastaju od acentričnih fragmenata ili celih hromozoma zaostalih u anafazi ćelijskog ciklusa zbog nemogućnosti pravilne interakcije sa proteinima deobnog vretena [2].

Kako im je nastanak skoro isključivo povezan sa delovanjem JZ na genetički materijal, ove promene se upotrebljavaju u biodozimetriji – metodologiji zasnovanoj na ispitivanju zračenjem indukovanih bioloških efekata i njihove povezanosti sa apsorbovanom dozom [3].

Biodozimetrija, kao metod procene apsorbovane doze zračenja, koji koristi biomarkere hromozomskog oštećenja, posebno je značajna jer, za razliku od fizičke dozimetrije, u obzir uzima i interindividualnu varijabilnost u odgovoru na zračenje. Zato je, iz bioloških razloga, uvek značajno istražiti interindividualne razlike u radiosenzitivnosti, posebno pri niskim dozama. Iz mehanicističkih razloga može biti interesantno ispitati povezanost između formiranja dicentrika u odgovoru na zračenje (metodom dicentrik test) i učestalost mikronukleusa formiranih u istim eksperimentalnim uslovima (CBMN testom); ovo poređenje omogućava procenu stepena varijabilnosti u odgovoru na različite doze JZ.

Ova studija je imala za cilj procenu interindividualnih razlika u odgovoru na genotoksični efekat X zračenja, utvrđivanje povezanosti doza-odgovor i senzitivnosti primenjenih testova u utvrđivanju ovog odgovora.

2. MATERIJAL I METODE

Puna periferna krv uzorkovana je od 14 zdravih donora (6 muškaraca i 8 žena), starosti između 27 i 48 godina (prosek godina $38 \pm 6,52$). Krv je uzorkovana 4 puta. Prvi put uzorkovana krv nije ozračena (kontrolni uzorci), a ostala 3 puta Li-heparinski vakutajneri sa uzorcima krvi ozračeni su dozama 0,4 Gy, 1 Gy i 2 Gy, X zračenjem energije 6 MeV. Krv je ozračena na radioterapijskom uređaju CLINAC 600EX, na udaljenosti 100 cm od izvora, na dubini od 2 cm u PMMA fantomu odgovarajućih dimenzija, zračnim poljem dimenzija $15 \times 15 \text{ cm}^2$. Biološka dozimetrija izvedena je modifikovanom mikrometodom za limfocite periferne krvi i konvencionalnom citogenetičkom tehnikom za analizu hromozomskih aberacija i mikronukleusa [4]

Za statističku obradu podataka korišćen je softverski paket Statistical Package for Social Sciences (SPSS) 17.0. Za izračunavanje koeficijenata zavisnosti odgovora od doze korišćen je softver Dose estimate [5].

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Uočeno je povećanje učestalosti hromozomskih aberacija i mikronukleusa sa povećanjem aplikovane doze. Učestalosti dicentričnih hromozoma i mikronukleusa (na 1000 analiziranih ćelija) za svakog donora i sve doze i kontrole, dati su u Tabeli 1.

Tabela1. Učestalosti CA i MN (na 1000 ćelija) za sve donore i sve doze

Donor	CA (u ‰)				MN (u ‰)			
	0 Gy	0,4 Gy	1 Gy	2 Gy	0 Gy	0,4 Gy	1 Gy	2 Gy
1	1	36	119	354	7	45	100	206
2	1	29	110	348	4	40	99	194
3	1	32	111	356	13	42	92	194
4	1	31	109	352	10	40	93	198
5	1	31	111	344	6	42	91	199
6	1	26	106	350	8	43	96	193
7	1	30	108	351	9	45	97	203
8	1	27	114	349	12	40	101	205
9	0	30	117	347	5	40	95	191
10	1	28	112	351	7	39	98	198
11	1	29	113	356	5	41	93	202
12	1	32	110	344	6	40	92	200
13	1	30	116	350	3	42	94	199
14	0	29	112	348	8	41	99	185

Detaljnijom analizom rezultata može se uočiti razlika u odgovoru na različite doze zračenja za oba testa i razlika u učestalosti promena kod nekih donora u odnosu na prosek pri datoj dozi. U Tabeli 2 prikazani su odgovori donora za oba testa i sve doze prema učestalosti u odnosu na prosek.

Tabela 2. Odgovori donora za sve doze prema učestalosti u odnosu na prosek

Donor	CA odgovor na zračenje				MN odgovor na zračenje			
	(H – više od proseka, L – niže od proseka, E – jednako proseku)							
	0Gy	0,4Gy	1Gy	2Gy	0Gy	0,4Gy	1Gy	2Gy
1	H	H	H	H	L	H	H	H
2	H	L	L	L	L	L	H	L
3	H	H	L	H	H	H	L	L
4	H	H	L	H	H	L	L	H
5	H	H	L	L	L	H	L	H
6	H	L	L	E	H	H	H	L
7	H	E	L	H	H	H	H	H
8	L	L	H	L	H	L	H	H
9	H	E	H	L	L	L	L	L
10	H	L	E	H	L	L	H	H
11	H	L	H	H	L	L	L	H
12	H	H	L	L	L	L	L	H
13	H	E	H	E	L	H	L	H
14	L	L	E	L	H	L	H	L

U cilju utvrđivanja razlika u odgovoru, izračunat je H odnos za svakog donora, svaku metodu i ukupni H odnos (H odnos-odnos između broja H vrednosti i broja merenja). Rezultati su prikazani u Tabeli 3.

Tabela 3. H odnos

Donor	H odnos dicentrik test	H odnos za CBMN test	Ukupni h odnos
1	1	0.875	0.9375
2	0.25	0.25	0.25
3	0.75	0.375	0.5625
4	0.5	0.375	0.4375
5	0.375	0.5	0.4375
6	0.25	0.75	0.5
7	0.5	0.875	0.6875
8	0.125	0.625	0.375
9	0.375	0	0.1875
10	0.25	0.375	0.3125
11	0.5	0.5	0.5
12	0.5	0.125	0.3125
13	0.375	0.5	0.4375
14	0	0.375	0.1875

Iz Tabele 3 se vidi da donor 1 ima veći odgovor pri svim dozama, te je njegov ukupni H odnos 93,75%, za razliku od donora 9 i 14, koji se karakterišu najslabijim odgovorom (H odnos je 18,75%). Uprkos činjenici da postoji interindividualna varijabilnost u odgovoru na zračenje, trend povećanja broja uočenih citogenetičkih promena isti je bez obzira na primenjenu metodu. To je dalo osnov za konstruisanje krive koja bi najbolje opisala zavisnost prinosa biomarkera (CA i MN) od primenjene doze zračenja. Linearno-kvadratni parametri krive za dicentrik test su $\alpha \pm SE$ (0.0487 (+/- 0.0038)) i $\beta \pm SE$ (0.0612 (+/- 0.0028)) i za mikronukleus test $\alpha \pm SE$ (0.0837 (+/- 0.0178)) i $\beta \pm SE$ (0.0052 (+/- 0.0103)). Obe krive prikazane na Fig.1 (a-dicentrik test, b-CBMN test). Uočava se da kriva za dicentrik test na primenjenim dozama odgovara po obliku i koeficijentima koji je opisuju, linearno-kvadratnoj funkciji. Kriva za CBMN test pokazuje linearni odnos i odstupa od očekivanog odgovora, što je u skladu sa literaturnim navodima [2] da je background učestalost MN varijabilna i kreće se u opsegu od 2-36, te da se ovaj test u biodozimetrijske svrhe može koristiti u opsegu doza od 0,3Gy – 4Gy. Ipak, na niskim dozama je uočeno da obe krive imaju sličan oblik, kao što je i nagovešteno ne velikim odstupanjem u α vrednostima. Kvadratni koeficijenti su pokazali razliku na višim dozama ($\beta=0.0612$ za dicentrike i $\beta=0,005$ za mikronukleuse), sa višim vrednostima β koeficijenta za dicentrike. Ova visoka vrednost je rezultat povećanja učestalosti

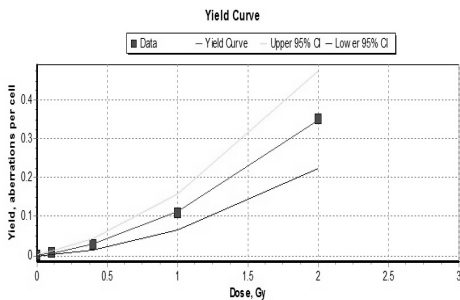


Fig1.a. Kriva doza-odgovor za dicentrik test

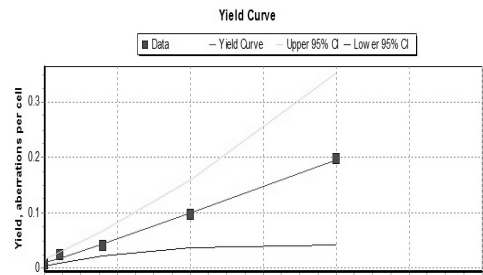


Fig1.b. Kriva doza-odgovor za CBMN test

dicentrika sa povećanjem doze, zbog čega možemo zaključiti da su dicentrici promena karakterističnija za izlaganje JZ nego mikronukleusi [2,4].

Interindividualna varijabilnost u odgovoru na zračenje, uočava se, međutim primenom oba testa, što je u saglasnosti sa nalazima drugih autora [6,7] i govori u prilog činjenici da korišćene metode imaju moć detekcije razlika u osetljivosti na zračenje, normalno prisutnih kod zdravih ispitanika opšte populacije.

4. LITERATURA

- [1] Rodrigues A. S., Oliveira N. G., Monteiro Gil O., Le'onard A., Rueff J. Use of cytogenetic indicators in radiobiology. *Radiation Protection Dosimetry* (2005), Vol. 115, No. 1–4, pp. 455–460
- [2] IAEA, WHO. *EPR-Biodosimetry 2011. Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies*. Vienna 2011
- [3] Silva-Barbosa I., Pereira-Magnata S., Amaral A., Sotero G., Cavalcanti Melo H. Dose assessment by quantification of chromosome aberrations and micronuclei in peripheral blood lymphocytes from patients exposed to gamma radiation. *Genetics and Molecular Biology*, 28, 3, 452–457 (2005)
- [4] International Atomic Energy Agency (IAEA): *Cytogenetic Analysis for Radiation Dose Assessment*. International Atomic Agency Technical Report Series 405. Vienna: IAEA, 2001
- [5] AINSBURY, E.A., LLOYD, D.C., Dose estimation software for radiation biodosimetry, *Hlth Phys.* 98 (2010) 290–295.
- [6] Scott D, Barber JB, Levine EL, Burrill W and Roberts SA (1998) Radiation-induced micronucleus induction in lymphocytes identifies a high frequency of radiosensitive cases among breast cancer cases: a test for predisposition? *Br J Cancer* 77: 614–620
- [7] Scott D, Barber JBP, Spreadborough AR, Burrill W and Roberts SA (1999) Increased chromosomal radiosensitivity in breast cancer patients: a comparison of two assays. *Int J Radiat Biol* 75: 1–10

MONITORING ŠAKA PROFESIONALNO IZLOŽENIH LICA U NUKLEARNOJ MEDICINI

Jelica KALJEVIĆ¹, Koviljka STANKOVIĆ² i Jelena STANKOVIĆ¹

1) Institut za nuklearne nauke Vinča, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, jkaljevic@vinca.rs

2) Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, kstankovic@etf.rs

SADRŽAJ

U radu su dati rezultati lične dozimetrijske konrole šaka lica profesionalno izloženih spoljašnjem gama zračenju u Centru za nuklearnu medicinu Kliničkog centra Srbije. Doze su izmerene termoluminescentnim prsten dozimetrima DXT-RAD (LiF:Mg,Ti) (Harshaw). Mesečne i godišnje doze su date za četiri grupe kontrolisanih lica za period od tri godine. Rezultati su pokazali da su maksimalne izmerene godišnje doze za šake manje od godišnje dozvoljene doze od 500 mSv.

1. Uvod

Zaštita lica profesionalno izloženih spoljašnjim jonizujućim zračenjima, uključuje i ličnu dozimetrijsku kontrolu odgovarajućim dozimetrima (telo, ekstremiteti, oko) [1]. Dozimetri za ekstremitete se koriste u situacijama okarakterisanim neuniformnim izlaganjima na radnom mestu i moguće prekoračenje granice izlaganja za kožu i ekstremitete. Opisane situacije karakteristične su za interventnu kardiologiju i radiologiju u nuklearnu medicinu.

Nuklearna medicina je interdisciplinarna oblast medicine koja se bavi primenom kratkoživećih radionuklida u lečenju i dijagnostici raznih bolesti (onkoloških, neuroloških, kardioloških). U terapijske svrhe se najčešće primenjuju beta emiteri u onkologiji (npr. ¹³¹I u lečenju karcinoma štitne žlezde). U dijagnostičke svrhe koriste se radionuklidi koji emituju gama zračenje niske energije. Najvažniji radionuklid je ^{99m}Tc, a koriste se i ¹³¹I, ¹²³I i ²⁰¹Tl. U nuklearnoj medicini se koriste i specijalne tehnike snimanja koje kombinuju detektore, računare i radionuklide (gama kamera, PET (pozitronska emisiona tomografija), itd...). PET omogućava vizuelni prikaz i in vivo “merenje” fizioloških i biohemijskih procesa primenom biološki aktivnih supstanci koje se označuju pozitronskim emiterima od kojih se najviše rutinski koriste ¹⁸F, ¹¹C, ¹³N i ¹⁵O. Ove radioobeležene supstance tzv. radiofarmaci su relativno niskih aktivnosti koje su dovoljne za detekciju zračenja, a da istovremeno ne deluju fiziološki. Spoljašnjim registrovanjem gama zračenja pomoću PET skenera, dobija se vizuelni prikaz lokalizacije i raširenosti ispitivanih obolenja.

U svakodnevnoj praksi, prilikom pripreme i ubrizgavanja radiofarmaka ruke zaposlenih, a najviše vrhovi prstiju mogu biti izložene velikim dozama od direktnog ili rasejano zračenja. Monitoring šaka podrazumeva obavezno nošenje odgovarajućih dozimetara koji imaju dobru energetsku i ugaonu osetljivost, koji ne ograničavaju operatera u manipulaciji i koji su kompatibilni sa nošenjem rukavica. Sve ove zahteve ispunjavaju termoluminescentni prsten dozimetri (TLD). U Institutu za nuklearne nauke „Vinča“ (INN Vinča), Laboratorija „Zaštita“, nivo izlaganja spoljašnjem gama zračenju šaka profesionalno izloženih lica se određuje merenjem ličnog ekvivalenta doze H_p(0.07) prsten dozimetrima na mesečnom nivou [1]. Prsten TLD se prvi put koriste u Srbiji u Kliničkom centru Srbije (KCS). U radu su dati rezultati dozimetrijske kontrole šaka osoblja Centra za nuklearnu medicinu KCS (CNM-KCS)

2. Metode

Sistem za merenje ličnog ekvivalenta doze za šake čine: komercijalni TLD DXT-RAD (Harshaw), čitač dozimetara 6600PLUS (Harshaw), program WinREMS (Harshaw), program TL dozimetrija i aparatura za montažu-demontažu prsten dozimetara. TLD DXT-RAD pripada grupi pasivnih dozimetara i sastoji se iz: ringlete, plastičnog prstena i plastične kapice. Ringletu čini detektor u obliku tablete od termoluminescentnog materijala LiF:Mg,Ti u Kapton foliji označen 5-cifrenim identifikacionim brojem. Sva merenje se vrše na automatskom TLD čitaču Harshaw 6600PLUS koji se sastoji od programabilnog

sistema za zagrevanje baziranog na brzom zagrevanju gasa (azota), i sistema fotomultiplikatora koji mere intenzitet termoluminescentne svetlosti [2]. Program WinREMS (Windows based Radiation Evaluation and Management System) omogućava kontrolu merenja i izračunava ekvivalent doze u ringleti prema (1).

$$D = \frac{Q \cdot ECC}{RCF}, \quad (1)$$

gde je: D - izmereni ekvivalent doze u smislu $H_p(0.07)$, Q - naelektrisanje na izlazu fotomultiplikatora, ECC - koeficijent kalibracije svakog pojedinačnog dozimetra, RCF - koeficijent kalibracije čitača. Koeficijenti ECC i RCF se dobijaju pomoću tri automatske kalibracione procedure programa WinREMS: i) izbor kalibracionih dozimetara, ii) kalibracija čitača i iii) kalibracija dozimetara. Za izračunavanje RCF koeficijenta, kalibracioni dozimetri se na odgovarajućem fantomu zrače u sekundarnoj standardnoj dozimetrijskoj laboratoriji (SSDL) prema standardu ISO 4037 na referentnom radioaktivnom izvoru ^{137}Cs [3, 4, 5]. Za određivanje ECC , koristi se iradijator u samom čitaču (^{90}Sr) i program WinREMS. Konačan rezultat svih kalibracionih procedura je dozimetar spreman za korisnika. Program TL dozimetrija povezuje rezultate merenja iz programa „WinREMS“ sa bazom ličnih podataka kontrolisanih lica (ime, prezime, JMBG)

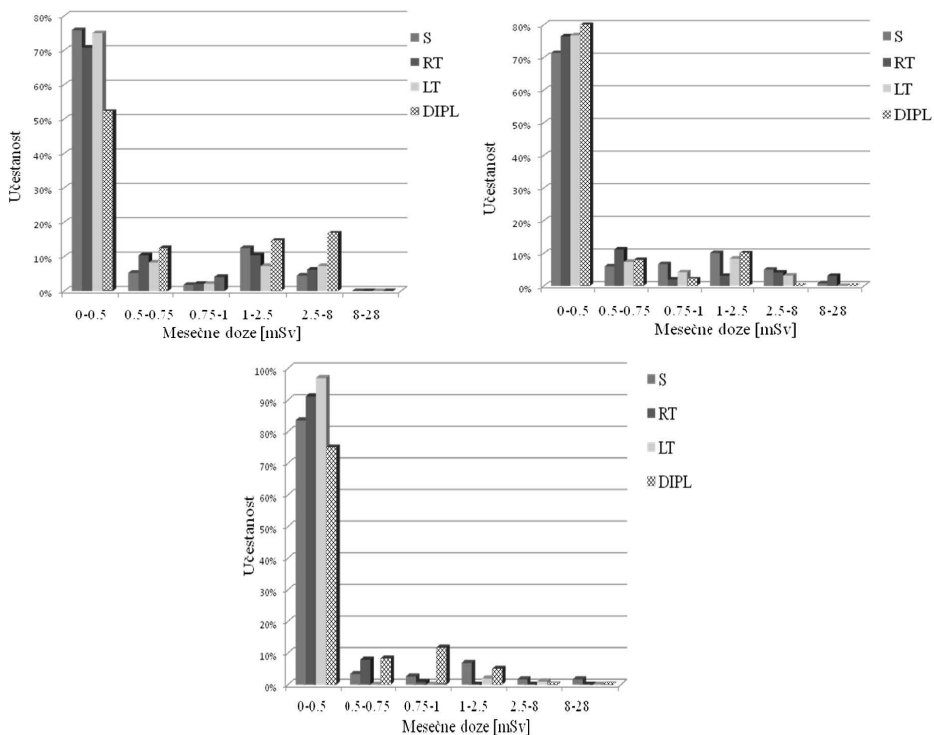
3. Rezultati merenja i diskusija

Rezultati merenja mesečnih vrednosti ličnog ekvivalenta doze gama zračenja za šake $H_p(0.07)$ su dati za tri godine. Kontrolisana lica su po profesiji podeljena na četiri grupe: medicinske sestre (S), radiološki tehničari (RT), laborantski tehničari (LT) i lica sa visokom stručnom spremom (DIPL). U poslednjoj grupi su: lekar nuklearne medicine, dipl. fizičar, dipl. el. inženjer i dipl. fiziko-hemičar. Kontrolisana lica nisu radila samo određene procedure već su se rotirala na svim procedurama tokom godine. U 2010. god. na kontroli je bilo 29 lica: 10 sestara, 7 radioloških tehničara, 8 laborantskih tehničara i 4 lica u DIPL grupi. Izmereno je ukupno 304 mesečne vrednosti. U 2011. god. na kontroli je bilo 33 lica: 10 sestara, 10 radioloških tehničara, 8 laborantskih tehničara i 5 DIPL lica (2 lekara nuklearne medicine, dipl. el. inž., dipl. fizičar i dipl. fiziko-hemičar). Izmereno je ukupno 362 mesečne vrednosti. U 2012. god. na kontroli je bilo 33 lica: 10 sestara, 10 radioloških tehničara, 8 laborantskih tehničara, 5 DIPL lica (2 lekara nuklearne medicine, dipl. el. inž., dipl. fizičar i dipl. fiziko-hemičar). Izmereno je ukupno 384 mesečne vrednosti. U Tabeli 1 su prikazani rezultati godišnjih doza po grupama (min, max i srednja vrednost, i standardna devijacija) u 2010, 2011. i 2012. god. za ona lica koja su kontrolisana u toku cele godine.

TABELA 1. Pregled godišnjih ekvivalenata doza za šake osoblja CNM-KCS

Osoblje	$H_p(0.07)[\text{mSv}]$		
	2010.god. $\bar{X} \pm \sigma$ (min-max)	2011.god. $\bar{X} \pm \sigma$ (min-max)	2012.god. $\bar{X} \pm \sigma$ (min-max)
S	5.7±3.7 (1.4-13)	9.6±13 (1.2-44)	6.0±7.5 (1.4-23)
RT	4.6±3.7* (0.85-10)	14±13 (2.4-41)	2.3±1.4 (1.2-5.6)
LT	6.7±7.4 (1.6-20)	5.64±6.23 (1.3-17)	2.6±2.0 (1.4-7.2)
DIPL	14±12 (3.1-27)	4.0±2.9 (1.0-6.6)	3.7±2.8 (1.1-8.1)

* kontrolisani su u periodu od 6 meseci.



Slika 1. Raspodela mesečnih $H_p(0.07)$ u 2010.god (gore levo), 2011.god (gore desno) i 2012. god (dole).

Analiza vrednosti prikazanih u Tabeli 1 pokazuje da su vrednosti standardne devijacije velike u odnosu na srednju vrednost, što ukazuje na rasipanje rezultata. Na ovakvu raspodelu su uticale pojedine velike vrednosti godišnjih doza. Na slici 1 je data raspodela mesečnih ekvivalentnih doza, $H_p(0.07)$, za šake kontrolisanih lica zaposlena u CNM-KCS, u 2010., 2011. i 2012. god. po grupama. Analizom slike 1 možemo da zaključimo da više od 70% sestara, radioloških i laborantski tehničara imaju mesečnu dozu do 0.5 mSv. Kad je u pitanju grupa DIPL, od 50% do 80% lica ima mesečnu dozu do 0.5 mSv, zavisno od godine. Iz toga proizilazi da je godišnja doza zračenja za većinu osoblja u CNM-KCS mnogo manja od propisane godišnje granične vrednosti od 500 mSv [6].

Rezultati ukupnih pojedinačnih doza za sva kontrolisana lica i za sve godine pokazuju da određeni broj ima mnogo veće doze od ostalih, što može navesti na zaključak da suprotno tvrdnjama nema rotacije osoblja ili da nema dovoljno obučenog kadra.

4. Zaključak

U radu je prikazan sistem za ličnu dozimetrijsku kontrolu ekstremiteta (šaka) lica profesionalno izloženih spoljašnjem gama zračenju, koji se koristi u INN Vinča, Laboratorija "Zaštita". Dati su mesečni i godišnji rezultati za kontrolisana lica CNM-KCS za tri godine. Merenja su izvršena termoluminescentnim prsten dozimetrima DXT-RAD (LiF:Mg,Ti). Kontrola profesionalno izloženih lica ne prelazi graničnu vrednost za ekstremitete od 500 mSv po godini.

5. Literatura

- [1] ICRP, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", Elsevier Ltd., ICRP Publication 103, 2007.
- [2] Model 6600 PLUS Automated TLD Reader with WinREMS™, Thermo Electron Co., Oakwood Village, OH, 2006.
- [3] X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of energy, ISO 4037-1, 1996.
- [4] X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of energy, ISO 4037-2, 1997.
- [5] X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of energy, ISO 4037-2, 1999.
- [6] Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima, "Sl. list SRJ" br. 32/98, 1998.

HANDS MONITORING OF PROFESSIONALLY EXPOSED PERSONS IN NUCLEAR MEDICINE

Jelica KALJEVIĆ¹, Koviļjka STANKOVIĆ² i Jelena STANKOVIĆ¹

1) Institut za nuklearne nauke Vinča, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, jkaljevic@vinca.rs

2) Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija,
kstankovic@etf.rs

ABSTRACT

In this paper, measurement results of personal dosimetric control for hands of persons professionally exposed to external gamma radiation in Center for Nuclear medicine in Clinical center Serbia, are shown. Doses are measured with thermoluminescent ring dosimeters DXT-RAD (LiF:Mg,Ti)(Harshaw). Monthly and yearly doses are given for four groups of monitored persons for three year period. Results showed that maximal measured yearly hand doses are less than yearly limit dose of 500 mSv.

MIKRONUKLEUSI KAO PREDIKTORI KARCINOMA U PROFESIONALNOJ EKSPOZICIJI GENOTOKSIČNIM AGENSIMA – PRIKAZ SLUČAJA

Sladana VUKOVIĆ, Jelena PAJIĆ, Boban RAKIĆ, Milenko ĐUKIĆ

*Institut za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“, Beograd, Srbija
sladjana.vukovicimrs@gmail.com, jejapajic@gmail.com,
rakicboban@yahoo.co.uk, djukicmilenko@gmail.com*

SAŽETAK

Maligni tumori su česta oboljenja u svim delovima sveta. Smatra se da nastaju iz jedne patološke ćelije, čiji genetički materijal zatim podleže replikaciji u ponavljanim deobama, te se formiraju klonirane tumorske ćelije. Početni stadijum u nastanku patološke ćelije je posledica mutacije genetičkog materijala. Ova alteracija može nastati spontano ili biti izazvana egzogenim faktorima, kao što su ekspozicija hemijskim kancerogenim materijama ili jonizujućim zračenjima. Citogenetička istraživanja, kojima se mogu detektovati ovakve promene, predstavljaju značajan element periodičnih pregleda zaposlenih u zoni jonizujućih zračenja, pre svega zbog svoje senzitivnosti u detekciji genomske nestabilnosti, povezane sa nastankom karcinoma, kao kasnog stohastičkog efekta izlaganja zračenjima. Prikaz slučaja kolorektalnog karcinoma ispitanice profesionalno izložene radionuklidima, u kome je višegodišnja perzistencija povećanog broja mikronukleusa bila povod za detaljne pretrage, koje su i dovele do uspostavljanja konačne dijagnoze, potvrda je brojnih epidemioloških studija koje navode mikronukleus test kao značajno oruđe u predikciji kancera.

1. UVOD

Maligni tumori su česta oboljenja u svim delovima sveta. Procenjuje se da 30-40% osoba u industrijski razvijenim zemljama u toku svog života oboli od nekog malignog oboljenja. Smatra se da nastaju iz jedne patološke ćelije, čiji genetički materijal zatim podleže replikaciji u ponavljanim deobama, te se formiraju klonirane tumorske ćelije. Početni stadijum u nastanku patološke ćelije je posledica mutacije genetičkog materijala. Ova alteracija može nastati spontano ili biti izazvana egzogenim faktorima, kao što su ekspozicija hemijskim kancerogenim materijama ili jonizujućim zračenjima. Da li će se iz ove promenjene ćelije razviti tumor, zavisi od brojnih faktora: od sposobnosti ćelije da reparira oštećenje genetičkog materijala, od prisustva drugih faktora koji potpomažu ili inhibiraju razvoj tumora, kao i od efikasnosti imunološkog sistema.

Veliki broj istraživanja u medicini rada pokušava da proceni udeo ekspozicije kancerogenim materijama (profesionalnim kancerogenima) sa radnog mesta u ukupnom broju malignih tumora u opštoj populaciji. Profesionalni kancerogen je svaki hemijski, fizički ili biološki agens na radnom mestu koji povećava rizik od nastanka malignog oboljenja među izloženim radnicima.

2. CILJ RADA

Perzistentno povećana učestalost mikronukleusa u binukleranim limfocitima osoba eksponovanih jonizujućim zračenjima, kao mogući prediktor karcinoma.

3. PRIKAZ SLUČAJA

Ispitanica V.M., stara 55 godina, po zanimanju je medicinska sestra i 31 godinu radi u zanimanju. Prvih 13 godina je radila na poslovima primarne zdravstvene zaštite, potom 10 godina na odeljenju hematologije (priprema i podela citostatske terapije), a ostalo vreme kao medicinska sestra na nuklearnoj medicini. Od 2001. do 2008. godine obavljala je poslove eluacije molibden-tehnecijumskog generatora i bila u kontaktu sa sledećim radionuklidima: itrijum Y⁹⁰, tehnecijum mTc⁹⁹, jod I¹³¹. Od 2008. godine nije

radila sa otvorenim izvorima jonizujućih zračenja zbog nalaza nestabilnih hromozomskih aberacija i povećanog broja mikronukleusa. Od tada obavlja poslove laboratorijskog tehničara u mikroanalitičkoj laboratoriji nuklearne medicine.

Ispitanica je udata, ima dvoje dece, živi u komfornim uslovima, normalne je uhranjenosti i nikada nije konzumirala cigarete ni alkohol. Negira porodično opterećenje za maligne bolesti. Redovno dolazi na periodične preglede koji su zakonom regulisani za sve zaposlene u zoni jonizujućih zračenja [3]. Periodični pregled podrazumeva uzimanje anamnestičkih podataka, fizikalni pregled, hematološke i biohemijske analize i poslednjih 10 godina citogenetičke analize u cilju određivanja biomarkera ekspozicije jonizujućim zračenjima (analiza hromozomskih aberacija i mikronukleus test).

Uvidom u zdravstveni karton periodičnih pregleda utvrđeno je da se ispitanica od 2008. godine redovno endokrinološki kontroliše zbog hipoehogenih nodoznih promena u oba režnja štitaste žlezde, bez poremećaja hormonskog tiroidnog statusa. Konstatovana je u maju 2011. godine povišena vrednost antitroponinskih antitela (77,2 ref. 0-75 IU/ml) i antitireoglobulinskih antitela (330 ref. 0.150 IU/ml) u sklopu autoimunog tireoiditisa.

Unazad 15 godina povremeno je lečena zbog hipohromene sideropenijske anemije koja je etiološki objašnjena miomatoznim uterusom i obilnim menstrualnim krvarenjima. Rađene analize vitamina B₁₂ i folne kiseline su bile urednog nalaza. Po menopauzi, koja je nastupila 2011. godine, došlo je do normalizovanja krvne slike.

Lečena je konzervativno zbog ulkusne bolesti 1997. godine, a 2005. godine zbog gastritisa uzrokovanog *Helikobacter pylori* infekcijom.

U 2012. godini lečena fizikalnom terapijom i nesteroidnim antiinflamatornim lekovima zbog degenerativnog oboljenja kičme i zglobova kolena.

Prvi put citogenetičke analize rađene su 2002. godine pri čemu je konstatovana jedna aberantna ćelija sa acentričnim fragmentom i jedan hromatidni prekid. Od 2008. godine uočava se konstantno povećan broj mikronukleusa i povremeno strukturne aberacije tipa dicentričnih i prstenastih hromozoma u kariotipu limfocita periferne krvi, zbog čega su usledile zabrane rada sa radioaktivnim supstancama i toksičnim materijama. Gamaspektrometrijska analiza 24-časovnog urina rađena iste, 2008. godine, pokazala je da je aktivnost mTc⁹⁹, J¹³¹ i Cs¹³⁷ ispod granica detekcije, a aktivnost K⁴⁰ na nivou prirodnog izlučivanja. Prosečne godišnje ekvivalentne doze (period 2001-2012.) na osnovu termoluminiscentne dozimetrije kretale su se od 0,55 do 1,72 mSv, što je u nivou prirodnog fona [4].

Ispitanica se premešta na radno mesto u mikroanalitičkoj laboratoriji, ali se citogenetičke promene (povećan broj mikronukleusa i hromozomskih aberacija) održavaju.

S obzirom na perzistiranje citogenetičkih promena u dužem vremenskom periodu, zahtevani su redovni kontrolni pregledi u Institutu za medicinu rada Srbije pri čemu su uz anamnezu i fizikalni pregled rađena citogenetička ispitivanja i laboratorijske (hematološke i biohemijske) analize krvi i urina. Od subjektivnih tegoba perzistiraju zamaranje i kostobolja. U statusu izuzev difuzno uvećane štitaste žlezde, ostali fizikalni nalaz je bio uredan.

Od 2011. godine u više navrata analizirani su tumor markeri. U maju 2011 (AFP, CA 15-3, CEA, CA 19-9, CA 125) i martu 2012. godine (CA 125, CA 19-9) su bili urednog nalaza. Od avgusta 2012. godine registrovana povišena vrednost CEA (26,4; 15,8; 56,8 ref. za nepušače 0-3,3 ng/ml) zbog čega je zahtevana detaljna ginekološka, endokrinološka i gastroenterološka obrada. Ispitivanja su sprovedena u 2012. godini pri čemu je ginekološkim pregledom konstatovan manji subserozni miom, UZ pregled abdomena je bio urednog nalaza, a hormonski tireoidni status očuvan sa nodoznim promenama u štitastoj žlezdi bez progresije u odnosu na prethodne ultrazvučne nalaze. Rađena ezofagogastroskopija je takođe bila urednog nalaza.

U okviru skrininga, u decembru 2012. godine, kolonoskopski uočena vegetantna formacija na 5cm od anokutane linije, uzet bioptički materijal i PH verifikovan adenokarcinom rektuma u MR stadijumu T3bN1 (PH br. 1097477576 od 28.12.2012.). MSCCT abdomena ukazao je na meta promene u jetri i plućima, što je potvrđeno i PET pregledom. Konzilijarno doneta odluka o primeni preoperativne

radioterapije koja je sprovedena u januaru. 2013. godine. Operativno lečena u martu.2013. kada je učinjena prednja niska resekcija rektuma sa totalnom mezorektalnom ekscizijom, kreirana staplerska koloanalna LT anastomoza i formirana protektivna ileostoma. Konzilijarno doneta odluka o primeni sistemske hemioterapije. Do sada ordinirana II ciklusa po FOLOX 4 HT protokolu.

4. DISKUSIJA

Prve promene u kariotipu limfocita uočene su 2008. godine, četiri godine pre nalaza povišene vrednosti CEA tumor markera i dijagnostikovanja malignog oboljenja. Povećana učestalost mikronukleusa je bila perzistentna u nalazu od 2008. godine (od 35 do 59 na 1000 binuklearnih limfocita), dok su strukturne promene na hromozomima varirale tokom posmatranog perioda. Promene u kariotipu limfocita su prikazane u Tabeli. br. 1.

Tabela br. 1 Zastupljenost promena u kariotipu limfocita

Godina	Dicentrični hromozom	Prstenasti hromozom	Acentrični fragment	Hromatidni prekidi	Mikronukleusi
2002.	/	/	1	1	9
2005.	/	/	/	/	7
2008.	1	/	1	/	36
2009.	1	1	2	1	50
2010.(maj)	/	/	/	3	39
2010.(novembar)	Nije rađeno	Nije rađeno	Nije rađeno	Nije rađeno	59
2011.*	/	1	2	2	55
2012. (januar)	/	/	/	/	42
2012. (novembar)	/	/	/	/	35

* *Smanjen mitotički indeks -150 analiziranih ćelija za hromozomske aberacije*

CBMN test (mikronukleus test) je važan u merenju nestabilnosti genoma, povezane sa pojavom kancera, na hromozomskom i molekularnom nivou. Ovim testom mogu se analizirati hromozomski prekidi, nerazdvajanje, rearanžmani, gubitak hromozoma, amplifikacija gena, nekroza i apoptoza [5]. Najnovije citogenetičke studije primarnih kultura solidnih tumora [6] potvrdile su da su mikronukleusi (MN) i nukleoplazmatični mostići (NPB) zajednički za transformisane ćelije i da najveći deo ovih abnormalnih jedarnih struktura potiče od nestabilnih dicentričnih i prstenastih hromozoma. Dakle, abnormalna jedarna morfologija praćena NPBs, i MN indikator je značajne genomske nestabilnosti povezane sa kancerom [6]. Iako je bazalna incidenca mikronukleusa u opštoj populaciji varijabilna i povezana sa mnogim kofaktorima (konzumiranje cigareta, folatni status, vitamin B₁₂, pol, starost), skoro sve od navedenih faktora u ovom slučaju isključili smo na osnovu anamnestičkih podataka uzetih od ispitanice i redovno sprovedenih hematološko-biohemijskih analiza. Pol i starost jesu kofaktori od značaja u ovom slučaju, ali se samo njima ne bi mogla objasniti dugogodišnja perzistencija genetičkih oštećenja. Literaturni podaci, međutim, ukazuju na jasnu vezu ekspozicije jonizujućim zračenjima, perzistencije genetičkih oštećenja i pojave kasnih stohastičkih efekata zračenja, kakav je kancer. Svi stohastički efekti JZ su višestepeni procesi. Najbolje je definisana kancerogeneza. Mnogi eksperimentalni i klinički podaci pokazali su da se kancer razvija kroz nekoliko koraka mutacija i upravo je takav model nastanka predložen za kolorektalni kancer [7]. Prema ovom modelu, razvoj genomske nestabilnosti je proces od najvećeg značaja, pošto ovaj fenomen povećava učestalost mutacija i samim tim verovatnoću druge i treće mutacije u pojedinačnim ćelijama. Povećana genomska nestabilnost kod radiosenzitivnih osoba može delom objasniti povećan rizik od razvoja karcinoma [8].

U opisanom slučaju, bez obzira na kasnu pojavu povišenih tumor markera i uredne ostale nalaze, višegodišnja perzistencija povećanog broja mikronukleusa u limfocitima periferne krvi, ukazala je na genomsku nestabilnost, uočenu na citogenetičkom nivou, koja je prethodila pojavi kancera, a CBMN test je potvrdio svoju primenu u predikciji kancera.

5. LITERATURA

- [1] Schottenfeld D., Fraumeni J.F.Jr. Cancer epidemiology and prevention. 2006. Oxford University Press Inc
- [2] Vidaković A. i sar. Medicina rada I i II (1997) Medicinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [3] Pravilnik o uslovima za dobijanje licence za obavljanje radijacione delatnosti (Sl.gl. RS 61/11 od 18.11.2011.)
- [4] Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zrčenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima (Sl.gl. RS 86/11 od 18.11.2011.)
- [5] Fenech M. Chromosomal biomarkers of genomic instability relevant to cancer. (2002) *Drugs Discovery Today*. Vol 7 (22) 1128-1137.
- [6] Gisselson D. et al. Abnorml nuclear shape in solid tumours reflects mitotic instability. (2001) *Am.J.Pathol.*158, 377-388
- [7] Fearon E., Vogelstein B. A genetic model fol colorectal cancer tumorigenesis. *Cell* 61, 759-767 (1990)
- [8] ICRP. Genetic susceptibility to cancer. *Annals of ICRP*. Publication 79. Pergamon (1999)

PRIMENA VISOKIH AKTIVNOSTI ^{131}I U LEČENJU KARCINOMA ŠTITASTE ŽLEZDE

Vera SPASOJEVIĆ-TIŠMA¹, Duško KOŠUTIĆ²

1) Javno preduzeće "Nuklearni objekti Srbije", Beograd, Srbija, verat@vinca.rs

2) Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd, Srbija, kosdus@vinca.rs

SADRŽAJ

Lečenje karcinoma štitaste žlezde je u osnovi hirurško, a kao dopunsko lečenje primenjuje se TSH supresivna terapija L-tiroksinom i radioablacija ^{131}I . Lečenje ^{131}I se sprovodi kod dobro diferentovanih karcinoma štitaste žlezde, i to onih čije ćelije vezuju jod, a u cilju ablacije ostatka tkiva nakon totalne tiroidektomije. Obično se daje doza od 5.55 do 6.5 GBq. Pri davanju ovako visokih doza moraju se obezbediti posebni uslovi za izolaciju pacijenta. Pacijent se otpušta iz sobe terapijskog bloka kada aktivnost ^{131}I u organizmu bude ispod 400 MBq. Novi kriterijumi za otpuštanje pacijenata predlažu da se hospitalizovanje i otpuštanje pacijenata utvrđuje individualno. Potrebno je pre svega uzeti u obzir zdravstveno stanje pacijenta, okruženje u kome živi, kao i prisustvo male dece.

1. Uvod

Štitasta žlezda je najveća endokrina žlezda u našem organizmu prosečne težine oko 25 grama. Ima izgled štita ili leptira i smeštena je na prednjoj strani vrata, ispred dušnika, između krikoidne hrskavice i suprasternalne jame. Štitasta žlezda stvara i sekretuje hormone: tiroksin, tironin i kalcitonin. Za stvaranje tiroksina (T4) i tironina (T3) potrebno je prisustvo joda. On se unosi hranom iz spoljašnje sredine. Dnevne potrebe su 100-200 mikrograma joda. Sekretija i stvaranje hormona T4 i T3 u štitastoj žlezdi su pod direktnim uticajem tireostimulišućeg hormona hipofize (TSH), a on je pod uticajem tireotropina (TRH) hormona hipotalamusa. Regulacija sinteze se odvija po principu negativne povratne sprege tj. porast tireoidnih hormona u plazmi inhibira sekreciju TSH i TRH i obrnuto. Dakle, za normalno funkcionisanje štitaste žlezde potrebno je da normalno funkcioniše hipotalamusno-hipofizno-tiroidni sistem [1]. Tiroidni hormoni putem krvotoka dospevaju do ciljnih organa. U krvotoku hormoni su u slobodnom obliku ili su vezani za proteine plazme. Slobodni se nalaze u veoma maloj količini, oko 0.1% u cirkulaciji, ali su veoma bitni jer predstavljaju aktivni oblik hormona. 75% hormona u cirkulaciji je vezano za proteine plazme globuline, a manji deo za prealbumine i albumine. Ovim vezivanjem se sprečava gubitak hormona putem bubrega, a vezani oblik čini i rezervu hormona. Između slobodnog i vezanog oblika hormona postoji ravnoteža. Tiroidni hormoni imaju ključnu ulogu u razvoju nervnog sistema, podstiču budnost, povećavaju osetljivost na različite stimuluse, utiču na osećaj gladi, pamćenje i sposobnost učenja, kao i na normalan emocionalni tonus. Kada se govori o malignitetu endokrinog sistema najčešće se misli na malignitet štitaste žlezde. I pored velikog broja dijagnostičkih postupaka veoma je teško postaviti dijagnozu maligniteta, naročito u slučaju pojedinačnih nodusa u štitastoj žlezdi koji mogu biti benigni ili maligni. Na osnovu brojnih ispitivanja primećeno je da je u područjima gde je povećana radijacija, kao posledica nuklearnih katastrofa, broj obolelih sa karcinomom štitaste žlezde povećan. Prema danas važećoj klasifikaciji Svetske Zdravstvene organizacije (SZO) iz 1988. godine [2] svi karcinomi štitaste žlezde se na osnovu njihove patohistološke građe mogu podeliti u dve grupe i to: medularni tireokarcinom (MTK) koji potiče od kalcitonin C ćelija i ne-medularni karcinom (NMTK) koji potiče od folikularnih ćelija. U grupu NMTK spadaju: papilarni tireokarcinom (PTK) i folikularni tireokarcinom (FTK), koji predstavljaju diferentovani oblik karcinoma, i anaplastični karcinom predstavnik ne-diferentovanog ne-medularnog tiroidnog karcinoma.

2. Metode

Lečenje karcinoma štitaste žlezde je u osnovi hirurško. Mnoge studije rađene u Evropi i u Americi kod pacijenata sa malignim tumorima većim od 1cm predlažu lečenje totalnom tiroidektomijom, a kao dopunsko lečenje TSH supresivnom terapijom L-tiroksinom i radioablaciju ^{131}I . Lečenje ^{131}I se sprovodi

kod dobro diferenciranih karcinoma štitaste žlezde i to onih čije ćelije vezuju jod [3], a u cilju ablacije ostatka tkiva nakon totalne tiroidektomije. Terapijski tretman radioaktivnim jodom ^{131}I u lečenju karcinoma štitaste žlezde, predstavlja najčešće primenjivano izlaganje otvorenim izvorima jonizujućih zračenja u terapiji. Upotreba ove metode u poslednjoj deceniji skoro se udvostručila. Procenom UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), učestalost tretmana radioaktivnim jodom ^{131}I u razvijenim zemljama je porasla sa 10 stanovnika od 100.000 populacije između 1985. i 1990. godine na 17 stanovnika od 100.000 populacije u periodu između 1991. i 1996. godine. Takođe se procenjuje da je u periodu između 1985. i 1990. godine izvedeno oko 210.000 tretmana, a u periodu između 1991. i 1996. godine oko 380.000 tretmana.

Cilj radiojodne terapije kod tiroidektomiranih pacijenata je uništenje preostalog funkcionalnog tkiva štitaste žlezde, ili terapije recidiva ili lokalnih odnosno udaljenih metastaza diferenciranih tireokarcinoma. Vrednost doze joda koja će se dati pacijentu je konzilijarna odluka. U cilju povećanja efikasnosti terapije ^{131}I pacijentima se savetuje dijeta siromašna jodom (dnevno oko 25-75 mg) u trajanju od dve nedelje pre početka terapije. U cilju adekvatne zaštite, profesionalno izloženih lica i okoline, pri korišćenju visokih aktivnosti ^{131}I , primenjuju se direktive Evropske Unije kao i čitav niz pratećih dokumenata koji se donose u skladu sa direktivama.

Da bi se navedene zaštitne mere uopšte mogle sprovesti, neophodno je da se svi poslovi oko primene otvorenih radioaktivnih izvora obavljaju u posebno organizovanim i opremljenim radnim prostorijama. U ovakvoj laboratoriji svi poslovi obavljaju se po nizu pisanih i nepisanih pravila koja obezbeđuju sprovođenje svih mera zaštite, a moraju ih znati svi oni koji se odluče za primenu radionuklida u medicini.

Izvor se dobija u originalnom, standardizovanom kontejneru i čuva se u olovnoj kasi u prostorijama Centra za nuklearnu medicinu. Neposredno pre ulaska pacijenta u sobu terapijskog bloka vrši se prenos kapsule u kontejneru koji se otvara u sobi terapijskog bloka. Pacijentu se po dolasku objasni način kako treba da se ponaša pri postupku ispijanja kapsule, a postupak se prekično i obavi „na hladno“ bez radioaktivne kapsule. Po uzimanju kapsule ^{131}I pacijent odlazi u svoju sobu, zatvara vrata i ponaša se u skladu sa dobijenim uputstvom. Svo vreme je pod video nadzorom osoblja. Obično se daje doza od 5.55 do 6.5 GBq, a kada su u pitanju koštane metastaze doza se povećava na 7.4 GBq. Nema dokaza da su terapijske doze radioaktivnog joda veće od 7.4 GBq efikasnije, ali su udružene sa povećanom incidencijom komplikacija.

Dalji nadzor i komunikacija sa pacijentom odvijaju se putem audio-vizuelnog sistema koji je postavljen u sobi pacijenta, sobi dežurnog osoblja i na pultu osoblja koje radi neprekidno. Prvog dana i svakog narednog dana u isto vreme, na mernim uređajima vrši se očitavanje izloženosti jonizujućim zračenjima, u tačno definisanoj geometriji i proračunava zaostala aktivnost. Terapijski efekat ^{131}I se bazira na emisiji beta i gama zraka pri radioaktivnom raspadu do stabilnog ^{131}Xe . Radioaktivni jod se unosi oralnim putem u organizam u vidu kapsule. Putem krvotoka stiže do štitaste žlezde. Iz krvi 30% unetog joda odlazi u štitastu žlezdu zbog velikog afiniteta ovog organa za jod. Ostalih 70% unetog joda se izluči mokraćom sa efektivnim vremenom poluiskazavanja od 7.6 dana. Vezivanjem za tkivo tiroidne žlezde beta čestice uništavaju tiroidne ćelije, a gama fotoni omogućavaju posterapijski scintigram na kome se može videti dali ima metastaza i gde su lokalizovane. Pacijent se otpušta iz sobe terapijskog bloka kada aktivnost ^{131}I u organizmu bude ispod 400 MBq.

3. Rezultati i diskusija

Šest nedelja nakon primljene terapije ^{131}I pacijenti imaju prvi kontrolni pregled kada kontrolišu kompletnu krvnu sliku i vrednosti TSH, FT3, Tg i anti-Tg. Na osnovu dobijenih rezultata se dobija uvid da li je uništeno maligno tkivo i da li treba ponoviti davanje ^{131}I . Ako ne, pacijenti se po protokolu kontrolišu: 3, 6, 12-tog meseca, i kasnije jednom godišnje doživotno. Sve vreme pacijenti su pod supresivno supstitucionom terapijom L-Tiroksina.

Smatra se da ablacionu dozu treba primeniti u svih bolesnika muškog pola starijih od 40 godina i žena starijih od 50 godina. Radioaktivni jod se primenjuje i u lečenju metastaza dobro diferentovanih karcinoma u plućima i kostima. [4]. Države članice Evropske Unije (EU), primenjuju ista pravila, kao u okviru BSS (Basic safety standards – Međunarodni sigurnosni standardi), ali pojedine zemlje izdaju posebne smernice kao na primer da doza od 400 MBq može dovesti do ograničenja od dve do tri nedelje za one porodice sa malom decom. Države članice EU primenjuju princip da zaostala aktivnost pri izlasku iz stacionarne ustanove bude u rasponu od 100 do 800 MBq, ali ona je u većini zemalja u rasponu od 400 do 600 MBq. I druga nacionalna tela i agencije izdaju preporuke o zadržanoj aktivnosti. Evropska asocijacija za lečenje tireoidee preporučuje [5] aktivnost ispod 800 MBq za ambulantno lečenje, pod uslovom da se poštuju određena ograničenja. Neki autori ne preporučuju kontakte odojčadi i trudnica sa pacijentom ukoliko aktivnost nije pala ispod 50 do 100 MBq. U Tabeli 1 su dati primeri za maksimalne aktivnosti ^{131}I sa kojima pacijent sme napustiti stacionarnu ustanovu.

Tabela 1. Maksimalne aktivnosti ^{131}I sa kojima pacijent može napustiti stacionarnu ustanovu

Država /Referenca	Aktivnost ^{131}I (MBq)
BSS	1100
Evropska asocijacija za terapiju tireoidee	800
Japan	500 ili < 30 $\mu\text{Sv/h}$ na 1 m
Nemačka	250 (osnova 3.5) $\mu\text{Sv/h}$ na 1 m
Ostale zemlje EU	95–800 (uglavnom 400–800)
Srbija	400

4. Zaključak

Predlaže se da hospitalizovanje i otpuštanje pacijenata utvrđuje individualno. Potrebno je pre svega uzeti u obzir zdravstveno stanje pacijenta, okruženje u kome živi, kao i prisustvo male dece [6]. Saveti o predostrožnostima zaštite drugih lica treba da se zasnivaju na realnim modelima ponašanja, uključujući i faktore stanovanja. Saveti bi trebalo da obezbede da efektivna doza za lica koja dolaze u kontakt sa pacijentom bude manja od 1 mSv, odnosno da bude unutar granične vrednosti izlaganja za pojedinca iz populacije. Uputstva za staratelje koja se svesno i voljno izlažu dozi od pacijenta isključuju se iz prethodnih graničnih izlaganja, ali se na njih primenjuju bezbednosne mere opisane u Publikaciji IAEA broj 63 [7].

5. Literatura

- [1] D. Kanazir. Molekulski mehanizmi delovanja hormona štitaste žlezde i bolesti receptora. I naučni skup o štitastoj žlezdi, Monografija, Sanu, Beograd, (1996) 1-38.
- [2] JF. Moley. Medullary thyroid cancer, Surg Clin North Am, (1995) 75:405-20.
- [3] HR. Maxon, HV. Smith. Radioiodine-131 in the diagnosis and treatment of metastatic well differentiated thyroid cancer, Endocrinol metab Clin North Am, (1990) 19:685-718.
- [4] R. Džodić. Protokol za lečenje malignih tumora štitaste žlezde, IORS, Beograd, (1993).
- [5] EUROPEAN THYROID ASSOCIATION, I-131 therapy for hiperthyroidism towards 2000 EUR. J. Nucl. Med. 23 4 (1996) BP13-BP15.
- [6] I. Mathieu et al. Recommended restrictions after iodine-131 therapy: Measured doses in family members, Health Phys. 76 2 (1999) 129-134.
- [7] IAEA, (2009) Safety Reports, Series No.63

APPLICATION OF HIGH ACTIVITY ^{131}I IN THE TREATMENT OF THYROID GLAND CARCINOMA

Vera SPASOJEVIĆ-TIŠMA¹, Duško KOŠUTIĆ²

- 1) Nuclear Facilities of Serbia, Belgrade, Serbia, verat@vinca.rs
- 2) "Vinca" Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia, kosdus@vinca.rs

ABSTRACT

The thyroid gland is the largest endocrine gland in the body placed at the front of the neck. Creates and secretes hormones: thyroxine, triiodothyronine and calcitonin. When we talk about the most common malignancy of the endocrine system it refers to the malignancy of the thyroid gland. Treatment of thyroid cancer is basically surgery (total thyroidectomy), and as an additional remedial treatment TSH suppressive L-thyroxine therapy and radio frequency ablation ^{131}I is applied. ^{131}I treatment is carried out in well-differentiated thyroid cancer, those whose cells bind iodine, and to the rest of the tissue ablation after total thyroidectomy. It is usually given in doses of from 5.55 up to 6.5 GBq. When giving such high doses it is necessary to provide special conditions for the isolation of the patient. The patient is discharged from the therapy room block when ^{131}I activity in the body is below 400 MBq. New criteria for the release of patients suggest that hospitalization and discharge of patients is determined individually. It is necessary first of all to consider the patient's condition, the environment in which he lives, and the presence of small children.

***RADIOAKTIVNI OTPAD
I DEKONTAMINACIJA***

IMOBILIZACIJA JONA ^{90}Sr U PRISUSTVU ^{60}Co UPOTREBOM CRVENOG MULJA

Aleksandra MILENKOVIĆ, Ivana SMIČIKLAS, Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ

*Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča,
P.F. 522, 11001 Beograd, Srbija,
aleksandra@vinca.rs, ivanat@vinca.rs, marijasljivic@vinca.rs*

SADRŽAJ

Tečni radioaktivni otpad predstavlja smešu radionuklida, čiji sastav značajno varira. U ovom radu ispitivana je mogućnost imobilizacije ^{90}Sr crvenim muljem iz industrije aluminijuma, u prisustvu ^{60}Co kao konkurentnog jona. Efikasnost sorpcije Sr^{2+} smanjuje se sa povećanjem moljskog udela Co^{2+} u smeši, kao i sa povećanjem njene koncentracije. Izoterme sorpcije jona Sr^{2+} pokazuju nepravilan oblik, sa izraženim maksimumom. Alkalna reakcija crvenog mulja sa vodenim rastvorima nižih koncentracija pogoduje taloženju Co^{2+} jona. Pri niskim koncentracijama smeše postiže se zadovoljavajuća efikasnost sorpcije Sr^{2+} (100-80%).

1. Uvod

Sorpcija jona na površini čvrstih supstanci je pojava koja zauzima značajno mesto u postupcima obrade kontaminiranih vodenih rastvora i smanjenja njihovog negativnog uticaj na životnu sredinu i ljudsko zdravlje. U nastojanju da tretmani budu što ekonomičniji, često se kao sorbenti uključuju i revalorizuju određeni nusprodukti iz procesa proizvodnje ili industrijski otpadni materijali. Jedan od njih je i crveni mulj - otpad koji nastaje prilikom proizvodnje glinice iz boksitne rude (Bayer-ov proces). Najčešće se odlaze na posebnim lokacijama u vidu visokoalkalne suspenzije, a karakteriše ga raznorodan hemijski i mineralni sastav [1]. ^{90}Sr je radioaktivni izotop stroncijuma koji nastaje fisijom urana i plutonijima, i predstavlja važnu komponentu tečnog radioaktivnog otpada [2]. Uzimajući u obzir da realni tečni radioaktivni otpad uvek predstavlja smešu različitih radionuklida, u ovom radu ispitana je sorpcija jona ^{90}Sr crvenim muljem u prisustvu korozionog produkta ^{60}Co .

2. Eksperimentalni deo

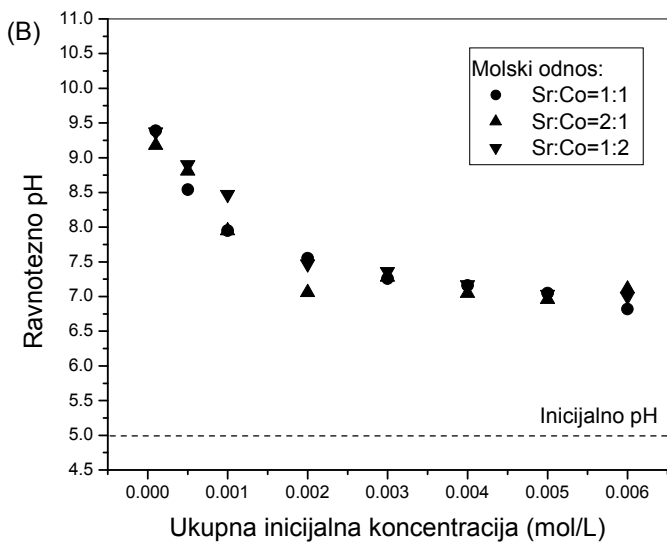
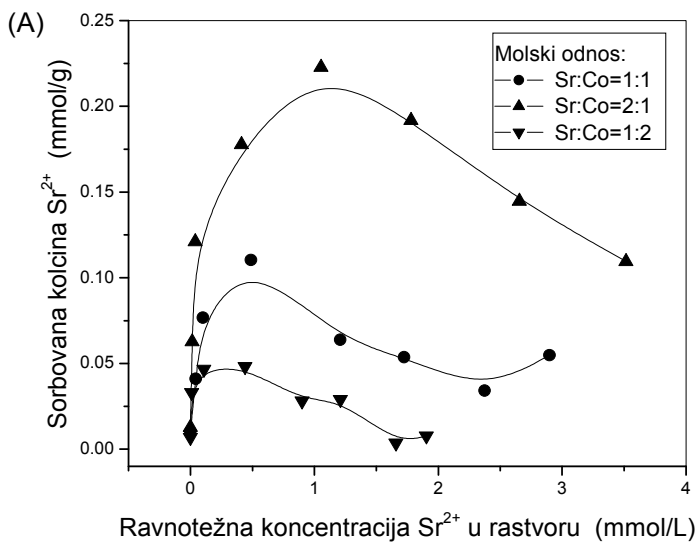
Uzorak crvenog mulja je preuzet iz fabrike glinice "Birač" (Bosna i Hercegovina). Talog je dekantovanjem odvojen od vodenog rastvora visokog alkaliteta, a zatim osušen na 105°C , usitnjen i homogenizovan u avanu. Ovako dobijeni prah je korišćen kao sorbent bez daljih tretmana.

Sorpcija je ispitivana u šaržnom sistemu, uravnotežavanjem 0,1000 g sorbenta sa 20,00 mL odgovarajućeg rastvora, 48 h, na horizontalnom šejkeru. Polazna pH vrednost svih rastvora podešena je na $5 \pm 0,1$. Rastovi su pripremljeni korišćenjem neaktivnih nitratnih soli Sr^{2+} i Co^{2+} , tako da ukupna koncentracija jona bude u opsegu 5×10^{-4} - 6×10^{-3} mol/L. Uticaj koegzistentnih jona Co^{2+} na sorbovanu količinu Sr^{2+} ispitan je pri njihovom ekvimolarnom odnosu (1:1), u višku Sr^{2+} (odnos 2:1), kao i u višku Co^{2+} (odnos 1:2). Nakon uravnotežavanja, izmerene su finalne pH vrednosti. Ravnotežne koncentracije Sr^{2+} jona u rastvoru određene su metodom plamene atomske absorpcione spektrometrije, na instrumentu Perkin Elmer 3100.

3. Rezultati i diskusija

Hemijska analiza crvenog mulja pokazala je da uzorak ima heterogeni sastav u kome preovlađuju oksidi Fe_2O_3 (42,42%), Al_2O_3 (18,08%), SiO_2 (12,62%), Na_2O (8,92%), TiO_2 (4,63%) i CaO (2,86%) [3].

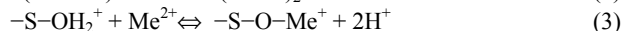
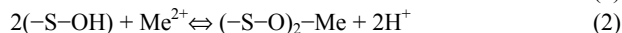
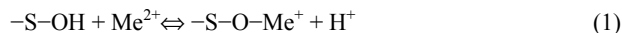
Na Slici 1A prikazane su količine jona Sr^{2+} sorbovane crvenim muljem u zavisnosti od ravnotežnih koncentracija Sr^{2+} u rastvoru, pri različitim moljskim odnosima ovog i konkurentnog jona Co^{2+} . Na osnovu sorbovanih količina, može se zaključiti da prisutni joni Co^{2+} suzbijaju imobilizaciju Sr^{2+} .



Slika 1. (A) Izoterme sorpcije jona Sr^{2+} crvenim muljem u prisustvu raličitih količina jona Co^{2+} i (B) ravnotežne pH vrednosti rastvora.

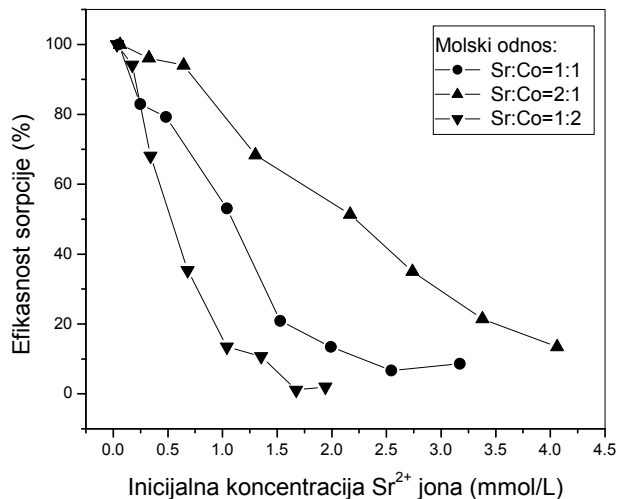
Izoterme Sr^{2+} jona, sorbovanih iz dvokomponentnih rastvora, imaju nepravilan oblik. Sa porastom polaznih koncentracija, sorbovana količina stroncijuma najpre raste a zatim opada. Ovakav oblik karakterističan je za kompetitivnu sorpciju one komponente rastvora prema kojoj, u binarnom sistemu, sorbent pokazuje manji afinitet [4, 5]. Početni nagibi izoterni upućuju na to da su krive uporedive s oblikom izoterni tipa L [6]. Međutim, umesto dostizanja platoa koji označava maksimalni sorpcioni kapacitet, ove krive se nakon dostizanja maksimuma spuštaju u oblast nižih sorbovanih količina po gramu crvenog mulja. Sorpcija Sr^{2+} opada sa porastom molskog udela Co^{2+} u smeši. Uočeni maskimumi sorpcije opadaju u nizu 0.22 mmol/g, 0.11 mmol/g, 0.05 mmol/g, sa promenom molskog udela $\text{Sr}^{2+}:\text{Co}^{2+}$ u smeši u nizu: 2:1, 1:1, 1:2.

Nakon kontakta sa sorbentom, ravnotežne pH vrednosti (Slika 1B) drastično rastu u odnosu na inicijalnu (pH 5), što je posledica prisustva jake baze NaOH kao komponente crvenog mulja. pH vrednosti opadaju od alkalnih (9,5-9) ka neutralnim (7,5-7), sa povećanjem sorbovane količine jona metala, nezavisno od sastava smeše. Ovaj trend može se objasniti porastom udela specifične sorpcije u celokupnom sorpcionom mehanizmu, pri čemu se polutanti vezuju za aktivne površinske centre uz otpuštanje H^+ jona prema mogućim reakcijama:



gde $-\text{S}$ označava metalni jon (Al, Fe, Si) čvrste faze, $\text{S}-\text{OH}$ i $-\text{S}-\text{OH}_2^+$ neprotonovani, odnosno protonovani sorpcioni centar, a Me^{2+} katjon iz rastvora.

Pored toga što katjoni Co^{2+} , kao joni veće elektronegativnosti, snažno konkurišu jonima Sr^{2+} u procesu sorpcije, oni podležu hidrolizi u rastvorima $\text{pH} > 8$ i grade nerastvorni $\text{Co}(\text{OH})_2$. Precipitacija Co^{2+} se može očekivati u opsegu koncentracija smeše $1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$ mol/L, obzirom da su date ravnotežne vrednosti ≥ 8 .



Slika 2. Efikasnost procesa sorpcije Sr^{2+} u zavisnosti od sastava smeše

Na Slici 2 prikazana je efikasnost sorpcije Sr^{2+} . Procenat Sr^{2+} jona uklonjenih iz rastvora opada sa povećanjem polazne koncentracije, kao i sa porastom molskog udela Co^{2+} u smeši. Pri niskim koncentracijama smeše zadovoljavajuća efikasnost sorpcije Sr^{2+} (100-80%) postiže se za sve ispitane molske odnose katjona.

4. Literatura

- [1] S. Wang, H.M. Ang, M.O. Tadó, Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes, *Chemosphere* 72 (2008), 1621–1635.
- [2] IAEA -169, Fission product nuclear data (FPND), Technical report published by International Atomic Energy Agency, Vienna 1973
- [3] I. Smičiklas, S. Smiljanić, A. Perić-Grujić, M. Šljivić-Ivanović, D. Antonović, The influence of citrate anion on Ni(II) removal by raw red mud from aluminum industry, *Chem. Eng. J.* 214 (2013) 327–335.
- [4] C. Jeon, W. Höll, Application of the surface complexation model to heavy metal sorption equilibria onto aminated chitosan, *Hydrometallurgy*, 71 (2004) 421–428.
- [5] B. Cerqueira, E. F. Covelo, L. Andrade, F. A. Vega, The influence of soil properties on the individual and competitive sorption and desorption of Cu and Cd, *Geoderma*, 162 (2011) 20–26.
- [6] C.H. Giles, A.P. D'Silva, I.A. Easton, A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm part. II. Experimental interpretation, *J. Colloid Interface Sci.* 47 (1974)766-778.

IMMOBILISATION OF ^{90}Sr BY RED MUD IN THE PRESENCE OF ^{60}Co

Aleksandra MILENKOVIĆ, Ivana SMIČIKLAS, Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ

*University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences,
P.O. Box 522, 11001 Belgrade, Serbia,
aleksandra@vinca.rs, ivanat@vinca.rs, marijasljivic@vinca.rs*

ABSTRACT

Liquid radioactive waste is a mixture of radionuclides, which composition varies considerably. The possibility of ^{90}Sr immobilization by red mud from the aluminum industry was studied in the presence of ^{60}Co as a competitive ion. Sr^{2+} sorption efficiency decreased with increasing molar fraction of Co^{2+} in the mixture, as well as with increasing concentration. Sorption isotherms of Sr^{2+} ions exhibited an irregular shape, with a pronounced maximum. Alkaline red mud reaction with aqueous solutions of lower concentration favored the precipitation of Co^{2+} ions. Good Sr^{2+} sorption efficiency (100-80%) can be achieved for mixtures of lower concentration.

MATHEMATICAL MODELLING OF TRANSPORT PHENOMENA IN CONCRETE POROUS MEDIA

Ilija PLEČAŠ

Institut za Nuklearne Vinča, Beograd, Srbija

ABSTRACT

Two fundamental concerns must be addressed when attempting to isolate low-level waste in a disposal facility on land. The first concern is isolating the waste from water, or hydrologic isolation. The second is preventing movement of the radionuclides out of the disposal facility, or radionuclide migration. Particularly, we have investigated here the latter modified scenario. To assess the safety for disposal of radioactive waste-concrete composition, the leakage of ^{60}Co from a waste composite into a surrounding fluid has been studied. Leakage tests were carried out by original method, developed in Vinca Institute [1,2,3,4,5]. Transport phenomena involved in the leaching of a radioactive material from a cement composite matrix are investigated using three methods based on theoretical equations [6,10]. These are: the diffusion equation for a plane source an equation for diffusion coupled to a first-order equation, and an empirical method employing a polynomial equation. The results presented in this paper are from a 25-year mortar and concrete testing project that will influence the design choices for radioactive waste packaging for a future Serbian radioactive waste disposal center.

1. INTRODUCTION

Cement and concrete are widely used in low-level waste management both as a means of solidifying waste and for containment of dry or liquid wastes. At present there is also widespread interest in the use of near-surface concrete trench system for the disposal of radwaste materials. Typical concrete is a mixture of cement, sand, stone aggregate and water in various proportions that together determine the structural properties and tightness of the poured material. Water content is one of the critical parameters and must be carefully controlled during curing and setting; to a large extent it will determine the porosity of the resulting material.

Engineered barriers are features of the disposal system made or altered by humans during the construction, operation and closure of a repository. Engineered barriers are intended to contribute to the overall performance of the disposal system by providing the level of containment required while the waste remains hazardous. In cases where the selected site or geological environment is not ideally suited for disposal, the repository can be heavily engineered so that, for meeting safety targets, reliance is placed primarily on the engineered barriers.

Engineering trenches system provides three biological protection barriers:

1. Mortar for immobilizing the waste and filling the concrete containers. (enable its penetration into all cavities of solid radioactive waste and thus fix it permanently; permit no leakage of radionuclides- use of special cement or adsorbers and provide primary biological protection)
2. Concrete container (store and enable transport of low and intermediate level radioactive waste; provide secondary biological protection; provide safe keeping of radioactive waste for 300-500 years)
3. Concrete for filling trenches (provide tertiary biological protection and prevent leakage of radionuclides which have penetrated the second barrier)

At the "Vinca" Institute of Nuclear Sciences, a promising composite for engineer trenches system, especially for concrete for filling trenches has been developed. Leakage test for leakage measurements of radionuclides from concrete was studied using the above method [1, 3, 7, 8, 9, 11,12]

2. THEORETICAL METHODS

Three methods are compared with respect to their applicability to experimental leaching data [6, 10,13,14].

Method I: Diffusion equation based on a plane source model

In this model the fraction f leached at time t (d) :

$$f = \frac{\sum a_n}{A_o} = \frac{2 S \sqrt{D_e t_n}}{V \sqrt{\pi}} \quad (1)$$

where $\sum a_n$ is the cumulative fraction leached of contaminant for each leaching period, A_o is the initial amount of contaminant in the sample, V is the volume of sample (cm^3), S is the exposed surface area of the sample (cm^2), t_n the duration of leachant renewal period (d) and D_e is the diffusion coefficient ($\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$)
The results may also be expressed by the cumulative fraction of the contaminant. Leach test results are plotted as the cumulative fraction of contaminant leached from the samples as a function of the square root of total leaching time:

$$\frac{\sum a_n}{A_o} \text{ versus } \sqrt{\sum t_n} \quad (2)$$

If the model is applicable a plot of $\sum a_n/A_o$ versus $\sqrt{\sum t_n}$ is a straight line and the diffusion coefficient D_e is given by:

$$D_e = \frac{\pi}{4} m^2 \frac{V^2}{S^2} \quad (3)$$

where $m = (\sum a_n/A_o) (1/\sqrt{\sum t})$, is the slope of the straight line ($\text{d}^{-1/2}$).

Method II: Rate equation for coupled diffusion and simultaneous first-order reaction

In this model, the rate equation is.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e (\partial^2 C / \partial X^2) + g(C) \quad (4)$$

Here, the special case where $g(C)$ is directly proportional to the concentration C , i.e. a first-order reaction was considered. The initial and boundary conditions are,

$$t = 0, \quad \alpha > x > 0, \quad C = C_o \quad (5)$$

$$t = 0, \quad x < 0, \quad C = 0 \quad (6)$$

$$t > 0, \quad x = 0, \quad C = 0 \quad (7)$$

From this, the fraction leached from a specimen having a surface area $S(\text{cm}^2)$ and volume $V(\text{cm}^3)$ is

$$f = (S/V) \sqrt{D_e/k} [(kt + 1/2) \operatorname{erf} \sqrt{kt} + \sqrt{kt/\pi} \exp(-kt)] \quad (8)$$

Where k is the rate constant of the first-order reaction and

$$\operatorname{erf}(u) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^u \exp(-z^2) dz \quad (9)$$

Method III: Polynomial equation

The orthogonal polynomial is one of the most useful empirical equations. Its general form is:

$$y(x) = \sum_{i=1}^n A_i \phi_i(x) \quad (10)$$

where:

A_i - is the parameter to be determined, and ϕ_i - is a function of x . Here, $\phi_i(x)$ - is taken as $t^{i/2}$, and the leaching fraction is given by

$$f = \sum_{i=1}^n A_i t^{i/2} \quad (11)$$

To simplify the mathematical treatment, a fourth terms polynomial of the form

$$f = A_0 + A_1 t^{1/2} + A_2 t + A_3 t^{3/2} \quad (12)$$

was fitted to the leaching data. For this type of model, extrapolation to longer term leaching is not advisable since the arbitrary constants do not necessarily have any physical significance.

3. PREPARATION OF SAMPLE FOR LEACHING TEST

More than 100 different formulations of concrete formulations were examined to optimize their mechanical and sorption properties. The concrete samples were prepared with a standard Portland cement PC-20-Z-45 MPa. The concrete composition was mixed with artificial radioactivity of ^{60}Co , $A_0=55-67(\text{kBq})$. Mixing time was about ten minutes. The mixtures were cast into 50 mm diameter cylindrical molds with a height of 50 mm, which were then sealed and cured for 28 days prior to the leaching experiments. Leaching of ^{60}Co was studied using the method recommended by the IAEA [12] The duration of leachant renewal period was 30 days. After each leaching period the radioactivity in the leachant was measured using EG&G- ORTEC spectrometry system and software. In this paper we discuss four representative formulations of concrete for filling trenches : C_1, C_2, C_3 and C_4 . Composition and initial radioactivity $A_0(\text{B}_q)$ per sample prepared for leakage test , is shown in Table I.

Table I. Concrete compositions (calculated as grams for 1000 cm³ of samples)

Materials	<i>Formula</i>			
	C_1	C_2	C_3	C_4
Cement (Portland),gr	400	410	420	430
Sand, 0-2 mm	846	584	700	670
Aggregate,2-4mm	522	520	512	310
Aggregate,4-8mm	432	686	598	890
Water,ml	180	180	180	180
Additives,ml	4	4	4	4
Initial activity $A_0(\text{kBq})$ ^{60}Co	Per sample ~60,0			

4. RESULTS

Experimental data show the fractions of ^{60}Co leached from concrete composite as a function of the square root of the leaching period. The linear relation between f and t is not observed throughout the test period. From the application of Method I to the leaching data we obtained:

$$\begin{aligned} f_I(C_1) &= 2,2 \cdot 10^{-5} t^{1/2} + 7,6 \cdot 10^{-9} \\ f_I(C_2) &= 3,9 \cdot 10^{-5} t^{1/2} + 5,8 \cdot 10^{-9} \\ f_I(C_3) &= 4,4 \cdot 10^{-5} t^{1/2} + 6,3 \cdot 10^{-9} \\ f_I(C_4) &= 5,5 \cdot 10^{-5} t^{1/2} + 7,5 \cdot 10^{-9} \end{aligned}$$

The diffusion coefficients predicted by Method I are:

$$\begin{aligned} D_I(C_1) &= 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ (cm}^2/\text{d)} \\ D_I(C_2) &= 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ (cm}^2/\text{d)} \\ D_I(C_3) &= 6,3 \cdot 10^{-6} \text{ (cm}^2/\text{d)} \\ D_I(C_4) &= 7,8 \cdot 10^{-6} \text{ (cm}^2/\text{d)} \end{aligned}$$

Method II was applied to the leakage data to obtain the unknown parameters D_e and k . From this we obtained:

$$\begin{aligned} D_{II}(C_1) &= 3,50 \cdot 10^{-6} \text{ (cm}^2/\text{d)} \\ D_{II}(C_2) &= 4,90 \cdot 10^{-6} \text{ (cm}^2/\text{d)} \\ D_{II}(C_3) &= 5,73 \cdot 10^{-6} \text{ (cm}^2/\text{d)} \\ D_{II}(C_4) &= 6,70 \cdot 10^{-6} \text{ (cm}^2/\text{d)} \end{aligned}$$

Using the least squares procedure, Method III yielded:

$$\begin{aligned} f_{III}(C_1) &= 7,6 \cdot 10^{-8} + 5,7 \cdot 10^{-5} t^{1/2} + 5,3 \cdot 10^{-8} t + 9,5 \cdot 10^{-12} t^{3/2} \\ f_{III}(C_2) &= 5,8 \cdot 10^{-8} + 6,8 \cdot 10^{-5} t^{1/2} + 6,6 \cdot 10^{-8} t + 9,4 \cdot 10^{-12} t^{3/2} \\ f_{III}(C_3) &= 4,3 \cdot 10^{-8} + 7,4 \cdot 10^{-5} t^{1/2} + 6,6 \cdot 10^{-8} t + 9,7 \cdot 10^{-12} t^{3/2} \\ f_{III}(C_4) &= 3,6 \cdot 10^{-8} + 7,2 \cdot 10^{-5} t^{1/2} + 9,8 \cdot 10^{-8} t + 9,7 \cdot 10^{-12} t^{3/2} \end{aligned}$$

Figure 1 and Figure 2 present plots of f against t for leakage of ^{60}Co from the four concrete samples, for Methods I and Method III.

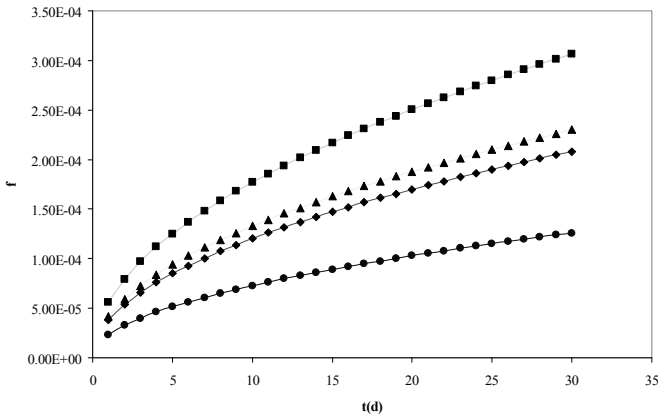


Figure 1. Plot of f against t (d) for leakage rate of ^{60}Co from concrete (Method I)

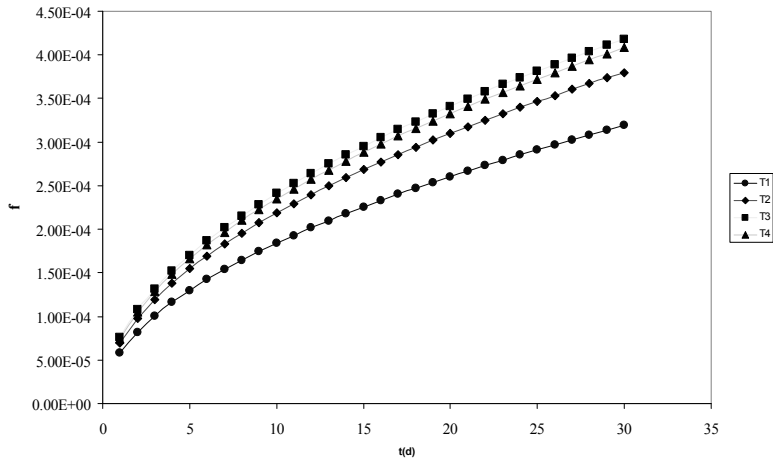


Figure 2. Plot of f against t (d) for leakage rate of ^{60}Co from concrete (Method III)

5. DISCUSSION AND CONCLUSION

Results are presented in Fig 1. and 2. which shows the fraction of ^{60}Co leached from cement composites as a function of the square root of leaching period. In the data for cement composite as a matrix, linearity between f and t (d) is not observed throughout the time tested; however, there are two different linearity before and after a leaching time of about 10 days. The slope of the linear relation for the early stage is larger than for the latter one. This change in the leaching rate may be associated with the fact that, as the leaching time elapsed, the diffusion rate would gradually slow down as the diffusion path becomes longer. Method I cannot describe the whole leaching process; but it is very convenient to simulate leaching over a long period because of its simplicity. Despite the very complex numerical treatment required, the fit obtained using Method II is no better than that obtained using Method I. Method III provides the best approximation over the whole leaching period. In many cases, however, the leaching mechanisms are unknown and, therefore, it is convenient to use polynomial approximation. Finally, the results presented in this paper will define the design of our future engineered trenches disposal system for radioactive waste.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

Work supported by the Ministry of Science and Technology of the Republic of Serbia.

7. REFERENCES

- [1] I. Plecas, Lj. Mihajlovic and A. Kostadinovic , Radioactive waste management and nuclear fuel cycle, **6 (2)**, 161 (1985)
- [2] I. Plecas, R. Pavlovic and S. Pavlovic , Bull. Mater. Sci, **26 (7)**, 699 (2003)
- [3] I. Plecas, Annals of Nuclear Energy, Elsevier, **30/18**, 1899 (2003)
- [4] I. Plecas, Acta Chem. Slovenica , **50/3**, 593 (2003)
- [5] I. Plecas, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, **258**, 435 (2003)
- [6] H. Matsuzuru , N. Moriyama, Y. Wadachi and A. Ito, Health Phys., **32**, 529 (1977)
- [7] N.J. Ojovan, I.V. Starceva, I.A. Sobolev, M.I. Ojovan, G.N. Chuikova, Proc.WM'04 Conference, 2004 , Tucson , Arizona , 4090.pdf. **2004**.
- [8] I. Plecas, J. Drljaca , A. Peric, A. Kostadinovic and S. Glodic , Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle, **14**.195 (1990)
- [9] U.N. Yepimakov, M.S. Oleinik, Ecological Chemistry, **9**, 116 (2000)
- [10] N. Morijama, D. Dojiri and H. Matsuzuru, Health Phys., **33**, 549 (1977)
- [11] I. Plecas, A. Peric, A. Kostadinovic and J. Drljaca, J.Radioanal.Nucl.Chem., Lett., **154**, 121 (1991)
- [12] E.D. Hespe, AtomicEnergy Rev., **9**, 195 (1971)
- [13] J.L. Seveque, M.D. Cayeux , M. Elert and H. Nouguiet, Cement and Concrete Research, **22**, 477 (1992)
- [14] C.E. Majorana and V.A. Salomoni, Journal of Hazardous Materials, **113**, 45 (2004)

MATEMATIČKO MODELOVANJE FENOMENA TRANSPORTA U BETONU KAO POROZNOM MEDIJU

Ilija PLEĆAŠ

Institut za Nuklearne Vinča, Beograd, Srbija

REZIME

U radu je prikazan matematički model pomoću koga se analizira i optimizuje fenomen transporta radionuklida kroz beton kao porozni materijal. Fenomeni transporta koji su uključeni u rezultate ispitivanja curenja radionuklida iz cementne matrice koriste tri metode bazirane na teorijskim jednačinama. Rezultati će se koristiti prilikom projektovanja konačnog odlagališta za radioaktivni otpad u Srbiji.

UTICAJ KOŠTANOG SORBENTA KAO ADITIVA ZEMLJIŠTU NA KOLIČINU JONA ^{90}Sr IZLUŽENIH U VODENI RASTVOR

Ivana SMIČIKLAS, Slavko DIMOVIĆ i Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ

Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Beograd, Srbija, ivanat@vinca.rs,
sdimovic@vinca.rs, marijasljivic@vinca.rs

SADRŽAJ

Ispitana je mogućnost primene biogenog apatita (B400) u remedijaciji zemljišta kontaminiranog radioaktivnim ^{90}Sr . Uzorak zemljišta uzet je sa lokaliteta Instituta za nuklearne nauke "Vinča" i veštački je kontaminiran Sr^{2+} jonima. Količina sorbenta dodatog zemljištu varirana je od 0 do 10%. Određena je i poređena stabilnost Sr-jona u nekontaminiranom i kontaminiranom zemljištu, sa i bez dodatka sorbenta, uravnotežavanjem različitih matriksa sa vodenim rastvorom. Dobijena izlužena količina Sr^{2+} predstavlja njegovu najlabilnije vezanu i biodostupnu frakciju. U slučaju kontaminiranog zemljišta, sa povećanjem količine aditiva, koncentracija izluženih Sr^{2+} jona smanjuje se od 562,1 mg/L pri 0% do 364,5 mg/L pri 10% B400. Preliminarni rezultati pokazuju da dodatak koštanog apatita utiče na smanjenje mobilnosti radioaktivnog stroncijuma u zemljištu.

1. Uvod

Radioaktivni izotop ^{90}Sr nastaje kao produkt fisije jezgra uranijuma i plutonijuma. Usled izvođenja nadzemnih nuklearnih proba, procesiranja radioaktivnog otpada i akcidenata, ovaj radionuklid dospeva u životnu sredinu [1]. Kao zemnoalkalni metal, ^{90}Sr je vrlo sličan kalcijumu u pogledu reaktivnosti i hemijskih svojstava. Analizom njegove distribucije u uzorcima zemljišta različitog sastava, ustanovljen je najveći sadržaj u jonoizmenjivačkoj frakciji [2]. Podaci ukazuju na pokretljivost Sr^{2+} jona i tendenciju prelaska u vodenu fazu, čime bivaju lako uključeni u lanac ishrane.

Jedan od *in-situ* postupaka tretmana zemljišta kontaminiranog radioaktivnim jonima je dodatak različitih aditiva koji smanjuju mobilnost zagađivača. Apatiti su grupa fosfatnih minerala koji se uspešno primenjuju u remedijaciji zemljišta kontaminiranih jonima teških metala i radionuklida [3,4]. U prethodnom radu uradjena je analiza distribucije Sr^{2+} jona u kontaminiranom zemljištu u funkciji količine dodatog biogenog apatita [5]. Sekvencijalna ekstrakcija zemljišta rastvorima različitog hemijskog sastava pokazala je da dodatak sorbenta prouzrokuje redistribuciju polutanta iz jonoizmenjivačke u karbonatnu i rezidualnu frakciju.

U ovom radu ispitan je uticaj biogenog apatita, kao aditiva, na količinu ^{90}Sr izluženog iz zemljišta u vodeni rastvor, pri visokom odnosu čvrsto/tečno (1:2). Ova frakcija ilustruje koncentraciju Sr^{2+} u medijumu koji ispunjava pore zemljišta i najbolji je indikator biodostupnosti zagađivača.

2. Eksperimentalni deo

Kompozitni uzorak nekontaminiranog zemljišta je uzet sa površine od 1 m² i dubine 20 cm unutar Instituta za nuklearne nauke "Vinča", s obzirom da se na ovoj lokaciji nalazi jedino odlagalište radioaktivnog otpada u Srbiji. Zemljište je sušeno 10 dana, na vazduhu, pri ambijentalnoj temperaturi, a zatim usitnjeno, homogenizovano i prosejano. Frakcija sitnija od 2 mm je korišćena u eksperimentima. Zemljište je kontaminirano neaktivnim Sr^{2+} jonima, uravnotežavanjem sa rastvorom $5 \cdot 10^{-2}$ mol/dm³ $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, pri odnosu čvrsto/tečno 1:2. Suspenzija zemljište/rastvor metala mešana je svakodnevno u otvorenom sudu, mesec dana. Nakon ovog perioda, zemljište je odvojeno od rastvora metala cedanjem i osušeno na vazduhu.

Za remedijaciju zemljišta korišćen je sorbent B400, dobijen žarenjem govedih kostiju na 400°C [6]. U cilju ispitivanja i poređenja uticaja sorbenta na količinu izluženih jona Sr^{2+} , uzorci nekontaminiranog

(Z) i kontaminiranog zemljišta (SrZ) tretirani su na isti način. Oba uzorka su izmešana sa B400 u količini od 1, 3, 5 i 10 % i na taj način su dobijeni uzorci Z1-Z10 i SrZ1-SrZ10. Ukupna masa uzoraka od 10 g (zemljište ili zemljište + sorbent) uravnotežavana je na rotacionom šejeru, pri brzini od 6 rpm, 15 dana, sa po 20 mL rastvora destilovane vode čija je inicijalna pH vrednost podešena na 5. Ova pH vrednost je selektovana na osnovu podataka o vrednosti pH kišnice na teritoriji Beograda. Nakon uravnotežavanja na sobnoj temperaturi, suspenzije su proceđene kroz filter papir (plava traka), izmerene su količine jona Sr^{2+} u vodenom rastvoru (ICP-OES Perkin ELMER 400, $\lambda=421.6$ nm), kao i finalne pH vrednosti.

3. Rezultati i diskusija

Analiza fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta pokazala je da se uzorak sa teritorije Instituta klasifikuje kao slabo alkalni ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}= 7.99$), sa niskim sadržajem dostupnog fosfora i sa malim kapacitetom jonske izmene [5].

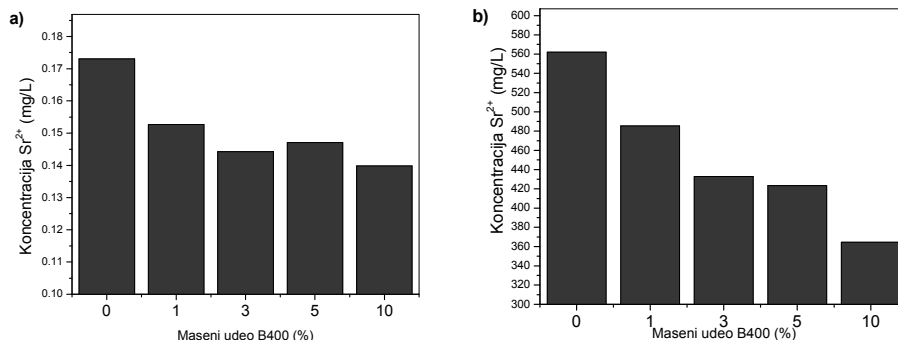
Na Slici 1 je data koncentracija Sr^{2+} jona desorbovanih iz nekontaminiranog i kontaminiranog zemljišta, u zavisnosti od dodate količine sorbenta B400.

Koncentracija jona Sr^{2+} izluženih iz nekontaminiranog zemljišta u vodeni rastvor (Slika 1a) iznosi 0,173 mg/L. Dodatak sorbenta koncentracija se smanjuje maksimalno do 0,139 mg/L. Ovi rezultati su u saglasnosti sa niskim sadržajem Sr^{2+} u polaznom uzorku. Sekvencijalna ekstrakcija je potvrdila prisustvo Sr^{2+} u različitim mineralnim frakcijama originalnog uzorka zemljišta (najviše u jonoizmenjivačkoj frakciji 61%, karbonatnoj 16%, i najstabilnijoj - rezidualnoj 14%) [5]. Pseudototalna koncentracija Sr^{2+} iznosila je $45,4 \pm 1,3$ mg/kg.

Nakon kontaminacije, pseudototalna koncentracija Sr^{2+} jona u zemljištu povećana je na 6400 ± 23 mg/kg, a udeo u jonoizmenjivačkoj frakciji na 94% [5]. Slika 1b pokazuje da je čak 562,1 mg/L izluženo u vodenu frakciju, što ukazuje na visok nivo kontaminacije uz povećanje broja slabih veza između Sr^{2+} jona i zemljišta (površinska adsorpcija). Dodatak B400 značajno utiče na smanjenje mobilnosti Sr^{2+} , a efekat raste kontinualno sa povećanjem masenog udela adiva. Pri dodatku 10% B400, koncentracija Sr^{2+} u vodenoj fazi opada na 364,5 mg/L.

Ovi rezultati su u saglasnosti sa literaturom i potvrđuju da biogeni apatit efikasno vezuje Sr^{2+} jone. Dominantni mehanizmi sorpcije su jonska izmena sa Ca^{2+} jonima unutar kristalne rešetke apatita i specifična sorpcija [6].

Aditivi koji se dodaju zemljištu u svrhu remedijacije često imaju funkciju i da regulišu pH vrednost. Sorbent B400 pokazuje slabo alkalnu reakciju sa vodenim rastvorima (tačka nultog naelektrisanja $\text{pH}_{\text{PZC}} 7,37$ [6]). S obzirom da je ispitivano zemljište takođe alkalnog karaktera, pH vrednosti vodenih rastvora nakon eksperimenta su u svim slučajevima bile ~ 8 . Porast pH od inicijalne vrednosti 5 do ~ 8 rezultat je puferkog kapacijeta kako sorbenta, tako i samog zemljišta. Finalne pH vrednosti su iznad pH_{PZC} sorbenta, pa je elektrostatičko vezivanje Sr^{2+} takođe moguće na njegovoj bruto negativno naelektrisanj površini, pri datim uslovima.



Slika 1. Koncentracije jona Sr²⁺ u vodenom rastvoru nakon izluživanja iz (a) nekontaminiranog i (b) kontaminiranog zemljišta, u funkciji od količine dodatog sorbenta B400.

4. Zaključak

Svrha *in-situ* tretmana kontaminiranog zemljišta postupcima imobilizacije/stabilizacije je da se indukuje hemijska reakcija između određenog aditiva i polutanta, da se eliminiše ili smanji mogućnost njegove migracije i na taj način spreči širenje kontaminacije na dublje slojeve zemljišta, podzemne vode i žive organizme. Preliminarni rezultati pokazuju da dodatak biogenog apatita zemljištu kontaminiranom ⁹⁰Sr jonima utiče na smanjenje koncentracije Sr²⁺ u vodenoj frakciji, koja je važan indikator biodostupnosti zagađivača.

5. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Projekat br. III 43009).

6. Literatura

- [1] NCRP, National Council on Radiation Protection and Measurements. *Some Aspects of Strontium Radiobiology*, NCRP, Bethesda, Maryland, 1991.
- [2] J. Solecki. Investigation of ⁸⁵Sr adsorption on selected soils of different horizons. *J. Environ. Radioact.* 82 (2005) 303-320.
- [3] S. Mignardi, A. Corami, V. Ferrini. Evaluation of the effectiveness of phosphate treatment for the remediation of mine waste soils contaminated with Cd, Cu, Pb, and Zn. *Chemosphere* 86 (2012) 354-60.
- [4] T.E. Moody. North Plateau Groundwater Sr-90 Phosphate Stabilization. Final Report for the West Valley Demonstration Project, CH2MHILL, 1997.
- [5] S. Dimović, I. Smičiklas, M. Šljivić-Ivanović, B. Dojčinović. Speciation of ⁹⁰Sr and other metal cations in artificially contaminated soils: the influence of bone sorbent addition. *J. Soils Sediments* 13 (2013) 383-393.
- [6] S. Dimović, I. Smičiklas, I. Plečaš, D. Antonović, M. Mitrić. Comparative study of differently treated animal bones for Co²⁺ removal. *J. Hazard. Mater.* 164 (2009) 279–287.

THE INFLUENCE OF BONE SORBENT ADDITION TO SOIL ONTO LEACHING AMOUNTS OF ^{90}Sr IN AQUEOUS SOLUTION

Ivana SMIČIKLAS, Slavko DIMOVIĆ, Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ
*University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, P.O.Box 522,
11001 Belgrade, Serbia*

ABSTRACT

The possibility of biogenic apatite (B400) application in the remediation of soil contaminated with radioactive ^{90}Sr was investigated. Soil sample was taken from the site of the Vinča Institute of Nuclear Sciences and artificially contaminated with Sr^{2+} ions. The amount of sorbent added to the soil varied from 0 to 10%. The stability of Sr-ions was determined and compared in the uncontaminated and contaminated soil, with and without sorbent addition, equilibrating various matrices with an aqueous solution. The resulting leached amounts of Sr^{2+} represent its most loosely bonded and bioavailable fraction. In the case of contaminated soil, leached Sr^{2+} amounts were reduced with increased additive rates from 562.1 mg/L at 0% to 364.5 mg/L at 10% B400. Preliminary results show that the addition of bone sorbent reduced the mobility of radioactive strontium in the soil.

NOVI OBJEKTI ZA SKLADIŠTENJE RADIOAKTIVNOG OTPADA U REPUBLICI SRBIJI

Milutin JEVREMOVIĆ, Milan PETROVIĆ, Milan ORLIĆ, Snežana PAVLOVIĆ

Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“, Beograd, Srbija,

milutin.jevremovic@vinca.rs

SADRŽAJ

Privremeno skladište radioaktivnog otpada se ranije nalazilo na nekoliko različitih lokacija unutar Instituta „Vinča“. Najveći deo radioaktivnog otpada je uskladišten u dva namenska metalna hangara (H1 i H2), čije stanje nije zadovoljavajuće. U cilju poboljšanja stanja sistema upravljanja radioaktivnim otpadom u Republici Srbiji, u okviru lokacije kruga Vinče izgrađeni su novi objekti za skladištenje čvrstog radioaktivnog otpada, H3, i za bezbedno skladištenje jakih izvora zračenja, BS. Operator novih objekata za skladištenje je Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“ koje je Licencu za probni rad objekata dobilo 12.09.2011.godine. Nakon probnog rada koji je trajao 20 nedelja i u kome su izvršena sva potrebna ispitivanja infrastrukturnih, sigurnosnih i bezbednosnih sistema, dopunjena dokumentacija i izvršeno dopunsko obučavanje lica koja rade u objektima, dozvola za korišćenje objekata, tj. pun pogon, je dobijena 27.09.2012.godine. Puštanjem u rad ovih objekata je skladištenje radioaktivnog otpada i izvora zračenja u Republici Srbiji, a ujedno i upravljanje radioaktivnim otpadom u celini, značajno unapređeno i stavljeno na viši sigurnosi i bezbednosni nivo.

1. Istorijat skladištenja radioaktivnog otpada

Institut „Vinča“ je osnovan 1948.godine i dugi niz godina je bio jedini nacionalni objekat za skladištenje radioaktivnog otpada (RAO) i zatvorenih izvora jonizujućih zračenja (ZIJZ). Istorijski posmatrano, privremeno skladište RAO je bivalo smeštano na nekoliko različitih lokacija unutar Instituta, od kojih neke još uvek nisu napuštene. RAO je u početku odlagan na terenu ispred sadašnje zgrade RM-a (Laboratorija za materijale). Za vreme pripreme terena za gradnju zgrade RM, staro skladište je premešteno na otvorenu deponiju 1962. godine. Kasnije, radioaktivni otpad se skladištio u dva namenska metalna hangara, izgrađena na teritoriji Instituta „Vinča“. Hangar H1 je pušten u upotrebu 1968. godine, a hangar H2 1982. godine. Radioaktivni otpad je 1984. godine sa otvorene deponije, posle kompaktiranja i prepakivanja, uskladišten u H2. Za skladištenje tečnog RAO korišćeni su podzemni rezervoari izgrađeni od nerđajućeg čelika, sa betonskom zaštitom. Unutar Instituta „Vinča“ nalazi se i nekoliko privremenih spremišta za čuvanje izvora jonizujućih zračenja koji su različitog, ali uglavnom neadekvatnog nivoa sigurnosti i bezbednosti.

Iako je aktivnostima na međunarodnim projektima, nuklearna bezbednost objekata značajno popravljena izgradnjom ograde, zajedničke za sve objekte RAO, boljim zaključavanjem svih ulaza, detekcijom neovlašćenog pristupa i uvođenjem pravila „dva čoveka“ za ulaz u objekat, ukupno posmatrano, dugotrajno stanje privremenog skladišta RAO nije bilo zadovoljavajuće sa tačke gledišta nuklearne sigurnosti i bezbednosti, kao i standarda sigurnosti i bezbednosti Međunarodne agencije za atomsku energiju. Odgovorno upravljanje radioaktivnim otpadom zahteva primenu mera kojima se obezbeđuje zaštita zdravlja ljudi i zaštita životne sredine, a neadekvatno upravljanje radioaktivnim otpadom moglo bi imati za posledicu štetne efekte na ljudsko zdravlje ili životnu sredinu, u sadašnjem, ili u nekom trenutku u budućnosti, što je u suprotnosti sa osnovnim principima sigurnosti.

Stanje hangara H1 i hangara H2 je u okviru izvršenih analiza [1-3] ocenjeno kao nezadovoljavajuće, jer oni ne ispunjavaju uslove za bezbedno i sigurno skladištenje RAO i na taj način potencijalno ugrožavaju životnu sredinu. Na osnovu analiza različitih opcija zaključeno je da dostizanje prihvatljivog rešenja zahteva značajne aktivnosti, koje podrazumevaju kako tretman RAO, tako i izgradnju novih objekata za skladištenje RAO i ZIJZ. Na osnovu svega izloženog, Vlada RS je, na osnovu odredbi iz Zakona [4], Odlukom o osnivanju javnog preduzeća za upravljanje nuklearnim objektima u Republici

Srbiji osnovala Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije” [5]. U skladu sa zaključcima Vlade Republike Srbije, u postupku sanacije stanja, pristupilo se izgradnji novog skladišta za čvrsti RAO, srednje i niske aktivnosti, H3, i bezbednog skladišta za jake izvore zračenja, BS, kao objekata od posebnog značaja.

2. Izgradnja novih objekata za skladištenje H3 i BS

U cilju poboljšanja postojećeg stanja sistema upravljanja radioaktivnim otpadom, u okviru lokacije kruga Institut „Vinča”/JP idejnim projektom [6] planirana je fazna izgradnja 3 nova namenska objekta: objekta za skladištenje čvrstog RAO, H3, (1260 m²), objekta za bezbedno skladištenje jakih izvora zračenja, BS, (435 m²) i objekta za tretman radioaktivnog otpada (930 m²), kao i platoa i internih saobraćajnica sa potpornim zidovima (2200 m²) (slika 1). Prva faza projekta izgradnje je realizovana završetkom izgradnje objekata H3, BS i pomoćnog objekta. Na osnovu aktuelnih analiza i rešenja, druga faza je odložena na neodređeno vreme, a umesto toga se pristupilo adaptaciji objekta „Latransa” u Postrojenje za preradu otpada niske i srednje aktivnosti. Proces izbora izvođača, projektovanja i izgradnje novih objekata RAO opisan je detaljno u Konačnom izveštaju o nuklearnoj sigurnosti za privremeno skladište radioaktivnog otpada H3 i bezbedno skladište radioaktivnih izvora BS (probni rad) [7].



Slika 1 Skladište radioaktivnog otpada, H3, i bezbedno skladište jakih izvora, BS

3. Licenciranje nuklearne aktivnosti u novim objektima kompleksa upravljanja RAO

U Konačnom izveštaju o nuklearnoj sigurnosti za H3 i BS su dati relevantni podaci o objektima koji su izgrađeni, uz obrazloženja pogonskih postupaka, a analizirani su i svi aspekti mera zaštite i sigurnosti koji su od značaja za sigurno i bezbedno izvođenje planiranih aktivnosti. Ove analize obuhvataju utvrđivanje principa i kriterijuma sigurnosti i bezbednosti, analizu mogućeg dejstva jonizujućih zračenja prilikom izvođenja planiranih operacija na osoblje, stanovništvo i životnu sredinu, analizu usklađenosti sa zahtevima postavljenim u zakonskim aktima kojima se reguliše rad u nuklearnim objektima i rad sa radioaktivnim materijalom, kao i pregled mogućih akcidenata koji mogu nastati prilikom izvođenja planiranih operacija u fazi korišćenja nuklearnih objekata. Pokazano je da, čak i u slučaju najtežih mogućih situacija, uz primenu svih planiranih interventnih mera, posledice eventualnog akcidenta mogu biti kontrolisane i neće premašiti propisane norme [8]. Pri izradi ovog izveštaja, posebna pažnja je ukazana na određene aspekte koji su od značaja za njegovu usklađenost sa normama i zahtevima u pogledu sigurnosti ovakvih objekata.

Nakon završene izgradnje objekta i izvršenog tehničkog prijema, Ministarstvo životne sredine, rudarstva i prostornog planiranja, Sektor za građevinarstvo, investicije i građevinsko zemljište je, 09.

septembra 2011. godine, donelo Rešenje kojim se dozvoljava upotreba objekta za skladištenje čvrstog radioaktivnog otpada i objekta za bezbedno skladištenje jakih izvora zračenja, čime su se stekli preduslovi da Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije, na osnovu podnetog zahteva, Konačnog izveštaja o sigurnosti i propisane dokumentacije, obavi potrebne analize i preglede i nakon izvršenih dopuna u dokumentaciji izda Javnom preduzeću licencu za obavljanje nuklearne aktivnosti - puštanje u probni rad navedenih objekata.

U probnom radu nuklearnog objekta H3 i BS, koji je trajao ukupno 20 nedelja (prvi deo od 12.09.2011. godine do 20.11.2011. godine - 10 nedelja, drugi deo od 19.12.2011. do 29.01.2012.godine - 6 nedelja, treći deo od 31.01.2012. do 26.02.2012.godine - 4 nedelje, završene su sve aktivnosti predviđene Programom probnog rada, donete potrebne odluke, kompletirana administrativna osnova sistema sigurnosti, svi nedostaci otklonjeni i postupljeno po zahtevima Agencije, čiji su predstavnici pratili realizaciju probnog rada. Sve promene do kojih je došlo unete su u ovu aktuelnu verziju Konačnog izveštaja o nuklearnoj sigurnosti za pogon i korišćenje objekata za skladištenje H3 i BS. Nakon probnog rada nuklearnih objekata, licenca za pun pogon objekata je dobijena 27.09.2012.godine.

4. Korišćenje novih objekata za skladištenje RAO

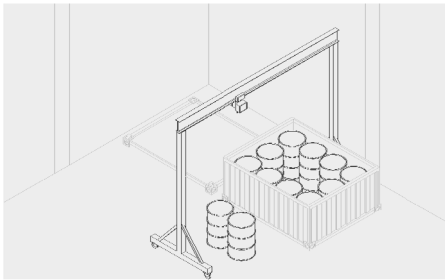
Skladištenje radioaktivnog otpada u H3 i izvora zračenja u BS je uslovljeno kriterijumima za prijem RAO u H3 i ZIJZ i nuklearnog materijala u BS, kojima se definišu parametri koji se kontrolišu prilikom prijema i opsege u kome se moraju nalaziti da bi pakovanje RAO ili izvora bilo primljeno u skladište. Pored zahteva po pitanju ambalaže, fizičko-hemijskih karakteristika i načina označavanja, dozvoljene vrednosti jačine doze gama zračenja koje potiču od pakovanja za H3 iznose: jačina doze na površini < 1 mSv/h, na rastojanju od 1m < 0,1 mSv/h, dok za BS iznose: jačina doze na površini < 2 mSv/h, na rastojanju od 1m < 0,1 mSv/h.

U toku probnog rada su proverena dva načina skladištenja RAO u hangaru H3: način skladištenja koji je opisan u Glavnom projektu - knjiga Tehnološki projekat [9] gde se burad slažu horizontalno, u dva reda, na devet nivoa (TIP-1) i način skladištenja u kome se burad pakuju u HH-HLISO kontejnere i skladište na 4 sprata (TIP-2). Nakon probnog rada, odlučeno je da se u pun pogon objekta krene sa načinom skladištenja TIP-2, s obzirom da drugi načini skladištenja nisu trenutno adekvatni i u skladu sa sadašnjim kapacitetima.

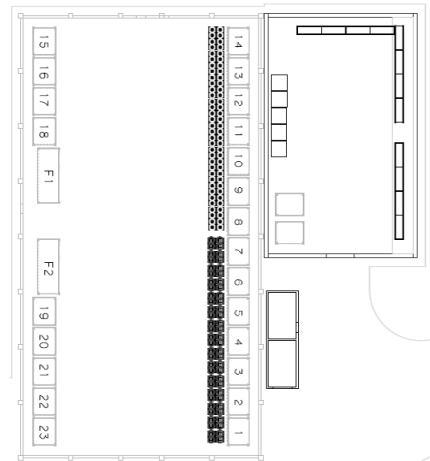
Načina slaganja (TIP-2) koji je proveren u probnom radu predstavlja pakovanje buradi u HH-HLISO kontejnere i njihovo skladištenje 4 komada, jedan na drugi. Za uvođenje ovog način skladištenja, se odlučilo nakon redovnih konsultacija i preporuka eksperata MAAE, koji su obilazili objekte u toku probnog rada. Za način skladištenja TIP-2 postoje odgovarajuća sredstva za upakivanje buradi u kontejnere. Predviđeno je korišćenje postojećeg pokretnog kрана - dizalice, koji postavlja burad na predviđena mesta u kontejneru. Ovakav način skladištenja minimizira potrebni tretman pre trajnog odlaganja, ukoliko se obezbedi odgovarajući kvalitet ambalaže (pre svega, antikoroziona zaštita). Na slici 2 je dat grafički prikaz procesa pakovanja buradi u ISO kontejnere pomoću postojećeg pokretnog kрана i fotografija napunjenih kontejnera sa buradima od 200 i 320 L. Manipulacija ISO kontejnerima se vrši viljuškarom DOOSAN D160S-5. U probnom radu objekta je proveren način pakovanja HH-HLISO kontejnera jedan na drugi u četiri nivoa tako da se kontejneri međusobno spajaju horizontalnim ISO spojnica.

HL-HHISO kontejner može prihvatiti 15 buradi od 200 L, ili 12 buradi od 320 L. Takođe, u HL-HHISO kontejnere se mogu pakovati burad i kombinovano. U zavisnosti od potrebe, moguće je u jedan HL-HHISO kontejner upakovati 6 buradi od 320 L и 9 буради од 200 L. Dozvoljen je i način skladištenja kada se radioaktivni otpad velikih dimenzija koji ispunjava kriterijume za prijem u H3 pakuje direktno u HL-HHISO kontejnere. Ovi slučajevi su dozvoljeni samo ako su opravdani time da se postojećom opremom ne može na siguran i bezbedan način izvršiti fragmentacija RAO do dimenzija potrebnih za pakovanje u burad od 200 ili 320 L. Prilikom pakovanja treba voditi računa da se RAO uskladišti na takav način koji je najpogodniji za kasniju manipulaciju, jer postoji mogućnost da se

unapređanjem kapaciteta za tretman otpada stvore takvi uslovi kako bi se još više smanjila količina otpada ili obezbedilo pakovanje sa minimalnim slobodnim prostorom u pojedinačnoj ambalaži.



Slika 2 Način pakovanja buradi u ISO kontejnere



Slika 3 Plan skladištenja RAO i ZIJZ

Odlučeno je da se zbog ograničenja u pogledu statičkog opterećenja objekta, a u saglasnosti sa postojećom tehničkom dokumentacijom, kontejneri skladište u rasporedu na način kao na slici 3, a da se posebnim uputstvima utvrdi redosled slaganja kontejnera. Na ovaj način bi se dobio prostor između uskladištenih kontejnera koji će biti korišćen za praznu ambalažu, manipulaciju viljuškarem i kao radni deo za pakovanje buradi u kontejnere. Kapacitet skladišta za koji je dobijena dozvola za korišćenje H3 je 92 HL-HHISO kontejnera i 4 ISO kontejnera, tj. teoretski 1620 standardnih buradi od 200 L (kada bi svaki kontejner bio napunjen sa 200 litarskim buradima). U desnoj zoni H3 duž linije kontejnera se smeštaju tretirana burad koja čekaju pakovanje u kontejnere i burad koja ispunjavaju kriterijume za prijem, a čekaju tretman. Drugi nivo kontejnera se pakuje tek nakon popunjavanja prvog. Prilikom skladištenja se vodi računa da se kontejneri veće mase skladište u prvom redu a da se pomeranje kontejnera zbog pravilnog rasporeda vrši samo u ograničenim, sigurnosno i bezbednosno opravdanim slučajevima. Zoniranjem skladišta su, pored brojeva koji predstavljaju poziciju kontejnera u skladištu, utvrđene is slovne oznake koji označavaju nivo na kome se kontejner nalazi (A,B,C,D). Takav način označavanja će unaprediti evidenciju uskladištenog otpada, tako što će svaki HL-HHISO kontejner, pored jedinstvene kodne oznake i ostalih parametara bitnih za evidentiranje, imati i oznaku lokacije u skladištu. Svi radioaktivni izvori koji se skladište u bezbedno skladište moraju zadovoljavati kriterijume za prijem u BS. Ovo podrazumeva detaljno testiranje izvora zračenja i eventualnu dodatnu enkapsulaciju. Projektovani kapacitet BS-a iznosi 60 kontejnera visine 1,2 m, prečnika 1 m, mase 6 t, i 40 sfernih kontejnera prečnika 1 m i mase 1 t. Jaki izvori se skladište u kontejnerima za jedan ili više izvora, tako da je moguće lako utvrditi njihov identitet i poziciju, uz mogućnost ponovne upotrebe. Masivni kontejneri (pojedinačni i zbirni) se spuštaju direktno na pod. Ovi kontejneri se nalaze na levoj strani BS-a i na slici 3 su obeleženi plavom bojom. Pozicije jakih izvora se ucrtavaju na elektronskoj verziji plana bezbednog skladišta, a njihove koordinate (x,y) se beleže. Jačina doze u centralnom prostoru ne sme biti veća od 100 μ Sv/h. U slučaju da ovi uslovi nisu zadovoljeni, postavlja se dodatna radijaciona zaštita od montažnih

betonskih i/ili olovnih zidova. Na desnoj strani BS-a na policama se skladište izvori nižih aktivnosti koji ispunjavaju kriterijume za prijem, ali nisu u potpunosti kondicionirani, tj. "čekaju" zbirno pakovanje za skladištenje.

Nuklearni materijali se skladište u bezbednom skladištu u dva HL-FHISO kontejnera dimenzija 3048 x 2438 x 2591 mm, testiranim za ekstremne uslove korišćenja ("heavy duty ISO"). Svi nuklearni materijali moraju biti zapakovani tako da se spreči kontaminacija kontejnera i skladišta.

5. Zaključak

U cilju poboljšanja stanja sistema upravljanja radioaktivnim otpadom u Republici Srbiji, u okviru lokacije kruga Institut „Vinča”/JP su izgrađeni objekti za skladištenje čvrstog RAO, H3, (1260 m²) i za bezbedno skladištenje jakih izvora zračenja, BS, (435 m²). Operator novih objekata za skladištenje RAO i ZIJZ je Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“ koje je Licencu za probni rad objekata dobilo 12.09.2011.godine. Nakon probnog rada koji je trajao 20 nedelja i u kome su izvršena sva potrebna ispitivanja infrastrukturnih, sigurnosnih i bezbednosnih sistema, dopunjena dokumentacija, izvršena dopunska obučavanje lica koja rade u objektima u skladu sa Pravilnikom o obavljanju nuklearne aktivnosti i korigovane sve uočene neusaglašenosti, dozvola za korišćenje objekata, tj. pun pogon, je dobijena 27.09.2012.godine. Na ovaj način je skladištenje radioaktivnog otpada i izvora zračenja u Republici Srbiji, a ujedno i upravljanje radioaktivnim otpadom u celini, značajno unapređeno i stavljeno na viši sigurnosi i bezbednosni nivo.

6. Literatura

- [1] Institute „Vinča”, Feasibility study for improvement/rearrangement of radioactive waste storage facilities in Vinča research centre, TC PROJECT SCG/4/031, Vinča, Jan 2004.
- [2] Institut „Vinča”, Strategija upravljanja radioaktivnim otpadom u Institutu “Vinča”, QM.1.RAO.000.01, ver. 1.0, 12.10.2006;
- [3] Institut „Vinča”, Informacija o stanju i programu mera sanacije stanja skladišta radioaktivnog otpada u INN Vinča, 28.09.2006.
- [4] Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti, Sl.gl. RS, br. 36/2009.
- [5] Odluka o osnivanju javnog preduzeća za upravljanje nuklearnim objektima u Republici Srbiji, Sl.gl. RS, br. 50/09.
- [6] Sanacija stanja skladišta radioaktivnog otpada - Izgradnja objekata za skladištenje otpada i objekta za tretman radioaktivnog otpada u Institut za nuklearne nauke “Vinča”, Skladište čvrstog RAO i bezbedno skladište RAI, Idejni projekat, 2007-2008.
- [7] JP „Nuklearni objekti Srbije”, Konačni izveštaj o nuklearnoj sigurnosti za privremeno skladište radioaktivnog otpada H3 i bezbedno skladište radioaktivnih izvora BS, ver. 1.0 - 1.3., 2011-2012.
- [8] Pravilnik o obavljanju nuklearne aktivnosti, Sl.gl. RS, br. 37/11 od 31.05.2011.
- [9] Sanacija stanja skladišta radioaktivnog otpada - Izgradnja objekata za skladištenje otpada i objekta za tretman radioaktivnog otpada u Institut za nuklearne nauke “Vinča”, Skladište čvrstog RAO i bezbedno skladište RAI - I faza, Glavni projekat, Knjiga I: DEKONTA d.o.o, Tehnološki projekat, Beograd, 2008.

NEW RADIOACTIVE WASTE STORAGE FACILITIES IN SERBIA

Milutin JEVREMOVIĆ, Milan PETROVIĆ, Milan ORLIĆ, Snežana PAVLOVIĆ
*Public Company „Nuclear Facilities of Serbia“, Belgrade, Serbia,
milutin.jevremovic@vinca.rs*

ABSTRACT

Temporary storage of radioactive waste was previously located in several locations on site of the Institute "Vinca". The most of the radioactive waste was stored in two metal hangars (H1 and H2), which is not satisfactory. In order to improve the situation of the radioactive waste management in the Republic of Serbia, new facilities for the storage of solid radioactive waste, H3, and the secure storage for strong radioactive sources, SS, were built. Operator of new storage facilities, the Public Company Nuclear Facilities of Serbia, received the "trial-run" license for these facilities on 12 September 2011. During the "trial-run" period, which lasted 20 weeks, all necessary testing of infrastructure, safety and security systems were performed, all additional documentation was submitted. Apart from that occupation workers were additionally. Full operation permission was received on 27 September 2012. Due to this, the storage of radioactive waste and radiation sources in the Republic of Serbia, as well as the radioactive waste management in general have been significantly improved.

PREGLED TEHNOLOGIJA TRETMANA TEČNOG RAO

Marija LEKIĆ, Danijela SOLDATOVIĆ i Dušan KIĆEVIĆ

*Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“, Beograd, Srbija,
marija.lekic@nuklearniobjekti.rs*

SADRŽAJ

Od osnivanja Instituta „Vinča“, 1948. godine generisan je tečni radioaktivni otpad (RAO). Pored tečnog RAO sa istraživačkog reaktora RA i Laboratorije za radioizotope koji je uskladišten u četiri podzemna bazena i u bazenu za ozračeno gorivo, postoje i izvesne količine neadekvatno uskladištenog tečnog RAO na nekoliko različitih lokacija unutar Instituta „Vinča“. U Javnom preduzeću „Nuklearni objekti Srbije“ planiran je tretman određenih količina tečnog RAO u Postrojenju za preradu otpada. Ovaj rad daje prikaz metoda koje se koriste za hemijsku karakterizaciju i tretman tečnog RAO, na osnovu nedavno objavljenih istraživanja iz oblasti ispitivanja i primene različitih vrsta tretmana, kao dela prakse integrisanog upravljanja radioaktivnim otpadom.

1. Uvod

Tretman je važna faza u upravljanju radioaktivnim otpadom koji za cilj ima redukciju zapremine generisanog otpada, obezbeđenje sigurnosti i smanjenje troškova sledećih faza upravljanja otpadom. Tok procesuiranja tečnog RAO kreće od sakupljanja, njegove karakterizacije (radiološka, fizička i hemijska) i segregacije, klasifikacije prema vremenima poluraspada prisutnih radionuklida. Zatim sledi odabir odgovarajuće metode za tretman RAO, predtretman (prema karakteristikama otpada), tretman (hemijska precipitacija, evaporacija, jonska izmena, membranske metode i td.), imobilizacija koncentrovanih rastvora i mulja, pakovanje i skladištenje. Osnovni cilj tretmana tečnog otpada je razdvajanje na dve frakcije. Veći udeo je tečna faza koja se ispušta životnu sredinu, nakon provere i ispunjavanja propisanih uslova, a manji udeo je koncentrovani talog sa radionuklidima koji odlazi na dalji tretman.

2. Izbor metode za tretman tečnog RAO

Donošenje odluke za odabir metode tretmana tečnog RAO zavisi od nekoliko faktora, koji se mogu svrstati u pet kategorija [1]:

1. Rezultati karakterizacije i segregacije tečnog otpada;
2. Kriterijumi ispuštanja u životnu sredinu dekontaminirane tečnosti;
3. Dostupnost tehnologija i njihova cena;
4. Mogućnosti kondicioniranja koncentrata koji su rezultat tretmana;
5. Kriterijumi za skladištenje i odlaganje kondicioniranih koncentrata.

Konvencionalne metode za tretman tečnog RAO su: hemijska precipitacija, evaporacija, jonska izmena/sorpcija i membranski procesi - mikrofiltracija, ultrafiltracija, nanofiltracija, reversna osmoza i dijaliza, dok se kontinualna elektrodejonizacija [2] navodi u novijim radovima. U Tabeli 1. prikazane su osnovne karakteristike i neka ograničenja ovih metoda [3].

Tabela 1. Metode tretmana tečnog RAO [3].

Tretman/proces	Karakteristike	Ograničenja
Hemijska precipitacija	<ul style="list-style-type: none"> Pogodna za velike zapremine sa visokim sadržajem soli 	<ul style="list-style-type: none"> Nizak DF* (10^1 DF 10^2)
Jonska izmena	<ul style="list-style-type: none"> Dobra hemijska, termička i radijaciona stabilnost Visoka selektivnost, DF > 10 do 10^4 	<ul style="list-style-type: none"> Uticao visokog sadržaja soli Teškoće pri regeneraciji i recikliranju Relativno skup proces
Evaporacija	<ul style="list-style-type: none"> DF > 10^4 do 10^6 Dobro uspostavljena tehnologija Visok zapreminski redukcionni faktor Pogodna za različite radionuklide 	<ul style="list-style-type: none"> Ograničenost procesa (penušanje, korozija, isparljivost određenih radionuklida) Skup proces
Reverzna osmoza	<ul style="list-style-type: none"> Uklanjanje rastvornih soli DF 10^2-10^3 Ekonomičnost Pogodna za velike operacije 	<ul style="list-style-type: none"> Sistem visokog pritiska, ograničen osmotskim pritiskom
Ultrafiltracija	<ul style="list-style-type: none"> Izdvajanje rastvornih soli iz koloidnih rastvora Dobra hemijska i radijaciona stabilnost za neorganske membrane 	<ul style="list-style-type: none"> Nečistoće Organske membrane-sekundarni RAO
Mikrofiltracija	<ul style="list-style-type: none"> Visoka regenerativna moć Dobra faza predtretmana 	<ul style="list-style-type: none"> Osetljiva na nečistoće u tečnom RAO
Ekstrakcija	<ul style="list-style-type: none"> Selektivnost omogućava dobro uklanjanje i regeneraciju 	<ul style="list-style-type: none"> Organske materije su prisutne u tečnom rafinatu Generisanje sekundarnog otpada

*DF -faktor dekontaminacije.

3. Prikaz metoda za tretman tečnog RAO sa osvrtom na hemijsku karakterizaciju

Prilikom hemijske karakterizacije tečnog uzorka bitno je odrediti pH vrednost, jonsku jačinu i koncentraciju jona, prisustvo kompleksnih jedinjenja EDTA (jer njegovo prisustvo otežava tretman tečnog RAO), prisustvo metala (posebno aluminijuma i gvožđa) kao i prisustvo uranijuma i torijuma [1]. Određivanje aluminijuma je važno zbog toga što aluminijum, kao i gvožđe, predstavlja prirodni adsorber i kao takav prečišćava otpadne vode od teških metala i anjona. Primer je dao Ren u svom radu ispitivajući flokulaciju visokokoncentrovanog niskoaktivnog tečnog RAO koji sadrži Pu i U [4]. Rezultati su pokazali da se Pu efikasno uklanja u alkalnoj sredini, dok efikasnost uklanjanja uranijuma dostiže 95,5% podešavanjem pH na 6 i dodavanjem 100ml/L Fe. Za predtretman je potrebno izvršiti hemijsku pripremu: oksidaciju organskih kontaminanata, razlaganje kompleksnih vrsta ili zaostalih kompleksirajućih agenasa, promenu valentnog stanja elemenata ili podešavanje jonskih vrsta u rastvoru kako bi se dobio bolji afinitet prema precipitatu. Glavne precipitacione metode koriste flokule hidroksida metala u neutralnoj ili alkalnoj sredini za uklanjanje radionuklida. U ovom procesu dolazi do adsorpcije radionuklida na flokulu ili koprecipitacije [5]. Postupci jonske izmene se dugo koriste u preradi otpadnih voda, tako da je ovakav tretman dosta ispitivan i razvijen. Različite nove studije su posvećene primeni i ispitivanju jonoizmenjivača koji imaju za cilj da poboljšaju efikasnost i performanse u tretmanima industrijskih razmera. Ren i saradnici su ispitivali uklanjanje uranijuma iz tečnog RAO dinamičkom (kolonski) i statičkom (batch) adsorpcijom pri čemu se pokazalo da se efikasnost ispitivanih smola znatno smanjuje u prisustvu anjona, trietanolamina i ulja koja mogu biti prisutna u tečnom RAO [6]. Jonoizmenjivačke osobine zeolita, bilo prirodnog bilo sintetičkog, predmet su većeg broja studija koje se tiču metoda tretmana tečnog RAO. Katjoni radioizotopa, prisutnih u efluentima nisko i srednjeaktivnog tečnog RAO, se uklanjaju upravo jonskom izmenom sa Na^+ jonima zeolita. Zeoliti poseduju veliki kapacitet jonske izmene, selektivnost i

specifičnost, ali i dobru radijacionu stabilnost [7]. Evaporacija je najefikasnija tehnika za otpad sa visokim sadržajem soli i efluente koji sadrže azotnu kiselinu, a kada se zahteva velika vrednost faktora dekontaminacije (10^4 - 10^6) [1]. Prisustvo nekih organskih jedinjenja, npr. tributilfosfata (TBP) u azotnoj kiselini, mogu za rezultat imati eksplozije tokom evaporacije i zahtevaju adekvatan predtretman, kao što je stripovanje parom [8]. U tretmanu sekundarnog otpada, nastalog dekontaminacijom, koriste se polupropustljive membrane. Studija je pokazala da se efikasnost uklanjanja Cs može povećati korišćenjem prirodnog zeolita u fazi predtretmana, i aktivnog uglja za uklanjanje organskih komponenti iz tečnog RAO [9]. Novija tehnologija kontinualne elektrodejonizacije (CEDI) koja se koristi za tretman niskoaktivnog tečnog RAO sa Cs, Co i Sr, smanjuje potrošnju energije u odnosu na ostale tretmane [2]. Eksperimentalno je dokazano da ova tehnologija ima dosta efikasnije performanse u poređenju sa konvencionalnim procesima jonske izmene, sa efikasnošću uklanjanja Sr većom od 95%.

4. Zaključak

Ovaj pregledni rad ima za cilj da ukaže na različite probleme koji se susreću u tretmanu tečnog RAO. Većina objavljenih radova o tretmanu tečnog RAO je usmerena ka proučavanju Cs, Co, Sr i U kao radionuklida sa velikim uticajem na životnu sredinu. Rede su studije koje se bave istraživanjem Zn, Eu i Pu. Većina adsorbenata ispitivana je u jednostepenoj ili dvostepenoj adsorpciji. U radovima skorijeg datuma ispituje se ponašanje više adsorbenata za potencijano uklanjanje radionuklida iz multikomponentnih sistema. Nove efikasne metode tretmana tečnog RAO, kao što je tehnologija kontinualne elektrodejonizacije, još uvek traže svoju ekonomsku opravdanost.

5. Literatura

- [1] M. I. Ojovan and W.E. Lee. An introduction to nuclear waste immobilization, 2005, Chapter 14 - Treatment of Radioactive Wastes, 149-178.
- [2] Liu, L.; Li, F.; Zhao, X. Low-level radioactive wastewater treatment by continuous electrodeionization. *Qinghua Daxue Xuebao/J. Tsinghua Univ.* 2008, 48, 1012-1014.
- [3] International Atomic Energy Agency. Handling and Processing of Radioactive Waste from Nuclear Applications; TRS No. 402; IAEA: Vienna, Austria, 2001.
- [4] Ren, J.S.; Mu, T. Treatment of high salinity low level radioactive wastewater containing uranium and plutonium by flocculation. *J. Nucl. Radiochem.* 2008, 30, 201-205.
- [5] J. Floureta, Y. Barréa, H. Muhrb. Design of an intensified coprecipitation reactor for the treatment of liquid radioactive wastes, 18th International Symposium on Industrial Crystallization, Chemical Engineering Science Volume 77, 30 July 2012, Pages 176–183.
- [6] Ren, J.S.; Mu, T.; Zhang, W.; Yang, S.Y. Effect of Ingredients in waste water on property of ion exchange resin for uranium-contained waste water treatment. *Atom. Ene. Sci. Technol.* 2008, 42, 38-42.
- [7] Abd El-Rahman, K.M.; El-Kamash, A.M.; El-Sourougy, M.R.; Abdel-Moniem, N.M. Thermodynamic modeling for the removal of Cs^+ , Sr^{2+} , Ca^{2+} , and Mg^{2+} ions from aqueous waste solutions using zeolite A. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2006, 268, 221-230.
- [8] T.P. Valsala, M.S. Sonavane, Treatment of low level radioactive liquid waste containing appreciable concentration of TBP degraded products Original Research Article, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 196, 30 November 2011, Pages 22-28.
- [9] Dulama, M.; Deneanu, N.; Dulama, C.; Pavelescu, M. Experimental studies concerning the semipermeable membrane separation efficiency for ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn in liquid radioactive waste. I. Treatment of secondary waste from POD decontamination procedure. *Rev. Chim.* 2008, 59, 544-549.

TECHNOLOGIES FOR THE TREATMENT OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE: REVIEW

Marija LEKIĆ, Danijela SOLDATOVIĆ i Dušan KIĆEVIĆ
*Public Company „Nuclear Facilities of Serbia“, Belgrade, Serbia,
marija.lekic@nuklearniobjekti.rs*

ABSTRACT

The liquid radioactive waste (RAW) has been generated since the establishment of the Institute "Vinca", in 1948. In addition to the liquid radioactive waste from research reactor RA and the Laboratory for radioisotopes that is stored in four underground basins, there are certain amounts of liquid radioactive waste inadequately stored at several different locations within the Institute "Vinca". Public Company "Nuclear Facilities of Serbia" has planned treatment of certain quantities of radioactive liquid waste in the waste processing facility, WPF. This paper presents methods used for chemical characterization and treatment technologies for liquid radioactive waste, in accordance with the recently published research papers on examination and application of various types of treatments, which represent part of the integrated radioactive waste management practice.

DEKONTAMINACIJA MANIPULATORA PRIMENOM ULTRAZVUČNE TEHNIKE

**Nataša LAZAREVIĆ, Nevena ZDJELAREVIĆ, Ivan KNEŽEVIĆ i
Miodrag MANDIĆ**

Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“, Vinča, Srbija, natasa.lazarevic@nuklearniobjekti.rs

SADRŽAJ

Prilikom prepakivanja ozračenog nuklearnog goriva, koje je sprovedeno u cilju transporta ozračenog nuklearnog goriva iz istraživačkog reaktora RA u Vinči u zemlju porekla u Rusiju, bilo je potrebno servisirati i upotrebiti manipulatore gorivnih elemenata, koji su bili kontaminirani usled korišćenja. Dekontaminacija manipulatora 3 je izvršena primenom ultrazvučne tehnike zbog velike jačine doze na kontaktu i komplikovane konstrukcije predmeta. Dekontaminacija je vršena 30 min, na temperaturi 60 C°i pri frekvenciji ultrazvuka od 18 kHz. Dobijen je visok faktor dekontaminacije i efikasnost dekontaminacije.

1. Uvod

U okviru projekta prepakivanja i transporta ozračenog nuklearnog goriva iz istraživačkog reaktora RA u Vinči u zemlju porekla u Rusiju 2010. godine [1], korišćeni su različiti manipulatori gorivnih elemenata, koje je često bilo potrebno dekontaminirati ili servisirati za dalju upotrebu. Dekontaminacija manipulatora gorivnih elemenata, koji su korišćeni ranijih godina na RA, je vršena uglavnom primenom alkohola i drugih organskih rastvarača, ali je zbog velike jačine doze na kontaktu na manipulatoru 3 i komplikovane konstrukcije predmeta, izvršena u ovom slučaju prvi put ultrazvučna dekontaminacija.

Ultrazvučna dekontaminacija je metoda uklanjanja čestica kontaminanata sa kontaminirane površine pomoću mehaničkih vibracija koje izaziva ultrazvuk. Kada ultrazvučni talasi određene frekvencije prolaze kroz tečnu fazu, tečnost počinje da osciluje sa istom frekvencijom kao i ultrazvučni generator i dolazi do pojave oblasti sa pod pritiskom, koji može biti niži od napona pare tečnosti pri visokim frekvencijama. Posledica toga je razdvajanje tečnosti i stvaranje mehurova, tj. pojave kavitacije. Efikasnost dekontaminacije primenom ultrazvuka zavisi od vibracione frekvencije, gustine energije u tačnoj fazi, pritiska, napona pare, viskoznosti rastvora, površinskog napona i temperature tečnosti, kao i jačine veze između kontaminanta i površine, tj. pripode kontaminanta, površine i okolnog medijuma. Odvajanje kontaminanta od površine je posledica udarnog talasa ultrazvuka i rezultat erozije površine, koja je izložena kavitacionim mehurovima i visoko frekventnom trenju, pri čemu se tretira fina struktura površine sa svim defektima, pukotinama i makroporama, koja je nedostupna konvencionalnim metodama čišćenja [2]. Kod površine alata je karakteristično da što se više koristi, površina mu je razrađenija i složenija, pa utoliko i teža za dekontaminaciju.

Korišćenjem rastvora za dekontaminaciju u ultrazvučnom polju, kombinuje se hemijsko dejstvo i uticaj vibracija, što je pogodno za otklanjanje čvrsto vezane kontaminacije. Primena ultrazvučne tehnike je naročito pogodna u slučajevima kada visoka jačina doze onemogućava manuelan tretman površine i kad je kontaminirana površina složene geometrije. Ova tehnika nije primenljiva za dekontaminaciju betona i materijala koji apsorbuju energiju ultrazvučnih talasa [3]. U tečnim sistemima najefikasnije su frekvencije od 18 do 22 kHz. Primena ultrazvuka u svrhe dekontaminacije ima ograničenje u potrebnom relativno kratkom rastojanju od izvora vibracionog polja od 30 cm.

2. Eksperiment

Za ultrazvučnu dekontaminaciju korišćena je ultrazvučna kada SONIC 18GT (SONIC, Niš), sa posudom od nerđajućeg Cr-Ni čelika, ispod čijeg dna su se nalazili ultrazvučni generatori, koji generišu ultrazvuk frekvencije 18 kHz. Kao grejni medijum i prenosilac ultrazvuka korišćena je destilovana voda, koja je sipana u kadu, do 2/3 nivoa visine kade. U kupatilu se nalazila mrežica, na koju je postavljen plastični sud sa sredstvom za dekontaminaciju, u kome je vršena dekontaminacija valjkastog dela

manipulatora 3, koji je bio napravljen od gvožđa. Na taj način je kontaminirana tečnost dobijena primenom dekontaminacije ultrazvukom bila odvojena od okolnog medijuma, tj. destilovane vode, i time je onemogućena kontaminacija ultrazvučne kade. U plastični sud sipan je rastvor za dekontaminaciju sa 0.1% površinski aktivne materije, tako da je nivo rastvora bio iznad valjkastog dela predmeta. Valjkasti deo manipulatora 3 sa prorezima na kome se nalazila koncentrisana kontaminacija je bio potpuno uronjen u plastični sud, a vertikalni deo je pričvršćen klemom i mufom i zaštićen PVC folijom. Gornji deo predmeta je bio pričvršćen na staklo digestora zbog stabilnosti. Podešavanje efikasnosti ultrazvučne dekontaminacije je vršeno variranjem nivoa tečnosti, tj. dodavanjem rastvora za dekontaminaciju, dok se ne pojavi maksimalno „ključanje“ u kadi. Dekontaminacija je vršena 30 minuta, pri temperaturi podešenoj na 60 °C.

Za merenje jačine doze korišćen je bazni uređaj Canberra Radiagem 2000 sa NaI sondom SG-1R, a beta/gama kontaminacija je merena sa kontaminacionom sondom SABG15. Efikasnost uređaja za merenje beta/gama kontaminacije iznosi 35 % za radionuklid ⁶⁰Co. Za merenje prenosne površinske kontaminacije korišćena je indirektna metoda merenja, korišćenjem vlažnog brisa, pri čemu je uzeto da faktor prenosa kontaminacije na bris iznosi 10%. Greška merenja površinske kontaminacije metodom uzimanja brisa je bila 25%, dok su greške merenja jačine gama doze bile 20%. Izmerena kontaktna jačina doze u sva četiri pravca normalno na stranice ultrazvučne kade je iznosila 1 μSv/h, a kada je dodata tečnost 0.2 μSv/h.

Posle završene dekontaminacije predmet je izvađen iz ultrazvučne kade, ispran destilovanom vodom 3 puta i obrisani suvom vatom. Merena je jačina doze po površini predmeta kontaktno i uzeti su brisevi. Izračunati su odgovarajući faktor dekontaminacije i efikasnost dekontaminacije, izražena kao procenat skinute aktivnosti.

3. Rezultati i diskusija

Manipulator 3 je imao maksimalne vrednosti specifične nevezane kontaminacije na ograničenom prostoru od 10% površine na delu koji je valjkastog oblika sa prorezima. Jačina doze na predmetu je iznosila 20 μSv/h dominantno, dok je na nekim delovima valjkastog dela dostizala maksimalnu vrednost 60 μSv/h. U tabeli 1. su dati rezultati jačine doze i specifična aktivnost briseva uzetih sa predmeta pre i posle dekontaminacije, faktor dekontaminacije i efikasnost dekontaminacije izražena kao procenat skinute aktivnosti.

Tabela 1. Jačine doze i specifična aktivnost briseva uzetih sa predmeta pre i posle dekontaminacije, faktor dekontaminacije i efikasnost dekontaminacije

Objekat	Manipulator 3
Maksimalna jačina doze pre dekontaminacije (μSv/h)	60
Dominantna jačina doze pre dekontaminacije (μSv/h)	20
Maksimalna jačina doze posle dekontaminacije (μSv/h)	8
Specifična aktivnost brisa β/γ pre dekontaminacije (Bq/cm ²)	9
Specifična aktivnost brisa β/γ posle dekontaminacije (Bq/cm ²)	< 0.6
Faktor dekontaminacije	15
Efikasnost dekontaminacije (%)	93.3

Dobijen je visok faktor dekontaminacije i efikasnost dekontaminacije. Vrednosti specifične kontaminacije na brisu su svedene na nivo prirodnog fona, što znači da je uklonjena nevezana kontaminacija [4]. Vrednost maksimalne jačine doze 8μSv/h na predmetu ukazuje na prisustvo hemijski vezane kontaminacije u porama materijala, ali postupak nije ponavljen, jer dalje ponavljanje postupka ne bi bilo efikasno i opravdano, tj. ne bi dovelo do daljeg smanjenja jačine doze. Izmerena jačina doze

dobijena na predmetu posle izvršene dekontaminacije je bila prihvatljiva uzimajući u obzir da će rad servisera biti kratkotrajan, maksimalno dva sata[5].

4. Zaključak

Dekontaminacija manipulatora 3 je izvršena primenom ultrazvučne tehnike, koja je naročito pogodna u slučajevima kada visoka jačina doze onemogućava manuelan tretman površine i kad je kontaminirana površina složene geometrije. Dekontaminacija je vršena u trajanju 30 min, na temperaturi 60 C° i pri frekvenciji ultrazvuka od 18 kHz. Dobijen je visok faktor dekontaminacije i efikasnost dekontaminacije. Vrednosti specifične kontaminacije na brisu su svedene na nivo prirodnog fona, odnosno nije ustanovljeno prisustvo nevezane kontaminacije na predmetu. Pošto je izmerena jačina doze dobijena na predmetu posle izvršene dekontaminacije prihvatljiva, dozvoljen je rad servisera sa manipulatorom u trajanju od 2 sata.

5. Literatura

- [1] Technical Specifications “Spent fuel assemblies of the Vinca RA Reactor (Republic of Serbia). Delivery to the Russian radiochemical plant at FSUE “PA “Mayak”, № 1011/3-2009.
- [2] Ultrasonic decontamination. In: *State of the Art Technology for Decontamination and Dismantling of Nuclear Facilities*, Technical reports series No. 395, pp. 56-56, 1999. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [3] J. Severa and J. Bar. Use of vibration. In: *Handbook of radioactive contamination and decontamination*, Studies in Environmental Science 47, pp. 125-126, 1991. Elsevier Science Publishing Company. Inc., Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo.
- [4] Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije. *Službeni glasnik Republike Srbije* 38/11, 31.05.2011.
- [5] Istraživačka i razvojna organizacija “Sosny”, Institut za nuklearne nauke “Vinča” – Centar za nuklearne tehnologije i istraživanja “NTI” i Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, *Konačni izveštaj o sigurnosti za prepakivanje i privremeni smeštaj ozračenog nuklearnog goriva reaktora RA*, Vinča, jun 2009.

ULTRASONIC DECONTAMINATION OF MANIPULATOR

**Nataša LAZAREVIĆ, Nevena ZDJELAREVIĆ, Ivan KNEŽEVIĆ,
Miodrag MANDIĆ**

Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“, Vinča, Srbija, nataša.lazarevic@nuklearniobjekti.rs

ABSTRACT

During the repackaging of spent nuclear fuel, which was done prior to transport of spent nuclear fuel from RA research reactor in Vinca to the Russian Federation, there was a need for servicing and later usage of fuel element manipulators, which were contaminated during above mentioned operation. Ultrasonic decontamination of manipulator no. 3 was conducted due to high dose rate on the surface of the manipulator and due to its complex construction. Decontamination was done for a period of time of 30 minutes at a temperature of 60 C° with ultrasonic frequency of 18 kHz. High decontamination factor and decontamination efficiency were obtained.

SINTEZA NANOČESTIČNOG HIDROKSIAPATITA EMULZIONOM METODOM, KAO POTENCIJALNOG SORBENTA JONA TEŠKIH METALA I RADIONUKLIDA

**Vojislav STANIĆ, Miodrag MITRIĆ, Slavica RAIČEVIĆ, Ilija PLEĆAŠ,
Nataša SARAP**

Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Beograd, Srbija, voyo@vinca.rs

SADRŽAJ

Neorganski nanomaterijali na bazi hidroksiapatita su potencijalno atraktivni kao sorbenti teških metala i radionuklida. Nanočestični hidroksiapatit je sintetizovan pomoću emulzione metode. Karakterizaciona studija pomoću XRD, SEM, ICP i FTIR je pokazala da su čestice uzoraka nano veličine i monofazne.

1. Uvod

Zagađenje životne sredine teškim metalima je jedan od najvećih ekoloških problema u svetu. Prirodni i sintetički hidroksiapatiti $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, pokazuju veliki afinitet prema sorpciji jona teških metala i radionuklida [1, 2]. Sorpcione osobine hidroksiapatita zavise od njegovih fizičko-hemijskih svojstava: specifične površine, hemijskog sastava, veličine i morfologije čestica, kao i vrste jona teškog metala i eksperimentalnih uslova. Poznavanje sorpcionih svojstava hidroksiapatita od velike je važnosti za pronalaženja tehnoloških rešenja za njihovu imobilizaciju kao i za izučavanje procesa migracije jona metala u prirodi. S obzirom na potencijalnu primenu hidroksiapatita, interesovanje za postupcima sinteze ovog materijala je u stalnom porastu.

Nanotehnologija se danas razvija velikom brzinom te se koristi u raznim područjima nauke i tehnologije. Nanočestice zbog svojih malih dimenzija (< 100 nm) poseduju veću specifičnu površinu od makro čestica, koja daje veći broj atoma na granici faza odnosno veću hemijsku reaktivnost i bolja difuziona odnosno sorpciona svojstva [3, 4].

U ovom radu nanočestični hidroksiapatit je sintetizovan emulzionom metodom. Prednost ove metoda je da postoji mogućnost kontrole dobijanja čestica određene veličine i morfologije, te da se mogu dobiti značajne količine materijala iz jeftinih hemikalija uz korišćenje relativno pristupačne opreme.

2. Eksperimentalni deo

2.1. Sinteza kalcijum hidroksiapatita

Sve korišćene hemikalije za sinteze uzoraka hidroksiapatita su bile p. a. čistoće: tetradeciltrimetilamonijumhlorida (TDAC, Henkel), $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, NH_4OH i $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ su dobijeni od Merck-a. Bidestilovana voda je korišćena prilikom sinteze uzoraka hidroksiapatita.

U vodeni rastvor 70 cm^3 TDAC (3,5 g) i $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (2 g) je dodato u kapima 50 cm^3 rastvora 0,9g $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. pH rastvora je u toku sinteze održavan na 10 dodavanjem 25% NH_4OH . Nakon ukapavanja, suspenzija je ostavljena da stari 5 sati uz konstantno mešanje ($200 \text{ ob} \cdot \text{min}^{-1}$) na sobnoj temperaturi (25°C). Dobijeni proizvod je proceden na vakuumu, ispran alkoholom i bidestilovanom vodom i ostavljen u sušnici na 105°C preko noći da se osuši.

2.2. Metode karakterizacije uzoraka

Svi uzorci snimljeni su na difraktometru Philips PW-1050. Za analizu je upotrebljena $K\alpha$ linija Cu, pri naponu 20 kV i struje od 15 mA, na rendgenskoj cevi. Merenja su vršena u oblasti difrakcije 2θ od 20° do 60° , sa korakom od $0,05^\circ$ i vremenom ekspozicije 1s.

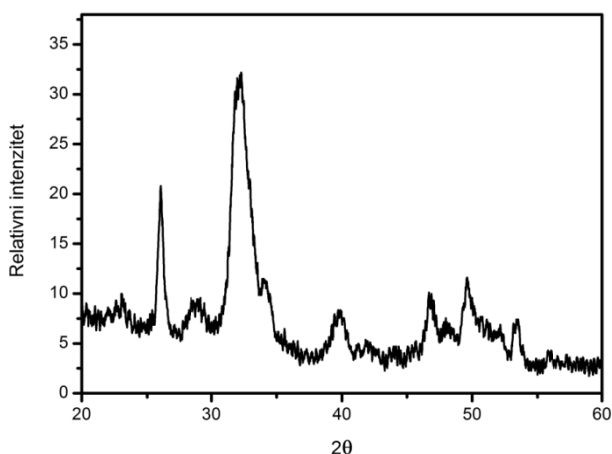
FT-IR spektar uzorka je snimljen na Nicolet 6700 FT-IR spektrofotometru, KBr tehnikom u opsegu $4000\text{-}400 \text{ cm}^{-1}$.

Morfološka karakterizacija uzoraka je vršena na JEM-2010F transmisivnom elektronskom mikroskopu pri radnom naponu od 100 kV.

Kvantitativna elementalna analiza (Ca i P) uzoraka je rađena metodom atomske emisijske spektrometrije sa induktivno spregnutom plazmom, pomoću uređaja ICP spektrometar Spectro Flame (Spectro Analytical Instruments, Nemačka).

3. Rezultati i diskusija

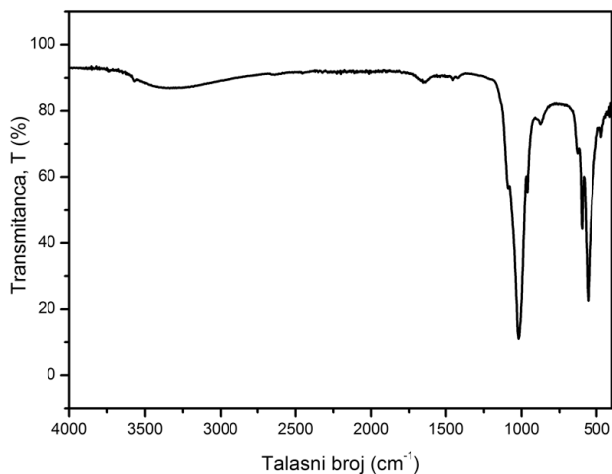
Rendgenostrukturalna analiza je pokazala da sintetisani uzorak poseduje heksagonalnu strukturu, koja odgovara kristalnoj rešetki kalcijum hidroksiapatita (ASTM kartica 9-423). Sintetisani HAP ima nešto veće vrednosti parametra rešetke a (0,9458 nm) i c (0,6908 nm) u odnosu na standardni hidroksiapatit ($a = 0,9418$ nm i $c = 0,6884$ nm). Povećanje vrednosti parametara rešetke su posledica načina pripreme uzoraka, nestehiometrijskog sastava i prisustva raznih primesa. Dobijeni difraktogrami poseduje široke pikove, što ukazuje da je uzorak slabo kristaliničan i da su dobijene čestice nano dimenzija.



Slika 1. XRD difraktogram sintetisanog hidroksiapatita

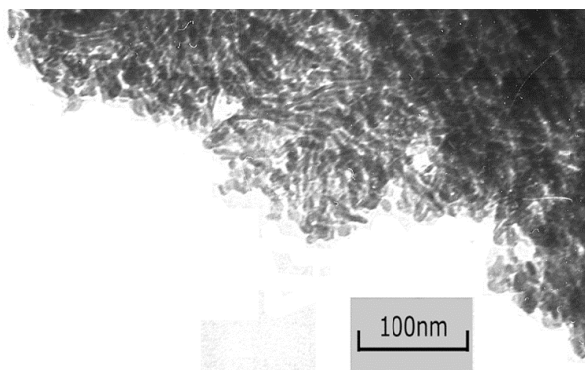
Kvantitativna elementalna analiza uzorka je pokazala da je molski odnos $[Ca]/[P]=1,64$, nešto manji od stehiometrijskog. Stehiometrijski hidroksiapatiti imaju Ca/P odnos 1,67.

Odgovarajući FT-IR spektri sintetisanog uzorka dati je na [Slici 2](#). FT-IR spektri uzoraka hidroksiapatita dopiranih jonima metala su skoro identični sa spektrom čistog hidroksiapatita i mogu se uočiti zajedničke karakteristične apsorpcione trake koje potiču od adsorbovane vode, hidroksilne, fosfatne i karbonatne grupe. Apsorpcione trake karakteristične za PO_4^{3-} grupu nalaze se na oko 1092 cm^{-1} , 1040 cm^{-1} , 962 cm^{-1} , 601 cm^{-1} i 471 cm^{-1} . Traka slabog intenziteta na oko 1410 cm^{-1} odgovaraju vibracijama CO_3^{2-} grupe. Na osnovu slabog intenziteta ovih traka, može se pretpostaviti da je količina karbonatnih jona veoma mala u uzorku. Široke trake u opsegu od 2500 cm^{-1} do 3700 cm^{-1} i traka slabog intenziteta na oko 1642 cm^{-1} potiču od vibracija adsorbovanih molekula vode. Traka slabog intenziteta na oko 3572 cm^{-1} i traka na 632 cm^{-1} odgovaraju vibracijama OH grupe.



Slika 2. FTIR spektar sintetisanog uzoraka

TEM mikrografija sintetisanog uzoraka je prikazana na Slici 3. Sa mikrografije se može uočiti da je uzorak homogen i da su prisutne nanometarske čestice, sličnih morfoloških karakteristika: nepravilnog cilindričnog oblika često izvijene i neujednačene veličine. Prosečna dužina čestica iznosi oko 25 nm a širina oko 7 nm.



Slika 3. TEM mikrografija uzoraka hidroksiapatita

4. Zaključak

U ovom radu, nanostrukturne čestice hidroksiapatita su sintetizovane emulzionom metodom na sobnoj temperaturi. Dobijeni prah poseduje kristalnu strukturu, koja odgovara rešetki čistog hidroksiapatita. Čestice dobijenog praha su nepravilnog cilindričnog oblika i neujednačene veličine, prosečne dužine oko 25 nm i širine oko 7 nm. Dobijeni nanočestični prah hidroksiapatita može se primeniti kao materijali za imobilizaciju jona teških metala prilikom tretmana zagađene vode i zemljišta.

5. Literatura

- [1] I. Smičiklas, A. Onjia, S. Raičević, Đ. Janačković, M. Mitrić, Factors influencing the removal of divalent cations by hydroxyapatite, *J. Hazard. Mater.* 152 (2008) 876–884.
- [2] S.D. Raicevic, T.S. Kaludjerovic-Radoicic, A.I. Zouboulis, In situ stabilization of toxic metals in polluted soils using phosphates: theoretical prediction and experimental verification, *J. Hazard. Mater.* 117 (2005) 41–53.
- [3] Z. Zhang, M. Li, W. Chen, S. Zhu, N. Liu, L. Zhu. Immobilization of lead and cadmium from aqueous solution and contaminated sediment using nano-hydroxyapatite. *Environ. Pollut.* 2010, (158) 514–519.
- [4] I. Mobasherpour, E. Salahi, M. Pazouki. Removal of divalent cadmium cations by means of synthetic nano crystallite hydroxyapatite, *Desalination*. 266 (2011) 142-148.

6. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije pod sledećim projektom: III43009.

SYNTHESIS OF HYDROXYAPATITE NANOPARTICLES BY EMULSION METHOD AS A POTENTIAL SORBENT OF HEAVY METAL IONS AND RADIONUCLIDES

Voislav STANIĆ, Miodrag MITRIĆ, Slavica RAIČEVIĆ, Ilija PLEĆAŠ,
Nataša SARAP

University of Belgrade, Institute Vinča, Radiation and Environmental Protection Department, Belgrade, Serbia, voyo@vinca.rs

ABSTRACT

Inorganic nanomaterials based on hydroxyapatite are potentially attractive if used as sorbents for numerous heavy metals and radionuclides. The synthesis of hydroxyapatite nanoparticles was done by emulsion method. Characterization studies from XRD, SEM, ICP and FTIR spectra showed that particles of the sample are of nano size and they do not contain any discernible crystalline impurity.

***REGULATIVA, EDUKACIJA
I JAVNO INFORMISANJE***

USAGLAŠENOST NACIONALNE LEGISLATIVE SA DIREKTIVOM 97/43 EURATOM SAVETA EVROPSKE UNIJE I KLINIČKA IMPLEMENTACIJA U SRBIJI

Borislava PETROVIĆ¹, Milan TEODOROVIĆ¹, Milutin BAUCAL¹, Laza RUTONJSKI¹, Ozren ČUDIĆ¹, Borko BASARIĆ¹, Ljubica SMILJANIĆ¹, Jelena STANKOVIĆ², Luka RAGOJLOVIĆ³, Goran KOLAREVIĆ⁴, Dragomir PAUNOVIĆ⁵, Nina PAVLOVIĆ⁶

1) Institut za onkologiju Vojvodine, Sremska Kamenica, Srbija

2) Klinički centar Niš, Niš, Srbija

3) Vojnomedicinska akademija, Beograd, Srbija

4) Institut za onkologiju i radiologiju Srbije, Beograd, Srbija

5) Zdravstveni centar Kladovo, Kladovo, Srbija

6) Klinički centar Kragujevac, Kragujevac, Srbija

SADRŽAJ

U radu su prezentovani rezultati analize stepena implementacije testova kontrole kvaliteta, i evidencije o izloženosti pacijenata u radioterpijskim centrima u Srbiji. Klinička implementacija je vrlo raznolika, s obzirom na raznolike tehničke mogućnosti centara i njihovu opremljenost. Testovi kontrole kvaliteta svih aparata se sprovode prema tehničkim mogućnostima svakog centra pojedinačno, ali u svim slučajevima prevazilaze zakonski obavezne testove. Vežano za evidenciju pacijenata, nosioci licence imaju delimičnu evidenciju o izloženosti, u različitim bazama podataka i ti podaci nisu centralizovani, ni na nivou jedne ustanove, a pogotovo ne na nivou države.

1. Uvod

Novi Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti Srbije, usvojen je 2009. godine, kao i dva prateća pravilnika: Pravilnik o evidenciji o izvorima jonizujućih zračenja, profesionalno izloženim licima, o izloženosti pacijenata jonizujućim zračenjima i radioaktivnom otpadu (Sl. Gl. RS 97/11 od 21.12.2011), i Pravilnik o primeni izvora jonizujućih zračenja u medicini (Sl. Gl. RS 1/12 od 11.01.2012) [1,2,3].

Zakon je, kao i članovi Pravilnika, u punoj saglasnosti sa Direktivom Euratom 97/43 [4], i to: u Pravilniku o primeni izvora jonizujućih zračenja u medicini, član 6 (medicinska izlaganja) u saglasnosti je sa Article 1 Euratom direktive (exposures), član 7 (opravdanost izlaganja) u saglasnosti je sa Article 3 Euratom direktive (justification), član 14 (optimizacija izlaganja) u saglasnosti je sa Article 4 Euratom direktive 97/43, članovi 20 i 21 (odgovornost za sprovođenje izlaganja) sa Article 5 (Responsibilities). Članovi 22 i 23 (Pisane procedure i protokoli) sa Article 6 (Procedures), član 24 (dopunska obuka profesionalno izloženih lica) sa Article 7 (Training), Član 25 (Posebno značajna izlaganja) sa Article 8 (Equipment), itd. Osim toga, u Prilogu br. 3, tabela 8, data je lista obaveznih testova koji uključuju mehaničke i provere zračnog snopa. Ova lista testova je vrlo kratka, i u stvari nedostatna sa aspekta preporučenih testova kontrole kvaliteta od strane AAPM , i IAEA, koji su usvojeni i u radioterapijskim centrima u Srbiji [5,6,7,8]. Na primer, u okviru Pravilnika reproducibilnost ugla gentrja treba da bude jedina dnevna provera, dok su široko prihvaćene preporuke u literaturi da na prvom mestu doza (output snopa) treba da bude dnevna provera, kao i konstantnost simetrije i ravnoće referentnog zračnog polja, i provera energije snopa, kako za fotonski tako i elektronski snop. Dnevna provera takođe treba da uključi poziciju lasera, indikatora distance, i niz najvažnijih interlokova (vrata, audiovizuelnu komunikaciju, itd). Većina ovih testova naznačena je kao mesečna provera, ali su zapravo neophodni kao dnevne provere. U okviru radioterapije, kao zakonski obavezne, trebalo bi uvesti testove kontrole kvaliteta ne samo akceleratora i kobaltnog uređaja, već i uređaja za brahiterapiju, kao i CT simulatora, sistema za planiranje i lokalizatora, da bi se u potpunosti uveo jednak sistem kontrole kvaliteta u radioterapiji, koja je tehnološki najzahtevnija grana medicine, i samim tim, bez sistema kontrole kvaliteta otvara velike mogućnosti nastanka akcidenta u širim razmerama, ne celu seriju pacijenata.

Članom 17. Pravilnika o evidenciji o izvorima jonizujućih zračenja, profesionalno izloženim licima, o izloženosti pacijenata jonizujućim zračenjima i radioaktivnom otpadu (iz decembra 2011.godine), nosioci licence za obavljanje radijacione delatnosti (bolnice) dužni su da čuvaju podatke o profesionalno izloženim licima, kao i pacijentima. Svrha je da se ova evidencija koristi kao izvor podataka za procenu doze koju je pacijent primio zavisno od vrste medicinskog postupka (naziv postupka, parametri izvora jonizujućeg zračenja, neželjeni efekti, akcidenti/incidenti).

2. Metode

Konsultovani su svi radioterapijski centri u Srbiji, u pogledu sprovođenja testova kontrole kvaliteta, i evidencije o izloženosti pacijenata.

3. Rezultati

Klinička implementacija u Srbiji je vrlo raznolika, s obzirom na raznolike tehničke mogućnosti centara i njihovu opremljenost.

Testovi kontrole kvaliteta svih aparata se sprovede prema tehničkim mogućnostima svakog centra pojedinačno, ali u svim slučajevima prevazilaze zakonski obavezne testove.

Vežano za evidenciju pacijenata, nosioci licence imaju delimičnu evidenciju o izloženosti, u različitim bazama podataka (RV sistem, bolničko informativni sistem, papirne verzije), i ti podaci nisu centralizovani, ni na nivou jedne ustanove, a pogotovo ne na nivou države. Tako da jedan pacijent, zbog jedne ili više procedura, može više puta da bude izložen jonizujućem zračenju, a da o tome nema povezanih podataka. Isto se odnosi i na profesionalno izložena lica, ne postoji evidencija profesionalno izloženih lica niti baza o ekvivalentnim dozama koje je pojedinac primio na nivou jedne države (primer prelazak prof. izloženog lica iz jedne u drugu ustanovu). U jedan od problema spada i baza incidenata/akcidenata. Ni u jednoj ustanovi ne postoji sistem prijave akcidenta/incidenta. Ukoliko se za isti i sazna, on je prenet verbalno, nikad upisan u karton, papirni ili elektronski. Činjenica je da je uvođenjem RV sistema u radioterapiji broj mogućih akcidenata dramatično smanjen, time što je procedura tretmana pacijenta automatizovana i uticaj ljudskog faktora smanjen na minimum. Problem prijave akcidenata prepoznat je na međunarodnom nivou, i razvijeni su online sistemi anonimne prijave, (Rosis-Radiation Oncology Safety Information System) [9].

4. Literatura

- [1] Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti Srbije, (Sl. gl. RS 36/09 od 15.05.2009)
- [2] Pravilnik o evidenciji o izvorima jonizujućih zračenja, profesionalno izloženim licima, o izloženosti pacijenata jonizujućim zračenjima i radioaktivnom otpadu (Sl. Gl. RS 97/11 od 21.12.2011)
- [3] Pravilnik o primeni izvora jonizujućih zračenja u medicini (Sl. Gl. RS 1/12 od 11.01.2012)
- [4] COUNCIL DIRECTIVE 97/43/Euratom of 30 June 1997 on health protection of individuals against the dangers of ionizing radiation in relation to medical exposure
- [5] IAEA TEC DOC 989, Quality assurance in radiotherapy, 1995
- [6] Task Group 142 report: Quality assurance of medical accelerators, EE Klein, J. Hanley, J Bayouth et al, Med. Phys. 36 (9), Sept 2009
- [7] IAEA TECDOC 1583, Commissioning of Radiotherapy Treatment Planning Systems: Testing for Typical External Beam Treatment Techniques, 2008
- [8] COMPREHENSIVE AUDITS OF RADIOTHERAPY PRACTICES: A TOOL FOR QUALITY IMPROVEMENT -QUATRO, IAEA, 2007
- [9] Cunningham J, Coffey M, Knöös T, Holmberg O: Radiation Oncology Safety Information System (ROSI) - Profiles of participants and the first 1074 incident reports. Radiotherapy and Oncology 2010, 97(3):601-607

COMPLIANCE OF NATIONAL LEGISLATION WITH THE MEDICAL EXPOSURE DIRECTIVE AND CLINICAL IMPLEMENTATION

Borislava PETROVIC¹, Milan TEODOROVIC¹, Milutin BAUCAL¹, Laza RUTONJSKI¹, Ozren CUDIC¹, Borko BASARIC¹, Ljubica SMILJANIC¹, Jelena STANKOVIC², Luka DRAGOJLOVIC³, Goran KOLAREVIC⁴, Dragomir PAUNOVIC⁵, Nina PAVLOVIC⁶

- 1) *Institute of oncology Vojvodina, Radiotherapy department, Sremska Kamenica, Serbia*
- 2) *Clinical center Nis, Clinic of oncology, Radiotherapy department, Nis, Serbia*
- 3) *Military Medical Academy, Radiotherapy department, Belgrade, Serbia*
- 4) *Institute for Oncology and Radiology of Serbia, Radiotherapy department, Belgrade, Serbia*
- 5) *Health center Kladovo, Radiotherapy department, Kladovo, Serbia*
- 6) *Clinical Center Kragujevac, Kragujevac, Serbia*

ABSTRACT

New Serbian Law on Ionizing radiation protection and nuclear safety has been employed in 2009. In addition, two additional regulations were brought: Regulation on the records of ionising radiation sources, professionally exposed persons, and irradiation of patients to ionising radiation and radioactive waste (dec 2011) and Rulebook on application of the ionising radiation sources in medicine (jan 2012). By the Act 17 of the first Regulation (from dec 2011), the licenced hospital is obliged to keep the detailed records on doses received by the patients or keep data on the parameters of the conducted procedure, so that the dose can be estimated for further evaluation (type of diagnostic procedure, administered isotope/ dose or dose prescribed to the target volume), name of person approving the procedure, and also side effects as well as accidents/incidents reported. In reality, hospitals keep the records, but in different bases, in papers, or in hospital information system (if available). The records are not condensed or centralized. On the other hand, although the new law obliges licencees (hospitals) to keep the records of accidents, in reality, they are always verbally transferred, never in paper, if ever revealed. By the full use of RV system in radiotherapy, number of human errors is much lower, but still mistreatments of patients occur, due human errors. The other Rulebook (jan 2012) is fully compliant with the Euratom 97/43 directive and its articles. It contains also additional QA test which should be carried out on radiotherapy equipment but number and types of obligatory QA test, are very limited.

NOVE PREPORUKE MEĐUNARODNE KOMISIJE ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA ZA GRANIČNU EKVIVALENTNU DOZU ZA OČNO SOČIVO

Danijela SAVIĆ, Dragana KRSTIĆ, Dragoslav NIKEZIĆ

Univerzitet u Kragujevcu, Prirodnomatematički fakultet, Kragujevac, Srbija, danijela.savic031@gmail.com

SADRŽAJ

Na osnovu opsežnih istraživanja reakcije tkiva na zračenje, Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja je objavila preporuku o značajnom smanjenju ekvivalentne doze za očna sočiva sa 150 mSv na 20 mSv na godišnjem nivou. Ova preporuka je izazvala veliku pažnju u svim institucijama koje se bave zaštitom od zračenja i dozimetrijom očnog sočiva, jer do sada nije pokazivano mnogo interesovanja za zaštitu očnog sočiva zbog granice doze od 150 mSv po jednoj godini, što je mnogo veće od granične doze od 20 mSv na godišnjem nivou za celo telo.

1. Uvod

Na osnovu odluke Drugog međunarodnog kongresa radiologa 1928. godine osnovan je Međunarodni komitet za zaštitu od zračenja i radijuma koji od 1950. godine predstavlja Međunarodnu komisiju za zaštitu od zračenja (ICRP) i jedna je od komisija Međunarodnog društva radiologa. Od svog osnivanja do danas, Komisija se bavila i zaštitom profesionalno izloženog osoblja kroz preporuke za maksimalno dozvoljene individualne godišnje doze, čije su se vrednosti tokom vremena menjale. Komisija je 1928. godine preporučila da je nivo prihvatljivog zračenja 1 Sv kako bi se izbegli deterministički efekti. Od 1951. godine predlaže novu graničnu vrednost doze od 3 mSv sedmično, za nisko-LET zračenje. Novi rezultati istraživanja sredinom prošlog veka ukazivali su da osim determinističkih efekata, za ograničavanje izlaganja zračenju važan faktor predstavljaju i stohastički efekti za koje ne postoji bezopasni prag. S obzirom na nagli porast primene nuklearne energije u svim sferama života, Komisija 1956. godine predlaže maksimalnu dozvoljenu dozu od 50 mSv na godišnjem nivou za profesionalna lica i 5 mSv za stanovništvo. Vodeći računa o zaštiti od stohastičkih efekata, preko niza preporuka za smanjenje izlaganja svim tipovima jonizujućeg zračenja, Komisija 1973. godine formuliše ALARA-princip, koji se od 1977. godine [1] neizostavno pojavljuje u svim njenim preporukama: "sve doze treba držati onoliko nisko koliko je razumno dostižno uzimajući u obzir ekonomske i društvene mogućnosti". Komisija takođe predlaže najnovije izmene vrednosti tkivnih težinskih faktora [2,3]. Poseban značaj imaju preporuke ICRP 116, kojima se bitno redukuje ekvivalentna doza za očno sočivo [4].

2. Operativne veličine

U radiološkoj zaštiti definisane su: zaštitne veličine, koje je definisao ICRP i operativne veličine, koje je definisao ICRU. Zaštitne veličine su se razvile iz koncepta doznog ekvivalenta do poslednje preporučene veličine, efektivne doze. Operativne veličine su se razvile od maksimuma doznog ekvivalenta (MADE) preko dozno ekvivalentnih indeksa do ambijentalnih, direkcionih i personalnih doznih ekvivalenata.

Odgovarajuće veličine za monitoring oblasti su: ambijentalni dozni ekvivalent, $H^*(d)$, i direkciono (upravljeni) dozni ekvivalent $H'(d)$. Odgovarajuća operativna veličina za individualni monitoring je lični dozni ekvivalent $H_p(d)$.

Usmereni dozni ekvivalent, $H'(d, \Omega)$, u tački radijacionog polja je dozni ekvivalent koji bi bio proizveden sa odgovarajućim proširenim poljem u ICRU sferi dubine d , na radijusu u određenom pravcu, α . Informacija o usmerenom doznom ekvivalentu trebalo bi da sadrži specifikaciju referentne dubine. Ovaj referentni sistem može često da bude povezan sa radijacionim poljem. U posebnom slučaju usmerenog polja, pravac se određuje preko ugla α , između radijusa suprotnog incidentnom polju i

specificiranog radijusa. Kada je $\alpha = 0^0$, veličina H' ($d, 0^0$) se piše kao H' (d) i jednaka je sa $H^*(d)$. Adekvatna operaciona dozimetrijska velicina za očno socivo je H_p (3).

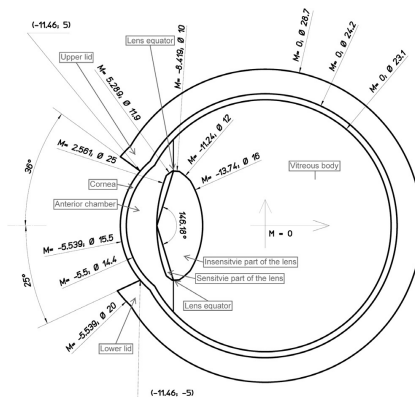
3. Nove preporuke

Komisija 2010. godine [4,5] daje najnovije preporuke za konverzije faktore za efektivnu dozu i apsorbovane doze organa za različite vrste spoljašnjeg izlaganja. Ovi koeficijenti su izračunati korišćenjem zvaničnih ICRP/ICRU računarskih fantoma, koji predstavljaju organizam odraslog muškarca i žene uz primenu Monte Carlo simulacija za transport zračenja. Komisija je u aprilu 2011. godine na osnovu opsežnih istraživanja tkivne reakcije na zračenje objavila preporuku o značajnom smanjenju ekvivalentne doze za očna sočiva sa 150 mSv na 20 mSv na godišnjem nivou, uz dodatno ograničenje da doza ne bi trebalo da prelazi 50 mSv u toku jedne godine, kao i najnovija razmatranja za procenu apsorbovane doze u očnom sočivu (Tabela 1).

Vrsta doze	Godišnje granice doze (mSv)	
	Zaposlena lica	Stanovništvo
Efektivna doza	20*	1
Ekv. doza očnog sočiva	20*	15
Ekv. doza kože	500	50
Ekv. doza šaka i stopala	150	-

*Usrednjeno na period od 5 uzastopnih godina

Ova preporuka je izazvala veliku pažnju u svim institucijama, koje se bave zaštitom od zračenja i dozimetrijom očnog sočiva, jer do sada nije pokazivano mnogo interesovanja za zaštitu očnog sočiva zato što je smanjena granica doze 7,5 puta. Značajan doprinos istraživanjima u ovoj oblasti dat je u okviru projekta ORAMED (optimizacija zaštite od zračenja za medicinsko osoblje) finansiranog od strane Evropske Unije.



Slika1. Model oka u Monte Carlo simulacijama Behrens et al. (2009),

4. Posebna razmatranja za procenu apsorbovane doze za očna sočiva

U izveštaju ICRP118 godine navodi se da su nedavne studije pokazale da očno sočivo može da bude osetljivo na zračenje mnogo više nego što se ranije pretpostavljalo i da su ranije preporuke Komisije taj rizik znatno potcenile, smatrajući da u svim praktičnim situacijama na radnom mestu granična doza na koži i/ili celom telu može da obezbedi odgovarajuću zaštitu oka. Skoro istovremeno, objavljen je ICRP 116 [4] u kome su istaknuta i posebna razmatranja za procenu apsorbovane doze u sočivu oka. Urađena su kompletna razmatranja konverzionih koeficijenata fluensa u $H_p(3)$ za fotone i elektrone, iz kojih je proizašlo da bi operativne veličine za praćenje doza za očna sočiva mogle da se primene ne samo za elektrone i niskoenergetske fotone već i za sve druge vrste zračenja.

Novi podaci sa modelima životinja i proučavanja izloženosti ljudi ukazuju da se promene na oku mogu javiti na znatno nižem pragu apsorbovane doze od dotadašnjeg praga od 2 Gy, a sada se misli da je daleko niži, od 0 do 0.5 Gy pri akutnoj i hroničnoj izloženosti [6]. Ovo je podstaklo radiobiološka istraživanja osetljivosti pojedinih ćelija unutar očnog sočiva na zračenja, posebno na elektrone, niskoenergetske fotone i neutrone. Istraživanja su rađena na referentnim skupovima podataka za očna sočiva definisanih na sledeći način: (a) za fotone sa energijama od 10 keV do 2 MeV za AP, LAT i ROT geometriju; (b) za elektrone sa energijama od 100 keV do 10 MeV za AP geometriju; i (c) za neutrone sa energijama od 0.001 eV do 4 MeV za AP, LOT i ROT geometriju. Za izračunavanje konverzionih koeficijenata korišćeni su stilizovani modeli očiju fantoma (slika 1) [5]. Za sve ostale energije i geometrije zračenja, kao i druge vrste zračenja (protoni, pozitroni, mioni, pioni, joni helijuma) urađeni su konverzioni koeficijenti kao srednja vrednost konverzionih koeficijenata za očna sočiva muških i ženskih fantoma. U najnovijem radu dobijeni su konverzioni koeficijenti za neutrone od termalnih do energije 15 MeV, koji do sada nisu bili dostupni [7].

5. Zaključak

U radu su predstavljene nove preporuke za granične vrednosti ekvivalentne doze za očno sočivo. ICRP je sugerisala smanjenje doze, kojim smanjuje graničnu dozu za očna sočiva sa 150 mSv na 20 mSv u toku jedne godine, uz dodatno ograničenje da doza ne bi trebalo da prelazi 50 mSv na godišnjem nivou. Povećano je interesovanje za računanje konverzionih koeficijenata između fluensa i personalnog ekvivalenta za očno sočivo za neutrone, koji do sada nisu bili dostupni.

6. Zahvalnica

Ovaj rad je sproveden uz podršku Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, u okviru projekata OI 171021 i III 43011.

7. Literatura

- [1] ICRP 26. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26, Ann. ICRP 1 (3), 1977.
- [2] ICRP 74. International Commission on Radiological Protection. Conversion factors for use in radiological protection against external radiation. Oxford: Pergamon Press, ICRP Publication 74, 1996.
- [3] ICRP 103. The Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2–4), 2007.
- [4] ICRP 116. International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. ICRP Publication 116. Ann. ICRP 40(2–5), 2010.
- [5] R. Behrens, G. Dietze and M. Zankl. Dose conversion coefficients for electron exposure of the human eye lens. *Phys. Med. Biol.* 54 (2009) 4069–4087.
- [6] ICRP 118. ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs—threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41(1–2), 2012.
- [7] G. Gualdrini, P. Ferrari and R. Tanner. Fluece to Hp(3) conversion coefficients for neutrons from thermal to 15 MeV. *Radiat. Prot. Dosim.* Doi:10.1093/rpd/net126 (2013)

NEW RECOMMENDATION ICRP 116 OF THE EQUIVALENT DOSE ANNUAL LIMIT FOR THE EYE LENS

Danijela SAVIĆ, Dragana KRSTIĆ, Dragoslav NIKEZIĆ

University of Kragujevac, Faculty of Science, Serbia, nikezic@kg.ac.rs

ABSTRACT

The recent statement on tissue reactions issued by the International Commission on Radiological Protection recommends a very significant reduction in the equivalent dose annual limit for the eye lens from 150 to 20 mSv/ y. This has stimulated a lot of interest in eye lens dosimetry in radiation protection community.

IMPLEMENTACIJA PROPISA U OBLASTI ZAŠTITE OD JONIZUJUĆIH ZRAČENJA

**Jasminka JOKSIĆ, Mirjana RADENKOVIĆ, Olivera MARINKOVIĆ,
Stefan RAFAJLOVIĆ, Marijana BALIN**

*Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije, Beograd, Republika Srbija,
joksic@srbatom.gov.rs*

SADRŽAJ

U radu je dat pregled propisa u oblasti zaštite od jonizujućih zračenja, koje je Agencija za zaštitu od zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije donela u skladu sa Zakonom o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti i prikazani rezultati njihove implementacije.

1. Regulisanje oblasti zaštite od zračenja

Mere zaštite života i zdravlja ljudi i zaštite životne sredine od štetnog dejstva jonizujućih zračenja su regulisane Zakonom o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti [1] (u daljem tekstu Zakon). Zakonom je radjaciona delatnost definisana kao svaka aktivnost (radnja) sa izvorima jonizujućih zračenja koja može dovesti do povećanja nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima profesionalno izloženih lica i stanovništva. Istim zakonom su definisani i poslovi zaštite od jonizujućih zračenja za koje Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije (u daljem tekstu Agencija) izdaje ovlašćenja pravnim licima nakon ispunjavanja uslova propisanih zakonom i podzakonskim aktima. Takođe, zakonom je propisano i prijavljivanje ili notifikacija kao pisani akt u formi prijave koji pravno lice ili preduzetnik na propisanom obrascu dostavlja Agenciji kompletnu informaciju o vrsti izvora jonizujućih zračenja koje poseduje, koristi ili namerava da koristi.

Osnivanjem regulatorne Agencije, koja vrši javna ovlašćenja i donosi propise u skladu sa Zakonom, postignut je napredak u uspostavljanju jače regulatorne kontrole i to obavezom prijavljivanja i evidentiranja izvora jonizujućih zračenja, licenciranja radjacionih delatnosti i ovlašćivanjem pravnih lica za obavljanje poslova zaštite od jonizujućih zračenja.

2. Nacionalni propisi u oblasti zaštite od jonizujućih zračenja

Tokom 2011. godine, Agencija je donela set podzakonskih propisa za implementaciju Zakona, od kojih 14 pravilnika [2] koji detaljno regulišu oblast zaštite od jonizujućih zračenja. Pravilnici su izradjeni u skladu sa preporukama Medjunarodne agencije za atomsku energiju i zasad delimično usklađeni sa propisima Evropske Unije, te su u stalnom postupku daljeg usaglašavanja.

Pravilnik o prijavljivanju i evidentiranju izvora jonizujućih zračenja [3] propisuje kriterijume za izvore jonizujućih zračenja za čije je korišćenje pravno lice, odnosno preduzetnik dužan da pribavi potvrdu o evidentiranju, izvore jonizujućih zračenja koji se izuzimaju iz regulatorne kontrole, kao i obrazac odnosno sadržaj prijave izvora jonizujućih zračenja koje pravna lica poseduju odnosno koriste. Pravilnik o uslovima za dobijanje licence za obavljanje radjacione delatnosti [4] propisuje uslove koje mora da ispunjava pravno lice, odnosno preduzetnik za obavljanje radjacione delatnost, vrstu i stepen stručne spreme lica odgovornog za zaštitu od jonizujućih zračenja, radno iskustvo u oblasti zaštite od jonizujućih zračenja i dopunsku osposobljenost i obučenosť u zavisnosti od radjacione delatnosti za koju se traži licenca. Ovim pravilnikom se takođe propisuje i stepen stručne spreme, osposobljenost za rad i sprovođenje mera zaštite od jonizujućih zračenja i zdravstveni uslovi za sva profesionalno izložena lica kao i dokumentacija koju je potrebno priložiti uz zahtev za dobijanje dozvole za promet izvora jonizujućih zračenja.

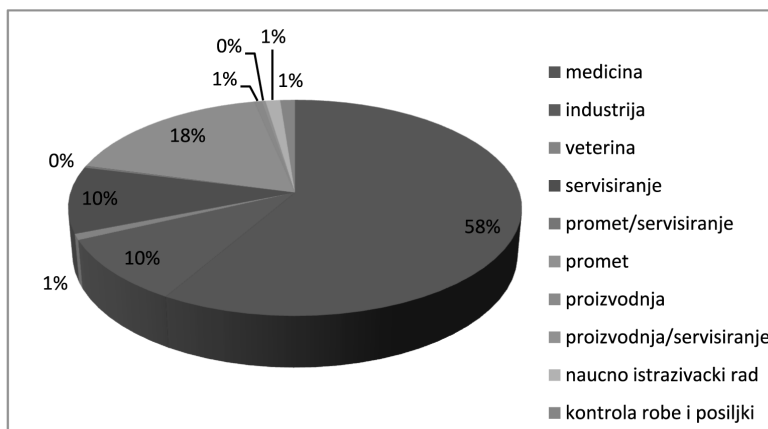
Pravilnik o uslovima za dobijanje rešenja za obavljanje poslova iz oblasti zaštite od zračenja [5] propisuje dokumentaciju koja se podnosi uz zahtev za izdavanje ovlašćenja za obavljanje poslova iz oblasti zaštite od zračenja. Agencija izdaje ovlašćenja za poslove monitoringa radioaktivnosti ili pojedina ispitivanja u okviru monitoringa radioaktivnosti (merenje ambijentalnog ekvivalenta doze gama zračenja

u vazduhu, gamaspektrometrijska ispitivanja, ispitivanje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti, ispitivanje stroncijuma-90, ispitivanje tricijuma i ispitivanje koncentracije radona), poslove merenja sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi (pravno lice koje od Agencije dobije ovo ovlašćenje istovremeno je ovlašćeno za određivanje sadržaja radionuklida u robama pri uvozu, izvozu i tranzitu), projektovanje mera radijacione sigurnosti i bezbednosti za svaku radijacionu delatnost, merenja radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima profesionalno izloženih lica, pacijenata i stanovništva, osposobljavanje profesionalno izloženih lica i lica odgovornih za sprovođenje mera zaštite od jonizujućih zračenja, merenja radi kontrole sistema upravljanja kvalitetom mera zaštite od jonizujućih zračenja, dekontaminaciju radne i životne sredine i humanu dekontaminaciju.

Ostali propisi [2] detaljnije regulišu druge aktivnosti u oblasti zaštite od zračenja.

3. Implementacija propisa koji uredjuju obavljanje radijacionih delatnosti i poslova zaštite od jonizujućih zračenja

U skladu sa Zakonom i donetim propisima, Agencija obavlja poslove autorizacije, odnosno licenciranje obavljanja radijacionih delatnosti i izdavanje ovlašćenja za obavljanje poslova zaštite od jonizujućih zračenja.



Slika 1. Raspodela licenci za različite vrste radijacionih delatnosti

Na slici 1. je dat grafički prikaz raspodele izdatih licenci za različite vrste radijacionih delatnosti tj. različite primene izvora jonizujućih zračenja medicini, industriji, veterini, u prometu izvora jonizujućih zračenja, itd. Najveći broj izdatih licenci je u medicini (58%), mada je očekivano da ovaj broj bude još veći, zatim za poslove prometa (18%), servisiranja (10%), za primene u industriji (10%).

U prethodnom periodu, Agencija je izdala i 32 ovlašćenja za obavljanje poslova zaštite od jonizujućih zračenja a u Tabeli 1. je dat prikaz broja izdatih ovlašćenja za obavljanje pojedinih poslova zaštite od zračenja definisanih propisima.

Tabela 1. Broj izdatih ovlašćenja za obavljanje poslova zaštite od jonizujućih zračenja

Ovlašćenje	Broj ovlašćenih institucija
Pojedina ispitivanja u okviru monitoringa	12
Projektovanje mera radijacione sigurnosti i bezbednosti	5
Merenja radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima profesionalno izloženih lica, pacijenata i stanovništva	6
Osposobljavanje profesionalno izloženih lica i lica odgovornih za sprovođenje mera zaštite od jonizujućih zračenja	4
Merenja radi kontrole sistema upravljanja kvalitetom mera zaštite od jonizujućih zračenja	2
Dekontaminaciju radne i životne sredine	3

Dobijanje ovlašćenja je uslovljeno izmedju ostalog i akreditacijom laboratorija koja vrše ispitivanja, što je prilično strog uslov u odnosu na regulativu drugih zemalja, ali obezbeđuje odgovarajuću organizaciju i jedan je od uslova za osiguranje kvaliteta merenja. Najveći broj izdatih ovlašćenja odnosi se na obavljanje pojedinih ispitivanja u okviru monitoringa-12.

Implementacijom propisa koji obavezuju pravna lica i preduzetnike da prijave/evidentiraju izvore u okviru procesa licenciranja, prikupljeni su podaci o izvorima jonizujućih zračenja i to u zadatom formatu, što omogućava formiranje odgovarajuće baze podataka odnosno centralnog nacionalnog registra izvora jonizujućih zračenja. U okviru Programa tehničke pomoći MAAE Republici Srbiji, kroz regulatorni nacionalni projekat: Formiranje nacionalnog registra nuklearnih materijala, izvora jonizujućih zračenja, radioaktivnog otpada i izlaganja i jačanje drugih relevantnih funkcija regulatornog tela, Agenciji je donirana oprema i softver *Regulatory Authority Information System (RAIS)*, kojim će formirana baza moći da se održava i unapredi uspostavljanjem i objedinjavanjem svih evidencija koje su u nadležnosti regulatorne agencije u skladu sa Zakonom.

4. Zaključak

Donošenjem podzakonskih propisa u skladu sa Zakonom o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti, obezbeđeni su uslovi i uvedeni jasni kriterijumi za prijavljivanje i evidentiranje izvora jonizujućih zračenja, licenciranje radijacionih delatnosti i ovlašćivanje institucija za obavljanje poslova zaštite od jonizujućih zračenja. Implementacijom donetih propisa obezbeđuje se adekvatna provera ispunjenosti propisanih uslova za primenu mera radijacione sigurnosti i bezbednosti i uspostavlja nacionalna baza podataka u oblasti zaštite od zračenja, što su preduuslovi za regulatornu kontrolu nad korišćenjem izvora zračenja i primenom principa zaštite od zračenja u praksi.

5. Literatura

- [1] Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti („Službeni glasnik RS“ broj 36/09 i 93/12)
- [2] <http://www.srbatom.gov.rs/srbatom/zakonska-regulativa.htm>
- [3] Pravilnik o prijavljivanju i evidentiranju izvora jonizujućih („Službeni glasnik RS“ broj 25/11)
- [4] Pravilnik o uslovima za dobijanje licence za obavljanje radijacione delatnosti („Službeni glasnik RS“ broj 61/11)
- [5] Pravilnik o uslovima za dobijanje rešenja za obavljanje poslova iz oblasti zaštite od zračenja („Službeni glasnik RS“ broj 61/11)

REGULATORY WORK IN THE FIELD OF RADIATION PROTECTION

**Jasminka JOKSIĆ, Mirjana RADENKOVIĆ, Olivera MARINKOVIĆ,
Stefan RAFAJLOVIĆ, Marijana BALIN**

*Serbian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, Belgrade, Republic of Serbia,
joksic@srbatom.gov.rs*

ABSTRACT

Here is presented an overview of legislation in the field of radiation protection adopted by the Serbian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, in accordance with the Law on Protection against Ionizing Radiation and Nuclear Safety and the results of their implementation.

REGULATORNI POSLOVI U OBLASTI NUKLEARNE SIGURNOSTI I BEZBEDNOSTI I UPRAVLJANJA RADIOAKTIVNIM OTPADOM

**Milan VUJOVIĆ, Ivana AVRAMOVIĆ, Mirjana RADENKOVIĆ i
Vladimir JANJIĆ**

*Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije, Beograd, Republika Srbija,
vujovic@srbatom.gov.rs*

SADRŽAJ

U radu je dat pregled nuklearne infrastrukture u Republici Srbiji, prikaz podzakonskih propisa u oblasti nuklearne sigurnosti i bezbednosti i upravljanja radioaktivnim otpadom, koje je donela Agencija za zaštitu od zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije i opisan proces licenciranja nuklearnih aktivnosti.

1. Nuklearne aktivnosti u Republici Srbiji

Nuklearna infrastruktura u Republici Srbiji obuhvata sledeće nuklearne objekte: istraživački reaktor RA, reaktor nulte snage RB, skladišta radioaktivnog otpada hangar H1, hangar H2 i hangar H3 i bezbedno skladište radioaktivnih izvora BS kao i zatvoreni rudnik uranijuma u Gabrovnici kod Kalne. Svi nuklearni objekti izuzev zatvorenog rudnika uranijuma u Gabrovnici kod Kalne nalaze se na istoj lokaciji u Vinči, nedaleko od Beograda. Zakonom o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti [1] (u daljem tekstu Zakon 36/09), upravljanje nuklearnim objektima je proglašeno za delatnost od opšteg interesa i za obavljanje ove delatnosti 2009. godine je osnovano Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“ (u daljem tekstu JP NOS).

Zakonom 36/09 nuklearne aktivnosti su definisane kao: uvoz, izvoz, korišćenje i transport nuklearnog materijala, eksploatacija ruda koje sadrže nuklearni materijal, lociranje, projektovanje, izgradnja, probni rad, puštanje u rad, korišćenje, trajni prestanak rada i dekomisija nuklearnih objekata i sanacija njihovih lokacija, kao i upravljanje radioaktivnim otpadom. Istim zakonom propisano je da se nuklearni objekat može locirati, projektovati, izgraditi, pustiti u probni rad, pustiti u rad, koristiti, trajno prestati sa radom i započeti njegova dekomisija samo uz prethodno pribavljenu licencu za obavljanje nuklearne aktivnosti koju izdaje Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije (u daljem tekstu Agencija). Na ovaj način po prvi put u Republici Srbiji uvedeno je licenciranje nuklearnih aktivnosti.

2. Nacionalni propisi u oblasti nuklearne sigurnosti i upravljanja radioaktivnim otpadom

Zakonom 36/09 je propisano osnivanje samostalne regulatorne organizacije koja vrši javna ovlašćenja u skladu sa zakonom: Agencije za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije. Agencija je osnovana u decembru 2009. godine a postala operativna do kraja 2010. godine. Tokom 2011. godine, Agencija je donela set podzakonskih propisa u skladu sa Zakonom 36/09, od kojih 4 pravilnika koji detaljno regulišu oblast nuklearne sigurnosti i upravljanja radioaktivnim otpadom. Pravilnici su izradjeni u skladu sa preporukama Međunarodne agencije za atomsku energiju i delimično uskladjeni sa propisima Evropske Unije.

Pravilnik o načinu vođenja evidencije o nuklearnim materijalima [2] propisuje način vođenja evidencije o nuklearnom materijalu, način na koji korisnik nuklearnog materijala obaveštava Agenciju i način na koji Agencija vodi registar nuklearnog materijala. Ovaj pravilnik se takode primenjuje na sve nosioce licence koji osnivaju ili upravljaju postrojenjem za proizvodnju, razdvajanje, preradu, skladištenje ili drugu upotrebu sirovina ili posebnog fisionog materijala.

Pravilnik o obavljanju nuklearne aktivnosti [3] uređuje i reguliše ocenu sigurnosti nuklearnog objekta, načine i rokove dostavljanja redovnih izveštaja o radu nuklearnog objekta kao i način, vrstu i vremenske intervale u kojima se vrši kontrola mera integralnog sistema upravljanja kvalitetom za obavljanje nuklearnih aktivnosti. Ovim pravilnikom se takode definišu uslovi za promet i korišćenje

nuklearnog materijala, uslovi koje moraju ispunjavati lica koja su stručno osposobljena za rukovanje nuklearnim materijalima, način vođenja evidencije, sadržaj i oblik programa osiguranja kvaliteta i njegovu primenu u nuklearnom objektu kao i plan i program stručnog osposobljavanja zaposlenih lica. Pravilnik o uslovima za dobijanje licence za obavljanje nuklearne aktivnosti [4] uređuje i reguliše dokumentaciju koja se podnosi uz zahtev za izdavanje licence za svaku nuklearnu aktivnost pojedinačno, projektne osnove za nuklearne objekte, uslove za lociranje, projektovanje, izgradnju, puštanje u probni rad, probni rad, puštanje u rad, korišćenje, trajan prestanak rada i dekomisiju nuklearnog objekta kao i način vođenja evidencije o izdatim licencama. Ovim pravilnikom takode se definišu i program provere ispunjenosti uslova za dobijanje licence za obavljanje nuklearnih aktivnosti, sadržaj izveštaja o nuklearnoj sigurnosti i druge dokumentacije potrebne za dokazivanje ispunjenosti uslova nuklearne sigurnosti i bezbednosti za nuklearne objekte i obavljanje nuklearnih aktivnosti, način i obim redovnog i vanrednog izveštavanja kao i drugi uslovi koji moraju biti ispunjeni u vezi sa obavljanjem nuklearnih aktivnosti. Pravilnik o upravljanju radioaktivnim otpadom [5] uređuje način privremenog čuvanja radioaktivnog otpada nastalog pri radu, način i uslove pod kojima se radioaktivni otpad čuva, sakuplja, evidentira, skladišti, obrađuje i odlaze, način vođenja evidencije o radioaktivnom otpadu i rokove dostavljanja podataka iz evidencije Agenciji.

3. Licenciranje nuklearnih aktivnosti

Jedan od osnovnih regulatornih poslova Agencije je licenciranje nuklearnih aktivnosti, u skladu sa nacionalnom regulativom. Licenciraju se nuklearne aktivnosti koje predstavljaju faze životnog veka nuklearnog objekta od lociranja pa sve do njegovog trajnog prestanka rada i dekomisije, što znači da za svaki nuklearni objekat bez obzira na njegov trenutni status, operater mora pribaviti odgovarajuću Licencu za obavljanje nuklearne aktivnosti od regulatorne Agencije.

Proces licenciranja nuklearne aktivnosti počinje podnošenjem zahteva za izdavanje licence od strane operatera nuklearnog objekta. Uz zahtev neophodno je podneti dokumentaciju propisanu Zakonom 36/09, Pravilnikom o obavljanju nuklearne aktivnosti i Pravilnikom o uslovima za dobijanje licence za obavljanje nuklearne aktivnosti. Propisana dokumentacija sastoji se iz niza dokumenata kojima se dokazuje sigurnost i bezbednost obavljanja određene nuklearne aktivnosti, podataka o karakteristikama i stanju potrebne opreme, organizaciji i stručnosti lica koja će obavljati nuklearnu aktivnost. Veoma važan deo dokumentacije je Konačni izveštaj o sigurnosti, kao i interne procedure operatera. Na osnovu pregleda podnete dokumentacije i uvida u stvarno stanje, regulatorna Agencija tokom procesa licenciranja nalaže operateru određena poboljšanja u cilju ispunjavanja propisanih mera nuklearne sigurnosti i bezbednosti. Ukoliko su ispunjeni svi uslovi u skladu sa propisima, u roku od 90 dana od prijema zahteva, Agencija operateru izdaje licencu za obavljanje određene nuklearne aktivnosti. Licenca se izdaje na period od tri godine, sa obavezom da najkasnije 60 dana pre isteka važenja licence za obavljanje nuklearne aktivnosti bude podnet zahtev za produženje roka važnosti licence. Ukoliko se steknu uslovi za dopunu licence u okviru iste nuklearne aktivnosti, operater podnosi na razmatranje Agenciji novi zahtev sa propisanom dokumentacijom.



Slika 1. Licencirano skladište radioaktivnog otpada hangar H3

Licencu za obavljanje nuklearne aktivnosti – upravljanje radioaktivnim otpadom, koja se odnosi na puštanje u rad i korišćenje skladišta radioaktivnog otpada hangar H3 (slika 1.) i bezbednog skladišta radioaktivnih izvora BS, Agencija je izdala JP Nuklearni objekti Srbije. Nuklearne aktivnosti na ostalim nuklearnim objektima u ovom trenutku nisu licencirane.

4. Zaključak

Nuklearna infrastruktura u Republici Srbiji obuhvata nekoliko objekata koji su u različitim fazama životnog veka. Osnivanjem Agencije za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije, koja je donela podzakonske propise u skladu sa Zakonom 36/09, započela je praksa licenciranja nuklearnih aktivnosti na nuklearnim objektima. Cilj licenciranja je provera i obezbeđivanje ispunjenosti svih propisanih mera nuklearne sigurnosti, čime se postiže adekvatna zaštita od zračenja tokom obavljanja aktivnosti na nuklearnim objektima kao i sprečavanje negativnih uticaja na životnu sredinu.

5. Literatura

- [1] Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti („Službeni glasnik RS“ broj 36/09 i 93/12)
- [2] Pravilnik o načinu vođenja evidencije o nuklearnim materijalima („Službeni glasnik RS“ broj 27/11)
- [3] Pravilnik o obavljanju nuklearne aktivnosti („Službeni glasnik RS“ broj 37/11)
- [4] Pravilnik o uslovima za dobijanje licence za obavljanje nuklearne aktivnosti („Službeni glasnik RS“ broj 37/11)
- [5] Pravilnik o upravljanju radioaktivnim otpadom („Službeni glasnik RS“ broj 60/11)

**REGULATORY WORK IN THE FIELD OF NUCLEAR SAFETY AND SECURITY AND
RADIOACTIVE WASTE MENAGMENT**

**Milan VUJOVIĆ, Ivana AVRAMOVIĆ, Mirjana RADENKOVIĆ ,
Vladimir JANJIĆ**

*Serbian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, Belgrade, Republic of Serbia,
vujovic@srbatom.gov.rs*

ABSTRACT

Here are presented an overview of nuclear infrastructure in the Republic of Serbia and the overview of the regulations in the field of nuclear safety and radioactive waste management, issued by the Serbian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Besides, the licensing of nuclear activities has been described.

DOGRADNJA OSNOVNIH STANDARDA RADIJACIONE SIGURNOSTI U MEĐUNARODNIM PREPORUKAMA

Olivera MARINKOVIĆ, Stefan RAFAJLOVIĆ i Marijana BALIN

Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije, Beograd, Srbija,

marinkovic@srbatom.gov.rs

SADRŽAJ

U ovom radu biće date neke postavke iz publikacije Međunarodne agencije za atomsku energiju: Sigurnosni standardi MAAE, Opšti sigurnosni uslovi, Deo 3. (Privremeno izdanje), Zaštita od jonizujućih zračenja i sigurnost izvora zračenja, Beč, 2011. Takođe se ukazuje na neophodnost uspostavljanja precizne terminologije, tj. propisivanja značenja reči, koje su od posebne važnosti za primenu regulative u oblasti zaštite od jonizujućih zračenja, nuklearne i radijacione sigurnosti, sigurnosti pri transportu i upravljanju otpadom.

1. Uvod

Međunarodna agencija za atomsku energiju (MAAE) prvi put je usvojila osnovne sigurnosne standarde u junu 1962. godine koji su štampani u okviru Sigurnosne Serije, publikacija broj 9. Izmenjene verzije osnovnih sigurnosnih standarda izdate su 1967. i 1982. godine. Praksa zajedničke podrške i usvajanja preporuka od strane više međunarodnih organizacija – pored MAAE (IAEA) još i Međunarodna organizacija rada (ILO), Agencija za nuklearnu energiju (OECD/NEA) i Svetska zdravstvena organizacija (WHO) - ostvarena je prvi put 1982. godine. Nastavljena je pri usvajanju Osnovnih sigurnosnih standarda za zaštitu od jonizujućih zračenja i za sigurnost izvora zračenja, koji su štampani 1996. godine (poznati kao BSS No.115) uz pridruživanje i drugih međunarodnih organizacija: Organizacije Ujedinjenih nacija za hranu i poljoprivredu (FAO) i Panameričke zdravstvene organizacije (PAWHO).

Generalna konferencija MAAE donela je 2005. godine rezoluciju GC(49)/RES/10 kojom se nalaže Sekretarijatu MAAE da pristupi reviziji BSS No.115. Ovoga puta se pozivaju da uzmu učešće u donošenju novih standarda pored IAEA, FAO, ILO, OECD/NEA, PAHO, WHO i EC/Euratom i UNDEP. Posle višegodišnjeg rada stručnjaka na pripremi teksta, MAAE je usvojila 12. jula 2011. godine Opšte sigurnosne preporuke, Deo 3 [1] kao Privremeno izdanje i prosledila ga uvažanim međunarodnim organizacijama na usvajanje. U zavisnosti od njihovih odluka, usvojeni tekst će biti publikovan kao zajednički podržan standard.

2. Značenje reči i izraza

Za potrebe ovog rada upotrebljavaju se: reč „zračenje“ u značenju „jonizujuće zračenje“; reč „transport“ u značenju „transport nuklearnog i drugog radioaktivnog materijala“; i reč „otpad“ u značenju „radioaktivni otpad“.

Identično razumevanje pojmova u jednoj oblasti delovanja ljudi, kao i u okviru zakonske regulative podrazumeva se kao nešto što je obavezno i nepotrebno obrazlagati.

Stvarnost nas upozorava da smo daleko od urednosti koja bi nam dozvoljavala da pitanje značenja reči i izraza ostavimo po strani.

Polazeci od definicija zaštite od zračenja (radiation protection) i sigurnosti (nuclear safety) date u Rečniku sigurnosti MAAE (IAEA Safety Glossary, Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, 2007 Edition) [2] i uzimajući u obzir druga dokumenta MAAE izdvajaju se sledeća zapažanja u poređenju sa našom terminologijom:

Prvo: U tački 8) član 3. Zakona o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti (Službeni glasnik RS, broj 36/09 i 93/12; u daljem tekstu Zakon 36/09) pojam „zaštita od jonizujućih zračenja“ nije definisan u skladu sa Rečnikom sigurnosti MAAE jer se ne navodi da se radi o zaštiti ljudi. Definicija

zaštite životne sredine je data u tački 7) član 3. ali se na osnovu člana 1. Zakona 36/09 može shvatiti da pojam „zaštita od jonizujućih zračenja“ obuhvata i zaštitu životne sredine,

Drugo: Dokumenta MAAE koriste termin „nuclear safety“ u dvostrukom značenju: širem značenju „sigurnost“ kada se odnose na sigurnost svih izvora jonizujućih zračenja (kao u Rečniku sigurnosti MAAE) i u užem značenju, u brojnim dokumentima MAAE, kada se govori o sigurnosti nuklearnog materijala i nuklearnih objekata. U Zakonu 36/09 definisan je pojam „radijaciona sigurnost“ koji je skoro identičan definiciji „nuclear safety“ u Rečniku sigurnosti MAAE. Takođe, tačkom 23) član 3. Zakona 36/09 definiše se pojam „nuklearna sigurnost“ koja može da se izjednači sa užim značenjem pojma „nuclear safety“ koji je prisutan u dokumentima MAAE. Tako bi neko, ko se pridržava definicije pojma „nuklearna sigurnost“ date u Zakonu 36/09 mogao iz samog naslova Zakona 36/09 da zaključi kako se isti uopšte ne odnosi na radijacionu sigurnost, sigurnost u transportu i sigurnost otpada.

Prilog za podsticaj udruživanja napora da se donese naš Rečnik sigurnosti i zaštite, treba da bude i isticanje problema u vezi sa značenjem reči „bezbednost“. Pošto se radi o različitom značenju reči „bezbednost“ u okviru drugih zakona relevantnih za korišćenje izvora zračenja kao što su Zakon o bezbednosti i zdravlju na radu i Zakon o transportu opasnog tereta, potrebni su veliki naponi kako bi se postiglo identično značenje i upotreba pojmova „sigurnost“ i „bezbednost“ u srpskom zakonodavstvu.

3. Dogradnja osnovnih standarda

Kraj prvog veka primene izvora zračenja skoro se poklopio sa krajem XX veka. Obeležili su ga događaji sa štetnim posledicama. Neki su bili prouzrokovani ljudskom greškom u rukovanju, neki napuštanjem, zanemarivanjem opasnih izvora zračenja (što može da se podvede pod ljudsku grešku, ali sa komplikovanim uzrocima, jer se vezuje za sistem kontrole i celo društvo, ne samo za pojedinca), neki su prouzrokovani prirodnom katastrofom koja je uticala na sigurnost nuklearnog objekta, a neki su bili izazvani zloupotrebom opasnih izvora.

To su bili razlozi da MAAE pristupi opsežnoj dogradnji osnovnih standarda sigurnosti i bezbednosti.

U ovom radu se ne diskutuje o sistemu i sadržaju standarda za bezbednost jer, zbog značaja, to pitanje zahteva veći prostor od onoga koji bi se ovde mogao dodeliti. Nezaobilazno je naglasiti značaj dobre koordinacije u pripremi mera sigurnosti i bezbednosti tako da se planirane mere dopunjuju sa pozitivnim međusobnim uticajem.

4. MAAE Opšte sigurnosne preporuke Deo 3

Dokument: Sigurnosni standardi MAAE, Opšte sigurnosne preporuke, Deo 3. (Privremeno izdanje), Zaštita od jonizujućih zračenja i sigurnost izvora zračenja, Beč, 2011 (u daljem tekstu Novi BSS) temelji se na dokumentu: Osnovni principi sigurnosti (IAEA, Fundamental Safety Principles) [3]. Izmene u odnosu na BSS No.115 su zasnovane na publikaciji Naučnog komiteta Ujedinjenih nacija za efekte atomskog zračenja (UNSCEAR) i preporukama Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja (publikacije ICRP).

Novi BSS namenjen je da ga koriste vlade i regulatorna tela, ali i zdravstvene službe i institucije ovlašćene za sprovođenje mera zaštite.

U paragrafu 1.45 Novog BSS navodi se da preporuke treba da primenjuju, odnosno ugrade u svoju regulativu, države koje računaju na saradnju sa međunarodnim organizacijama koje će prihvatiti Novi BSS.

Radi uspostavljanja preporuka za zaštitu i sigurnost koje će biti lakše za praktičnu primenu, Novi BSS uvodi tri tipa stanja u kojima dolazi do izlaganja jonizujućim zračenjima (exposure situations): stanje planiranog izlaganja, stanje izlaganja u vanrednoj situaciji i stanje postojećeg izlaganje. Zajedno, ova tri tipa izlaganja pokrivaju tri kategorije izlaganja zračenju na koja se odnosi Novi BSS: profesionalno izlaganje, izlaganje stanovništva i medicinsko izlaganje. Profesionalno izlaganje i izlaganje stanovništva

su kategorije koje postoje u sva tri stanja izlaganja, dok je kategorija medicinskog izlaganja prisutna samo u stanju planiranog izlaganja.

Struktura Novog BSS sastoji se od poglavlja o opštim uslovima koji važe za sva tri stanja izlaganja:

- Primena principa zaštite od zračenja;
- Uspostavljanje zakonodavnog i pravnog okvira;
- Odgovornost regulatornog tela;
- Odgovornost za zaštitu i sigurnost;
- Upravljanje zaštitom i sigurnošću.

Zatim slede tri poglavlja posvećena bližem određivanju uslova za tri tipa stanja: stanje planiranog izlaganja, stanje izlaganja u vanrednoj situaciji i stanje postojećeg izlaganja.

Može se reći da je Novi BSS podrška za primenu uslova koji su uopšteno bili dati i u BSS No.115. Značajno više detalja se može naći o opravdanosti izlaganja, gradiranom pristupu, ograničavanju doza, oceni sigurnosti, razmeni informacija i mnogim drugim merama zaštite i sigurnosti.

U medicinsko izlaganje uključuju se: izlaganja ljudi zračenju zbog zapošljavanja, izlaganja zbog pravno-medicinskih razloga ili razloga koje nameće osiguranje. Umesto dijagnostičkih referentnih nivoa za ovakva izlaganja zahteva se ograničavanje doza.

Čitajući preporuku da individualni monitoring treba da obavlja autorizovan dozimetrijski servis koji primenjuje upravljanje kvalitetom, prepoznajemo da, kako ovaj zahtev, tako i veliki broj drugih, nalazimo već ugrađene u našu regulativu i praksu.

5. Zaključak

Ovaj tekst nije sastavljen da bi u potpunosti predstavio sadržaj Novog BSS, za šta bi bilo potrebno mnogo prostora. Izdvojene stvari ni u kom slučaju nisu našle svoje mesto u tekstu zato što su važnije od drugih koje nisu pomenute, nego samo kao ilustracija sadržaja. Cilj je da se stručna javnost pokrene ka upoznavanju sa Novim BSS i da se podstakne usaglašavanje upotrebe naših reči pri prevodenju.

6. Literatura

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA General Safety Requirements Part 3 (Interim), IAEA, Vienna (2011).
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Safety Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection (2007 Edition), IAEA, Vienna (2007).
- [3] EUROPEAN ATOMIC ENERGY COMMUNITY, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna (2006).

UPGRADING OF INTERNATIONAL BASIC SAFETY STANDARD RECOMMENDATIONS

Olivera MARINKOVIĆ, Stefan RAFAJLOVIĆ i Marijana BALIN

*Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije, Beograd, Srbija,
marinkovic@srbatom.gov.rs*

ABSTRACT

This paper presents selected statements from IAEA Safety Standards No. GSR Part 3 (Interim) in the aim to appoint GSR Part 3 at the top literature position in technical support organization libraries. Each IAEA Member State should incorporate GSR Part 3 in legislation. At the very beginning of implementation stands correct terminology. Using a few examples we try to justify an initiative for writing A Safety Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection in Serbian language.

***METODE DETEKCIJE
I MERNNA INSTRUMENTACIJA***

O KALIBRACIJI GAMA-SPEKTROMETARA

Predavanje po pozivu

Ištvan BIKIT, Dušan MRĐA, Jaroslav SLIVKA, Kristina BIKIT

Departman za fiziku, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija

e-mail: bikit@df.uns.ac.rs

SADRŽAJ

Opisane su metode određivanja efikasnosti poluprovodničkih gama spektrometara. Pokazano je da je sem konvencionalne metode uz korišćenje referentnih izvora moguće izvršiti kalibraciju detektora i drugim tehnikama. Monte Karlo simulacije deluju najpouzdanije, međutim one zahtevaju tačno poznavanje svih delova detektora. Sa druge strane, tehnika "sum-peak" koristi samokalibrirajuća svojstva fotonskih detektora i u tom smislu ima veliku metrološku prednost, ali je primenljiva samo za izvore koje emituju gama zrake u kaskadi.

1. Uvod

Gama spektrometrija pomoću germanijumskih detektora je široko rasprostranjena merna tehnika za određivanje koncentracije aktivnosti radionuklida različitih uzoraka [1]. Proračun aktivnosti preko površine fotopikova zahteva poznavanje totalne fotopik efikasnosti na energiji emisije gama zraka, za date eksperimentalne uslove. Efikasnost detekcije zavisi od nekoliko faktora koji se mogu klasifikovati u dve grupe: oni vezani za sopstvene karakteristike detektora (kao što su aktivna zapremina detektora, njegova geometrija i materijali koji se nalaze u sklopu zaštite), kao i oni vezani za uzorak koji se meri (kao što su geometrija u koju se uzorak dovodi i fizičko-hemijske karakteristike matrice uzorka). Poslednja dva faktora impliciraju potrebu za kalibracijom efikasnosti detektora za svaku konfiguraciju izvora, kako bi se održala tačnost u određivanju brzine brojanja. Tačnije, u slučaju voluminoznih izvora, efekti samoapsorpcije uzrokuju veliku osetljivost efikasnosti u niskoenergetskom opsegu na promene tipa matrice, što zahteva određivanje efikasnosti u slučaju bilo kakve varijacije u sastavu matrice.

Primena gama spektrometrije za monitoring radioaktivnosti u životnoj sredini zahteva merenje koncentracija aktivnosti koristeći uzorke različite mase/zapremine, kako bi se postigla odgovarajuća merna preciznost, za prihvatljivo dugo vreme merenja. Različitost u veličini uzoraka iz životne sredine zahteva barem nekoliko tipova držača za uzorke [2]. Takođe, mora se uzeti u obzir činjenica da efikasnost detekcije za datu geometriju zavisi i od karakteristika uzorka, gustine uzorka i matrice uzorka.

Analize radioaktivnosti u životnoj sredini obuhvataju energetski opseg od 30 keV do 3000 keV (gama i X zraci emitovani od strane prirodnih i veštačkih radionuklida). Stoga, kalibracija efikasnosti predstavlja proceduru pomoću koje se određuje kontinualna kriva efikasnosti u pomenutom energetskom opsegu. Pod terminom "efikasnost", podrazumeva se totalna fotopik efikasnost. Kao poseban slučaj može se izdvojiti određivanje koncentracije aktivnosti za jedan radionuklid, kada kompletna kriva efikasnosti nije potrebna, već je dovoljno poznavati vrednost efikasnosti na datoj energiji, ili za nekoliko vrednosti energije.

Postoji nekoliko procedura za određivanje efikasnosti detekcije [3], ali najbolji pristup predstavlja upravo kombinacija nekoliko procedura. Isključivo eksperimentalni pristup je i najpouzdaniji [2], a u njegovoj osnovi leži merenje spektra kalibracionog izvora koji emituje gama zrake u posmatranom energetskom opsegu. Efikasnost detekcije može se izračunati pomoću sledeće jednačine:

$$\varepsilon = \frac{R}{A p_{\gamma}}$$

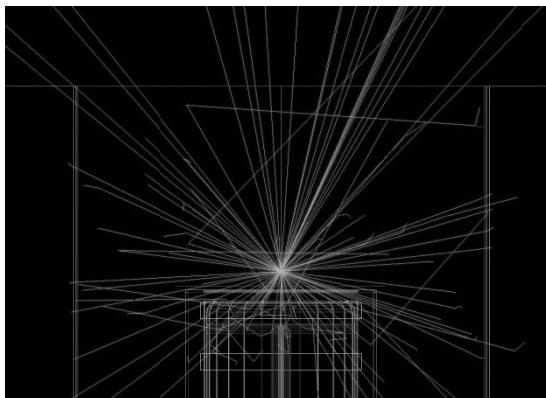
gde je A poznata koncentracija aktivnosti kalibracionog izvora, R izmerena neto brzina brojanja određena na osnovu površine ispod pika totalne apsorpcije, a p_γ relativni prinos gama zraka, tj. verovatnoća emisije gama zraka date energije. Kako je energetski opseg od značaja prilično širok (od 30 keV do 3000 keV) neophodno je snimiti spektre različitih kalibracionih izvora, takvih da su energije spektralnih linija što ravnomernije raspoređene unutar ovog energetskog opsega. Osim toga, poželjno je da radionuklidi emituju gama zrake samo jedne energije, zbog toga što u suprotnom veoma često dolazi do koincidentnog sumiranja (kada gama zraci iz kaskadnih prelaza simultano deponuju svoju energiju unutar detektora). Međutim, komercijalno dostupnih izvora koje karakteriše emisija samo jedne energije i dovoljno dug period poluraspada ima relativno malo, pa se stoga uglavnom koriste radionuklidi koji imaju gama prelaze na nekoliko energija. U ovom slučaju moraju se primeniti matematičke korekcije na koincidentno sumiranje, što unosi dodatan faktor u računu procene nesigurnosti krive efikasnosti [4].

Postoji dva tipa kalibracionih izvora koji se koriste za kalibraciju efikasnosti detekcije: zatvoreni izvori, fiksnih dimenzija i poznate aktivnosti i standardni radioaktivni materijali, poznate specifične aktivnosti. Idealan slučaj bio bi ukoliko je kalibracioni izvor istog oblika i sastava kao i dati uzorak. Međutim, iako je moguće napraviti kalibracione izvore različitih oblika, u praksi je nemoguće uvek postići podudaranje gustine i sastava uzorka i kalibracionog izvora. Zbog toga, neophodno je sprovesti određene matematičke korekcije.

Naredni metod kalibracije efikasnosti u potpunosti se razlikuje od objašnjenog eksperimentalnog metoda i vrši se isključivo računski. Teško je analitički objasniti kako totalna fotopik efikasnost zavisi od energije gama zraka i parametara detektora. Najbolji pristup proračunu efikasnosti detekcije pruža Monte Karlo metod, baziran na simulaciji istorijata pojedinačnih fotona. Simulacija omogućava praćenje svakog fotona duž njegove putanje nakon emisije, od izvora do detektora, kao i unutar samog detektora. Foton interaguje putem fotoelektričnog efekta, Komptonovog rasejanja ili efekta stvaranja para, a kao rezultat ovih procesa dolazi do stvaranja elektrona, pozitrona i sekundarnih fotona, čije se putanje takođe mogu pratiti. U simulaciju je uključena verovatnoća za odvijanje svakog tipa interakcije pri svakom mogućem upadnom uglu, kako bi se konačno dobio ukupan rezultat svih odigranih interakcija.

Za Monte Karlo proceduru potrebni su sledeći ulazni parametri:

- dimenzije izvora i rastojanje od detektora
- dimenzije kape detektora kao i osetljivih i neosetljivih zona detektora
- sastav i gustina svih materijala sa kojima fotoni mogu stupiti u interakciju
- linearni atenuacioni koeficijenti svih ovih materijala
- verovatnoće odvijanja svih relevantnih interakcija fotona u materijalu detektora u funkciji od energije i upadnog ugla informacija o transportu elektrona i pozitrona kroz materijal detektora



Slika 1. Vizualizacija Monte Karlo simulacije

Savremeni proračuni bazirani na Monte Karlo metodi rezultuju vrednostima efikasnosti detekcije sa nesigurnostima uporedivim onima dobijenim putem eksperimentalne kalibracije i primene različitih neophodnih matematičkih korekcija [1, 5]. Najvažniji preduslov za uspešnu Monte Karlo simulaciju je tačno poznavanje dimenzija kristala detektora, koje su najčešće date od strane proizvođača, ali je takođe potrebno i poznavanje tačnih dimenzija delova oko kristala, kao i raspodela osetljivih i neosetljivih zona, što je korisniku često nepoznato. Ove nesigurnosti dovode do većih nesigurnosti efikasnosti detekcije u simulacijama.

Za isključivo računsko određivanje efikasnosti detekcije Monte Karlo metod je neizbežan – međutim postoje jednostavnije metode koje omogućavaju pretvaranje efikasnosti detekcije merene pomoću kalibracionog izvora određene geometrije i matrice u efikasnost detekcije uzorka drugačije geometrije i matrice [6, 7]. Ove metode najčešće zahtevaju prva četiri gore navedena ulazna parametra, ali je tačnost ovih podataka od manjeg značaja, zbog toga što relativno preračunavanje dovodi do manje vrednosti greške [2].

Najčešće korišćeni metod baziran je na proračunu efektivnih prostornih uglova za uzorke različitih geometrija i sastava. Prvi metod ovog tipa razvijen je od strane [8] za koaksijalne detektore i cilindrične uzorke, dok je u [9] ovaj metod proširen na cilindrične uzorke prečnika većeg od prečnika kristala detektora. Ovaj metod je eksperimentalno testiran za tačkaste, disk i cilindrične izvore na različitim rastojanjima za brojne detektore. Slaganje eksperimentalnih i preračunatih vrednosti je unutar 3%, kada su parametri detektora poznati sa velikom tačnošću. Program Angle [10] baziran je upravo na ovom metodu.

U praksi, primena gama spektrometrije za analizu uzoraka iz životne sredine bazira se na eksperimentalnoj kalibraciji efikasnosti detekcije. Međutim, to nikada nije isključivo eksperimentalni pristup, pošto ova metoda mora biti podvrgnuta brojnim računskim korekcijama kako bi se adekvatno primenila na uzorke različitih geometrija i sastava. Problem predstavlja činjenica da direktna eksperimentalna kalibracija, zajedno sa odgovarajućim korekcijama, uvodi brojne nesigurnosti u konačan rezultat merenja. Iz tog razloga ovaj pristup zahteva analize mogućih devijacija rezultata.

2. Primer izračunavanja efikasnosti detekcije

U daljem tekstu biće dat primer kalibracije efikasnosti metodom koja se primenjuje u Laboratoriji za niskofonsku gama spektrometriju, Departmana za fiziku u Novom Sadu. U procesu eksperimentalne kalibracije korišćeni su sertifikovani izvori napravljeni od radioaktivnih materijala poznatih koncentracija aktivnosti, kao i nekoliko sertifikovanih zatvorenih izvora. Program Angle je korišćen za preračunavanje efikasnosti detekcije za uzorke drugih dimenzija i sastava. Koncentracije aktivnosti uzoraka zemljišta,

trave i vode, dobijeni prilikom IAEA interkomparacija, merene su na kalibrisanim detektorima i rezultati ovih merenja kasnije su korišćeni za korekciju krive efikasnosti detektora.

3. Kalibracioni izvori

Osobine radioaktivnih materijala korišćenih za pripremu cilindričnih kalibracionih izvora date su u tabeli 1. Tabela 2 prikazuje osobine izvora komercijalnog porekla i laboratorijski pripremljenih, koji su korišćeni za kalibraciju efikasnosti detekcije.

Maseni atenuacioni koeficijenti SRM i F mereni su u tačkastoj geometriji pomoću tačkastih izvora ^{133}Ba , ^{152}Eu i ^{141}Am kako bi bio obuhvaćen energetski opseg od interesa [2]. U cilju verifikacije pretpostavljenog hemijskog sastava ovih materijala korišćen je program XCOM [11].

Gama spektri prikupljeni su pomoću HPGe detektora i analizirani pomoću softvera Canberra Genie 2000. Prvo, potrebne tabele radionuklida izdvojene su korišćenjem programa Nuclide Library Editor, selekcijom samo relevantnih radionuklida i prelaza. Sledeći korak je određivanje aktivnosti svih kalibracionih izvora korišćenjem programa Certificate File Editor.

Program Geometry Composer može se koristiti za kreiranje fajlova koji u sebi sadrže informaciju o mogućim kombinacijama izvor-detektor. Ovo je neophodno za određivanje odnosa fotopik i ukupne efikasnosti (peak-to-total efficiency), koji se koristi za korekciju zbog sumiranja pravih koincidencija, a do kojeg dolazi kod nuklida koji emituju gama zrake sa više energija. Veličina sumiranja pravih koincidencija zavisi od verovatnoće da se dva fotona emitovana istovremeno, istovremeno i detektuju [12]. Ona zavisi od geometrije, tj. prostornog ugla pod kojim se vidi detektor iz izvora. Što je izvor dalje od detektora, manja je verovatnoća da će dva fotona emitovana istovremeno biti detektovani zajedno, a dalje od nekog određenog rastojanja, koje zavisi od veličine detektora, gubici na sumiranje pravih koincidencija će biti zanemarljivi. Za dati prostorni ugao, broj sumiranja pravih koincidencija po jedinici vremena proporcionalan je aktivnosti izvora.

Ukoliko proizvođač detektora nije Canberra, kao u našem slučaju, program sadrži listu unapred definisanih detektora, tako da korisnik može izabrati iz liste detektor sa najpribližnijim dimenzijama kristala. Ovo može dovesti do nesigurnosti intenziteta linije korigovane na koincidencije, i ova nesigurnost može biti mnogo veća od nesigurnosti koje proističu iz statistike i efikasnosti.

Sama analiza spektra izvršena je pomoću programa Gamma Acquisition & Analysis (GA&A).

Tabela 1. Radioaktivni materijali korišćeni za pripremu kalibracionih izvora.

Kod	SRM	F	KCl
<i>Tip</i>	Sertifikovani standardni referentni materijal SRM 4350B	Radioaktivni materijal, koncentracija aktivnosti merena u drugoj laboratoriji	Hemijska supstanca visoke čistoće
<i>Poreklo</i>	NBS, USA	Institut Vinča, Srbija	Merck, Germany
<i>Matrica</i>	Rečni sediment	Fosfatna legura	KCl
<i>Radionuklidi od značaja</i>	^{40}K , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{241}Am , ^{232}Th niz, ^{238}U niz	^{238}U niz	^{40}K
<i>Približna koncentracija aktivnosti [Bq/kg]</i>	4 – 560	1500	$16.3 \cdot 10^3$
<i>Referentni datum</i>	1981.09.09.	-	-

Tabela 2. Kalibracioni izvori.

Kod	Poreklo	Materijal, gustina [g/cm ³]	$r \times h$ [cm], V [cm ³]	Radionuklidi od značaja	Približna aktivnost, ref. datum
PA	Amersham, UK	-	Tačkasti izvor	⁶⁰ Co, ¹³³ Ba, ¹³⁷ Cs, ²⁴¹ Am	400 kBq, 1976.06.01.
PF	Framatome, France	-	Tačkasti izvor	²² Na, ⁵¹ Cr, ⁵⁴ Mn, ⁵⁷ Co, ⁶⁰ Co, ⁸⁵ Sr	400 kBq, 2005.02.15.
C7230SRM	Lab. pripremljen	SRM, 0.950	3.48x2.80, 106.4	⁴⁰ K, ⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ¹⁵² Eu, ²⁴¹ Am, ²³² Th niz, ²³⁸ U niz	0.4 - 56 Bq, 1981.09.09.
C7230x2SRM	Lab. pripremljen	SRM, 0.947	3.48x5.60, 212.8	⁴⁰ K, ⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ¹⁵² Eu, ²⁴¹ Am, ²³² Th niz, ²³⁸ U niz	0.8 - 112 Bq, 1981.09.09.
C7230F	Lab. pripremljen	F, 1.527	3.48x2.80, 106.4	²³⁸ U niz	250 Bq
C7230x2F	Lab. pripremljen	F, 1.527	3.48x5.60, 212.8	²³⁸ U niz	500 Bq
C7031KCl	Lab. pripremljen	KCl, 0.923	3.26x3.05, 101.6	⁴⁰ K	1.5 kBq
C7031x2KCl	Lab. pripremljen	KCl, 0.882	3.48x5.60, 212.8	⁴⁰ K	3.1 kBq
Bottle	Framatome, France	Smola, 1.15	4.74x7.06, 484	¹⁵² Eu	33.8 kBq, 2005.01.26.
Marinelli	Framatome, France	Smola, 1.15	5.56x5.60, 450	¹⁵² Eu	32.5 kBq, 2005.01.27.

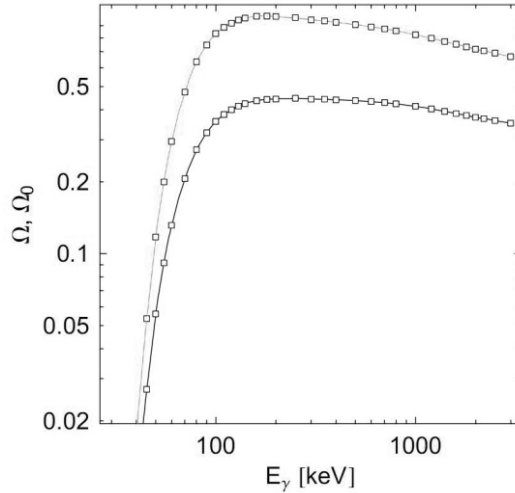
4. Određivanje efikasnosti

Efikasnosti detekcije za izvore pripremljene iz test uzoraka izračunate su pomoću efikasnosti za kalibracione izvore, korišćenjem metode relativnih efektivnih prostornih uglova. Nepoznata efikasnost detekcije ε može se izračunati preko poznate efikasnosti ε_0 koristeći relaciju:

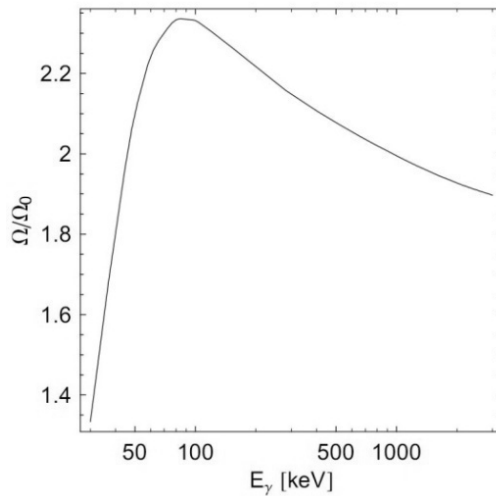
$$\varepsilon = \varepsilon_0 \frac{\Omega}{\Omega_0}$$

gde je Ω efektivni prostorni ugao za geometriju izvor-detektor nepoznate efikasnosti, a Ω_0 efektivni prostorni ugao za geometriju izvor-detektor poznate efikasnosti.

Efektivni prostorni uglovi izračunati su pomoću ranije pomenutog programa Angle. Kao ulazne parametre ovaj program zahteva karakterizaciju uzorka – dimenzije, gustinu i sastav izvora kao i kontejnera u kojem je izvor smešten, i karakterizaciju detektora, zajedno sa materijalima koji ga okružuju. Proračuni su izvedeni do na Gausov koeficijent reda 16 stepeni preciznosti, za mrežu energija koja se proteže od 30 keV do 3000 keV sa 35 vrednosti distribuiranih tako da pretežno ravnomerno pokrivaju energetski opseg u logaritamskoj skali. Dobijene vrednosti tačaka su interpolirane na glatke funkcije $\Omega(E_\gamma)$ i $\Omega_0(E_\gamma)$, i na taj način dobijeni su i njihovi odnosi u funkciji od E_γ . Tipične funkcije prostornih uglova prikazane su na slici 2, dok je odgovarajuća funkcija njihovog odnosa prikazana na slici 3.



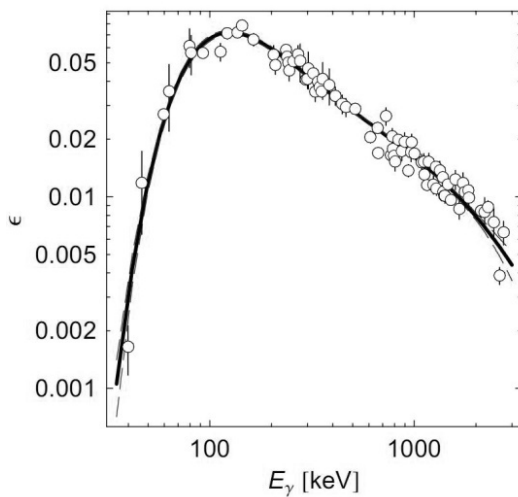
Slika 2. Tipične interpolirane funkcije efektivnih prostornih uglova [2]



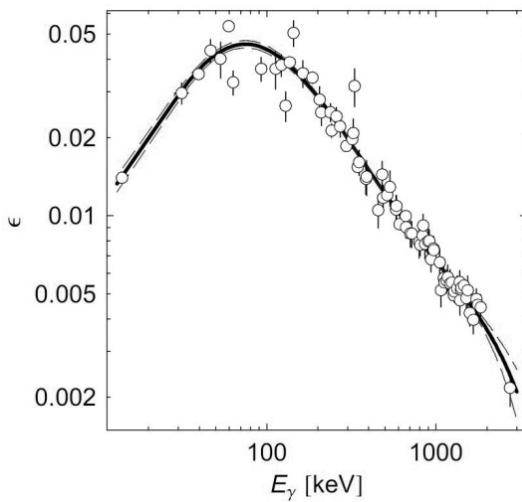
Slika 3. Tipičan odnos efektivnih prostornih uglova u funkciji od energije [2]

Vrednosti efikasnosti $\varepsilon(E_\gamma)$ izračunate su pomoću gore date formule za istu mrežu energetske vrednosti za koju je dato $\varepsilon_0(E_\gamma)$ za kalibracione izvore. Nakon procesiranja svih kalibracionih izvora, ova procedura rezultovala je sa 200 tačaka $\varepsilon(E_\gamma)$ za datu geometriju detektor-test uzorak i mnoge od njih su bile na istim ili približnim energijama.

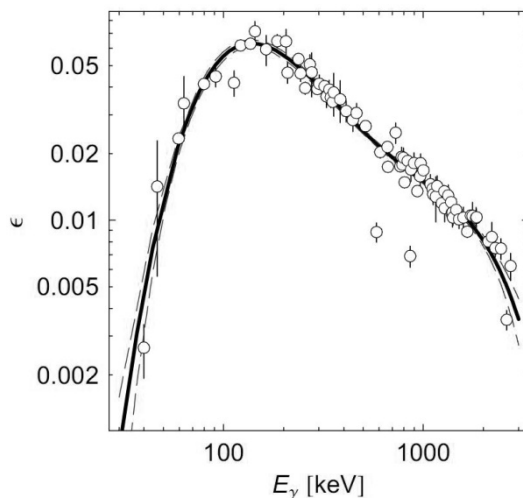
Neke od kriva efikasnosti dobijene na prethodno opisan način prikazane su na slikama 4-6.



Slika 4. Kriva efikasnosti (zajedno sa ulaznim podacima) za uzorak zemljišta [2]



Slika 5. Kriva efikasnosti (zajedno sa ulaznim podacima) za uzorak trave [2]



Slika 6. Kriva efikasnosti (zajedno sa ulaznim podacima) za Marineli uzorak vode [2]

Velike nesigurnosti pojedinih vrednosti efikasnosti, naročito na niskim energijama, kao i velike devijacije nekih tačaka sa manjim nesigurnostima, potiču od činjenice da ovaj metod kalibracije koristi sirove ulazne podatke za veoma različite izvore, sa različitim radionuklidima, aktivnostima, geometrijama i sastavom. Koridor greške dobijenih kriva efikasnosti je prilično uzak zbog velikog broja tačaka što umanjuje uticaj tačaka koje leže van krive.

5. Određivanje efikasnosti korišćenjem sumiranog vrha (samokoincidentni metod) [13, 14, 15]

Aktivnost izvora ^{60}Co merena je korišćenjem pikova totalne apsorpcije, sumiranog i „pile-up“ pika (koji predstavlja rezultat slučajnih koincidencija) i ukupne površine spektra. Za dva koincidentna gama kvanta intenzitet pravog sumiranog vrha se može izraziti kao:

$$N_{\Sigma} = At\varepsilon_1\varepsilon_2wL_{\tau} + N_C,$$

gde je N_C – odbroj usled slučajnih koincidencija dva potpuno apsorbovana gama zraka energija 1173 keV i 1332 keV, ε_1 i ε_2 efikasnosti za ove pikove totalne apsorpcije, t – vreme merenja, w – korekcionni faktor na ugaone korelacije, L_{τ} – faktor gubitka iz fotovrhova, a A je aktivnost izvora.

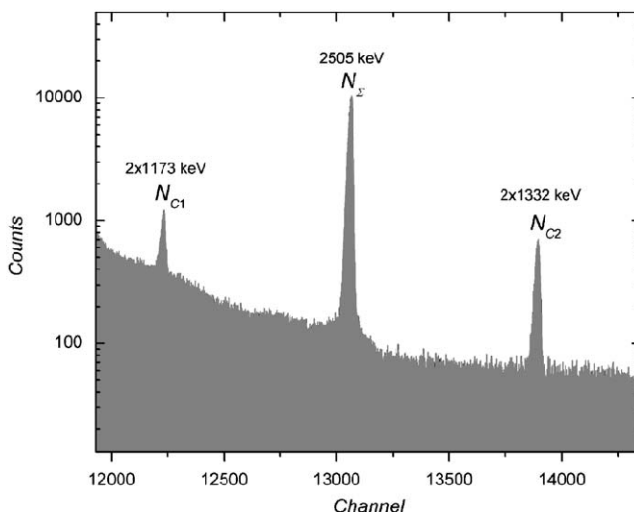
Ukoliko su dva gama zraka, emitovana od strane različitih jezgara, potpuno apsorbovana u detektoru unutar vremenskog intervala 2τ (2τ - vreme razlaganja koincidentnog kola), u spektru će se takođe pojaviti pikovi samo usled slučajnih koincidencija. Stoga, osim sumiranog vrha (N_{Σ}), u spektru ^{60}Co javljaju se pikovi 2×1173 keV i 2×1332 keV. Površine ovih pikova usled slučajnih koincidencija mogu se dovesti u vezu sa efektivnim vremenom razlaganja 2τ pomoću relacije:

$$N_{C1} = 2\tau A^2 t (\varepsilon_1(1 - \varepsilon_{T2}w))^2, N_{C2} = 2\tau A^2 t (\varepsilon_2(1 - \varepsilon_{T1}w))^2$$

Na ovaj način, aktivnost izvora može se odrediti pomoću sledeće jednačine:

$$A = \frac{N_T}{t} \left[\left(\left(\frac{N_\Sigma}{2\sqrt{N_{C1}N_{C2}}} - 1 \right) \left(\sqrt{\frac{4N_T\sqrt{N_{C1}N_{C2}}}{N_1N_2} + 1} - 1 \right) \right)^{-1} + 1 \right]$$

gde je ukupna površina spektra izražena kao $N_T = At(\varepsilon_{T1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{T1}\varepsilon_{T2}W)$, gde su ε_{T1} i ε_{T2} totalne efikasnosti, a N_1 i N_2 su površine pojedinačnih fotovrhova (indeksi 1 i 2 odnose se na gama zrake na 1173 keV i 1332 keV, respektivno).



Slika 7. Sumirani vrhovi u spektru ^{60}Co

6. Zaključak

Svaki metod za kalibraciju efikasnosti ima određene prednosti i mane. Kalibracija pomoću tačkastih izvora deluje najjednostavnije, međutim merenja se moraju vršiti na većim rastojanjima u slučaju izvora koji sadrže radionuklide koji emituju gama zrake sa više energija, kako se ne bi uvodile značajne korekcije zbog koincidentnog sumiranja [2]. Takođe, odnos efektivnih uglova za prelazak sa cilindrične na tačkastu geometriju je najveći, što dovodi do većih nesigurnosti. Sa druge strane, cilindrični kalibracioni izvori napravljeni su u istoj geometriji kao i mereni uzorak, i korišćeni SRM kalibracioni izvor u navedenom primeru imao je istu matricu kao uzorak zemljišta. Međutim, aktivnost korišćenog SRM kalibracionog izvora je mala. Ukoliko se koristi zatvoreni voluminozni kalibracioni izvor, mana je velika brzina brojanja, što dovodi do velikog mrtvog vremena koje se ne može korigovati elektronikom. Takođe, višelinijnski ^{152}Eu izvor zahteva značajnu korekciju na koincidencije. Različiti kalibracioni izvori, nakon korekcije odnosa efektivnih uglova, dali su rezultate za datu efikasnost detekcije koji su u pojedinim slučajevima bili van statističke greške. Uzrok za ovakva odstupanja, koja se najčešće javljaju u niskoenergetskom regionu, često se ne može lako pronaći. Podaci za kalibraciju efikasnosti dobijeni pomoću različitih kalibracionih metoda omogućavaju stvaranje eksperimentalnih krivih efikasnosti koje su u dobroj međusobnoj saglasnosti.

7. Literatura:

- [1] Garcia-Talavera M., Neder H., Daza M.J., Quintana B., TOWARDS A PROPER MODELING OF DETECTOR AND SOURCE CHARACTERISTICS IN MONTE CARLO SIMULATIONS, *Applied Radiation and Isotopes* **52** (2000) 777-783
- [2] Slivka J., Bikit I., Veskovic M., Krmar M., Todorovic M., Mrdja D., Forkapic S., EVALUATION OF EFFICIENCY CALIBRATION METHODS OF SEMICONDUCTOR GAMMA SPECTROMETERS, *Journal of Research in Physics*, **31**, No. 1, (2007) 19-30
- [3] Debertin K., Helmer R.G., GAMMA- AND X-RAY SPECTROMETRY WITH SEMICONDUCTOR DETECTORS, North-Holland, New York (1988).
- [4] Vidmar T., Likar A., CALCULATION OF TOTAL EFFICIENCIES OF EXTENDED SAMPLES FOR HPGe DETECTORS, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **555** (2005) 251
- [5] Puzovic J.M., Anicin I., USER FRIENDLY MONTE-CARLO PROGRAM FOR THE GENERATION OF GAMMA-RAY SPECTRAL RESPONSES IN COMPLEX SOURCE-DETECTOR ARRANGEMENTS, *Nuclear Instruments and Methods, A* **414** (1998) 29–282
- [6] Sima O., Dovlete C., LINEAR RELATIONS FOR EFFICIENCY CALIBRATION OF GAMMA-SPECTROMETRIC MEASUREMENTS OF BULK SAMPLES, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **200** (1995) 191
- [7] Aguiar J.C., Galiano E., Fernandez J., PEAK EFFICIENCY CALIBRATION FOR ATTENUATION CORRECTED CYLINDRICAL SOURCES IN GAMMA RAY SPECTROMETRY BY THE USE OF A POINT SOURCE, *Applied Radiation and Isotopes* **64** (2006)1643
- [8] Bikit I., Slivka J., Vesković M., Mrđa D., Žikić-Todorović N., Varga E., Ćurčić S., Čonkić Lj., EFFECT OF SELF-ABSORPTION IN VOLUMINOUS SOURCES IN GAMMA-SPECTROMETRY, *Journal of Research in Physics*; **30** No.1, (2004) 61-65
- [9] Bikit I., Slivka J., Vesković M., Mrđa D., Žikić-Todorović N., Varga E., Ćurčić S., Čonkić Lj., CALIBRATION OF GMX HPGe DETECTOR WITH NBS REFERENCE SOURCE, *Journal of Research in Physics*; **30** No.1, (2004) 55-59
- [10] S. Jovanovic, A. Dlabac, ANGLE V2.0, BUILD VERSION: 2.0.0.118, Copyright 1994–2002
- [11] Berger M.J., Hubbell J.H., Seltzer S.M., Chang J., Coursey J.S., Sukumar R., Zucker D.S., XCOM: Photon Cross Section Database, NIST (1998)
- [12] Slivka J., Bikit I., Veskovic M., Conkic Lj., Gama spektrometrija, specijalne metode i primene (2000)
- [13] Bikit I., Nemes T., Mrda D., SIMPLE METHOD FOR ABSOLUTE ACTIVITY MEASUREMENT OF ⁶⁰Co SOURCE, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **603** (2009) 333–336
- [14] Bikit I., Nemes T., Mrda D., Jovančević N., ON THE ABSOLUTE SOURCE ACTIVITY MEASUREMENT WITH A SINGLE DETECTOR: THE ¹³³Ba CASE, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **612** (2009) 103–111
- [15] Nemes T., Mrda D., Bikit I., ABSOLUTE ACTIVITY MEASUREMENT OF ¹⁵²EU SOURCES WITH A SINGLE DETECTOR, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **648** (2011) 114–123

ON THE CALIBRATION OF GAMMA SPECTROMETERS

I. BIKIT, D. MRĐA, J. SLIVKA i K. BIKIT

*Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Novi Sad, Serbia
e-mail: bikit@df.uns.ac.rs*

ABSTRACT

In this paper, methods for semiconductor gamma spectrometer efficiency determination are described. It is shown that besides the conventional method which requires calibration sources, detector calibration can be done using several different techniques. Monte Carlo simulations are the most reliable, but require exact knowledge of all detector parts. On the other hand, sum-peak technique uses self-calibrating properties of photon detectors, and has great metrological advantage. However, this technique can be applied only with sources emitting gamma rays in cascade.

SPEKTRALNA I VREMENSKA ANALIZA U DIGITALNOJ SPEKTROSKOPIJI – RAZVOJ SOFTVERA I PRIMERI

**Dimitrije MALETIĆ, Aleksandar DRAGIĆ, Dejan JOKOVIĆ,
Radimir BANJANAC, Vladimir UDOVIČIĆ,
Nikola VESELINOVIĆ, Ivan ANIČIN**
Institut za fiziku, Beograd, Srbija, maletic@ipb.ac.rs

SADRŽAJ

U radu su opisane potrebe Niskofonske laboratorije za Nuklearnu fiziku, Instituta za Fiziku za softverom za spektralnu i vremensku analizu podataka dobijenih digitalnim uređajima, kao i razvoj softvera i njegova primena. Ovakvim softverom dolazimo do mogućnosti spektralne i vremenske analize kontinualnog merenja intenziteta Kosmičkog zračenja, kao i energetskog spektra koje ovo zračenje ostavlja u plastičnim scintilatorima. Potom, Spektralna i vremenska analiza primenjena je na spektrima i pojedinačnim linijama spektra Germanijumskih detektora (HPGe detektorima), NaI detektorima i, treba istaći, koincidentnim i antikoincidentnim spektrima prethodno pomenutih detektora. Svaki korak pri razvoju softvera za analizu podataka upoređivan je sa spektrima i odbojima dobijenim iz analognih sistema, sa posebnim osvrtom na koincidentne i antikoincidentne spektre i odboje.

1. Uvod

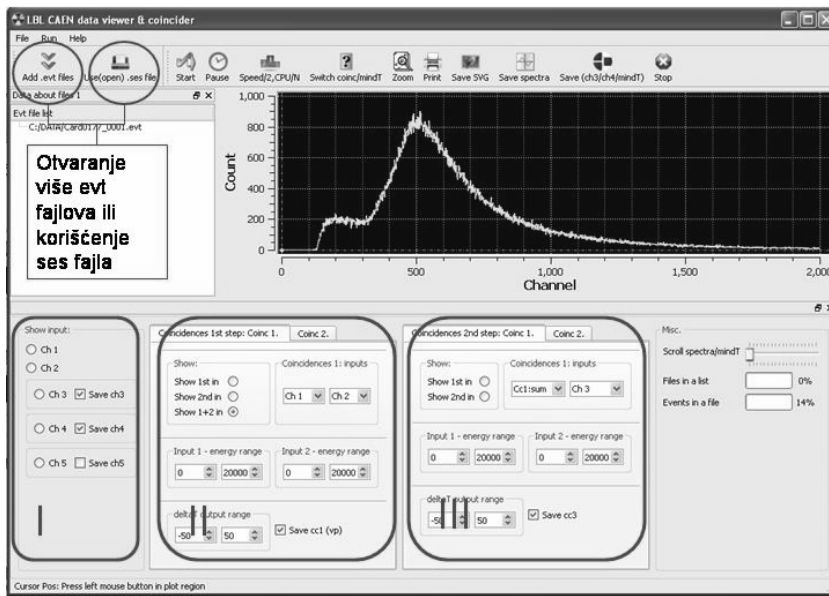
S obzirom da se digitalna spektroskopija sve više koristi u merenjima u Niskofonskoj Nuklearnoj fizici kao i u merenjima Kosmičkog zračenja, postojala je potreba za razvoj novog softvera koji bi mogao da analizira dobijene podatke sa digitalnih uređaja u Niskofonskoj laboratoriji za Nuklearnu fiziku Instituta za fiziku. Nabavkom savremene digitalne merne opreme bazirane na brzim alanlogno/digitalnim pretvaračima proizvođača CAEN, tipa N1728B, došlo je do mogućnosti da vršimo veoma raznovrsna merenja i to sa veoma velikom količinom izlaznih podataka, mnogo većom nego kod prethodnika, analognih spektroskopskih uređaja. Ovi podaci nam omogućavaju da povećamo naša znanja o onome što merimo. Više informacija o Niskofonskoj laboratoriji i merenjima koja se u njoj vrše možete naći u referenci [1]. Moramo da istaknemo najvažniju novinu u našim merenjima novim digitalnim uređajima, a to je da se tokom merenja zapisuje svaki pojedinačni događaj sa odgovarajućom amplitudom i vremenom pojavljivanja na detektoru. Detaljnije, možemo napisati da se impulsi (do 4) detektorska izlaza dovode u CAEN-ov analizator u kome se amplituda digitalizuje u 32k kanala dok se trenutak pojavljivanja na analizatoru zapisuje sa rezolucijom od 10ns. Ovakvo dobijamo ogromnije količine podataka, ali dobijamo mogućnost da se one kombinuju u off-line analizi.

Razvijeni programski paket za (off-line) analizu sastoji se iz programa koji su pisani u C++ programskom jeziku. Kompajlira se pogromom Qt, tako da može da radi i na MS Windows programima kao i na Linux-u. Takođe, program može da radi sa ili bez grafičkog okruženja – batch mode.

Razlog za podelu programskog paketa na više programa proistekla je iz praktične potrebe za efikasnijom analizom eksperimenata sa različitim postavkama i uslovima za izlazne podatke. Ovakvo podeljeni programi dele i analizu, i to tako da ako imate najjednostavnije zahteve za analizu (npr tražite jednostavno spektar merenja) to možete da uradite koristeći samo jedan od programa nazvan DataViewer, dok ako želite da postavljate (jedan ili više) energetskih ili vremenskih uslova na spektre ili kreirate vremenske serije (odboje), to radite dvostepeno. U prvom stepenu ekstrajete listu željenih događaja sa odgovarajućim vremenom pojavljivanja za željeni detektor DataViewer programom. Ovakvu listu koristite kao ulaz za sledeći program TimeTools, u kome zadajete svoje zahteve na energiju i vreme pojavljivanja. Ovakvo izbegavate ponavljanje 1 stepene pripreme podataka, i time umnogome štedite vreme za analizu. Treći stepen čini program Synchronization, i koristi za nešto komplikovanija koincidiranja i antikoincidiranja i u praksi se retko koristi. U daljem tekstu ćemo da predstavimo DataViewer program kao i neke od primera korišćenja u Niskofonskoj laboratoriji za Nuklearnu fiziku.

2. Program DataViewer i TimeTools

CAEN-ov program za akviziciju snima podatke u binarne liste digitalizovanih amplituda i vremena pojavljivanja na detektorima koje program DataViewer kasnije može za učitava. DataViewer je izdjeljen na nekoliko celina, koje se ocrtavaju i na njegovom grafičkom interfejsu. Slika 1. Donji deo prozora sadrži tri menija koji služe za unos parametara pri obradi podataka. Prvi meni omogućava pregledanje svih 4 ulaza CAEN/a, dugi stepen služi za zadavanje parametara koincidencija osnovnih 4 ulaza. Treći stepen ima nešto komplikovanije mogućnosti koincidencija i to sa 4 osnovna ulaza i sa izlazima koincidencija iz drugog stepena (4+2 ulaza). Ovako dobijamo najosnovnije podatke iz nekog merenja, spektre i dva stepena koincidencija. Svaki od ovih izlaza se može se snimiti za dalju (ili buduću) analizu.



Slika 1. Izgled prozora DataViewer programa podeljen u nekoliko celina.

Dalje, program TimeTools preuzima podatke koje smo snimili programom DataViewer. TimeTools program ima mogućnost za vremensku analizu koincidentnih i sukcesivnih događaja, kao i za kreiranje vremenskih serija. Kreiranje vremenskih serija znači da dobijamo listu odbroja za zadati vremenski interval (npr. dobijamo listu odbroja detektora na svakih 5min). Dalje, važno je napomenuti da je u ovom programu moguće zadati uslove na ulazne energetske spektre, što omogućuje selektovanje pojedinačnih linija spektra. Takodje, moguće je zadati ograničenja na vreme medju koincidentnim događajima (tzv. minDt krivu, koja predstavlja spektar minimalnih TimeToAmplitude vrednosti izmedju koincidentnih događaja) gde se dobija razlikovanje promptnih i zakasnelih događaja.

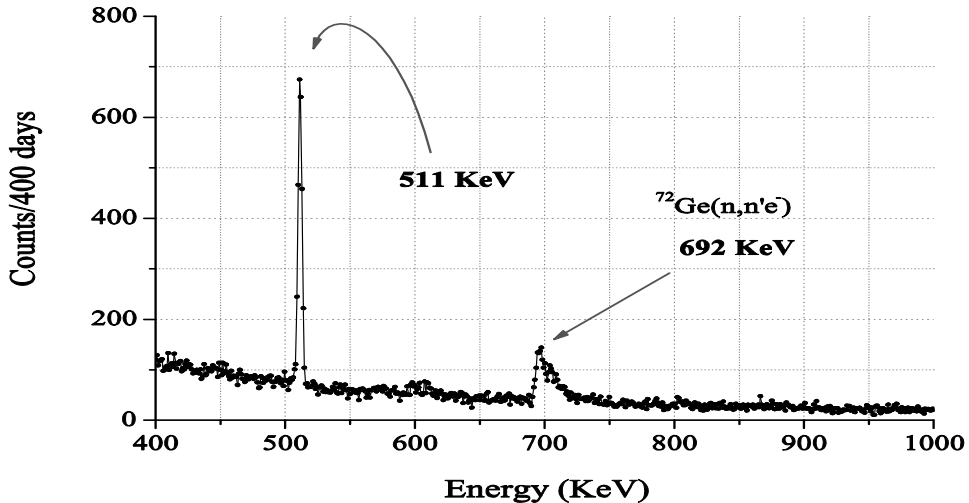
3. Primeri digitalne analize u Niskofonskoj laboratoriji

Prilikom razvoja softvera za digitalnu analizu, korišćen je primer analogne analize kod merenja intenziteta Kosmičkog zračenja plastičnim scintilacionim detektorima.

Kod merenja Kosmičkog zračenja kod nas i u inostranstvu imali smo slučaj analogne analize, s tim da dobijamo/zapisujemo odbroj za neki zadati vremenski period (npr. odbroj plastičnog scintilatora u

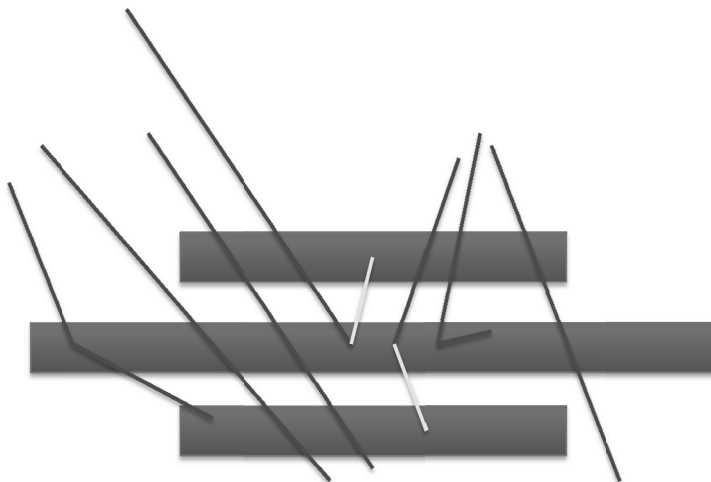
roku od 5 minuta) - vremenske serije. Novim softverom, omogućeno je da se analize vrše bazirane na uvidu u pojedinačne signale. Ovim se omogućava prvo da se u off-line analizi proizvedu željene vremenske serije istovetne analognim vremenskim serijama što omogućava provere digitalnog sistema akvizicije i obrade podataka sa analognim sistemom. Nove mogućnosti su da se ponovi off-line analiza sa drugim parametrima, ali sa već postojećim merenjima, što nje bilo moguće sa analognim sistemom brojanja. Nove parametre dobijamo kao rezultat uvida u spektralne razlike za različite vremenske intervale i time postavimo osnove za korekcije 5-o minutnih odbroja. Još jedna pogodnost koja nam je zanimljiva da pomenemo je da nam novi softver daje i mogućnost rada u automatskom modu, a pored toga možemo i da pratimo ovu automatsku analizu putem web sajta.

Sledeći primeri primene novog softvera u Niskofonskoj laboratoriji je određivanje spektara promptnih i zakasnelih koincidencija u off-line analizi. Ovaj primer se koristi pri koincidencijama plastika i HPGe detektora (HPGe u veto zaštiti). Iako veto zaštitu koristimo kao anti-koincidencija ova dva detektora, nama je interesantna koincidencija i rezultujući Kosmički indukovani događaji u zakasnelim koincidencijama, gde su primetni anihilacioni pik i linija Kosmički proizvedenih neutrona. Slika 2.



Slika 2. Spektar zakasnelih koincidencija germanijumskog detektora i plastičnog scintilacionog detektora, sa jasno vidljivim linijama 511 i 692 keV.

Od mnoštva drugih primera koišćenja ovog softvera, možemo pomenuti najnovije rezultate upoređivanja varijacija više post-radonskih linija u gama spektroskopiji i rezultata varijacija dobijenih iz radonometra (alfa spektroskopijom). Istraživanju apsorpcija u nisko-energetskom delu spektra, kao i dosta komplikovan metod dobijanja spektra pozitrona iz raspada zaustavljenih Kosmičkih miona u sendviču plastičnih scintilatora, slika 3. Za poslednji slučaj, softver je dodatno preuređen jer je bilo potrebno da se zbog dužine merenja i količine podataka analiza uradi isparcelisano, u koracima sa minimalnim brojem događaja odjednom, dodatno sa modulano postavljenim softverom, što je zahtevalo da programi rade u batch modu, i to modifikovani programi za koincidencije, antikoincidencije, više manipulatora kolonama u koincidentnim listama i programa za selekciju sukcesivnih događaja. Ova analiza je do sada najkomplikovanija analiza koja je koristila novi softver.



Slika 3. Selektovanje događaja kod merenja zaustavljenih miona u sendvič detektoru plastičnih scintilatora. Samo neki od ovih događaja koriste za analizu.

4. Zaključak

Novi zahtevi za obradom podataka u digitalnoj spektroskopiji imali su za potrebu razvoj novog programa za analizu podataka u Niskofonskoj laboratoriji za nuklearnu fiziku. Novi programski paket pokriva sve potrebe naše laboratorije pri analizama u digitalnoj spektroskopiji, i smatramo da je dosta uopšten kako bi mogao da se koristi i za potrebe drugih laboratorija koje se bave digitalnom spektroskopijom. Navedeni primeri korišćenja digitalne spektroskopije u Niskofonskoj laboratoriji samo mogu da potvrde naše stanovište da je softver koristan i uopšten.

5. Literatura

- [1] Dragić A. *et. al. Nucl. Tech. & Rad. Prot.*, Vol. XXVI, No. 3, 181-192 (2011)

SPECTRAL AND TIME ANALYSIS IN DIGITAL SPECTROSCOPY / SOFTWARE DEVELOPEMENT AND EXAMPLES

**Dimitrije MALETIĆ, Aleksandar DRAGIĆ, Dejan JOKOVIĆ,
Radomir BANJANAC, Vladimir UDOVIČIĆ,
Nikola VESELINOVIĆ, Ivan ANIČIN**

Institut za fiziku, Beograd, Srbija, maletic@ipb.ac.rs

ABSTRACT

This paper describes the needs of Low background laboratory for Nuclear physics in the Institute of Physics for software for spectral and time analysis of data obtained from digital devices as well as development of this software and examples of it's usage. Using this software we are now able to do the intensity and time analysis of continuous Cosmic ray monitoring, and spectral analysis of Cosmic ray's energy loss in plastic scintillators. Further more, the spectral and time analysis is done on spectrums or part of spectrum of Germanium detectors (HPGe) and also NaI detectors, with emphasis on coincident and anti-coincident spectrums of any combinations of mentioned detectors. Every step in software development is compared with spectrums and count obtained using analogous devices, especially for coincident and anti-coincident spectrums and intensities (counts).

KOMPOZICIJA KOSMIČKOG ZRAČENJA ZAUSTAVLJENOG U VETO DETEKTORIMA

**Dimitrije MALETIĆ, Dejan JOKOVIĆ, Radomir BANJANAC, Aleksandar DRAGIĆ,
Vladimir UDOVIČIĆ, Nikola VESELINOVIĆ, Ivan ANIČIN**
Institut za fiziku, Beograd, Srbija, maletic@ipb.ac.rs

SADRŽAJ

U radu je prikazana kompozicija zračenja, dobijena simulacijom, koje dovodi do pojave spektra plastičnog scintilacionog detektora kada bi na njega upadalo samo kosmičko zračenje. Spektar kosmičkog zračenja dobija se Monte Karlo simulacionim programom CORSIKA. Simulacija deponovane energije i odgovora plastičnog scintilatorskog detektora dobijamo korišćenjem simulacionog paketa Geant4. Motiv za detaljan opis spektra scintilacionog detektora je analiza odnosa mionskih i ne-mionskih događaja u spektru scintilacionih detektora za potrebe korekcija odbroja kontinualnih merenja kosmičkog zračenja u Niskofonskoj laboratoriji za nuklearnu fiziku.

1. Uvod

Prilikom analize vremenskih serija odbroja scintilacionih plastičnih detektora pri kontinualnom merenju kosmičkog zračenja u Niskofonskoj laboratoriji za Nuklearnu fiziku Instituta za fiziku [1] došlo je do potrebe određivanja dela spektra plastičnih scintilacionih detektora koji dolazi samo od upadnih miona. Kako bi se odnos broja signala koji dolazi od upadnih miona sa brojem koji dolazi od ostalih čestica odredio, bilo je potrebno uraditi detaljne simulacije plastičnih scintilatora i poredjenje sa eksperimentalnim rezultatima. Za pripremu simulacionog uzorka kosmičkog zračenja koje pada na plastični scintilator koristi se Monte Karlo simulacioni program CORSIKA (COsmic Ray Simulation for KAskade) [2]. Ovaj program se koristi za detaljnu simulaciju kaskada u vazduhu, koje su inicirane visoko-energetskim upadnim česticama u najvišim slojevima atmosfere. Posle simulacija kosmičkog zračenja sledi simulacija plastičnog scintilatorskog detektora. Geant4 [3] simulira propagaciju čestica kosmičkog zračenja dobijenog iz CORSIKA simulacija i interakciju sa materijalima kroz koje prolazi. Značajno je da simulacija treba da bude detaljna, tako da uključi sve materijale, od krova laboratorije do aktivnog scintilacionog materijala. Kada simulirane čestice dođu do aktivnog scintilacionog materijala, tada Geant4 zapisuje rezultat. Prvi rezultat koji smo dobili iz simulacija je deponovana energija u scintilacionom materijalu. Kako smo bili uvereni da je ovo dovoljno detaljna simulacija, uradili smo i zahtevniju simulaciju koja se bazira na brojanju optičkih fotona generisanih u scintilacionom plastiku i koji dospeva do fotomultiplikatora. Bitno je da smo uporedili i rezultate simulacije sa eksperimentalnim rezultatima. Na kraju smo iz simulacija uzeli i podatke o tome koje čestice doprinose simulacionom spektru plastičnog scintilatora, što nam je dalo mogućnost da uvidimo koji deo spektra dolazi od kosmičkih miona.

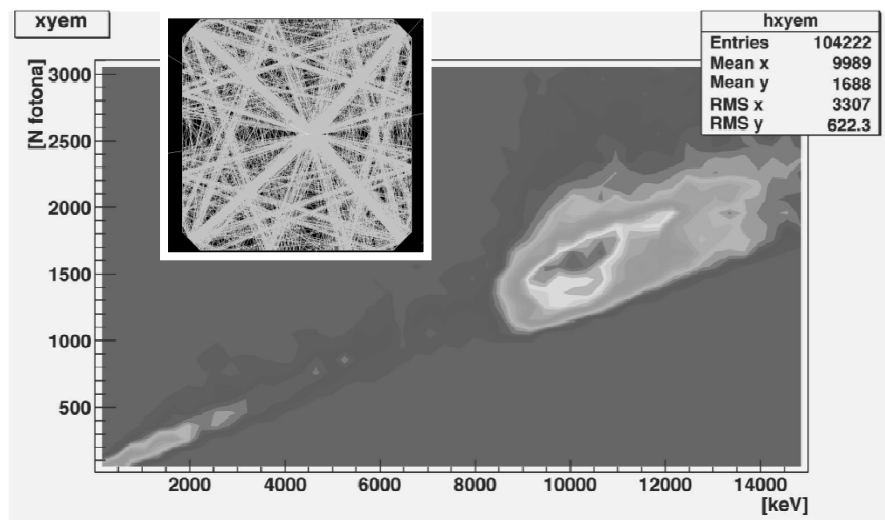
2. Simulacija kosmičkog zračenja

Monte Karlo simulacija kosmičkog zračenja koje pada na plastične scintilatorske detektore urađena je korišćenjem programa CORSIKA. Ovaj program je razvijen za potrebe eksperimenta KASKADE (KARlsruhe Shower Core and Array DETector) u Karlsruheu u Nemačkoj. Cilj programa CORSIKA je detaljna simulaciju kaskada u vazduhu, koje su inicirane visoko-energetskim upadnim česticama u najvišim slojevima atmosfere. Treba da se naglasi da CORSIKA simulacije uključuju sve komponente kosmičkog zračenja, odnosno elektromagnetsku, mionsku i hadronsku komponentu. Ovaj program daje kao izlaz čestice na zadatoj nadmorskoj visini, tj na opservacionoj ravni. Ove čestice su okarakterisane vrstom čestice, komponentama impulsa, koordinatama na opservacionoj ravni i vremenom dolaska na opservacionu ravan. Za korišćenje ovakvog izlaznog fajla u programu Geant4, bilo je potrebno kreirati i posebnu vezu Geant4 programa i ovog fajla koje smo nazvali "prošireni" HEPEvt format. Posebno je važno bilo omogućiti kreiranje više primarnih verteksa sa različitim koordinatama u istom događaju u

Geant-u. Ovo je korisno jer je otvorena mogućnost posmatranja događaja u kojima više čestica pada simultano na detektor, što vodi dobijanju preciznijeg spektra kosmičkog zračenja.

3. Simulacija plastičnog scintilacionog detektora

Geant4 simulacija kao rezultate daje ili vrednost deponovane energije u aktivnom detektorskom materijalu ili broj fotona koje dospevaju do fotomultiplikatora detektora. Detektori u Niskofonskoj laboratoriji za Nuklearnu fiziku sastoje se od 1m x 1m plastičnog scintilacionog materijala dok su isečeni na uglovima u meri da je odsečena površina dovoljna da na nju nalegne fotomultiplikator. Ovi fotomultiplikatori sakupljaju scintilacione fotone, a dva dijametralno suprotna fotomultiplikatora svoje signale spajaju u jedan signal tj. signal jedne dijagonale. Obe dijagonale se posle prikupljanja podataka, kasnije u off-line analizi koincidiraju i daju jedinstveni odgovor detektora. Ovaj odgovor smo simulirali geant4 simulacijom sa brojanjem optičkih fotona koji stižu do fotomultiplikatora.

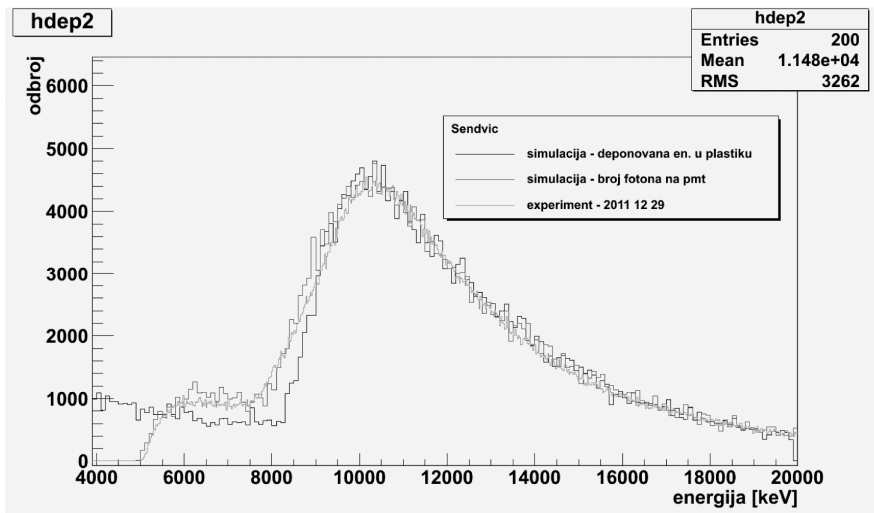


Slika 1. U kvadratu gore – izgled trajektorija optičkih fotona koji stižu na fotomultiplikatore za prosečan mionski događaj. Grafikon prikazuje zavisnost broja fotona na PMT u zavisnosti od deponovane energije čestice.

Na slici 1, u umetnutom kvadratu nalazi se izgled trajektorija scintilacionih fotona koji dospevaju na fotomultiplikatore kod uobičajenog događaja prolaska miona kroz plastični scintilator. Na Slici 1, dalje, vidimo zavisnost broja fotona koji stižu na fotomultiplikatore u zavisnosti od deponovane energije u plastičnom scintilatoru. Očigledna je nelinearnost, što opravdava dodatne napore za detaljnijim simulacijama preko kolekcije fotona na fotomultiplikatorima.

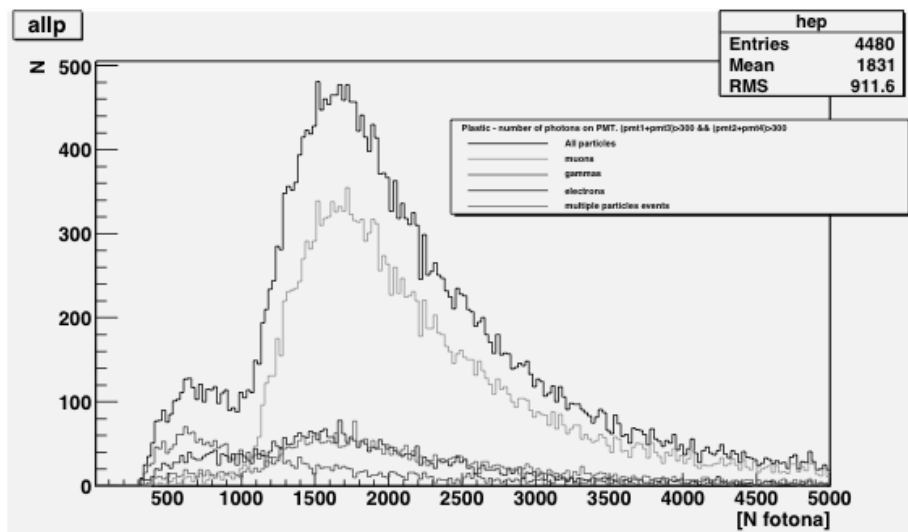
U obe simulacije, i putem deponovane energije i putem brojanja fotona, dobijamo veliki deo spektra koji odlazi na niskoenergetski deo. Ovi događaji iz niskoenergetskog dela daju veliki broj fotona koji stiže na samo po jedan fotomultiplikator, ali ako se postave uslovi selekcije tako da se prihvataju događaji koji daju značajan broj scintilacionih fotona na svaki od 4 fotomultiplikatora, uveliko se odseca niskoenergetski deo. Ovu selekciju nemoguće je uraditi sa simulacijama sa samo deponovanom energijom, i zato nam simulacije sa kolekcijom optičkih scintilacionih fotona daju nezamenjivu prednost pri detaljnim simulacijama. Sada smo u mogućnosti da postavljamo raznih uslova na odbroje

fotomultiplikatora, približno simulaciju realnim podacima, i budemo sigurni da simulacija odgovara stvarnosti. Optimizacijom uslova na fotomultiplikatore dobijamo dobro slaganje sa eksperimentom što se vidi na slici 2.



Slika 2. Poređenje simulacija koje daju kao rezultat deponovanu energiju, simulacija koje broje fotone na PMT i eksperimentalnih rezultata. Vidljivo je da se su bolje simulacije sa brojanjem fotona.

Simulacije nam daju i energiju i vrstu upadne čestice, pa smo u mogućnosti da razložimo simulacioni spektar na vrste upadnih čestica. Slika 3. Pokazuje ovo razlaganje. Sa slike se vidi da se spektar plastičnih scintilatora sastoji dominantno od miona, ali i velikog dela koje dobijamo visokoenergetskim gamma zracima i visokoenergetskim elektronima. Uvidom i u niskoenergetski deo spektra, koji se odseca pomenutim postavljanjem uslova da imamo značajan odbroj na svakom od fotomultiplikatora vidimo da je od predominantno komponovan od gama i elektrona, dok imamo mali deo miona koji pripadaju graničnim efektima. Sa slike 3. takođe vidimo da je i deo spektra koj liči na mali pik levo od glavnog pika scintilacionog detektora veštački i da ne sadrži značajan deo miona, tako da ne može da se koristi prilikom određivanja broja miona koji prolaze kroz detektor. Takođe treba napomenuti da se kompozicija višestrukih događaja, tj. događaja sa pojavom više čestica na površini od $1m^2$ sastoji predominantno od elektromagnetske komponente zračenja.



Slika 3. Kompozicija simulacionog spektra pastičnog scintilacionog detektora. Dominantan je odbroj miona u centralnom (mionskom) piknu, beznačajan u niskoenergetskom piknu levo.

4. Zaključak

Detaljnijim simulacijama kosmičkog zračenja i scintilacionog detektora pokazali smo kompoziciju zračenja koje se zaustavlja u scintilacionom detektoru. Videli smo da je dominantna mionska komponenta, ali da nije beznačajna ni visokoenergetska elektromagnetska komponenta. Ova simulacija pomaže da odredimo koji deo mionske komponente vidimo scintilacionim detektorima u Niskofonskoj laboratoriji, ali i koji se deo čestica kosmičkog zračenja zaustavlja veto scintilacionim detektorima.

5. Literatura

- [1] Dragić A. et al. *Nucl. Tech. & Rad. Prot.*, Vol. XXVI, No. 3, 181-192 (2011)
- [2] CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers D. Heck, J. Knapp, J.N. Capdevielle, G. Schatz, T. Thouw Forschungszentrum Karlsruhe Report FZKA 6019 (1998)
- [3] Geant4 — a simulation toolkit S. Agostinelli et al. *NIM A Volume 506, Issue 3, 1 July 2003.*

COMPOSITION OF COSMIC RAYS STOPPED IN VETO DETECTORS

Dimitrije MALETIĆ, Dejan JOKOVIĆ, Radomir BANJANAC, Aleksandar DRAGIĆ,
Vladimir UDOVIČIĆ, Nikola VESELINOVIĆ, Ivan ANIČIN
Institut za fiziku, Beograd, Srbija, maletic@ipb.ac.rs

ABSTRACT

In this paper we show the composition of cosmic rays stopped in plastic scintillators we get using Monte Carlo simulations. Cosmic ray spectrum we get using Monte Carlo simulations using CORSIKA. Simulation of plastic scintillators we get using Geant4. A detailed simulation was part of efforts in analysis of data we get from continuous monitoring of Cosmic rays in Low background laboratory for Nuclear physics where we wanted to find out which part of scintillator signal comes from muons and which part from other particles.

REZULTATI INTERKOMPARACIJE ODREĐIVANJA SADRŽAJA RADIONUKLIDA U VODI I ZEMLJIŠTU IAEA-2011-03

Dubravka VUKOVIĆ¹, Gordana PANTELIĆ^{1,2}, Mihajlo VIĆENTIJEVIĆ¹

1) Naučni Institut za Veterinarstvo Srbije, Beograd, dubakaiva@gmail.com

2) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd

SADRŽAJ

U radu su prikazani rezultati učešća naše laboratorije u međunarodnoj interkomparaciji merenja aktivnosti radionuklida u jednom uzorku zemljišta i 3 uzorka vode organizovanog od strane MAAE. Organizator interkomparacije je kod ocenjivanja rezultata laboratorija učesnica uzimao u obzir tačnost i preciznost poslatih rezultata, koja uključuje kombinovanu mernu nesigurnost dobijenih rezultata i referentnih vrednosti. Naši rezultati su za većinu radionuklida (93 %) ispunili oba postavljena zahteva za tačnost i preciznost merenja.

1. Uvod

Interkomparacije koje organizuje Međunarodna agencija za atomsku energiju (MAAE) iz Beča su dobar način da se proveri kvalitet rada laboratorija. Na osnovu SRPS ISO/IEC 17025 [1] ovaj vid eksterne kontrole je obavezan za akreditovane laboratorije. Učešćem u međunarodnoj interkomparaciji akreditovana laboratorija potvrđuje tačnost i pouzdanost akreditovane metode. Laboratorija za radijacionu higijenu Naučnog instituta za veterinarstvo u Beogradu učestvuje u međunarodnim interkomparacijama od 2002. godine.

Tri uzorka vode i jedan uzorak zemljišta distribuiran je zainteresovanim laboratorijama u 2011. godini u okviru međunarodne interkomparacije IAEA-2011-03. U uzorcima vode (površinske, spajkovane sa smešom radionuklida i zakiseljena azotnom kiselinom) je bilo potrebno odrediti Co-60, Ba-133, Cs-134, Cs-137, Eu-152 i Am-241. U uzorku zemljišta (obično zemljište, niske radioaktivnosti) je trebalo odrediti K-40, Cs-137, Tl-208, Pb-210, Pb-214, Bi-214, Ra-226, Ac-228, U-238, U-235 i U-234. Organizator interkomparacije je kod ocenjivanja rezultata laboratorija učesnica koristio standardne parametre (tačnost i preciznost), koji su se koristili i u prethodnim interkomparacijama [2, 3]. Konačan rezultat zavisi od ukupne merne nesigurnosti referentne vrednosti koju daje MAAE i vrednosti koju je prikazala laboratorija učesnica interkomparacije.

Tačnost se računa prema formuli (1), a preciznost prema formuli (2):

$$u = \frac{|A_s - A_l|}{\sqrt{u_s^2 + u_l^2}} \quad (1)$$

$$P = \sqrt{\left(\frac{u_s}{A_s}\right)^2 + \left(\frac{u_l}{A_l}\right)^2} \cdot 100\% \quad (2)$$

gde su:

A_l - rezultat laboratorije učesnice interkomparacije,

A_s - referentna vrednost MAAE,

u_l - kombinovana merne nesigurnost laboratorije učesnice interkomparacije

u_s - kombinovana merne nesigurnost referentne vrednosti MAAE.

Svakom rezultatu pridružuje status prihvatljiv (A) ili neprihvatljiv (N) u zavisnosti da li je predviđen kriterijum ispunjen [2, 3]. U ovoj interkomparaciji kriterijum za tačnost je da je vrednost $u \leq 2.58$.

Kriterijum za preciznost je $P \leq 15\%$ za Co-60 i Eu-152, a $P \leq 20\%$ za ostale radionuklide u vodi, dok je za zemljište $P \leq 20\%$ za sve radionuklide.

U slučaju kada je postignuta zadovoljavajuća tačnost i preciznost prihvatljivost je obeležena sa A, ako oba kriterijuma nisu ispunjena rezultat je neprihvatljiv (N). Ukoliko jedan od dva parametra nije ispunjen, računa se relativno odstupanje aktivnosti (RB) prema formuli (3):

$$RB = \frac{(A_s - A_t) * 100}{A_s} \quad (3)$$

koje se upoređuje sa granicama koje su unapred određene, apsolutna vrednost $|RB| \leq 15\%$ za Co-60 i Eu-152 i $|RB| \leq 20\%$ za ostale radionuklide u vodi, a za zemljište je $|RB| \leq 20\%$ za sve radionuklide [4]. Ukoliko je $|RB|$ ispod ove unapred definisane granice, rezultat se prihvata sa upozorenjem (W), u suprotnom je N (neprihvatljiv).

2. Metode merenja

Uzorci vode i zemljišta su pripremljeni u skladu sa preporukama organizatora. Mereni su na HPGe poluprovodničkom detektoru ORTEC relativne efikasnosti 30% i rezolucije 1.80 keV na energiji od 1332.5 keV. Kalibracija detektora za merenje uzoraka vode vršena je referentnim standardom od 500 cm³ u marineli geometriji Češkog metrološkog instituta (tip MBSS 2, sertifikat 9031-OL-49/10 od 3.08.2010. godine). Merenje uzorka zemljišta vršeno je u cilindričnoj geometriji zapremine 100 cm³, a kalibracija je obavljena sa uzorkom zemljišta iz ranije interkomparacije [3]. Uzorci su mereni više puta od 75000s do 250000s. Korekcije su izvršene na datum 15.11.2011. Rezultati su dati sa kombinovanom mernom nesigurnošću na nivou poverenja k=1. Kod proračuna merne nesigurnosti najveći doprinos je bio od merne nesigurnosti faktora efikasnosti dobijenih u toku kalibracije i merne nesigurnosti odbroja u piku totalne apsorpcije dobijeni tokom merenja uzorka. Ukupna merna nesigurnost za pojedine radionuklide merene u uzorcima vode se kretala od 4% do 12%, a u uzorcima zemljišta od 5% do 14%.

3. Rezultati

U prikazanim tabelama su date izmerene vrednosti prirodnih i proizvedenih radionuklida u uzorcima vode i zemljišta, kao i referentne vrednosti MAAE, njihov odnos i prihvatljivost rezultata [4]. U svim uzorcima vode rezultati su bili u okviru prihvatljivih granica, što nam ukazuje na dobru kalibraciju i mogućnost merenja niskih aktivnosti.

Tabela 1. Rezultati analize sadržaja radionuklida u uzorku vode broj 1 u odnosu na MAAE vrednosti i njihova prihvatljivost

Radionuklid	MAAE vrednost (Bq/kg)	Lab. vrednost (Bq/kg)	Odnos Lab./MAAE	Prihvatljivost
Am -241	4.7 ± 0.1	4.93 ± 0.48	1.05	A
Ba - 133	5.0 ± 0.1	5.06 ± 0.42	1.01	A
Co-60	15.3 ± 0.2	15.9 ± 0.8	1.04	A
Cs-134	7.7 ± 0.1	7.37 ± 0.33	0.96	A
Cs-137	6.2 ± 0.1	7.01 ± 0.30	1.13	A
Eu-152	15.4 ± 0.2	15.1 ± 0.8	0.98	A

Tabela 2. Rezultati analize sadržaja radionuklida u uzorku vode broj 2 u odnosu na MAAE vrednosti i njihova prihvatljivost

Radionuklid	MAAE vrednost (Bq/kg)	Lab. vrednost (Bq/kg)	Odnos Lab./MAAE	Prihvatljivost
Am -241	2.4 ± 0.1	2.42 ± 0.30	1.01	A
Ba – 133	2.5 ± 0.1	2.43 ± 0.20	0.98	A
Co-60	7.6 ± 0.1	8.25 ± 0.42	1.09	A
Cs-134	3.8 ± 0.1	3.77 ± 0.19	0.99	A
Cs-137	3.1 ± 0.1	3.49 ± 0.22	1.13	A
Eu-152	7.7 ± 0.1	7.99 ± 0.50	1.04	A

Tabela 3. Rezultati analize sadržaja radionuklida u uzorku vode broj 3 u odnosu na MAAE vrednosti i njihova prihvatljivost

Radionuklid	MAAE vrednost (Bq/kg)	Lab. vrednost (Bq/kg)	Odnos Lab./MAAE	Prihvatljivost
Am -241	3.3 ± 0.1	3.71 ± 0.42	1.12	A
Ba - 133	3.5 ± 0.1	3.28 ± 0.30	0.94	A
Co-60	10.7 ± 0.2	11.25 ± 0.57	1.05	A
Cs-134	5.4 ± 0.1	5.32 ± 0.36	0.99	A
Cs-137	4.4 ± 0.1	4.86 ± 0.24	1.10	A
Eu-152	10.8 ± 0.2	10.42 ± 0.61	0.96	A

U uzorku zemljišta svi radionuklidi osim Bi-214 i Ra-226 su tačno određeni. Uran -234 koji je većina laboratorija radila alfaspektrometrijski, u našoj laboratoriji određen je sa visokom preciznošću gamaspektrometrijski. Masa uzorka zemljišta za merenje je iznosila 100 g, a kalibracija je određena sa sličnim uzorkom dobijenim u interkomparaciji 2009. godine [3] u kome su radionuklidi imali nisku aktivnost, što doprinosi težem izračunavanju niskih aktivnosti prirodnih radionuklida u ovom uzorku.

Tabela 4. Rezultati analize sadržaja radionuklida u uzorku zemljišta u odnosu na MAAE i njihova prihvatljivost

Radionuklid	MAAE vrednost (Bq/kg)	Lab. vrednost (Bq/kg)	Odnos $\frac{Lab.}{MAAE}$	RB (%)	Tačnost	Preciznost	Prihvatljivost
Ac-228	41.0 ± 2.0	37.1 ± 1.9	0.90	9.51	A	A	A*
Bi-214	50.0 ± 2.8	35.6 ± 1.9	0.71	28.8	N	A	N
Cs-137	14.4 ± 0.6	16.8 ± 0.8	1.17	16.67	A	A	A
K-40	485 ± 11	542 ± 34	1.12	11.75	A	A	A
Pb-210	42.6 ± 2.2	47.4 ± 6.6	1.11	11.27	A	A	A
Pb-212	36.5 ± 1.6	37.6 ± 2.4	1.03	3.01	A	A	A
Pb-214	50.0 ± 3.8	38.4 ± 2.6	0.77	23.2	A	A	A
Ra-226	50.2 ± 2.0	36.6 ± 2.0	0.73	27.09	N	A	N
Tl-208	13.0 ± 0.7	11.36 ± 0.96	0.87	12.69	A	A	A
U-234	26.4 ± 2.0	29.0 ± 3.5	1.10	9.85	A	A	A

*A- prihvatljiv rezultat; N- neprihvatljiv rezultat

Prilikom izračunavanja aktivnosti radionuklida u zemljištu nisu vršene korekcije na koincidentno sumiranje, što može objasniti niže dobijene vrednosti za aktivnost Bi-214. Rezultati ove interkomparacije su iskorišćeni za korekciju krive efikasnosti detektora za merenje aktivnosti zemljišta u cilindričnoj geometriji.

4. Zaključak

Dobri rezultati dobijeni učešćem u međunarodnoj interkomparaciji koju je organizovala Međunarodna agencija za atomsku energiju iz Beča potvrdili su tačnost i pouzdanost gamaspektrometrijske metode za koju smo akreditovani. U svim uzorcima vode rezultati su bili u okviru prihvatljivih granica, što nam ukazuje na dobru kalibraciju i mogućnost merenja niskih aktivnosti. Osam od 10 radionuklida u zemljištu je ispunilo oba testa tačnosti i preciznosti, tako da se korišćena kalibracija, korigovana sa rezultatima ove interkomparacije, može koristiti za merenje uzoraka zemljišta.

5. Literatura

- [1] Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje, SRPS ISO/IEC 17025, Zavod za standardizaciju, Beograd, 2006
- [2] Shakhashiro, A., Fajgelj, A., Sansone, U. Comparison of different approaches to evaluate proficiency test data. In: Combining and Reporting Analytical Results. RSC Publishing, Cambridge, 2006, 220–228.
- [3] Worldwide Open Proficiency Test: Determination of Natural and Artificial Radionuclides in Moss-Soil and Water, IAEA-CU-2009-03, IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications No. 22, IAEA, 2012
- [4] Preliminary result of IAEA-TEL-2011-03 World wide open proficiency test, IAEA, 2012

PROFICIENCY TEST ON THE DETERMINATION OF GAMMA EMITTING RADIONUCLIDES IN WATERS AND SOIL IAEA-2011-03

Dubravka VUKOVIĆ¹, Gordana PANTELIĆ^{1,2}, Mihajlo VIĆENTIJEVIĆ¹,

1) Institute of Veterinary Medicine of Serbia, Belgrade

2) Univeristy of belgrade, Institute of Nuclear Science " Vinča", Belgrade

ABSTRACT

The paper presents the results obtained in our laboratory during the participation at proficiency tests for the measurement radionuclides in one soil and three water samples organised by IAEA. The proficiency testing scoring system applied by IAEA takes into consideration the trueness and the precision of the reported data and it includes in the evaluation both the total combined uncertainty associated with the target value of proficiency testing samples and the total uncertainty reported by the participating laboratories. In most cases (93%) our laboratory satisfy the acceptance conditions.

ИСТРАЖИВАЊЕ КВАЛИТЕТА ГАМАСПЕКТРОМЕТРИЈСКИХ МЕРЕЊА

Јан ХАНСМАН, Иштван БИКИТ, Јарослав СЛИВКА,
Мирослав ВЕСКОВИЋ, Миодраг КРМАР, Наташа ТОДОРОВИЋ,
Душан МРЂА, Софија ФОРКАПИЋ, Јована НИКОЛОВ
*Природно-математички факултет, Лабораторија за нуклеарну физику,
Нови Сад, Србија, jan.hansman@df.uns.ac.rs*

САДРЖАЈ

Мерења су извршена германијумским детектором високе чистоће (HPGe) који се налази у заштити од гвожђа ливеног пре другог светског рата. Мерења су трајала преко једне ноћи (око 65000 секунди). Одређене су концентрације активности Cs-137, K-40, Ra-226 и Th-232.

1. Увод

Мерења у нуклеарној физици су значајна у фундаменталним истраживањима а такође и у екологији, медицинској физици, заштити животне средине и другим примењеним областима. Због тога је важно детаљно познавати карактеристике мерног система. Познавање концентрације радионуклида у природи је значајно са еколошко- здравственог аспекта. Због развоја нуклеарне енергетике као и због употребе радиоактивних изотопа у индустрији и медицини, повећавају се опасности од радиоактивног загађења животне средине. Прецизним мерењем, често веома малих концентрација активности радионуклида, омогућава се праћење процеса њиховог транспорта у реалним условима - у земљишту, води и атмосфери према живим организмима а за то је потребно имати стабилан и квалитетан систем за мерење и праћење концентрације активности радионуклида у животној средини.

2. Експериментални рад

Мерења су извршена полупроводничким детектором чија је активна запремина израђена од германијума високе чистоће (HPGe), произвођача CANBERRA, модел G.C.2520-7600s1S, серијски број b87053. Релативна ефикасност детектора је 22,4%, резолуција 1,76 keV FWHM на 1,33 MeV а однос Peak/Compton 56,4:1 (подаци са тестирања IEEE standard test ANSI/IEEE std325-1996 од 18. јуна 2002. г.). Величина детектора је 51 mm у пречнику и 58,5 mm у дужини. Активна површина према прозору је 20,4 cm² а удаљеност од прозора је 5 mm. Радна температура је 77 K и одржава се помоћу криостата типа Horizontal dipstick type 7600sl Special 6` Endcap, који је у контакту са течним азотом који се чува у Dewar-овом суду.

3. Резултати

Идеја о мерењу једног узорка више пута на детектору у Fe заштити је настала због потребе провере рада тог система, јер на њему се јавља највише проблема услед делова система који имају доста година. Наиме на том детектору се најчешће јавља померање калибрације и услед најмање ефикасности самог детектора и велике запремине пасивне заштите, се очекују највећа одступања између резултата. Као узорак је узета земља са површине сса 50x50 cm и дубине од 0-15 cm. Земља је из баште породичне куће у Бачком Петровцу. Сваке године се у башти искористи сса 250 kg/ha НПК 15:15:15 ђубрива и око 300 kg/ha уреа-е. Земља је уситњена и осушена на 105°C до константне масе. После сушења је узорак поново измешан и уситњен у авану на прах и онда упакован у две стандардне кутијице за мерење, димензија 70x31 mm (укупно 70x62 mm). Узорак је остао стално упакован и кутијице нису отворане између појединачних мерења. Маса узорка који је мерен је износила 299,9 грама. Спектри су снимани преко ноћи, у просеку око 65000 секунди. Прво мерење од 50 је урађено у ноћи између 21. и 22. октобра 2010. године. Последње мерење из серије је урађено у ноћи између 10. и 11. фебруара 2011. године. За обраду снимљених спектра је

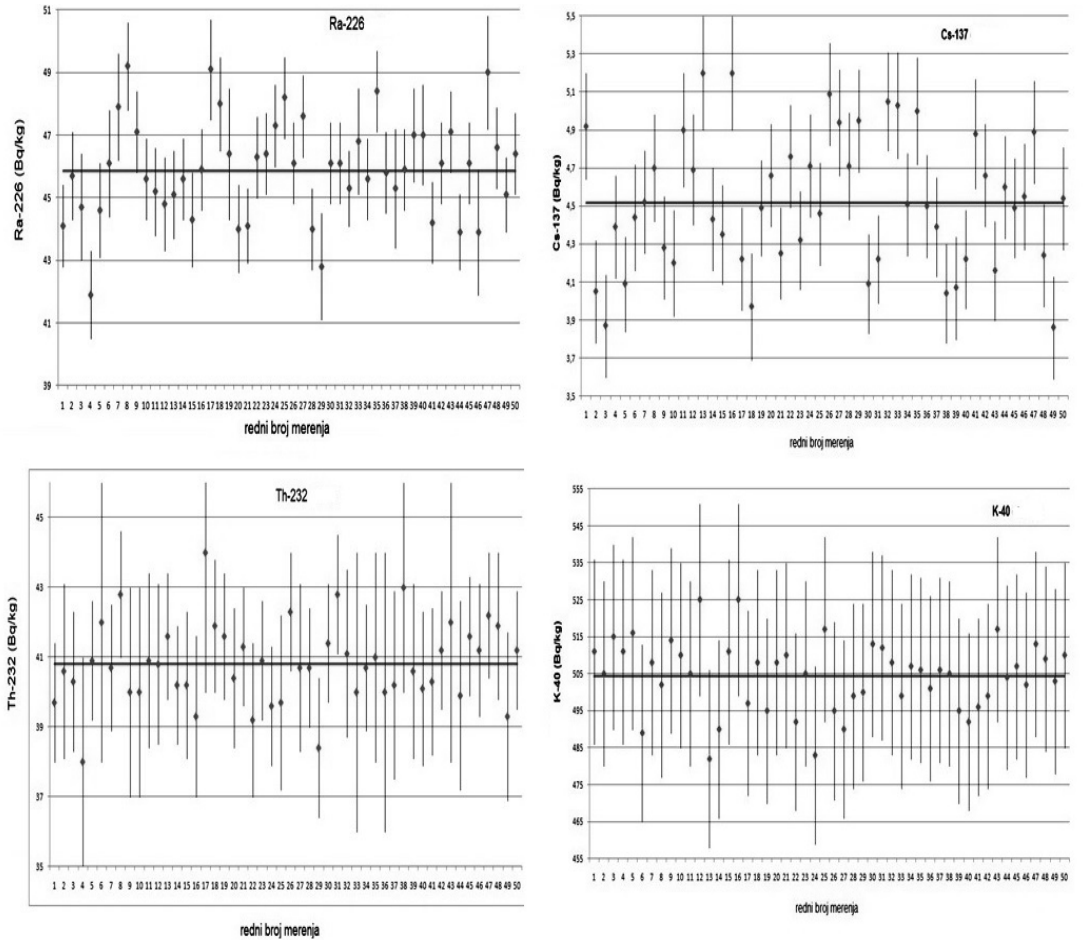
коришћен програм Гение 2000. Параметри за обраду спектра су били исти за све снимљене спектре. Као фонски спектар приликом обраде резултата је коришћен фонски спектар снимљен 31.децембра 2008. године (259628 секунди).

Табела 1 - Резултати мерења активности узорка

р.бр.	шифра спектра	концентрација активности $\pm 1,6 \sigma$ (Bq/kg)			
		Ra-226	Th-232	K-40	Cs-137
1	MJH101021	44.1 \pm 1.3	39.7 \pm 1.7	511 \pm 25	4.92 \pm 0.28
2	MJH101025	45.7 \pm 1.4	40.6 \pm 2.5	505 \pm 25	4.05 \pm 0.27
3	MJH101026	44.7 \pm 1.7	40.3 \pm 2.0	515 \pm 25	3.87 \pm 0.27
4	MJH101027	41.9\pm1.4	38\pm3	511 \pm 25	4.39 \pm 0.27
5	MJH101028	44.6 \pm 1.5	40.9 \pm 1.7	516 \pm 26	4.09 \pm 0.15
6	MJH101101	46.1 \pm 1.7	42 \pm 4	489 \pm 24	4.44 \pm 0.28
7	MJH101102	47.9 \pm 1.7	40.7 \pm 1.8	508 \pm 25	4.52 \pm 0.27
8	MJH101103	49.2\pm1.4	42.8 \pm 1.8	502 \pm 25	4.70 \pm 0.28
9	MJH101104	47.1 \pm 1.3	40 \pm 3	514 \pm 25	4.28 \pm 0.27
10	MJH101108	45.6 \pm 1.3	40 \pm 3	510 \pm 25	4.20 \pm 0.28
11	MJH101109	45.2 \pm 1.4	40.9 \pm 2.5	505 \pm 25	4.9 \pm 0.3
12	MJH101110	44.8 \pm 1.5	40.8 \pm 2.3	525\pm26	4.69 \pm 0.29
13	MJH101111	45.1 \pm 1.4	41.6 \pm 1.8	482\pm24	5.2\pm0.3
14	MJH101201	45.6 \pm 1.3	40.2 \pm 1.7	490 \pm 24	4.43 \pm 0.27
15	MJH101202	44.3 \pm 1.5	40.2 \pm 2.1	511 \pm 25	4.35 \pm 0.26
16	MJH101206	45.9 \pm 1.3	39.3 \pm 2.3	525\pm26	5.2\pm0.3
17	MJH101207	49.1 \pm 1.6	44\pm4	497 \pm 25	4.22 \pm 0.27
18	MJH101208	48.0 \pm 1.5	41.9 \pm 1.9	508 \pm 25	3.97 \pm 0.28
19	MJH101209	46.4 \pm 2.1	41.6 \pm 1.8	495 \pm 25	4.49 \pm 0.25
20	MJH101214	44.0 \pm 1.4	40.4 \pm 2.0	508 \pm 25	4.66 \pm 0.27
21	MJH101215	44.1 \pm 1.2	41.3 \pm 1.7	510 \pm 25	4.25 \pm 0.24
22	MJH101217	46.3 \pm 1.3	39.2 \pm 2.2	492 \pm 24	4.76 \pm 0.27
23	MJH101218	46.4 \pm 1.3	40.9 \pm 1.7	505 \pm 25	4.32 \pm 0.26
24	MJH101220	47.3 \pm 1.3	39.6 \pm 1.7	483 \pm 24	4.71 \pm 0.27
25	MJH101221	48.2 \pm 1.3	39.7 \pm 2.5	517 \pm 25	4.46 \pm 0.27
26	MJH101222	46.1 \pm 1.3	42.3 \pm 1.7	495 \pm 24	5.09 \pm 0.27
27	MJH101223	47.6 \pm 1.3	40.7 \pm 2.4	490 \pm 24	4.94 \pm 0.28
28	MJH101227	44.0 \pm 1.3	40.7 \pm 1.7	499 \pm 25	4.71 \pm 0.28
29	MJH101228	42.8 \pm 1.7	38.4 \pm 2.0	500 \pm 24	4.95 \pm 0.27
30	MJH101229	46.1 \pm 1.3	41.4 \pm 1.7	513 \pm 25	4.09 \pm 0.26
31	MJH101230	46.1 \pm 1.3	42.8 \pm 1.7	512 \pm 25	4.22 \pm 0.23
32	MJH110104	45.3 \pm 1.2	41.1 \pm 2.4	508 \pm 25	5.05 \pm 0.26
33	MJH110110	46.8 \pm 1.7	40 \pm 4	499 \pm 25	5.03 \pm 0.28
34	MJH110111	45.6 \pm 1.3	40.7 \pm 1.8	507 \pm 25	4.51 \pm 0.27
35	MJH110112	48.4 \pm 1.3	41 \pm 3	506 \pm 25	5.00 \pm 0.28
36	MJH110113	45.8 \pm 1.3	40 \pm 4	501 \pm 25	4.50 \pm 0.27
37	MJH110117	45.4 \pm 1.9	40.2 \pm 2.7	506 \pm 25	4.39 \pm 0.26
38	MJH110118	45.9 \pm 1.3	43 \pm 3	505 \pm 25	4.04 \pm 0.26
39	MJH110119	47.0 \pm 1.5	40.6 \pm 2.5	495 \pm 25	4.07 \pm 0.27
40	MJH110120	47.0 \pm 1.6	40.1 \pm 2.2	492 \pm 24	4.22 \pm 0.26

Табела 1 - наставак

41	МЈН110124	44.2±1.3	40.3±2.1	496±24	4.88±0.29
42	МЈН110126	46.1±1.3	41.2±1.7	499±25	4.66±0.27
43	МЈН110127	47.1±1.3	42±4	517±25	4.16±0.26
44	МЈН110131	43.9±1.2	39.9±2.7	504±25	4.60±0.27
45	МЈН110201	46.1±1.3	41.6±1.7	507±25	4.49±0.26
46	МЈН110203	43.9±2.0	41.2±1.9	502±25	4.55±0.28
47	МЈН110204	49.0±1.8	42.2±1.8	513±25	4.89±0.27
48	МЈН110208	46.6±1.3	41.9±2.1	509±25	4.24±0.27
49	МЈН110209	45.1±1.2	39.3±2.4	503±25	3.86±0.27
50	МЈН110210	46.4±1.3	41.2±1.7	510±25	4.54±0.27



Слика 1 - Графички приказ резултата

4. Закључак

Извршена анализа спектра је показала да се практично резултати од свих 50 мерења преклапају са средњом вредношћу у оквиру грешке од 1,6 σ . Највећи број резултата са једне стране средње вредности је код Ra-226 и износи 6, што је испод границе упозорења која износи 7 тачака са једне стране. Код Cs-137, K-40 и Th-232 има по највише 4 узастопних резултата са једне стране средње вредности [5]. Друга могућност за испитивање, би била, да се узорак сваки пут испразни из кутијица за мерење и поново упакује у исту геометрију и да се тако види да ли би дошло до неких значајнијих разлика у резултатима. Таква мерења би било погодније урадити на неком од детектора у оловној заштити због могућности убацивања гасног азота у заштиту и избацивања радона из заштите. Такође би се осим наведених, могла посматрати и концентрација U-238 у узорку, што би било интересантно због коришћења НПК дубрива на земљишту, јер је познато да често у фосфатним сировинама од којих се праве вештачка ђубрива, има знатних концентрација U-238, који често и није у равнотежи са Ra-226 и осталим потомцима. За то би били погоднији детектори са берилијумским прозором који имају бољу ефикасност, посебно на енергијама до 100 keV-а где се налазе гама линије U-238. Треба напоменути да се контрола квалитета стандардно ради са по 20 узорака, па са овом контролом од 50 узорака, добијени позитивни резултати још више добијају на значају.

5. Литература

- [1] J.Сливка, И.Бикит, М.Весковић, Љ.Чонкић-Гама-спектрометрија, специјалне методе и примене, Универзитет у Новом Саду, 2000
- [2] Leo,W.R.-Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg,New York,1994.
- [3] GENIE 2000 spectroscopy software 3.0,operations manual,Canberra industries 2004
- [4] GERMANIUM DETECTORS,user's manual, Canberra industries 2003
- [5] Интерна контрола квалитета у лабораторијама за животну средину - приручник

RESEARCH OF GAMASPECTROMETRIC MEASUREMENTS QUALITY

Jan HANSMAN, Ištvan BIKIT, Jaroslav SLIVKA, Miroslav VESKOVIĆ, Miodrag KRMAR,
Nataša TODOROVIĆ, Dušan MRĐA, Sofija FORKAPIĆ, Jovana NIKOLOV
Faculty of Science, Department of Nuclear Physics, Novi Sad, Serbia,
jan.hansman@df.uns.ac.rs

ABSTRACT

Measurments are performed with high purity germanium detector (HPGe) in passive iron shield with iron made before WW II. Measurment last through one night (cca 65000 s). Main goal was to determine activity concentration of Cs-137, K-40, Ra-226 and Th-232.

ПРОЈЕКТОВАЊЕ ЗАШТИТЕ ЗА НИСКОФОНСКИ СПЕКТРОМЕТАР WETYN (WELL TYPE NATRIUM IODIDE)

**Јан ХАНСМАН, Иштван БИКИТ, Јарослав СЛИВКА,
Мирослав ВЕСКОВИЋ, Миодраг КРМАР, Наташа ТОДОРОВИЋ, Душан МРЂА, Софија
ФОРКАПИЋ, Јована НИКОЛОВ**

*Природно-математички факултет, Лабораторија за нуклеарну физику,
Нови Сад, Србија, jan.hansman@df.uns.ac.rs*

САДРЖАЈ

Потреба за брзим, ефикасним, прецизним и квалитетним мерењем рутинских узорака је циљ сваке лабораторије која се бави услужним гамаспектрометријским мерењима. Управо за то може служити велики 9''x 9'' NaI(Tl) детектор велике ефикасности. У овом раду је описан поступак изградње цилиндричне оловне заштите, са освртом на различите могућности облика и материјала.

1. Увод

Сваки тип детектора гама зрака има одређене предности и одређене мане у односу на остале типове детектора. У почетку незаменљиви NaI(Tl) сцинтилациони детектори све више су уступали место најпре Ge(Li) а сада HPGe (High-Purity Germanium) детекторима. У данашње време надмоћна резолуција германијумских детектора је практично сасвим из употребе истиснула NaI(Tl) сцинтилационе детекторе, али ипак у неким пољима примене су ови детектори још увек незаменљиви. Једна од главних предности у односу на германијумске детекторе је могућност рада ових детектора на нормалним температурама без потребе за хлађењем на температуру течнок азота. Такође се NaI(Tl) детектори могу направити у било ком облику и величини што није случај са германијумским кристалима.

Раније је важна предност NaI(Tl) детектора била и њихова велика ефикасност у односу на Ge детекторе, но данас се већ и Ge детектори праве са ефикасношћу које су упоредиве или чак и веће него код 3''x 3'' NaI(Tl). Један такав детектор се налази и у Лабораторији за нуклеарну физику у Новом Саду ефикасности 100,6%.

Од краја 1980-их година у Лабораторији за нуклеарну физику у Новом Саду се налази и 9''x 9'' NaI(Tl) који се углавном користио као активна или пасивна заштита Ge детектора у 25 cm гвозденој заштити, но већ давно је ван употребе због непостојања пасивне заштите за њега. Једна од опција би била ставити овај детектор у масивну 25 cm Fe заштиту, али се тамо већ налази Ge детектор, који је у редовној употреби. Само стављање узорака би било јако компликовано и стављање овог детектора у заштиту би утицало на фон самог германијумског детектора. Зато је за редовну употребу овог 9''x 9'' NaI(Tl) детектора потребно направити посебну заштиту.

2. Пројектовање заштите

Као ефикасна заштита детектора могу да се користе олово, гвожђе, бетон са оловним струготинама или жива. Жива је најнепрактичнији материјал пошто се за њу мора направити непропусни суд а и токсична је у случају да дође до цурења. Бетон са оловним струготинама, где олова иде око 10%, је вероватно најјефтинија опција за прављење заштите, али је потребна велика дебљина зидова такве заштите па тиме је и заштита кабаста. Такође је потребно унутрашњи слој од барем 5 cm направити од чистог олова, јер сви материјали који се користе за израду бетона имају у себи природних радионуклида. Зато ове опције нису ни озбиљно разматране за израду пасивне заштите детектора.

Материјали који су долазили у обзир за заштиту су гвозђе, гвоздене цигле, олово, оловне цигле или комбинација 5-10 cm олова са спољашње стране заштите са 10-15 cm гвозђа са унутрашње стране.

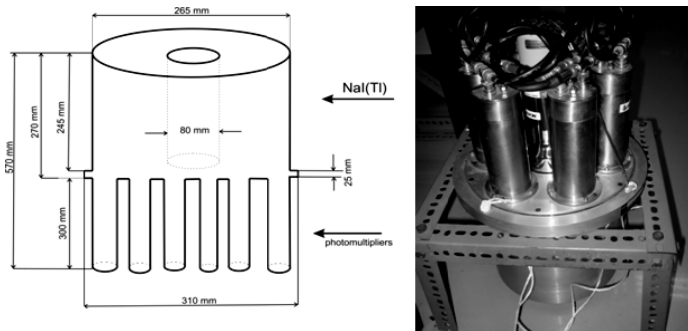
Најјефтинија опција је заштита од гвозђа, које је лако доступно и релативно се лако пронађе чисто, без контаминације вештачким радионуклидима. У свакој већој ливници се могу излити жељени облици или исећи потребни комади од гвоздених табли. Непрактичност овакве заштите је велика запремина и тежина заштите, јер је потребно да зидови буду 25 cm дебели. У случају прављења цилиндричне заштите за 9×9 NaI(Tl) детектор, било би потребно 3650 килограма гвозђа а у случају заштите кубног облика 5500 килограма гвозђа. Овде још долази у питање и приступност детектору и делу за стављање узорка. Једина предност оваквог система је што у спектру нема доприноса X-линија од олова на ниским енергијама и није потребно стављање танких лимова кадмијума или калаја и бабра између заштите и детектора.

Прављење заштите од олова има више опција. Једна од њих је изливање оловних цигли и облагање целог детектора помоћу њих. Предност овакве заштите је њено релативно једноставно састављање и растављање и једноставно изливање оловних цигли, пошто се све цигле могу изливати по истом калупу. Проблем настаје код отварања заштите и стављања узорка за мерење, јер је потребно померати велики број цигли. Једина опција у оваквом случају је да детектор буде постављен хоризонтално а цигле од отвора да буду на колицима која би се по шинама могла померати и отварати приступ детектору и мереном узорку.

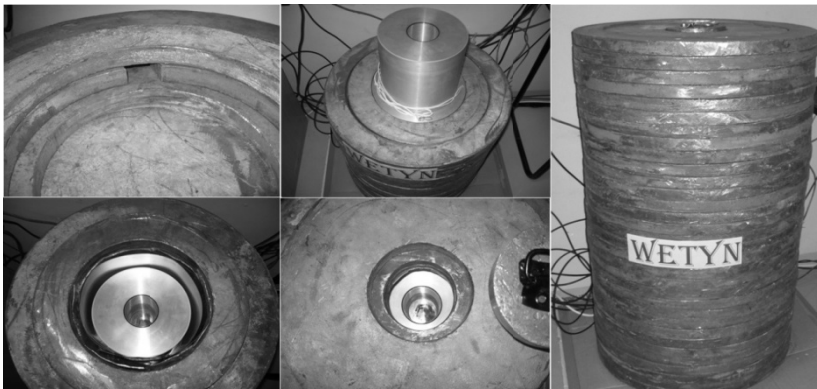
Други метод је изливање оловних прстенова из сегмената који би се уклапали један у други што је теоретски једноставно, али у пракси није лако изводљиво, јер је потребна велика прецизност приликом израде сваког сегмента и њиховог уклапања. Показало се касније, да је била добра одлука одустати од овакве врсте прављења заштите, јер је за добијање прецизних сегментираних прстенова потребна посебна дорада после изливања олова, која отежава, продужава и поскупује процес израде.

Изливање прстенова од олова за заштиту детектора мале запремине, као што су германијумски детектори или 3×3 NaI(Tl), је прилично једноставно. Но то није случај за велики 9×9 NaI(Tl) (слика 1), јер су прстенови великог пречника и самим тим ако би били из једног дела, били би тешки 75-100 килограма. То наравно не би био велики проблем, али је циљ израде ове заштите, осим да зидови буду 15 cm, такође био и да буде релативно лако склопива и ако је потребно, да се може преместити без употребе тешких машина.

Да би се испунили наведени услови, пројектовање и изградња заштите су извршени поделом оловног прстена на два концентрична прстена. Ширина спољашњег прстена је 7 cm а унутрашњег 8 cm, док је дебелина прстенова 3 cm. Тиме су сви делови заштите приближно исте масе од 36-40 килограма, осим 5 горњих унутрашњих прстенова који имају 52 килограма, али тиме је омогућено да поклопци за стављање узорка буду подељени на два дела тежине по око 10 килограма. Укупна тежина заштите је 2622 килограма а цена израде је око 3-5 пута мања од куповине комерцијалне заштите за овакав тип детектора. Заштита је изнутра обложена лимовима од 2 милиметра калаја домаће производње и 1 милиметра комерцијалног бакарног лима, због редукције X-флуоресцентног зрачења олова и тиме побољшања граница детекције на ниским енергијама. Лим од калаја је изливен топљењем калајних шипки на бакарним лимовима и потапањем у хладну воду, чиме је дошло до раздвајања калаја и бабра, јер није било могуће купити калајне лимове у Србији а калајни лимови из увоза су били јако скупи (и до 4000 долара). Комбинација калаја и бабра је одабрана због лакше доступности и цене материјала а кадмијум је такође избегнут и због своје токсичности.



Слика 1 - Шема и изглед 9''x9'' NaI(Tl)



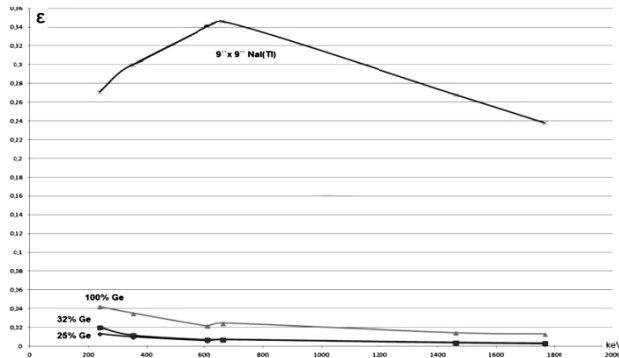
Слика 2 - Изглед склопљене детекторске заштите за 9''x9'' NaI(Tl) у Лабораторији за нуклеарну физику, Нови Сад

3. Резултати

Целокупна маса детектора је око 50 килограма и садржи 6 фотомултипликатора. Сви фотомултипликатори су првобитно тестирани и подешени да појединачно дају сигнале у истим каналима спектра. Један 3''x3'' NaI(Tl) детектор је стављен унутар отвора великог детектора са доње стране. Сигнали из оба детектора се сабирају и воде у појачавач и даље у вишеканални анализатор и рачунарски софтвер Genie-2000.

За енергијски интервал 50 keV-6 MeV, смањење укупне брзине бројања детектора у заштити у односу на детектор без штита је око 80 пута колико је редукована и најинтензивнија линија у фонском спектру K^{40} (1460,8 keV). На вишим енергијама (нпр. 2614,5 keV и 3189 keV) интензитет линија унутар заштите је редукован до чак 170 пута.

Фотопик ефикасност детекције гама зрачења оваквог система је неупоредиво већа (20-100 пута) од ефикасности најбољих Ge детектора (слика 3).



Слика 3 - Упоређење ефикасности 9'' x 9'' NaI(Tl) са ефикасношћу Ge детектора

4. Закључак

Предности оваког детекторског система су: велика осетљивост детектора, кратко време мерења, систем је оперативан на собној, лако и једноставно припремање узорка за мерење.

Овакав ултра-нискофонски детекторски систем са изузетно високом ефикасношћу детекције, омогућава одређивање ниских концентрација радионуклида у различитим узорцима за релативно кратка времена мерења, што је од великог значаја у примењеним истраживањима интердисциплинарног карактера, као и проучавање ретких нуклеарних процеса значајних за фундаментална истраживања у физици и астрофизици.

5. Литература

- [1] J.Сливка, И.Бикит, М.Весковић, Ј.Чонкић-Гама-спектрометрија, специјалне методе и примене, Универзитет у Новом Саду, 2000
- [2] D.Mrđa, I.Bikit, I.Anićin, J.Slivka, J.Hansman, N.Žikić-Todorović, E.Varga, S.Ćurčić, J.Puzović-BACKGROUND REDUCTION USING Fe AND Pb SHIELDING, Fifth General Conference of the Balkan Physical Union BPU-5, Vrnjačka Banja 2003., Serbian Physical Society, Belgrade, 2003
- [3] CANBERRA SYSTEM CONSIDERATIONS with High Resolution Detectors - applications note
- [4] Gordon R.Gilmore-Practical Gamma-ray Spectrometry 2nd Edition, Nuclear Training Services Ltd, Warrington, UK, John Wiley & Sons Ltd, 2008

SHIELDING DESIGN FOR LOW BACKGROUND LEVEL DETECTOR WETYN (WELL TYPE NARIUM IODIDE)

Jan HANSMAN, Ištvan BIKIT, Jaroslav SLIVKA, Miroslav VESKOVIĆ, Miodrag KRMAR, Nataša TODOROVIĆ, Dušan MRĐA, Sofija FORKAPIĆ, Jovana NIKOLOV
Faculty of Science, Department of Nuclear Physics, Novi Sad, Serbia, jan.hansman@df.uns.ac.rs

ABSTRACT

Need for fast, efficient, accurate and quality measurement of routine samples is the goal of every laboratory engaged in service gamma-spectrometric measurements. 9'' x 9'' NaI (Tl) detector is exactly design for it. This paper describes the process of building a cylindrical lead shielding, with emphasis on the different possibilities of shapes and materials.

ТЕСТИРАЊЕ 9''x 9'' NaI(Tl) СПЕКТРОМЕТРА ОБЛИКА ЈАМЕ

Јан ХАНСМАН, Иштван БИКИТ, Јарослав СЛИВКА, Мирослав ВЕСКОВИЋ, Миодраг КРМАР, Наташа ТОДОРОВИЋ, Душан МРЂА, Софија ФОРКАПИЋ, Јована НИКОЛОВ

Природно-математички факултет, Лабораторија за нуклеарну физику,

Нови Сад, Србија, jan.hansman@df.uns.ac.rs

САДРЖАЈ

Резултати добијени из првих снимљених спектра 9''x 9'' NaI(Tl) детектора у новој 15 cm дебелој оловној заштити су представљени у овом раду. Кад сва тестирања буду приведена крају, у плану је да овај детектор служи за испитивање свих врста комерцијалних узорака и тиме допринесе повећању ефикасности рада лабораторије.

1. Увод

Од свих сцинтилационих материјала, NaI(Tl) се најчешће користи за детекцију гама зрачења и то када енергијска резолуција није од велике важности за мерење. У односу на германијумске детекторе, NaI(Tl) има неколико предности. Може бити направљен у практично било ком облику и величини и све те величине су комерцијално доступне, има јако високу ефикасност и кошта пуно мање од полупроводничких детектора.

Лоша особина NaI(Tl) осим слабе енергијске резолуције јесте и обавезно спајање кристала са фотомултипликатором, те осетљивост на влагу.

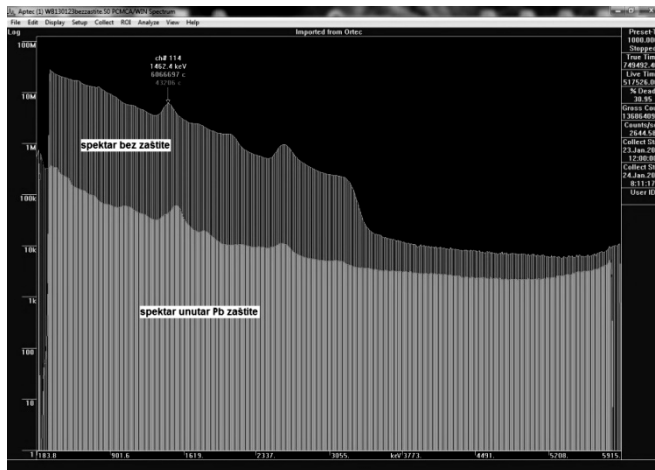
На тржишту су доступни и сами кристали NaI(Tl) различитих величина а такође и готове конфигурације где је кристал већ спојен са фотомултипликатором. Цела конфигурација је обично затворена у алуминијумском кућишту а често је кућиште и додатно хромирано због лакшег одржавања. Сам фотомултипликатор је пресвучен антимагнетским μ -металом због смањивања пертурбација узрокованих електричним и магнетним пољем које окружује детекторски систем.

2. Експериментални рад

9''x 9'' NaI(Tl) детектор је у Лабораторији за нуклеарну физику у Новом Саду практично 20 година стајао неупотребљен. Зато се прво приступило испробавању рада самог детектора и тестирању свих фотомултипликатора. Наиме цео систем се састоји од 7 фотомултипликатора (6 фотомултипликатора на 9''x 9'' и још један на 3''x 3'' NaI(Tl), који је спојен са великим NaI(Tl) у један систем), који су појединачно контролисани и намештани да дају сигнал у истом каналу сниманог спектра. Пошто је установљено да су сви фотомултипликатори исправни, цео систем је састављен и снимљени су фонски спектри најпре без заштите, а после тога и у заштити (слика 1).

Даље тестирање је извршено разним референтим материјалима које лабораторија поседује а који су током предстојећих година добијени од IAEA. За почетак су бирани материјали који садрже само један радионуклид или више њих, али под условом да им се гама линије јако разликују по енергији.

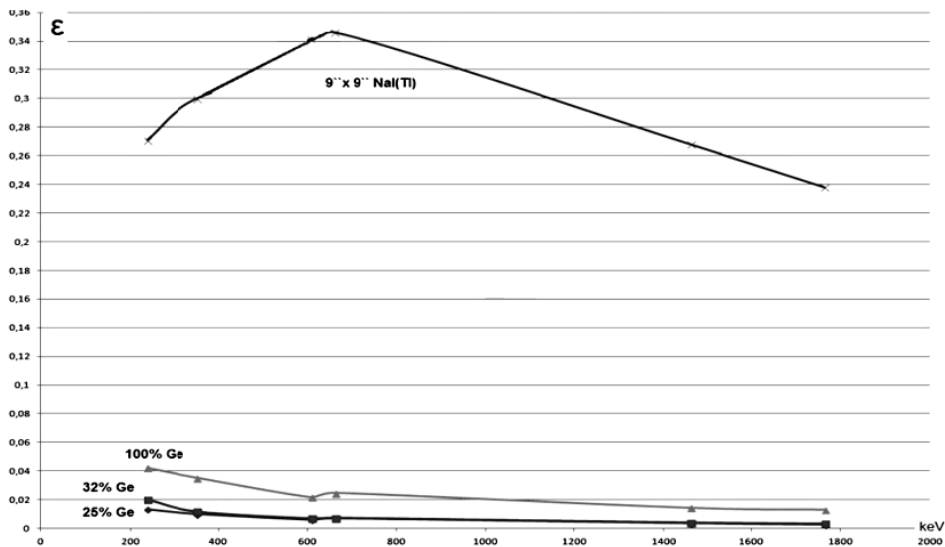
Тренутно су у току снимања спектра тачкастих извора и симулација тих спектра у програмском пакету GEANT4. Тачкасти извори се бирају тако да имају малу активност (око 1000 Bq ако је то могуће), тј. да им је прошло око 10 периода полураспада од дана производње, пошто услед велике ефикасности целог система, ако извор има велику активност, долази до великог мртвог времена детекторског система.



Слика 1 - Упоређење спектра детектора без и унутар оловне заштите

3. Резултати

У табели 1 и на слици 2 су наведене ефикасности различитих врста германијумских детектора за одређене линије у спектру и упоређене су са ефикасношћу $9'' \times 9''$ NaI(Tl) детектора. Ефикасност се односи на стандардну величину узорка која се најчешће користи приликом снимања спектра узорака у Лабораторији за нуклеарну физику у Новом Саду и износи 72 милиметра пречника и 62 милиметра висине.



Слика 2 - Упоређење ефикасности $9'' \times 9''$ NaI(Tl) са ефикасношћу Ge детектора

Табела 1 - Упоредње ефикасности германијумских и 9''x 9'' NaI(Tl) детектора за величину узорка 72x62 милиметра

Изотоп	Енергија (keV)	ефикасност 25% HPGe	ефикасност 32% HPGe	ефикасност 100,6% HPGe	ефикасност 9''x 9'' NaI(Tl)
Pb ²¹⁴ /Ra ²²⁶	351,9	0,010	0,021	0,035	0,30
Bi ²¹⁴ /Ra ²²⁶	609,3	0,006	0,011	0,022	0,33
Cs ¹³⁷	661,6	0,007	0,014	0,025	0,35
K ⁴⁰	1460,8	0,0036	0,008	0,014	0,27
Bi ²¹⁴ /Ra ²²⁶	1764,5	0,0026	0,007	0,013	0,24
*Co ⁶⁰	1173,2	0,032	0,042	0,097	0,583
	1332,5	0,028	0,040	0,089	0,549
	2505,7**	-	-	-	0,32

* - за Co⁶⁰ су наведене ефикасности тачкастог извора постављеног на детектору;

** - енергија коинцидентно сумиране гама линије Co⁶⁰.

У табели 2 су израчунате и упоређене минималне детектабилне ефикасности (MDA) 25% HPGe и 9''x 9'' NaI(Tl) детектора за различите дужине времена мерења. Израчунавање MDA је извршено према формули из [1] :

$$MDA = \frac{2,71+4,65 \sqrt{I_B t}}{\varepsilon t p_\gamma}; \text{ а за коинцидентно сумирање: } MDA = \frac{2,71+4,65 \sqrt{I_B t}}{\varepsilon_1 p_{\gamma 1} \varepsilon_2 p_{\gamma 2} t} \quad (1)$$

где су:

I_B - брзина бројања посматране гама линије у фонском спектру;

t - дужина времена мерења;

ε - ефикасност детектора;

p_γ - вероватноћа емисије фотона по распаду.

Табела 2 - Упоредње MDA 25% HPGe и 9''x 9'' NaI(Tl) детектора

Изотоп	Енергија (keV)	MDA за 1 сат		MDA за 1 дан	
		25% HPGe (Bq)	9''x 9'' NaI(Tl) (Bq)	25% HPGe (Bq)	9''x 9'' NaI(Tl) (Bq)
Pb ²¹⁴ /Ra ²²⁶	351,9	2,36	1,110	0,45	0,254
Bi ²¹⁴ /Ra ²²⁶	609,3	2,55	0,735	0,48	0,149
Cs ¹³⁷	661,6	0,87	0,308	0,16	0,063
K ⁴⁰	1460,8	12,2	7,693	2,18	1,567
Bi ²¹⁴ /Ra ²²⁶	1764,5	8,15	1,962	1,35	0,482
*Co ⁶⁰	1173,2	0,09	0,15	0,014	0,031
	2505,7	-	0,14	-	0,028
Изотоп	Енергија (keV)	MDA за 1 месец		MDA за 1 годину	
		25% HPGe (Bq)	9''x 9'' NaI(Tl) (Bq)	25% HPGe (Bq)	9''x 9'' NaI(Tl) (Bq)
Pb ²¹⁴ /Ra ²²⁶	351,9	2,36	1,110	0,45	0,254
Bi ²¹⁴ /Ra ²²⁶	609,3	2,55	0,735	0,48	0,149
Cs ¹³⁷	661,6	0,87	0,308	0,16	0,063
K ⁴⁰	1460,8	12,2	7,693	2,18	1,567
Bi ²¹⁴ /Ra ²²⁶	1764,5	8,15	1,962	1,35	0,482
*Co ⁶⁰	1173,2	0,0025	0,0056	0,0007	0,0016
	2505,7	-	0,0052	-	0,0014

* - за израчунавање MDA су узете ефикасности за тачкасти извор на детектору.

4. Закључак

Изузетно велика ефикасност великог 9''x 9'' NaI(Tl) детектора и поред слабог разлагања линија, може имати велику предност у брзини одређивања активности узорка. Теоретски овакав систем може постићи и јако ниске MDA које су упоредиве или чак и ниже него код германијумских детектора кад су у питању запремински узорци. Код тачкастих извора, границе детекције германијумских детектора су ниже него код 9''x 9'' NaI(Tl).

Код узорака који садрже значајне концентрације активности различитих радионуклида, може доћи до проблема разлагања гама линија услед њиховог преклапања а такође и због велике комптонске ивице, која би могла сакрити мале активности осталих радионуклида. Због тога је важно добро подесити квалитетан софтвер за обраду података, што и јесте један од циљева у наредном периоду.

5. Литература

- [1] Aurelian Luca, Some considerations about MDA and ISO 11929-3, Horia Hulubei Nat. Inst. of Phys. and Nucl. Eng. (IFIN-HH), Bucharest-Magurele, Romania (2000)
- [2] Gordon R. Gilmore and John D. Hemingway, Practical Gamma-ray Spectrometry 2nd Edition, Nuclear Training Services Ltd, Warrington, UK, John Wiley & Sons Ltd, 2008
- [3] CANBERRA SYSTEM CONSIDERATIONS with High Resolution Detectors - applications note
- [4] P.Chiozzi, P.De Felice, A.Fazio, V.Pasquale, M.Verdoya, Laboratory application of NaI(Tl) gamma-ray spectrometry to studies of natural radioactivity in geophysics, Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse, Settore di Geofisica, Universita di Genova, Italy, Appl Radiat Isot. 2000 Jul;53(1-2):127-32.

TESTING OF WELL-TYPE 9''x 9'' NaI(Tl) DETECTOR

**Jan HANSMAN, Ištvan BIKIT, Jaroslav SLIVKA, Miroslav VESKOVIĆ,
Miodrag KRMAR, Nataša TODOROVIĆ, Dušan MRĐA, Sofija FORKAPIĆ,
Jovana NIKOLOV**

*Faculty of Science, Department of Nuclear Physics, Novi Sad, Serbia,
jan.hansman@df.uns.ac.rs*

ABSTRACT

The results from the first spectra recorded with 9'' x 9'' NaI (Tl) detector in the new 15 cm thick lead shielding are presented in this paper. When all the tests are completed, the plan is that this detector will be use for all types of commercial samples and thus contribute to increasing the efficiency of the laboratory.

УТИЦАЈ ГАМА ЗРАЧЕЊА ФИСИОНИХ ПРОДУКАТА НА ПРОМЕНУ ГАМА КОНСТАНТЕ ^{252}Cf

Јан ХАНСМАН¹, Миодраг КРМАР¹, Никола ЈОВАНЧЕВИЋ² и Страхња ИЛИЋ¹

- 1) *Природно-математички факултет, Лабораторија за нуклеарну физику, Нови Сад, Србија, jan.hansman@df.uns.ac.rs, krmар@df.uns.ac.rs, ilic.strahinja@gmail.com*
- 2) *European Commission, Joint Research Centre, Institute for Reference Materials and Measurements, Retieseweg 111, B-2440 Geel, Belgium, nikola.jovancevic@df.uns.ac.rs*

САДРЖАЈ

У овом раду је испитан утицај акумулације фисионих продуката ^{252}Cf на промену специфичне гама константе ^{252}Cf , што може бити од значаја за све могуће примене овог извора, а посебно у медицини где се ^{252}Cf употребљава као извор неутрона у брахитерапији. Мерења су извршена са релативно новим извором 2008. године а следећи сет мерења је урађен 2013. године. На основу добијених спектра је израчуната специфична гама константа и установљено је да се она повећала за један ред величине у временском интервалу дугом приближно два периода полураспада ^{252}Cf .

1. Увод

Калифорнијум је сиви метал густине сличне олову који се добија вештачки, у нуклеарним реакторима или акцелераторима. До данас је познато десет изотопа калифорнијума и свих десет су нестабилни, али само пет изотопа (^{248}Cf , ^{249}Cf , ^{250}Cf , ^{251}Cf , ^{252}Cf) имају нешто дужи период полураспада и то од 0,9 до 900 година. Сви изотопи калифорнијума се распадају алфа распадом а ^{248}Cf , ^{249}Cf , ^{250}Cf и ^{252}Cf доживљавају и спонтану фисију.

Једини од изотопа калифорнијума који има комерцијалну примену је ^{252}Cf . Око 97% распада овог изотопа се одвија путем емисије алфа честице док се осталих око 3% распада на тај начин што доживљава спонтану фисију. ^{252}Cf је снажан неутронски емитер и један микрограм овог изотопа емитује 170 милиона неутрона у минути. Просечно по једном распаду ^{252}Cf емитује $3,7676 \pm 0,0049$ неутрона од којих је $3,7590 \pm 0,0049$ тренутних а $0,0086 \pm 0,0010$ закаснелих [1]. Танке фолије које садрже ^{252}Cf се користе као извори фисионих фрагмената за истраживања или као преносни извор неутрона у неутронској активационој анализи. Такође веома важну употребу ^{252}Cf има у медицини [2], у брахитерапији за третман различитих врста канцера а посебно ефикасност ова врста терапије је показала у лечењу свих нивоа канцера цервикса, ендометријалног аденокарцинома, вагиналног канцера, канцера усне шупљине, меланома, саркома и глиобластома. Код ^{252}Cf брахитерапијског извора је процењено да две трећине апсорбоване дозе потиче од неутрона а једна трећина од гама зрака. Међутим пошто су неутрони 6 пута ефективнији [2] у уништавању заражених ћелија од гама зрака, биолошки ефекти брахитерапијских третмана се приписују практично само неутронима и обично се не води рачуна о гама зрачењу фисионих продуката који настају у самом извору који садржи ^{252}Cf . Тренутно не постоје стандардне вредности процењених фотонских доза за ^{252}Cf због веома широког распона потомака који се добијају из спонтане фисије, тако да је усвојена пракса да се допринос гама зрачења укупној дози процењује мерењима у воденом фантому.

Специфична гама константа извора, са аспекта дозиметрије, представља једну од основних карактеристика извора и ако је она позната, дозу тачкастог извора је лако израчунати. Уколико радиоактивни извор емитује гама зрачење различитих енергија, тада је специфична гама константа једнака збиру гама константи за поједине енергије [3], помноженим са бројем кваната дате енергије који у просеку долазе на један распад:

$$\Gamma = \frac{1}{4\pi R^2} \sum_i p_{\gamma i} D(E_i) \quad (1)$$

где су:

R - растојање између извора и тачке у којој се доза процењује;

$p_{\gamma i}$ - вероватноћа емисије посматраног фотона по једном распаду;

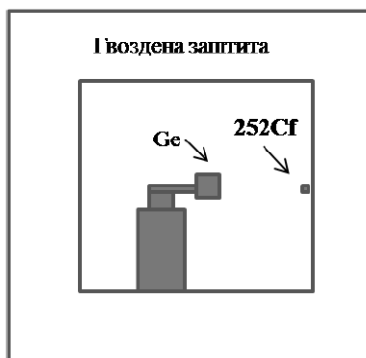
$D(E_i)$ –јачина дозе по јединици густине флукса за енергију E_i (MeV).

У пракси, специфична гама константа се дефинише као јачина дозе гама зрачења од извора активности 1 MBq на растојању од 1 m. при чему се обично изражава у практичним јединицама (mSv/h)/MBq). Таблична вредност за гама константу новог извора ^{252}Cf за гама зрачење је $1,131 \times 10^{-5}$ (mSv/h)/MBq.

2. Експериментална поставка

У експерименту је коришћен извор ^{252}Cf произвођача Ритверц ГмбХ, Русија, тип HCf 2.PO1.6004, source No. Cf-252.13.08, сертификован од стране „D.I.Mendeleyev Institute for Metrology“, под бројем 987/08. Јачина извора неутрона у тренутку када је набављен (03.јул.2008.) је износила $5,84 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ у $4\pi \text{ sr}$ са несигурношћу од 3%, са просечном енергијом неутрона од 2,12 MeV. Номинална активност извора у том моменту је била $6 \cdot 10^4 \text{ Bq}$. Извор се налази у завареној капсули од нерђајућег челика. ^{252}Cf је у форми оксида и нанесен је термално-оксидативним методом на унутрашњу доњу страну капсуле. Димензије извора су: пречник 6 мм, висина 5 мм и активни пречник 4 мм.

За детекцију гама зрачења је коришћен HPGe детектор, ефикасности 25%, произвођача Canberra. Детектор се заједно са судом за течни азот налази смештен у нискофонској заштити од гвожђа, дебљине зидова 25 цм. Ефективна запремина заштите је 1 m^3 . Извор ^{252}Cf је приликом мерења био смештен испред детектора на највећој могућој удаљености од детектора, што је износило 38 цм. Сам извор је био постављен са унутрашње стране заштите детектора (слика 3) [4].



Слика 3. Геометрија у којој је био постављен извор ^{252}Cf у току снимања спектра

Гама спектар калифорнијумског извора је био снимљен 2008. године, да би мерење у идентичној геометрији било поновљено 2013. године. Ефективно време мерења спектра у оба наврата је било око 260000 секунди. Обрада снимљених спектра и идентификација гама линија је вршена програмским пакетом Genie 2000, Canberra.

3. Резултати

Да би се извршила идентификација радиоизотопа насталих спонтаном физијом извора калифорнијума, било је потребно направити библиотеку са одговарајућим изотопима [5]. Радиоизотопа који имају вероватноћу настанка од 10^0 или већу има преко 200 а свих укупно преко 800. У првом кораку су у обзир узети само оних 200 са највећом вероватноћом настанка. Елиминирањем изотопа који у спектру не стварају довољно интензивне гама линије да би у мерењу биле уочене, библиотека изотопа је смањена на око 90. Пошто је највећи број физионих потомака ^{252}Cf краткоживећи, са периодом полураспада до неколико минута, за све њих је узета претпоставка да су до првог снимања спектра, што је било око 6 месеци после прављења извора, ушли у равнотежу са ^{252}Cf и да им се активност смањује као и активност ^{252}Cf . Наравно постоји и извезан број изотопа који имају дужи период полураспада и који нису ушли у равнотежу са ^{252}Cf . С обзиром да се активност ових физионих продуката мења са временом, промена вредности специфичне гама константе потиче баш од њих. Са идентификованим гама линијама и списком радионуклида који дају допринос укупном гама спектру, израчунато је колика је била специфична гама константа ^{252}Cf извора 2007. и 2013. године.

С обзиром да је у гама спектрима извора ^{252}Cf забележен велики број гама линија малог интензитета, неопходно је било одредити колики утицај на укупну вредност гама константе могу имати баш ти гама прелази малог интензитета. Спектри су обрађени са неколико различитих „peak significant level“ и израчунате су специфичне гама константе за сваки од датих случајева (Табела 1).

Табела 1 - Утицај различитих нивоа значајности линија на израчунавање специфичне гама константе калифорнијума

датум	старост извора ^{252}Cf (a)	peak significant (ниво значајности)	број пронађених гама линија	специфична гама константа (mSv/h)/MBq
25.11.2008.	0,385	3	236	$1,52 \times 10^{-5}$
		5	96	$1,35 \times 10^{-5}$
		8	49	$1,14 \times 10^{-5}$
		10	38	$1,09 \times 10^{-5}$
13.04.2013.	4,865	3	58	$1,40 \times 10^{-4}$
		4	31	$1,23 \times 10^{-4}$
		6	9	$9,22 \times 10^{-5}$

Претрага гама линија у спектру са нивоом значајности мањим од 3 није извршена, јер у том случају у софтвер проналази и непостојеће линије.

4. Закључак

Као што се види из Табеле 1, специфична гама константа извора ^{252}Cf је један ред величине већа пет година након што је извор направљен. То свакако потиче од акумулације физионих продуката гама емитера. Евидентно је да ће фотонска доза прилико употребе ^{252}Cf извора расти, да би након два периода полураспада она била десет пута већа од фотонске дозе коју производи свеж ^{252}Cf извор. Уколико се ^{252}Cf употребљава као брахитерапијски извор, након два периода полураспада, да би се постигла одређена неутронска доза, потребно је вршити четири пута дужу апликацију. Будући да јеу истом временском периоду специфична гама константа извора услед акумулације физионих продуката порасла одприлике десет пута, јасно је да се применом пет година старог брахитерапијског ^{252}Cf извора може очекивати и 40 пута већа фотонска доза. Гама спектар физионих продуката ^{252}Cf је изузетно комплексан и садржи велики број гама линија малог

интензитета. За одређивање реда величине специфичне гама константе, довољно је узети у обзир најинтензивније линије, али грешка приликом такве процене иде и до 50%. Уколико се за границу неодређености процене узме 10%, потребна је прецизнија анализа која укључује неколико стотина гама линија пошто велики број линија слабијег интензитета може дати значајан допринос.

5. Литература

- [1] Compilation and evaluation of fission yield nuclear data, IAEA-TECDOC-1168 (2000), 45-57
- [2] C.K.Chris Wang, Progress in Californium-252 Neutron Brachytherapy, Georgia Institute of Technology, USA (2012)
- [3] L.M.Unger,D.K.Trubey, Specific Gamma-Ray Dose Constants for Nuclides Important to Dosimetry and Radiological Assessment, Oak Ridge National Laboratory, USA (1982)
- [4] Никола Јованчевић, Анализа неутронима генерисане активности у нискофонским гама спектроскопским системима, Докторска дисертација, Нови Сад (2010)
- [5] R.B.Firestone, V.S.Shirley, S.Y.F.Chu, C.M.Baglin, and J.Zipkin, Table of Isotopes, John Wiley and Sons, New York , (1996)

EFFECT OF GAMMA RADIATION OF FISSION PRODUCTS ON GAMMA CONSTANT OF ^{252}Cf

Jan HANSMAN¹, Miodrag KRMAR¹, Nikola JOVANČEVIĆ², Strahinja ILIĆ¹

1) Природно-математички факултет, Лабораторија за нуклеарну физику, Нови Сад, Србија,
jan.hansman@df.uns.ac.rs

2) European Commission, Joint Research Centre, Institute for Reference Materials and Measurements,
Retieseweg 111, B-2440 Geel, Belgium, nikola.jovancevic@df.uns.ac.rs

ABSTRACT

The influence accumulation of ^{252}Cf fission products on change of ^{252}Cf gamma constant is analyzed in this work. It can be important for number of ^{252}Cf applications, including medicine where ^{252}Cf is used as source of neutrons in brachytherapy. The measurements were made with a relatively fresh source in 2008. and the next set of measurements were made 2013. Recorded gamma spectra were used to calculate gamma constant. It is estimated that gamma constant is order of magnitude higher after period equal to two half-lives of ^{252}Cf .

RAČUNANJE EFEKTIVNE DUBINE INTERAKCIJE HPGe DETEKTORA KORIŠĆENJEM EFTRAN SOFTVERA

**Jelena NIKOLIĆ, Dragana TODOROVIĆ, Marija JANKOVIĆ,
Milica RAJAČIĆ, Nataša SARAP, Gordana PANTELIĆ**

Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča Beograd, Srbija jnikolic@vinca.rs

SADRŽAJ

Nekoliko različitih metoda za kalibraciju HPGe detektora razvijano je tokom dužeg vremena, a jedan od njih se bazira na pretpostavci da se kristal detektora može predstaviti jednom tačkom u kojoj se dešava interakcija, na tzv. efektivnoj dubini interakcije (h_0). U ovom radu se prikazuje određivanje h_0 uz korišćenje EFTRAN softvera za transfer efikasnosti i korekciju na koincidentno sumiranje. Takođe, prikazana je i provera slaganja teorijskih sa eksperimentalnim rezultatima, kao i provera zavisnosti h_0 od energije detektovanih gama kvanata.

1. Uvod

Jedan od glavnih zadataka u spektrometriji gama emitera je kalibracija detektora, u ovom slučaju HPGe detektora. Nekoliko različitih metoda za kalibraciju razvijano je tokom dužeg vremena, a jedan od njih se bazira na pretpostavci da se kristal detektora može predstaviti jednom tačkom (virtuelni tačkasti detektor) u kojoj se dešava interakcija, na tzv. efektivnoj dubini interakcije, dok se cilindrični uzorak predstavlja nizom diskova elementarne debljine na različitim visinama [1].

Da bi se odredila efektivna dubina interakcije, označi se rastojanje između virtualnog tačkastog detektora i vrha detektora sa h_0 , a udaljenost tačkastog izvora od kape detektora, duž ose simetrije detektora, sa x . Pretpostavka da se zapremina detektora može aproksimirati virtuelnim tačkastim detektorom smeštenim na efektivnoj dubini interakcije, implicira da je efikasnost za tačkasti izvor na različitim visinama u odnosu na kapu detektora, obrnuto srazmerna kvadratu udaljenosti. Ovo je posledica promene prostornog ugla pod kojim tačkasti detektor "vidi" izvor. U neapsorbujućoj sredini imamo [1]:

$$\frac{\varepsilon(x_1)}{\varepsilon(x_2)} = \frac{N(x_1)}{N(x_2)} = \frac{(x_2 + h_0)^2}{(x_1 + h_0)^2} \Rightarrow \quad (1)$$
$$\sqrt{\frac{N(x_1)}{N(x_2)}} - 1 = \frac{x_2 - x_1}{x_1 + h_0}$$

gde su $N(x_1)$ i $N(x_2)$ broj detektovanih fotona na visinama x_1 i x_2 respektivno. Za jedno merenje možemo odabrati da izvori stoje na kapi detektora ($x_0 = 0$), čime se računanje dodatno pojednostavljuje. Merenjem odbroja na različitim udaljenostima x od kape detektora i fitovanjem zavisnosti

$\sqrt{\frac{N(x_0)}{N(x)}} - 1$ od $x - x_0$ linearnom funkcijom, dobijamo koeficijent nagiba krive koji predstavlja $1/h_0$.

U praksi su često korišćeni programi koji računaju, na osnovu niza poznatih parametara, transfer efikasnosti od poznate (izmerene) efikasnosti za jednu geometriju do nove, za novu geometriju i matriks. Ujedno, ovi programi mogu da računaju korekzione faktore za koincidentno sumiranje. Računanje transfera efikasnosti se u programu EFTRAN zasniva na pretpostavci da je odnos efikasnosti na dve različite pozicije izvora u odnosu na detektor, jednak odnosu prostornih uglova pod kojim detektor "vidi"

taj izvor. Pošto se efektivni prostorni ugao ne može izračunati numerički, koristi se Gauss-Legendre integracija [2].

Koristeći EFTRAN, umesto merenja, možemo izračunati efikasnost detektora za tačkasti izvor na različitim udaljenostima od detektora. Na osnovu ovako dobijenih efikasnosti, možemo izračunati teorijski odbroj na različitim visinama i to iskoristiti za dobijanje efektivne dubine interakcije.

2. Rezultati i diskusija

Merenja su izvršena u Laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine Instituta za nuklearne nauke Vinča na tri HPGe detektora, koji su dalje u radu označeni sa Detektor 1 (p-tip), Detektor 2 (n-tip) i Detektor 3 (p-tip), relativnih efikasnosti 18%, 20% i 50% respektivno. Za merenje su korišćeni tačkasti izvori ^{60}Co i ^{133}Ba proizvođača Czech Metrological Institute, aktivnosti 732.9 kBq i 271.5 kBq respektivno na dan 1.8.2011. Izvori su stavljeni na plastično postolje visine 11.5cm da bi se, zbog visoke aktivnosti, izbegla saturacija detektora i koincidentno sumiranje. Na osnovu dobijenih spektara i poznate aktivnosti, izračunata je efikasnost detektora za tu geometriju, koja je korišćena kao početni podatak za transfer efikasnosti. Uz pomoć programa EFTRAN, urađen je transfer efikasnosti za tačkasti izvor na 5 različitih visina i na osnovu tako dobijenih efikasnosti, izračunat je odbroj $N(x)$ korišćenjem sledećeg izraza:

$$N(x) = (Ae^{-t \ln 2 / T_{1/2}}) \cdot P_{\gamma} \cdot 1000s \cdot \varepsilon(x) \cdot C(E) \quad (2)$$

gde je $Ae^{-t \ln 2 / T_{1/2}}$ aktivnost tačkastog izvora korigovana na vreme poluraspada, P_{γ} je prinos na datoj energiji, 1000s je vreme trajanja merenja, $\varepsilon(x)$ je efikasnost na visini x dobijena transferom efikasnosti i $C(E)$ je faktor korekcije na koincidentno sumiranje na energiji E , dobijen takođe pomoću programa EFTRAN.

Za ukupno 5 energija napravljena je linearna zavisnost odnosa odbroja na različitim visinama kako je dato u jednačini (1) i na osnovu nagiba prave je izračunata efektivna dubina interakcije za te energije. Da bi se potvrdilo slaganje sa eksperimentalnim rezultatima, izvršeno je posebno merenje tačkastog izvora ^{60}Co proizvođača LMRI Coffret d'etalons gamma ECGS-2 poznate aktivnosti [3]. Na Slici 1 su date zavisnosti korena odnosa odbroja od udaljenosti izvora za sva tri detektora, dok se u Tabeli 1 nalaze efektivna dubina interakcije, izračunata na osnovu grafika sa slike 1 i na osnovu eksperimentalnih merenja. Na Slici 1 su zbog preglednosti dati grafici za 3 energije. Kao što se može videti sa Slike 1, merene vrednosti odbroja se dobro uklapaju u linearnu funkciju, a koeficijent fita je za sve energije $R^2 \geq 0.99$. Takođe, za energije za koje je izvršena eksperimentalna provera, rezultati pokazuju dosta dobro slaganje sa teorijski dobijenim rezultatima. Odstupanja između računatog i merene vrednosti za energije ^{60}Co se kreću u rasponu od 4.9% do 12.9%. Uočena odstupanja su posledica nedovoljno preciznog definisanja dimenzija kristala detektora, što ima značajan uticaj na transfer efikasnosti. Efektivna dubina interakcije h_0 pokazuje takođe i zavisnost od energije E , koja je data sledećim izrazom [3]:

$$\ln(h_0) = a + b \ln E + c(\ln E)^2 \quad (2)$$

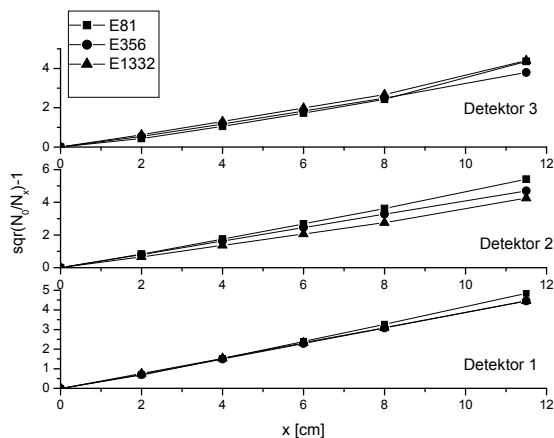
gde su a , b i c koeficijenti fita. Zavisnost h_0 od energije za sva tri detektora je data na slici 2. Slaganje fita sa računatim vrednostima je oko 98% što ukazuje na dobro slaganje teorijskih vrednosti sa funkcijom zavisnosti h_0 od energije predloženom u [4].

Tabela 1. Efektivna dubina interakcije, teorijska i eksperimentalna vrednost

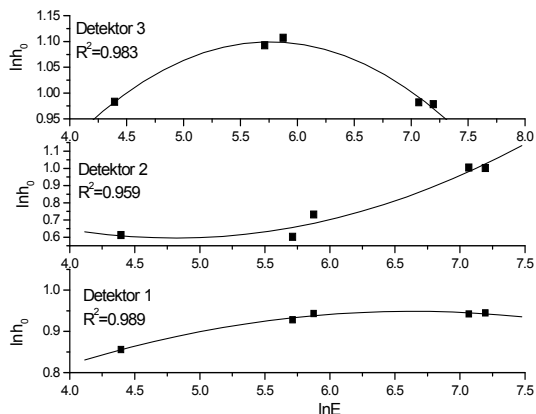
Energija [KeV]	Efektivna dubina interakcije [cm]		
	Teorijska vrednost		
	Detektor 1	Detektor 2	Detektor 3
80.997	2.35 ± 0.05	1.84 ± 0.04	2.67 ± 0.05
302.853	2.53 ± 0.05	1.83 ± 0.04	2.98 ± 0.06
355.99	2.56 ± 0.05	2.08 ± 0.04	3.03 ± 0.06
1173.24	2.57 ± 0.05	2.73 ± 0.05	2.67 ± 0.05
1332.5	2.57 ± 0.05	2.72 ± 0.05	2.66 ± 0.05
Eksperimentalna vrednost			
1173.24	2.92 ± 0.06	2.55 ± 0.05	2.39 ± 0.05
1332.5	2.95 ± 0.06	2.49 ± 0.05	2.53 ± 0.05

3. Zaključak

U radu je izvršeno računanje efektivne dubine interakcije za 3 HPGe detektora korišćenjem EFTRAN softvera za transfer efikasnosti i računanje korekcije na koincidentno sumiranje. Na osnovu izračunatih efikasnosti određena je efektivna dubina interakcije i određena zavisnost $h_0(E)$. Da bi se potvrdilo slaganje sa eksperimentalnim rezultatima, izvršeno je posebno merenje tačkastog izvora ^{60}Co i ustanovljeno je relativno dobro slaganje sa teorijskim rezultatima.



Slika 1. Zavisnost korena odnosa računatog odbroja i udaljenosti izvora od detektora. Na slici su, zbog preglednosti, dati rezultati za tri energije



Slika 2. Zavisnost efektivne dubine interakcije od energije za sva tri detektora

4. Literatura

- [1] M. Mohammadi, M. Abdi, M. Kamali, M. Mostajaboddavati and M. Zare. Evaluation of HPGe detector efficiency for point sources using virtual point detector model. *App. Radiat. Isot.* 69 (2011) 521–526.
- [2] T. Vidmar, N. Celik, N. Cornejo Diaz, A. Dlabac, I.O.B.Ewa, J. Carrazana Gonzalez, M. Hult, S. Jovanovic, M. Lepy, N. Mihaljevic, O. Sima, F. Tzika, M. JuradoVargas, T. Vasilopoulou, G. Vidmar. Testing efficiency transfer codes for equivalence *App. Radiat. Isot.* 68 (2010) 355–359
- [3] I Vukanac, M. Djurašević, A. Kandić, D. Novković, L. Nadjerdj, Z. Milošević; Experimental determination of the HPGe spectrometer efficiency, *Applied Radiation and Isotopes* 60 (2008) 792–795.
- [4] N. Peng, N. Bang-fa, T. Wei-zhi. An empirical formula for HPGe detector efficiency calibration for bulky sources *Radiat. Phys. Chem.* 81 (2012) 9–11

5. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije pod sledećim projektom III 43009.

CALCULATION OF EFFECTIVE INTERACTION DEPTH OF HPGe DETECTORS USING EFTRAN SOFTWARE

Jelena NIKOLIĆ, Dragana TODOROVIĆ, Marija JANKOVIĆ, Milica RAJAČIĆ, Nataša SARAP, Gordana PANTELIĆ

University of Belgrade Institute for Nuclear Sciences Vinca, Belgrade, Serbia

ABSTRACT

Several different methods of HPGe detector calibration is developrs over the years. One of the methods is based on the assumption that the detector crystal can be represented by a point in which the interaction takes place, placed at effective interaction depth (h_0). This paper presents the calculation of h_0 by using EFTRAN software for efficiency transfer and coincidence summing correction. Also, the validation of the results by experimental measurement as well as determination of dependence of h_0 and energy of gamma photon, was performed.

КАЛИБРАЦИЈА ЕФИКАСНОСТИ ГЕРМАНИЈУМСКИХ ДЕТЕКТОРА ЗА ПОТРЕБЕ МЕРЕЊА УЗОРАКА ИЗ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ

**Маја ЕРЕМИЋ-САВКОВИЋ¹, Ведрана ВУЛЕТИЋ², Љиљана ЈАВОРИНА¹,
Ирена ТАНАСКОВИЋ¹, Гордана ПАНТЕЛИЋ³**

- 1) *Институт за медицину рада Србије "Др Драгомир Карајовић", Делиградска 29, 11000 Београд, Србија, email: mesavkovic@yahoo.com*
- 2) *Агенција за заштиту од јонизујућих зрачења и нуклеарну сигурност Србије, Масарикова 5, Београд*
- 3) *Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке "Винча", Мике Петровића Аласа 12-14, Београд*

САДРЖАЈ

Лабораторије за испитивање радиоактивности узорка из животне средине често имају потребу да због различите запремине испитиваног узорка користе погодне геометрије за гамаспектрометријска мерења. За потребе испитивања узорка земљишта добијеног у оквиру Proficiency testa IAEA-CU-2011-04 ALMERA направљен је стандард у цилиндричној геометрији коришћењем сертифициваног раствора који је растворен у дестилованој води. Сертифицивани радиоактивни раствор је смеша радионуклида гама емитера у распону енергија 50 – 2000 keV. Добијена крива ефикасности коришћена је за одређивање активности ²²⁶Ra у узорку земљишта. Резултат активности ²²⁶Ra, који је оцењен оценом А (asserteble) потврдио је калибрацију ефикасности на германијумском детектору и могућност коришћења ове калибрације за сличне узорке из животне средине.

1. Увод

Гамаспектрометрија је данас високо развијена и применљива метода за праћење и мерење активности узорка из животне средине. Гамаспектрометрија омогућава да се детектовањем емисије гама фотона из одређеног узорка идентификују радионуклиди присутни у самом узорку и одреди њихова концентрација. За узорке из животне средине у интересу је одредити концентрацију како природних радионуклида урановог и торијумовог низа и ⁴⁰K, тако и вештачких радионуклида. Најчешће коришћени гамаспектрометријски инструменти у лабораторији су германијумски детектори. Данас германијумски детектори омогућавају изузетно добру резолуцију за детекцију енергије гама кваната од ниских енергија неколико eV све до 10 MeV.

У овом раду описана је калибрација ефикасности HP Ge детектора у лабораторији за испитивање радиоактивности за потребе анализе узорка земљишта добијеног учешћем у оквиру Proficiency testa IAEA-CU-2011-04 ALMERA (ПТ). Маса узорка била је 100g.

Криве ефикасности за геометрије које су се користиле у лабораторији нису биле одговарајуће за одређивање активности ²²⁶Ra у овом ПТ-у, те је било потребно одредити нову криву ефикасности. Резултат добијен анализом узорка из ПТ теста могуће је употребити за верификацију калибрације коју би лабораторија у будућности користила за мерење активности сличних узорка из животне средине [1,2].

Крива ефикасности зависи не само од карактеристика детектора већ и од облика, и густине узорка који се анализира. Пошто много већи утицај на ефикасност детектора има геометрија узорка, а мањи густина узорка [3], да би се избегао проблем хомогенизовања направљеног стандарда, матрикс за његову израду није био земљиште већ вода. Да би добили тачне резултате, узорак земљишта мерио се и активност рачунала према истим мерним условима под којима је извршена калибрација [4].

2. Припрема узорака за калибрацију

За припрему стандарда за калибрацију коришћен је сертификовани стандард смеша радионуклида Amersham QCY48. Укупна маса стандарда је 5.3331g. У табели 1. приказане су активности радионуклида који су садржани у стандарду, референтни датум је 1.06.2006.године. Изабрана је цилиндрична геометрија пречника 7.8 cm и висине 5.8 cm. Наведена геометрија испуњена је дестилованом водом до висине 3.1cm. Стандард за калибрацију добијен је додавањем 1 ml радног раствора QCY48 у 2M раствор HCl. Радни раствор добијен је разблаживањем укупне запремине сертификованог стандарда QCY48 са 4M HCl до запремине од 100 ml.

Активност сертификованог раствора и укупна активност стандардног раствора дата је у табели 1. У тренутку прављења стандарда за калибрацију радионуклиди ^{139}Ce , ^{203}Hg , ^{113}Sn , ^{85}Sr и ^{88}Y због краћег времена полураспада нису били активни. Неодређеност активности добијеног раствора потиче од неодређености активности сертификованог раствора и неодређености која потиче од разблаживања оригиналног раствора [5,6].

Табела 1: Активност сертификованог раствора и укупна активност стандардног раствора

Радионуклид	E (keV)	Гама прелаз/s/g	Gamma /100d	Активност (Bq/g) 1.06.2006.	Expanded uncertainty %	Активност (Bq/g) 9.04.2010.	Активност (Bq/ml) 9.04.2010.
^{241}Am	59.54	1127	36.3	3105	1.1	3085.5	164.56
^{109}Cd	88.03	646	3.68	17554	2.3	2129.8	113.59
Co-57	122.10	579	85.59	676	1.2	18.5	1
Cs-137	661.60	2418	85	2845	1.2	2603.6	138.85
Co-60	1173.24	3364	99.9	3367	1.1	2028.6	108.19
Co-60	1332.50	3366	99.9824	3367	1.1	2028.2	108.16

3. Калибрација

Коришћењем добијеног стандарда извршена је калибрација на два германијумска детектора у лабораторији за гамаспектрометрију. За мерење и калибрацију коришћен је софтвер *Gamma vision* фирме EG&G ORTEC. У овом раду су приказани резултати добијени за HP Ge детектор релативне ефикасности 25 % и резолуције 1.85 keV на 1.332 MeV. Узорак стандарда мерен је 83000s (слика 1). За конструкцију криве ефикасности коришћене су прерачунате активности радионуклида (табела 1) на дан 9.04.2010.године.

Добијена крива ефикасности у интервалу 50 – 2000 keV је:

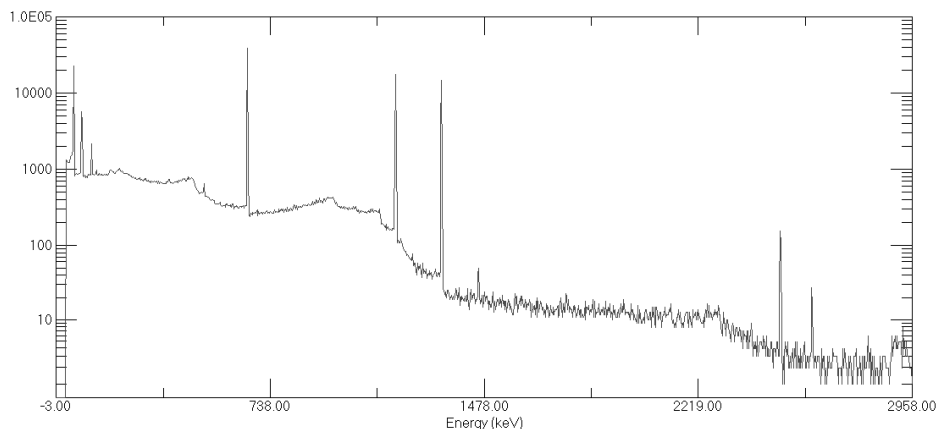
$$\ln \varepsilon = \sum_{i=1}^6 a_i E^{2-i} \quad (\text{E дато у MeV})$$

$$\begin{array}{llll} \text{коэффициенти су: } a_1= -0.697869 & a_3= 0.221885 & a_5= 0.000142 & \\ a_2= -3.996354 & a_4= -0.012171 & a_6= -0.000247 & \end{array}$$

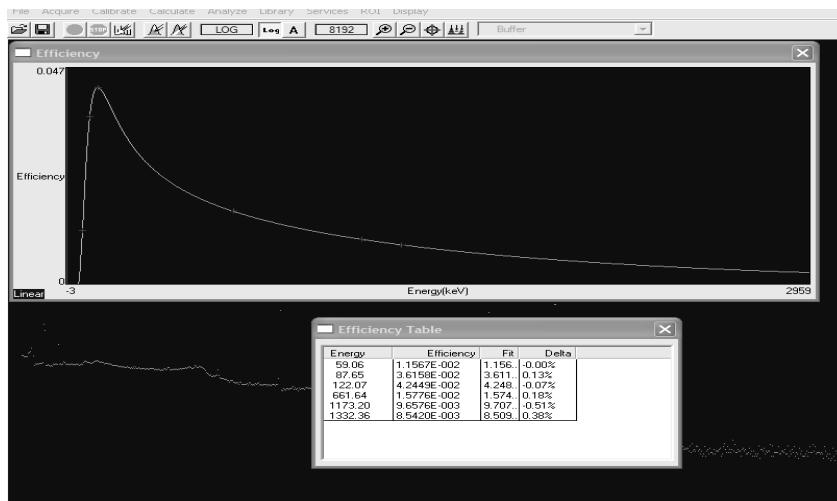
Добијена мерна несигурност ефикасности је 2.3 %.

Слика 1. Гама спектар стандарда за калибрацију

D2QCY48 G0H31
d2 standard QCY48R 1ml u maloj go geometriji visina uzorka H=3.
cm



Слика 2. Крива ефикасности германијумског детектора



Узорак земљишта у коме је требало одредити активност ^{226}Ra , пренет је у цилиндричну геометрију истих димензија као и геометрија узорка којим је рађена калибрација ефикасности. [4,7] Након истека времена неопходног за равнотежу потомака радијума од 30 дана, узорак земљишта мерен је 80000 s на истом гама детектору. Активност ^{226}Ra у анализираном узорку земљишта одређена је коришћењем криве ефикасности у распону од 600-2000 keV, јер су у наведеном опсегу енергије гама фотона са највећом вероватноћом емисије ^{214}Bi који је потомак ^{226}Ra .

Конечан резултат активности ^{226}Ra који је послат организатору ПТ је средња вредност активности за сваку енергију гама фотона ^{214}Bi . Процењена мерна несигурност је 8%. У табели 3. приказани су резултати Proficiency testa IAEA-CU-2011-04 ALMERA са коначном оценом резултата лабораторије, а на основу критеријума које је орагнизатор ПТ поставио.

Табела 3: Резултати Proficiency testa IAEA-CU-2011-04 ALMERA

Радионуклид	IAEA активност (Bq/kg)	IAEA Unc. (Bq/kg)	Лабораторија Активност (Bq/kg)	Лабораторија процењена грешка (Bq/kg)	Коначни резултат
Ra-226	19050	260	17200	1400	A

4. Дискусија и закључак

Овим ПТ тестом потврђено је да крива ефикасности конструисана на основу припремљеног стандарда у лабораторији за гамаспектрометрију, задовољава потребе мерења активности у сличним узорцима из животне средине за радионуклиде који емитују гама фотоне у интервалу од 600 keV до 2000 keV.

Енергија гама фотона ^{226}Ra на 186.1keV није узета приликом прорачуна његове активности. Радионуклиди ^{226}Ra (186.1 keV) и ^{235}U (185.7 keV) имају врло блиске енергије гама емисије, а у мереном узорку је био нарушен њихов природни однос који није могао да се користи за прорачун одброја који одговара појединачном радионуклиду.

Захтеви Proficiency testa IAEA-CU-2011-04 ALMERA за узорак земљишта били су да се одреди само активност радионуклида ^{226}Ra . Конструисану криву ефикасности потребно је у будућности тестирати за рачун активности и радионуклида у области ниских енергија.

5. Литература

- [1] Г. Пантелић, В. Вулетић. Калибрација германијумских детектора за мерење аеросола. Зборник радова XXV симпозијума друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе; октобар 2009, Копоник, Србија, 259-263
- [2] В. Вулетић, Г. Пантелић, И. Танасковић, М. Еремић-Савковић, Ј. Јаворина. Међулабораторијско поређење одређивања активности гамаемитера у филтеру за ваздух. Зборник радова XXIV симпозијума друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе; 3.-5. октобар 2007, Златибор, Србија, 345-349
- [3] Г.К. Пантелић, И.М. Трајић. Одређивање криве ефикасности германијумских детектора за различите густине и геометрије узорака. Зборник радова XVII Југословенског симпозијума за заштиту од зрачења, Београд, 1993; 199-202
- [4] G. Hasse, D. Tait and A. Wiechen “determination of full energy peak efficiency for cylindrical volume sources by the use of a point source standard in gamma-spectrometry” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 361 (1995) 240-244
- [5] Development and use reference materials and quality control materials. IAEA-TECDOC-1350. International Atomic Energy Agency, Vienna
- [6] *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, Int. Org. for Standardization, Geneva, Switzerland, 1993.
- [7] Harb, S., Salahel Din K., Abbady, A., *Study of Efficiency Calibrations of HPGe Detectors for Radioactivity Measurements of Environmental Samples*, South Valley University, Qena, Egypt, 2008.

GERMANIUM DETECTOR CALIBRATION FOR ENVIRONMENTAL SAMPLES MEASUREMENT

**Maja EREMIĆ SAVKOVIĆ¹, Vedrana VULETIĆ², Ljiljana JAVORINA¹,
Irena TANASKOVIĆ¹, Gordana PANTELIĆ³**

1) *Serbian Institute of Occupational Health "Dr Dragomir Karajović",
Deligradska 29, Belgrade, Serbia, email: mesavkovic@yahoo.com*

2) *Serbian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency,
Masarikova 5, Belgrade, Serbia*

3) *Institute of Nuclear Sciences "Vinca", Mike Petrovic Alasa 12-14, Belgrade, Serbia*

ABSTRACT

This paper describes the calibration of HP Ge detector for radioactivity measurement of soil sample obtained in the Proficiency Test IAEA-CU-2011-04 ALMERA. Activity concentration is determined on HP Ge detectors. Calibration standard in the same geometry configuration was prepared. The certified radioactive solution which contained several gamma emitting radionuclides was used as a master solution to prepare sample for the germanium detector calibration. Obtained efficiency curve for radionuclide activity concentration is to be used for the energy interval 50 – 2000 keV.

IZRAČUNAVANJE KOREKCIONIH FAKTORA ZA KOINCIDENTNO SUMIRANJE ZA ^{152}Eu -ZAPREMINSKI IZVORI

Mirjana ĐURAŠEVIĆ, Aleksandar KANDIĆ, Ivana VUKANAC, Bojan ŠEŠLAK i Zoran MILOŠEVIĆ

Institut za Nuklearne Nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, mirad@vinca.rs

SADRŽAJ

Učešćem u interkomparaciji organizovanoj od strane Gamaspektrometrijske radne grupe u okviru ICRM, već razvijeni teorijski model za potrebe rešavanja problema koincidentnog sumiranja primenjen je na zapreminske izvore. Analizirana je vrlo složena šema ^{152}Eu i formiran sistem jednačina. Rešavanje tako formiranog sistema zahtevalo je uvođenje određenih aproksimacija. U radu su prikazani izračunati korekcionni faktori za geometriju cilindrične PVC kutijice i radionuklid ^{152}Eu u kombinaciji sa bakrom i pleksiglasom kao apsorberom.

1. Uvod

Teorijski model zasnovan na matricnom formalizmu, razvijen za potrebe rešavanja problema koincidentnog sumiranja X- i gama zračenja za radionuklide sa kompleksnom šemom raspada, prikazan je u već objavljenim radovima [1, 2, 3]. Ovaj model pruža mogućnost da se za dati radionuklid na osnovu šeme raspada odrede sve putanje raspada, svi mogući ishodi raspada i identifikuju sve moguće singl i sumacione energije. Na taj način moguće je formirati analitičke izraze za brzine brojanja u singl i sumacionim pikovima, kao i za totalnu brzinu brojanja. Nepoznate promenljive su efikasnosti detekcije (totalne i pik) i aktivnost posmatranog izvora, i određuju se rešavanjem datog sistema jednačina.

Razvijeni teoretski model uspešno je primenjen na raspad radionuklida ^{139}Ce , ^{57}Co [1], ^{133}Ba [2] i ^{75}Se [3], ali samo za tačkaste izvore. Ideja je bila da se isti model primeni i potvrdi i za zapreminske izvore, što je realizovano u okviru interkomparacije organizovane od strane Gamaspektrometrijske radne grupe u okviru ICRM (International Committee for Radionuclide Metrology). Interkomparacija je organizovana sa ciljem da se odrede korekcionni faktori za koincidentno sumiranje za radionuklide ^{152}Eu i ^{134}Cs za tri različite geometrije cilindričnih kutijica u kombinaciji sa različitim apsorberima (Milar, bakar i pleksiglas) [4].

U ovom radu biće prikazani korekcionni faktori dobijeni za geometriju cilindrične PVC kutijice i za radionuklid ^{152}Eu u kombinaciji sa bakrom i pleksiglasom kao apsorberom.

2. Teorijski model primenjen na ^{152}Eu

Od organizatora interkomparacije dobili smo sve neophodne ulazne podatke za postavljanje potrebnog sistema jednačina. U slučaju primene teorijskog modela zasnovanog na matricnom formalizmu, potrebni ulazni podaci bili su snimljeni spektri izvora i šema raspada sa svim neophodnim podacima za radionuklid ^{152}Eu [5].

^{152}Eu raspada se elektronskim zahvatom (72.1 %) i beta plus raspadom (0.027 %) u ^{152}Sm i beta minus raspadom (27.9 %) u ^{152}Gm . Pri analizi datih spektara razmatrana su dva modela raspada, dok je pozitronski raspad zanemaren. Za svaki od njih određeni su svi parametri koje nam uspostavljeni model omogućava.

Tako je za raspad ^{152}Sm određeno:

- broj prelaza – 90
- broj koraka u putanji raspada može biti do 9, pri čemu su uzete u obzir samo putanje raspada do 5 koraka (sve putanje raspada sa više od 5 koraka imaju veoma malu verovatnoću raspada)
- broj ishoda raspada – 79 551
- broj svih mogućih energija (singl i sumacionih) – 1 354

Za raspad ^{152}Gd određeno je sledeće:

- broj prelaza – 41
- broj koraka u putanji raspada može biti do 6, pri čemu su uzete u obzir samo putanje raspada do 5 koraka (sve putanje raspada sa više od 5 koraka imaju veoma malu verovatnoću raspada)
- broj ishoda raspada – 6 425
- broj svih mogućih energija (singl i sumacionih) – 550.

Na osnovu teorijskog modela formirane su jednačine za sve moguće energije, kao i jednačina za totalnu brzinu brojanja. U početnom obliku ove jednačine bile su veoma komplikovane i imale su veliki broj sabiraka (npr. jednačina za totalnu brzinu brojanja imala je 198 sabiraka, dok je jednačina za energiju 40 keV imala 825 članova). Bilo je neophodno uvesti određene aproksimacije.

U prvom koraku pretpostavili smo oblik krive efikasnosti. Na osnovu toga određeni su sabirci koji se mogu zanemariti (to su oni sabirci čiji je doprinos manji od 0.1 % u odnosu na najdominantnije). Tako određeni sabirci izbačeni su iz jednačina, a same jednačine su umnogome pojednostavljene.

Drugi korak je podrazumevao aproksimaciju krive efikasnosti step funkcijom (uključujući K_{α} i K_{β} fotone samarijuma čije su energije 40 keV i 46 keV, respektivno). Za određivanje step funkcije korišćen je metod najmanjeg kvadrata, pri čemu je ostatak definisan kao razlika između teorijskog izraza i eksperimentalne vrednosti za brzinu brojanja.

Na taj način formiran je sistem jednačina koji se mogao numerički rešiti, a kao rešenja dobijene su korigovane efikasnosti u piku.

Korekcionni faktori za koincidentno sumiranje predstavljaju odnos nekorigovane i korigovane efikasnosti u piku.

Svi proračuni rađeni su korišćenjem matematičkog programa Matematika 5.2 (Wolfram Research Company).

3. Vrednosti dobijenih korekcionnih faktora

Korekcionni faktori za koincidentno sumiranje računati su za ^{152}Eu u geometriji cilindrične PVC kutijice i to na tri rastojanja od detektora:

- kutijica je postavljena na rastojanju od 10 cm iznad detektora,
- kutijica na detektoru, pri čemu je između kutijice i detektora apsorber od bakra i
- kutijica u kombinaciji sa bakrom i pleksiglasom kao apsorberom na detektoru, pri čemu je između kutijice i detektora apsorber od pleksiglasa (Slika 1)



Slika 1. Geometrija plastične cilindrične kutijice sa apsorberom od pleksiglasa

Zapreminski izvori pripremljeni od 2M HCl mereni su na spektrometarskom sistemu koji je sadržao HPGe detektor n-tipa. Svi spektri analizirani su softverom ANGES verzija 1.0, koji je izuzetno pouzdan pri dekonvoluciji spektara.

U Tabeli 1 prikazane su dobijene vrednosti korekcionih faktora za koincidentno sumiranje za ^{152}Eu zajedno sa apsolutnom mernom nesigurnošću.

Tabela 1. Dobijene vrednosti korekcionih faktora za ^{152}Eu i geometriju cilindrične plastične kutijice

Energija (keV)	Korekcionni faktori na 10 cm	Apsolutna merna nesigurnost	Korekcionni faktori za bakar	Apsolutna merna nesigurnost	Korekcionni faktori za pleksiglas	Apsolutna merna nesigurnost
121.8	1.017	0.005	1.083	0.002	1.166	0.009
244.7	1.022	0.009	1.115	0.005	1.247	0.006
344.3	1.008	0.003	1.054	0.002	1.061	0.007
411.1	1.017	0.010	1.135	0.002	1.152	0.012
444.0	1.022	0.002	1.106	0.002	1.220	0.002
564.0	0.949	0.006	1.023	0.004	1.126	0.004
688.6	1.014	0.007	1.034	0.004	1.152	0.019
778.9	1.011	0.007	1.080	0.009	1.092	0.002
867.4	1.026	0.001	1.135	0.004	1.286	0.036
964.1	1.005	0.016	1.041	0.008	1.160	0.015
1085.8	1.003	0.015	0.975	0.003	1.032	0.002
1089.7	1.010	0.010	1.073	0.011	1.085	0.003
1112.1	1.013	0.008	1.032	0.004	1.149	0.019
1212.9	1.026	0.001	1.132	0.005	1.280	0.036
1299.1	1.011	0.006	1.080	0.009	1.093	0.001
1408.0	1.014	0.007	1.038	0.004	1.156	0.020

Ukupna merna nesigurnost obuhvata statističku mernu nesigurnost i mernu nesigurnost matematičkog modela. Merna nesigurnost dobijena variranjem ulaznih podataka u okviru statističke merne nesigurnosti manja je od 0.1 %. Merna nesigurnost matematičkog modela uglavnom potiče od nesigurnosti unetih ulaznih podataka posledica nedovoljno relevantnih ulaznih podataka.

4. Zaključak

U radu su date vrednosti izračunatih korekcionih faktora za ^{152}Eu u zapreminskom izvoru. Dobijene vrednosti korekcionih faktora potvrdile su da se udaljavanjem izvora od detektora smanjuje efekat koincidentnog sumiranja. Takođe postojanje apsorbera je uticalo na vrednosti korekcionih faktora, pa su oni na nekim energijama za slučaj apsorbera od pleksiglasa čak i do 10 % veći od vrednosti korekcionih faktora za slučaj apsorbera od bakra. Rezultati dobijeni primenom razvijenog matematičkog modela zasnovanog na matričnom formalizmu na zapreminske izvore pokazali su odlično slaganje sa prihvaćenim rezultatima drugih učesnika u interkomparaciji.

Prikazani način izračunavanja korekcionih faktora za radionuklid sa kompleksnom šemom raspada kao što je ^{152}Eu pokazao se kao pouzdan. Kako se ^{152}Eu često koristi za kalibraciju poluprovodničkih HPGe spektrometara, u cilju dobijanja tačne i precizne krive efikasnosti, odnosno pouzdanih rezultata merenja uzoraka iz životne sredine, neophodno je u račun uvrstiti i korekzione faktore za koincidentno sumiranje.

5. Literatura

- [1] Novković, D., Kandić, A., Đurašević, M., Vukanac, I., Milošević, Z., Nadder, L., 2007, Coincidence summing of X-ray and γ -rays in γ -ray spectrometry. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 578, 207–217.
- [2] Novković, D., Đurašević, M., Kandić, A., Vukanac, I., Milošević, Z., Nadder, L., 2007, Coincidence summing of X-and γ -rays of ^{133}Ba , Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 582, 592–602.
- [3] Novković, D., Vukanac, I., Kandić, A., Đurašević, M., Milošević, Z., 2012, Coincidence summing of X-and gamma rays of ^{75}Se , Applied Radiation and Isotopes 70, 520–527.
- [4] M.-C. Lépy et al., 2012, Intercomparison of methods for coincidence summing corrections in gamma-ray spectrometry—part II (volumesources), Applied Radiation and Isotopes 70, 2112 – 2118.
- [5] Laboratoire National Henri Becquerel, Tables of evaluated data and comments on evaluation, http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm

CALCULATION OF COINCIDENCE SUMMING CORRECTION FACTORS FOR ^{152}Eu - VOLUME SOURCES

Mirjana ĐURAŠEVIĆ, Aleksandar KANDIĆ, Ivana VUKANAC, Bojan ŠEŠLAK i Zoran MILOŠEVIĆ

Institut za Nuklearne Nauke “Vinča”, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, mirad@vinca.rs

ABSTRACT

A theoretical model for solving the problem of coincidence summing based on matrix formalism was applied to the volume sources in the intercomparison exercise, organized by the Gamma-spectrometric working group within the International Committee for Radionuclide Metrology. A complex decay scheme of ^{152}Eu was analyzed and the system of equations was formed. Solving this system required the introduction of some approximations. The calculated correction factors for a cylindrical geometry box and radionuclide ^{152}Eu in combination with copper and plexiglas as absorber are presented in this paper.

PRORAČUN KOREKCIONIH FAKTORA ZA KOINCIDENTNO SUMIRANJE ZA NEKE PRIRODNE RADIONUKLIDE PRIMENOM EFFTRAN SOFTVERA

**Mirjana ĐURAŠEVIĆ, Aleksandar KANDIĆ, Ivana VUKANAC, Bojan ŠEŠLAK
i Zoran MILOŠEVIĆ**

Institut za Nuklearne Nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, mirad@vinca.rs

SADRŽAJ

Koincidentno sumiranje X i gama zračenja u spektru snimljenom na HPGe detektoru predstavlja jedan od najvažnijih problema u gama spektrometriji, naročito u bliskoj geometriji. Prisutni problem može se rešiti korišćenjem korekcionih faktora za koincidentno sumiranje. Cilj ovog rada je da se prikažu korekcionni faktori dobijeni korišćenjem matematičkog programa EFFTRAN. Korekcionni faktori izračunati su za neke prirodne radionuklide uranovog i torijumovog niza za slučaj geometrije cilindrične PVC kutijice od 200 ml sa matriksom zemlje.

1. Uvod

Određivanje aktivnosti gama emitera u uzorcima iz okoline, u većini slučajeva predstavlja težak zadatak. Razlog za to su uglavnom niske koncentracije aktivnosti prisutnih radionuklida u ispitivanom uzorku. Takvi uzorci su uvek zapreminski, zahtevaju dugo vreme merenja kako bi se postigla dobra statistika merenja i mere se u bliskoj geometriji. Sa druge strane, gama spektrometrija sve više podrazumeva korišćenja germanijumskih detektora visoke efikasnosti i širokog opsega merenja od nekoliko keV do nekoliko MeV. Sve to, međutim, dovodi do izraženije pojave efekta koincidentnog sumiranja, naročito kod radionuklida sa kompleksnom šemom raspada. Pikovi nastali usled koincidentnog sumiranja $X+X$, $X+\gamma$ i $\gamma+\gamma$ značajno komplikuju spektar i menjaju odbroj u singl pikovima posmatranih radionuklida. Zato je neophodno izvršiti korekciju na efekat koincidentnog sumiranja.

Do sada se velika pažnja poklanjala uticaju i korekciji koincidentnog sumiranja za slučaj veštačkih radionuklida, dok se ova pojava nije dovoljno razmatrala za slučaj prirodnih radionuklida. Razlog za to je što se uticaj korekcionih faktora za koincidentno sumiranje za slučaj prirodnih radionuklida u uzorcima iz okoline može zanemariti imajući u vidu značajnu statističku mernu nesigurnost rutinskih merenja. Međutim, ukoliko je u pitanju merenje u okviru učešća u interkomparacijama ili PT aktivnostima, uticaj korekcionih faktora na koincidentno sumiranje pri proračunu aktivnosti ne sme se zanemariti [1].

Korekcionni faktori za koincidentno sumiranje zavise od geometrije merenja i karakteristika samog detektora, tako da korišćenje nekih opštih tablica sa korekcionim faktorima, kao što su Debertin i Schötzig [2], ne daje dovoljno precizane rezultate.

Najbolje rešenje je da se za dati detektorski sistem i datu geometriju merenja odrede odgovarajući korekcionni faktori za koincidentno sumiranje. U tu svrhu mogu se koristiti brojni numerički programi zasnovani na Monte Carlo proračunima, kao što su GESPECOR, ETNA, EFFTRAN, ANGLE.

Cilj ovog rada je da se prikažu korekcionni faktori dobijeni korišćenjem numeričkog programa EFFTRAN za radionuklide iz uranovog i torijumovog niza za 200 ml cilindričnu kutijicu sa matriksom zemlje.

2. Koincidentno sumiranje

Pojava koincidentnog sumiranja nastaje u slučaju kada se radioaktivni raspad pretka u osnovno stanje potomka dešava uz emisiju nekoliko gama i/ili X- zraka u kaskadi, pri čemu se ceo proces odvija unutar vremena razlaganja spektrometra. Takve koincidencije se nazivaju stvarnim koincidencijama. Kao posledica toga na spektru će se pored dva postojeća singl pika pojaviti i treći pik na energiji koja je jednaka zbiru energija pojedinačnih gama fotona. Odbroji ispod pikova kod oba fotona biće smanjeni (*summing out*), dok će sumacioni pik imati višak u odbroju (*summing in*). Svako određivanje aktivnosti bazirano na analizi odbroja singl pika ova dva gama kvanta biće učinjeno sa greškom. Zbog toga je u cilju veće tačnosti pri obradi spektra neophodno izvršiti korekciju na efekte pravih koincidencija.

3. EFFTRAN softver

Numerički program EFFTRAN (A Monte Carlo efficiency transfer code) predstavlja Monte Carlo softver zasnovan na metodi transfera efikasnosti [3]. Začetnici ove metode su Moens i De Corte [4]. Metoda se zasniva na ideji da je odnos efikasnosti singl pika i totalne efikasnosti na datoj energiji gama zračenja nezavisan od položaja, veličine, gustine i sastava uzorka.

Sam program može se koristiti za određivanje transfera efikasnosti kao i korekcionih faktora za koincidentno sumiranje.

4. Rezultati primene numeričkog programa EFFTRAN za određivanje korekcionih faktora za koincidentno sumiranje

Korekcionni faktori za koincidentno sumiranje izračunati su korišćenjem programa EFFTRAN za poznate karakteristike koaksijalnog poluprovodničkog HPGe detektora p-tipa i karakteristike posmatranog izvora. Karakteristike detektora odnose se na dimenzije i materijal kristala, kućišta i prozora detektora, kao i mrtav sloj kristala detektora, dok se karakteristike izvora odnose na dimenzije i materijal posude u kojoj se nalazi uzorak i vrstu i količinu matriksa. Svi proračuni rađeni su za matriks zemlje smešten u 200 ml plastičnu cilindričnu kutijicu. U Tabeli 1 prikazane su dobijene vrednosti korekcionih faktora za energije sa najvećim prinosom nekih prirodnih radionuklida iz uranovog i torijumovog niza. Radionuklidi iz uranove serije sa najintenzivnijom emisijom u spektru su ^{214}Pb i ^{214}Bi . Zbog kratkog vremena poluraspada, ova dva radionuklida u zatopljenom uzorku dostižu sekularnu ravnotežu sa ^{226}Ra za 40 dana. Za gama linije sa najvećim prinosom ^{214}Pb (351.932 keV, 295.224 keV i 241.997 keV) se ne očekuje postojanje korekcionih faktora, jer one same ne učestvuju u kaskadnim prelazima. Gama linije sa najvećim prinosima za ^{214}Bi su 609.312 keV i 1120.387 keV. Obe linije mogu imati značajan summing-out, pošto se emituju u kaskadi sa drugim gama linijama.

Od radionuklida iz torijumove serije treba obratiti pažnju na ^{228}Ac iz razloga što se preko njega može odrediti aktivnost ^{232}Th . Za gama linije ^{228}Ac sa najvećim prinosom (911.196 keV i 968.960 keV, 338.960 keV) dolazi do izražaja pojava koincidentnih efekata. Za ^{208}Tl gama linija sa najvećim prinosom je 583.187 keV. Za nju se može očekivati značajna korekcija na koincidentno sumiranje s obzirom da je uvek praćena emisijom gama fotona energije 2614.5 keV

Radionuklid ^{235}U iz aktinijumove serije često se određuje pri radiološkoj karakterizaciji uzoraka iz životne sredine. Takođe, za određivanje aktivnosti ^{226}Ra preko linije od 186 keV potrebno je poznavati i doprinos toj liniji koji potiče od ^{235}U , pa je stoga i za taj radionuklid potrebno izračunati korekcionne faktore.

Tabela 1. Korekcionni faktori za koincidentno sumiranje izračunati programom EFFTRAN za energije najvećeg prinosa nekih prirodnih radionuklida

E (keV)	Prinos (%)*	radionuklid	Korekcionni faktor
351.932	35.60	²¹⁴ Pb	1.000
295.224	18.414	²¹⁴ Pb	1.000
241.997	7.268	²¹⁴ Pb	1.002
609.312	45.49	²¹⁴ Bi	1.046
1120.287	14.91	²¹⁴ Bi	1.049
238.632	43.6	²¹² Pb	1.000
727.330	6.65	²¹² Bi	1.014
583.187	85.6	²⁰⁸ Tl	1.053
860.53	12.4	²⁰⁸ Tl	1.020
911.196	26.2	²²⁸ Ac	1.015
968.960	15.9	²²⁸ Ac	1.016
338.960	11.4	²²⁸ Ac	1.022
185.720	57	²³⁵ U	1.010
143.767	10.94	²³⁵ U	1.013
163.356	5.08	²³⁵ U	1.001
205.3	5.02	²³⁵ U	1.001

* Vrednosti za prinose datih energija preuzeti su iz Nuclear data [5]

5. Zaključak

U radu su prikazani korekcionni faktori izračunati korišćenjem matematičkog programa EFFTRAN. Kao što je očekivano, za radionuklide iz uranove serije, ²¹⁴Pb skoro da ne zahteva korekcije na koincidentno sumiranje, dok su za ²¹⁴Bi te korekcije reda 5 %.

Za radionuklide iz torijumove serije, kao što se može videti iz Tabele 1, korišćenje korekcionnih faktora je neophodno ukoliko se želi postići bolja tačnost traženih aktivnosti.

Treba naglasiti i to da su svi korekcionni faktori računati za poluprovodnički HPGe detektor p-tipa, dok je za detektore n- tipa uticaj korekcionnih faktora znatno veći.

6. Literatura

- [1] M. Garcia-Talavera, J.P. Laedermann, M. Décombaz, M.J. Daza, B. Quintana, Coincidence summing corrections for the natural decay series in g-ray spectrometry, Journal of Radiation and Isotopes 54 (2001), 769-776
- [2] Debertin, K., Schötzig, U., 1990. Bedeutung von Summationskorrekturen bei der Gammastrahlen-Spektrometrie mit Germaniumdetektoren. PTB-Bericht PTB- Ra-24, Braunschweig ISSN0 341-6747, ISBN 3-89429-010-2.
- [3] T. Vidmar. EFFTRAN—A Monte Carlo efficiency transfer code for gamma-ray spectrometry. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 550, Issue 3, 21 (2005), 603-608.
- [4] L. Moens, J. De Donder, X. Lin, F. De Corte, A. De Wispelaere, A. Simonits, J. Hoste, Nucl. Instr. and Meth.187 (1981) 451.
- [5] Laboratoire National Henri Becquerel, Tables of evaluated data and comments on evaluation, http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm

CALCULATION OF COINCIDENCE SUMMING CORRECTION FACTORS FOR SOME NATURAL RADIONUCLIDES USING EFFTRAN SOFTWARE

**Mirjana ĐURAŠEVIĆ, Aleksandar KANDIĆ, Ivana VUKANAC, Bojan ŠEŠLAK
i Zoran MILOŠEVIĆ**

Institut za Nuklearne Nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, mirad@vinca.rs

ABSTRACT

Coincidence summing of X- and gamma-rays in spectra recorded by HPGe detectors is one of the most important problem in gamma ray spectrometry, especially at low source-detector distance. It could be solved by using coincidence summing correction factors. The aim of this paper is to present the correction factors obtained by using a mathematical program EFFTRAN. All correction factors were calculated for the some natural radionuclides of uranium and thorium series for the 200 ml PVC cylindrical box geometry with soil matrix.

ЕФИКАСНОСТ ДЕТЕКЦИЈЕ ФОТОНА 662 keV 32-ДЕТЕКТОРСКИМ СИСТЕМОМ ТИПА CRYSTAL BALL – СА И БЕЗ КОЛИМАТОРА

Невенка М. АНТОВИЋ¹, Сергеј К. АНДРУХОВИЧ², Александар В. БЕРЕСТОВ²

1) Природно-математички факултет, Универзитет Црне Горе, Подгорица, Црна Гора,
nena@rc.pmf.ac.me

2) Институт за физику, Академија наука, Минск, Бјелорусија, andru@ifanbel.bas-net.by

САДРЖАЈ

Разматрана је ефикасност регистрације фотона енергије 662 keV (^{137}Cs), спектрометром АРГУС са 32 NaI(Tl) детектора и геометријом мјерења $\sim 4\pi$ – без и са оловним колиматорима, као и двоструке коинциденције условљене расијањем овог фотона из кристала у кристал.

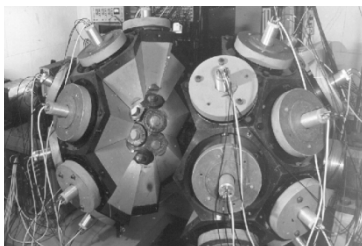
1. Увод

Код 32-детекторског система АРГУС (Институт за физику, Минск), типа *Crystal Ball* (геометријска ефикасност регистрације 0.9-4π srad), са кристалима NaI(Tl) димензија 15 cm x 10 cm и фотомултипликаторима ФЕУ-49Б [1], брзина бројања фона, у интегралном, режиму двоструких, троструких и четвороструких коинциденција, за 2000 s мјерења, износила је (у импулсима по секунди) 378.4 (интегрални режим), 38.6 (режим двоструких коинциденција) и 18.6 (режим троструких коинциденција) и 12.6 (режим четвороструких коинциденција) [2].

Главни допринос двоструким фонским коинциденцијама код спектрометара овог типа даје расијање фотона из кристала у кристал. Управо ти фотони (комптонски расијани на материјалу детектора), отежавају анализу спектра и утичу на тачност различитих мјерења, због чега је неопходно предузети одговарајуће мјере. Стога су у систем АРГУС уграђени оловни колиматори. Експерименталне ефикасности регистрације у пиксу тоталне апсорпције (фотоефикасности) ($\epsilon_{\text{фот}}$) и тоталне ефикасности регистрације ($\epsilon_{\text{тот}}$) фотона 661.66 keV (тј. 662 keV), које емитује извор ^{137}Cs активности 82 200 Вq – прије и након уградње колиматора, представљене су у овом раду. Одређена је и енергетска резолуција, као и двоструке коинциденције условљене комптонским расијањем ових фотона.

2. Спектрометар АРГУС са колиматорима

Колиматори у облику диска, дебљине и спољашњег дијаметра 30 mm и 150 mm, респективно, са отворима (дијаметар 80 mm – на површини детектора, и 50 mm – ка центру уређаја), уграђени у спектрометар АРГУС (слика 1), смањили су фонску брзину бројања уређаја у интегралном режиму око 13 %, у режиму двоструких и троструких коинциденција за око два пута (за вријеме мјерења 2000 s, у енергетском дијапазону од 200 keV до 1500 keV, импулса по секунди: 19.4 – у режиму двоструких коинциденција, и 10.1 – у режиму троструких коинциденција), а у режиму четвороструких коинциденција – за око три пута [2].



Слика 1. 32-детекторски систем АРГУС са уграђеним оловним колиматорима

3. Резултати мјерења и дискусија

Ефикасност регистрације и енергетска резолуција, прије и након уградње колиматора у спектрометар (индекси 1 и 2, респективно), добијене из сумарних спектра, представљене су у табели 1. У табели 2 дати су подаци за појединачне детекторе (32).

Табела 1. Ефикасност и енергетска резолуција – сумарни спектар

Фотон, keV	$\epsilon_{\text{фот1}}$	$\epsilon_{\text{фот2}}$	$\epsilon_{\text{тот1}}$	$\epsilon_{\text{тот2}}$	$(\Delta E/E)_1$, %	$(\Delta E/E)_2$, %
662	0.38	0.12	0.68	0.18	12.9	11.7

Смањење радијуса осјетљивих површина детектора, смањило је фотоефикасност за око 3.2, а тоталну ефикасност регистрације за око 3.8 пута. Постављањем колиматора, енергетска резолуција смањена је за око 10 %.

Као што је познато, и код детектора истог типа и димензија, ефикасности регистрације се разликују, због чега је умјесто теоријских процјена много боље урадити њихово експериментално одређивање. За појединачне детекторе (табела 2), ефикасности регистрације $\epsilon_{\text{фот}}$ крећу се од 0.007062 до 0.014471 (сума 0.383553), са средњом вриједношћу 0.011986 (без колиматора), и од 0.001959 до 0.0044 (сума 0.123658), са средњом вриједношћу 0.003864 (са колиматорима); док се тоталне ефикасности регистрације $\epsilon_{\text{тот}}$ крећу од 0.013847 до 0.026053 (сума 0.677527), са средњом вриједношћу 0.021173 (без колиматора), и од 0.002965 до 0.006833 (сума 0.17914), са средњом вриједношћу 0.005598 (са колиматорима). Енергетска резолуција била је од 9.4 % до 20.5 % (средња вриједност 12.9 %) – без колиматора, и од 9.3 % до 19.9 % (средња вриједност 11.7 %) – са колиматорима.

Анализујући даље комптонски расијано зрачење, разматране су двоструке коинциденције изазване расијаним фотонима чија сумарна енергија одговара енергији емитованог фотона (тј. уз примјену енергетског критеријума: $E_1, E_2 = (50-800) \text{ keV}$, $\Sigma E \in (662 \pm 2\Delta E/E) \text{ keV}$; гдје су E_1 и E_2 енергије фотона који изазивају коинциденцију). Исти извор ^{137}Cs мјерен је (t) 50.3 s у систему без колиматора, и 601 s у систему са колиматорима (табела 3).

N представља број регистрованих двоструких коинциденција, n – број комбинација парова детектора који могу регистровати двоструку коинциденцију и налазе се под назначеним углом¹, f – брзина бројања фона која се односи на један пар детектора под датим углом.

Истраживање је спроведено између осталог и стога што је основни извор фона при регистрацији 3γ -распада позитронијума уствари расијање једног од два фотона из двофотонског распада и његово регистровање у другом детектору [2], са чим у вези су и разматране коинциденције условљене комптонски расијаним фотонима.

Из табеле 3 види се да је, постављањем оловних колиматора, брзина бројања комптонски расијаних фотона значајно смањена: између 24.9 (угао 116.57°) и 326.7 пута (угао 41.81°), односно, у средњем, 107.6 пута. Слабије пригушење комптонског расијања уочава се и код геометрија 11 ($\sim 180^\circ$) – 25.5 пута, затим 10 (142.62°) – око 30.9 пута, и 6 и 9 (100.81° и 138.19° , респективно) – 47 и 47.1 пут, респективно.

¹ Укупан број комбинација детектора који могу регистровати двоструку коинциденцију (n) је 496, а наведени угао је угао из геометријског центра спектрометра на центре два детектора.

Табела 2. Ефикасности и енергетска резолуција – појединачни детектори

Број детектора	$\epsilon_{\text{фот1}}$	$\epsilon_{\text{фот2}}$	$\epsilon_{\text{тот1}}$	$\epsilon_{\text{тот2}}$	$(\Delta E/E)_1$, %	$(\Delta E/E)_2$, %
1	0.011340	0.004100	0.023301	0.005360	20.1	9.6
2	0.011742	0.003735	0.023900	0.005424	19.4	11.8
3	0.009871	0.003401	0.017697	0.004955	11.7	9.8
4	0.013447	0.003700	0.021647	0.005240	9.8	9.6
5	0.009591	0.003638	0.017925	0.005286	13.9	11.6
6	0.013139	0.001959	0.022531	0.002965	10.3	10.0
7	0.010364	0.003800	0.018210	0.005738	13.3	12.8
8	0.010213	0.003923	0.018866	0.005866	15.1	12.5
9	0.013547	0.003803	0.026053	0.005682	13.2	12.0
10	0.012549	0.003863	0.022374	0.005682	11.7	10.6
11	0.010364	0.003749	0.018424	0.005489	15.0	14.6
12	0.012980	0.003818	0.022488	0.005792	11.4	10.1
13	0.013145	0.003970	0.022303	0.005682	10.5	10.0
14	0.011206	0.003871	0.018424	0.005415	12.8	11.5
15	0.012880	0.004163	0.022645	0.005738	11.3	10.3
16	0.014368	0.003933	0.024485	0.005525	12.7	18.6
17	0.007062	0.003977	0.013847	0.005986	12.9	12.0
18	0.013630	0.004400	0.023957	0.006318	11.3	10.0
19	0.010755	0.003945	0.015900	0.005129	11.6	10.9
20	0.013045	0.004053	0.024627	0.006833	20.5	19.9
21	0.010324	0.003761	0.018652	0.005664	10.3	11.4
22	0.014471	0.004016	0.024827	0.005710	11.2	10.1
23	0.010202	0.003723	0.019750	0.005360	15.5	13.7
24	0.009996	0.003950	0.018025	0.006050	9.9	10.5
25	0.014377	0.004242	0.022859	0.005673	9.4	9.3
26	0.014394	0.004354	0.023572	0.006097	13.3	12.3
27	0.010869	0.003779	0.018139	0.005342	11.6	10.8
28	0.012885	0.003931	0.023829	0.005756	16.4	15.3
29	0.013912	0.004096	0.023629	0.006060	12.0	10.8
30	0.010473	0.003743	0.018994	0.005774	11.5	11.3
31	0.013085	0.003965	0.022403	0.005719	12.2	11.6
32	0.013327	0.004297	0.023244	0.005830	11.1	9.9

Табела 3. Комптонски расијано зрачење – двоструке коинциденције

Спектрометар АРГУС – без колиматора					Спектрометар АРГУС – са колиматорима				
Угао [°]	<i>N</i>	<i>N/n</i>	<i>(N/n)/t</i>	$[(N/n)/t]-f$	Угао [°]	<i>N</i>	<i>N/n</i>	<i>(N/n)/t</i>	$[(N/n)/t]-f$
37.38	8445	140.750	2.7982	2.7872	37.38	617	10.283	0.0171	0.0109
41.81	5539	184.633	3.6706	3.6592	41.81	269	8.967	0.0149	0.0112
63.43	873	29.100	0.5785	0.5755	63.43	211	7.033	0.0117	0.0106
70.53	10748	179.133	3.5612	3.5528	70.53	612	10.200	0.0170	0.0162
79.19	5111	85.183	1.6935	1.6889	79.19	795	13.250	0.0221	0.0213
100.81	5734	95.566	1.8999	1.8947	100.81	1475	24.583	0.0409	0.0403
109.47	10115	168.583	3.3515	3.3424	109.47	1674	27.900	0.0465	0.0458
116.57	1833	61.100	1.2147	1.2111	116.57	888	29.600	0.0493	0.0486
138.19	4804	160.133	3.1835	3.1738	138.19	1228	40.933	0.0682	0.0674
142.62	6317	105.283	2.0931	2.0859	142.62	2468	41.133	0.0685	0.0675
179.99	1841	115.062	2.2875	2.2791	179.99	873	54.563	0.0909	0.0894

Конечно, јасно је да су корекције због доприноса комптонски расијаних фотона неопходне, а један од често коришћених метода је тзв. „метод трапеза“.

4. Литература

- [1] Андрухович С. К. и др. Автоматизиованна региструјућа гамма-установка совпадений (АРГУС). *Препринт Института физики АН БССР*, Минск, 1986.
- [2] Антовић Невенка. Испитивање ријетких распада позитронијума на вишедетекторским гама-коинцидентним спектрометрима. *Докторска дисертација*, Физички факултет Универзитета у Београду, 2000.

DETECTION EFFICIENCY OF THE 662 keV PHOTONS BY THE 32-CRYSTAL BALL DETECTOR SYSTEM – WITH AND WITHOUT COLLIMATORS

Nevenka M. ANTOVIC¹, Sergey K. ANDRUKHOVICH², Aleksandar V. BERESTOV²

1) Faculty of Natural Sciences and Mathematics, University of Montenegro, Podgorica

2) Institute of Physics, Academy of Sciences, Minsk, Belarus

ABSTRACT

The registration efficiency of photons with energy of 662 keV (^{137}Cs) by the spectrometer ARGUS with 32 NaI(Tl) detectors and measuring geometry $\sim 4\pi$ – without and with lead collimators, has been discussed, as well as double coincidences caused by the photon scattering from crystal to crystal.

PROMJENE U BRZINI BROJANJA DETEKTORA U ZAVISNOSTI OD POZICIJE IZVORA U DETEKCIONOJ KOMORI VIŠEDETEKTORSKOG 4π SPEKTROMETRA

Nikola SVRKOTA¹, Nevenka M. ANTOVIĆ²

1) Centar za ekotoksikološka ispitivanja, Podgorica, Crna Gora, nsvrkota@t-com.me

2) Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica, Crna Gora

SADRŽAJ

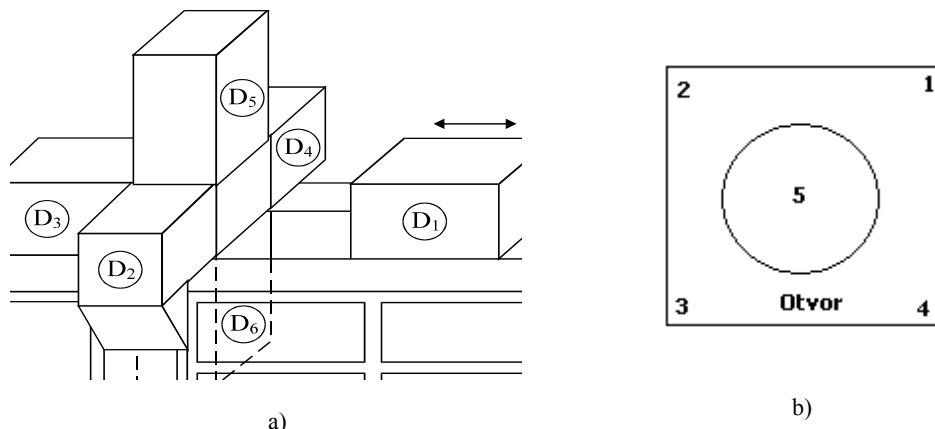
U ovom radu su predstavljene promjene u brzinama brojanja impulsa jednog od detektora u šestdetektorskom sistemu PRIPJAT-2M, u zavisnosti od pozicije izvora u detekcionoj komori.

1. Uvod

Izvršena je (početna) procjena relativnih odnosa brzina brojanja jednog od detektora 4π šestdetektorskog spektrometra PRIPJAT-2M [1], za tri radionuklida (^{137}Cs , ^{226}Ra i ^{232}Th), u zavisnosti od njihovog položaja u detekcionoj komori. U krajnjem, na osnovu toga bi se mogla procijeniti i promjena efikasnosti spektrometra, odnosno *efekat krajeva*.

2. Pozicija izvora i mjerenje

Za ovo ispitivanje korišćeni su izvori ^{137}Cs (tačkasti, aktivnosti 25.81 kBq na dan 19. 04. 1983. godine, dok je aktivnost izvora u toku mjerenja bila 13.2 kBq), ^{232}Th (visine 10 mm, aktivnosti 1000 Bq) i izvor ^{226}Ra (u metalnom cilindru visine 6 cm, aktivnosti 2250 Bq). Oznake detektora i pozicije izvora u odnosu na otvor detekcione komore prikazani su na slici 1 – a) i b), respektivno.

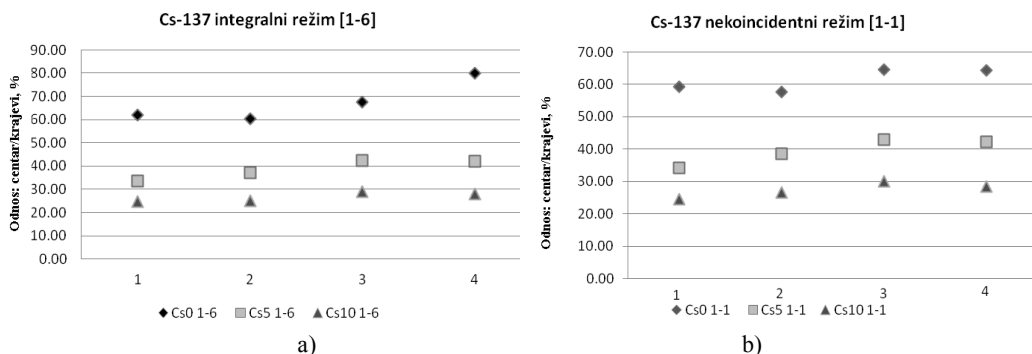


Slika 1. Šematski prikaz: a) pozicija detektora u sistemu PRIPJAT-2M, b) pozicija izvora u detekcionoj komori.

Izvori su postavljeni u krajeve/uglove detekcione komore (oznake pozicija: 1, 2, 3, 4) i u centar iste (pozicija 5), na rastojanjima/visini 0 cm, 5 cm i 10 cm od donjeg (broj 6) detektora. Mjerenja su vršena u integralnom, nekoincidentnom, kao i u režimima dvostrukih i trostrukih koincidencija (u slučaju emitera kaskada fotona, tj. izvora ^{226}Ra i ^{232}Th), tokom 200 s realnog vremena.

3. Promjene u brzini brojanja šestog detektora spektrometra PRIPJAT-2M

Odnos brzina brojanja kada je izvor u centralnoj poziciji (5) i kada se nalazi na *krajevima* (1, 2, 3 i 4), za tačkasti izvor ^{137}Cs varira u zavisnosti od pozicije i od visine – do 80 % za visinu 0 cm od šestog detektora (na poziciji 4, u nekoincidentnom režimu). Na većem rastojanju od donjeg/šestog detektora, ova razlika se smanjuje. Na slici 2 dat je grafički prikaz (poređenje) dobijenih rezultata.



Slika 2. Poređenje odnosa brzina brojanja centar/krajevi za različite pozicije izvora ^{137}Cs u integralnom (a) i nekoincidentnom (b) režimu rada.¹

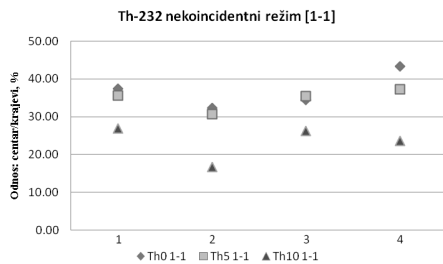
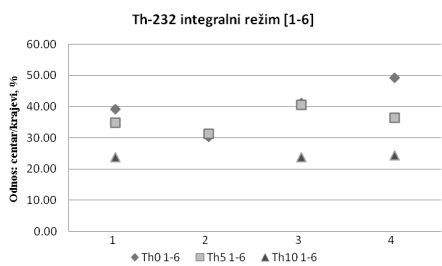
Grafici a) i b) na slici 2 pokazuju da brzine brojanja jednog (šestog) detektora, u slučaju ^{137}Cs , imaju skoro identične relativne odnose u oba režima u kojima se on može mjeriti (integralni i nekoincidentni). Odstupanja u brzini brojanja u odnosu na centralnu poziciju na visini 5 cm kreću se od 34 % do 42 %, dok su najmanja odstupanja uočena kada se izvor nalazi na visini od 10 cm (25-30) %.

Odnosi brzina brojanja (centralna pozicija/krajevi) za ^{232}Th prikazani su na slici 3 (integralni i nekoincidentni režim), kao i na slici 4 (režim dvostrukih i trostrukih koincidencija). Na rastojanju 0 cm od šestog detektora (tj. detektora broj 6), odstupanja su do 49 % – za integralni, i do 43 % – za nekoincidentni režim rada. Za visinu od 5 cm, razlike se kreću od 30 % do 40 % za oba režima rada, a za visinu od 10 cm – odstupanja su između 20 % i 30 %. Kao i u slučaju ^{137}Cs , najmanje razlike u brzinama brojanja javljaju se za poziciju izvora torijuma na visini od 10 cm.

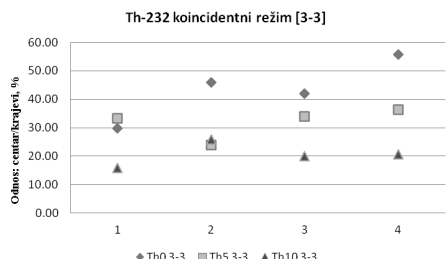
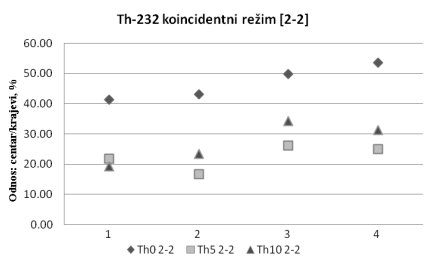
U režimu dvostrukih koincidencija, najveće odstupanje iznosi 53 % (pozicija 4) na rastojanju 0 cm od šestog detektora (kao i u prethodnim slučajevima, najveće odstupanje je na *nultoj* visini). Odstupanja za pozicije izvora koje odgovaraju rastojanjima (visinama) 5 cm i 10 cm od posmatranog detektora, kreću se u opsegu (17-26) % i (20-31) %, respektivno. Režim trostrukih koincidencija pokazao je da su odstupanja za pozicije izvora torijuma na visini od 5 cm u opsegu (23-36) %, a za pozicije izvora na visini 10 cm – (16-21) %.

Odnosi brzina brojanja impulsa (centar/krajevi) za ^{226}Ra prikazani su na slici 5. Radijumski izvor je sniman samo na rastojanju 0 cm od ispitivanog detektora (tj. izvor je postavljan na šesti detektor), zbog dimenzija izvora, i razlike u brzinama brojanja kreću se od 42 % do 46 % – za integralni, od 45 % do 50 % – za nekoincidentni, te od 41 % do 46 % – za režim dvostrukih koincidencija, dok su u režimu trostrukih koincidencija razlike u brzinama brojanja do 41 % (za poziciju 4).

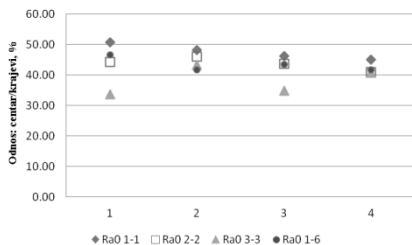
¹ Cs0, Cs5 i Cs10 – označavaju visinu pozicije izvora Cs u odnosu na šesti detektor (u cm), a 1-6 i 1-1 su oznake za integralni i nekoincidentni režim mjerenja, respektivno.



Slika 3. Poređenje odnosa brzina brojanja centar/krajevi za različite pozicije izvora ^{232}Th – u integralnom (a) i nekoincidentnom (b) režimu rada.



Slika 4. Poređenje odnosa brzina brojanja centar/krajevi za različite pozicije izvora ^{232}Th – u režimu dvostrukih koincidencija (a), i režimu trostrukih koincidencija (b).



Slika 5. Poređenje odnosa brzina brojanja centar/krajevi za različite pozicije izvora ^{226}Ra , u različitim režimima rada.

4. Diskusija i zaključak

Razlike u brzini brojanja impulsa iz izvora koji se nalazi na krajevima (tj. u uglovima) detekcione komore, u odnosu na brzinu brojanja kada se izvor nalazi u centru iste, javljaju se za sve izvore, i na svim rastojanjima od ispitivanog (šestog) detektora. Detektori koji čine spektrometar imaju prečnik 15 cm i visinu 10 cm, nalaze se u blokovima čije su ivice dužine 17.5 cm, što znači da su površine detektora i strane detekcione komore 177 cm^2 i 306 cm^2 , respektivno [1]. Kada se izvor nalazi na pozicijama 1, 2, 3 i 4, nalazi se u najlošijem položaju za detekciju, i to zbog toga što se ne nalazi na detektorima, već u uglu

između najbliža dva ili tri. Najveća odstupanja se javljaju na visini od 0 cm, što je i očekivano, budući da je razmatran šesti detektor, a upravo na njega se postavljaju izvori pri mjerenjima spektrometrom PRIPJAT-2M.

Jasno je da su ovakve razlike u brzini brojanja uslovljene činjenicom da je posmatran samo jedan (šesti) detektor, da su geometrije bile različite, itd. Buduća istraživanja bi trebala da (nakon analiza pojedinačnih detektora – neophodnih da bi se do kraja provjerio *efekat krajeva*) pokažu kako se mijenjaju efikasnost registracije pojedinih gama zraka i osjetljivost spektrometra u cjelini. Prethodno su, na primjer, istraživanja anizotropije osjetljivosti spektrometra tipa PRIPJAT koji se nalazi u Laboratoriji za nuklearnu spektroskopiju Instituta za fiziku Akademije nauka Bjelorusije u Minsku, pokazala da je maksimalno odstupanje efikasnosti od vrijednosti kada je izvor u centru (razmatrane su pozicije – udaljenost 2 cm od ugla, i 1 cm od sredine „rebra“), za gama zrak energije 662 keV (^{137}Cs) – 11 %, dok je za gama zrake 583 keV i 2615 keV (^{232}Th) to bilo 16 i 20 %, respektivno [2].

5. Literatura

- [1] Андрухович С. К., Берестов А. В., Гутко В. И., Хильманович А. М. Высококчувствительные многодетекторные гамма спектрометры ПРИПЯТЬ. *Препринт Института физики АН БССР*, Минск, 1995.
- [2] Андрухович С. К., Берестов А. В., Гаркуша С. Н., Рудак Э. А., Хильманович А. М., Узунбаджаков А. С, Зязюля Ф. Е., Антович Н. Расширение возможностей 4 π -гамма-спектрометров ПРИПЯТЬ. *Ядерна физика та енергетика (Nuclear Physics and Atomic Energy)* 2/20 (2007) 140-146.

CHANGES IN PULSE COUNTING RATE OF DETECTOR IN DEPENDENCE ON SOURCE POSITION IN MEASURING CHAMBER OF MULTIDETECTOR 4 π SPECTROMETER

Nikola SVRKOTA¹, Nevenka M. ANTOVIC²

1) *Centre for Ecotoxicological Research, Podgorica, nsvrkota@t-com.me*

2) *Faculty of Natural Sciences and Mathematics, University of Montenegro, Podgorica*

ABSTRACT

Changes in pulse counting rates of one detector in the six-detector system PRIPYAT-2M, in dependence on source position in the measuring chamber, are presented in this work.

PROCENA UTICAJA POKLOPCA PAKOVANJA OD IZABRANIH TITANIJUMSKIH LEGURA NA ENERGETSKU ZAVISNOST RADFET DOZIMETARA U POLJIMA GAMA I X ZRAČENJA

**Srboljub J. STANKOVIĆ¹, Radovan D. ILIĆ¹, Miloš ŽIVANOVIĆ¹,
Predrag OSMOKROVIĆ², Boris LONČAR³**

1) Institut za nuklearne nauke "VINČA", Beograd, Srbija, srbas@vinca.rs

2) Elektrotehnički Fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija, opredrag@verat.net

3) Tehnološko-metalurški Fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija, bloncar@tmf.bg.ac.rs

SADRŽAJ

U ovom radu je demonstrirana analiza dizajniranja RADFET dozimetra koja je bazirana na primeni numeričke metode Monte Karlo pri proceni uticaja titanijskih legura kao izabranog materijala za poklopac pakovanja dozimetara. Sprovedene su Monte Karlo simulacije transporta fotona X i gama zračenja različitih energija kroz razmatranu strukturu RADFET dozimetra i pritom je proračunat energetska zavisna faktor zaštite (SEDF) koji je moguće definisati za elektronske komponente datog tipa. Uzimajući u obzir vrednosti SEDF za različite vrednosti incidentnih energija fotona i dobijene odgovarajuće deponovane energije u materijalnim zonama RADFET dozimetra, ustanovljeno je da je titanijska legura sa cirkonijumom Ti-13Nb-13Zr pogodniji material za izradu poklopca za pakovanje.

1. Uvod

Od sredine sedamdesetih godina XX veka intenzivirao se novi pravac razvoja dozimetara jonizujućeg zračenja na bazi MOSFET poluprovodničkih komponenti [1]. Često se radijaciono osetljive MOSFET komponente nazivaju i RADFET detektorima ili dozimetrima, u zavisnosti od funkcije koja im je zadata u elektronskom sistemu. Inače, RADFET može da ima širok spektar primena u različitim oblastima, kao dozimetar u zaštiti od zračenja u okolini generatora jonizujućeg zračenja u medicinskim ustanovama, pri određivanju profila doze zračenja u radioterapijskim poljima, kao i kod određivanja pacijentnih doza. Široki dijapazon primena RADFET komponenti u dozimetriji i zaštiti od zračenja se može uočiti od njihovog korišćenja na postrojenjima u nuklearnoj industriji, pa sve do primene u okviru složenih elektronskih sistema koji su postavljeni na svemirskim letelicama i platformama. Kao i kod drugih tipova dozimetara, već su se sprovodila istraživanja vezana za energetska zavisnost RADFET-a. Do značajnih eksperimentalnih rezultata se došlo pri ispitivanju RADFET-a u opsegu fotonskih energija od 14 keV do 1250 keV[2]. Slično tome, druga grupa istraživača je sprovedla ispitivanja na radioterapijskom linearnom akceleratoru za visokoenergetsko X-zračenje do 8 MeV[3]. Uzimajući dosadašnja iskustva[4], kao jedno od važnih pitanja se postavlja kako pre sprovođenja eksperimenta sprovesti analizu dizajniranja detektora zračenja koja će dovesti do što povoljnije predikcije uticaja materijala koji će se koristiti za pakovanje RADFET-a, na njegovu energetska zavisnost. U tom cilju, u ovom radu je demonstrirana analiza dizajniranja RADFET dozimetra koja je bazirana na primeni numeričke metode Monte Karlo pri proceni uticaja titanijskih legura kao izabranog materijala za poklopac pakovanja dozimetara. Sprovedene su Monte Karlo simulacije transporta fotona X i gama zračenja različitih energija kroz razmatranu strukturu RADFET dozimetra i pritom je proračunat energetska zavisna faktor zaštite (SEDF) koji je moguće definisati za elektronske komponente datog tipa.

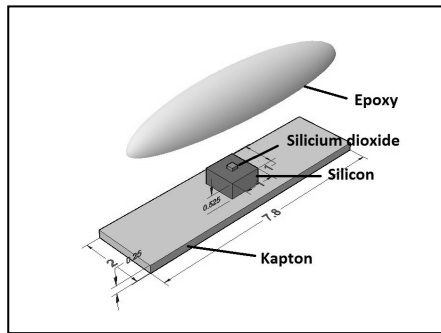
2. Postavka numeričkog eksperimenta

Dozimetrijski osetljivi element u strukturi RADFET dozimetra je oksid gejtja, kao tanki sloj silicijum oksida koji je postavljen na vrhu supstrata od silicijuma (Slika 1.). Pojednostavljeno gledano, pod dejstvom zračenja stvara se naelektrisanje unutar tankog sloja SiO₂ koje preko složenih fizičkih procesa ostvaruje promenu napona praga MOSFET tranzistora. Jedna od opšteprihvaćenih relacija je da promena napona praga MOSFET komponente u polju fotonskog zračenja je direktno proporcionalna

apsorbovanoj dozi zračenja u materijalnoj zoni oksida gejtja. U našem razmatranom slučaju, MOSFET je inkapsuliran u epoksi smoli koja mehanički ostvaruje primarnu zaštitu komponente. Radi ojačanja pre svega fizičke zaštite MOSFET se pakuje ispod poklopca koji može biti različitog geometrijskog oblika i od različitog konstrukcionog materijala. Ono što je evidentno je da se poklopac pakovanja pojavljuje i kao konstrukcioni element kojeg treba uzeti u obzir pri proceni promene energetske zavisnosti MOSFET komponente. U cilju praćenja očekivanih promena u energetske zavisnosti komponente uveden je energetske zavisni factor (SEDF) preko relacije:

$$SEDF(E_p) = \frac{D(\text{SiO}_2, E_p)_{\text{shield}}}{D(\text{SiO}_2, E_p)_{\text{bare}}} \quad (1)$$

Faktor SEDF je definisan kao odnos vrednosti absorbovane doze u MOSFET komponenti kada je stavljen poklopac pakovanja, i kada to nije učinjeno (u tzv. slučaju “gole” tranzistorske komponente). Tek kada se proceni, a kasnije i eksperimentalno utvrdi faktor SEDF, onda ima smisla uraditi sledeći korak ukoliko se pokaže da je to potrebno, a to je da se sprovede energetska kompenzacija RADFET dozimetra.



Slika 1. Šematski prikaz geometrijske konfiguracije i materijalnih zona RADFET dozimetra.

Da bi se uspešno realizovala simulacija transporta fotona veoma je važno za što verodostojniji matematički opis geometrijske konfiguracije RADFET-a iskoristiti adekvatan softver. Softverski paket FOTELP-2K10 [5][6] koristi RFG i PENGEOM6 softverske module za opis geometrije dozimetra. U skladu sa dostupnim podacima za veoma radijaciono osetljivi MOSFET [7][8], supstrat silicijuma (1 mm² u površini baze, 0.525 mm debljine) se nalazi unutar zapremine u kojoj je natkriven epoksi smolom (oznaka Epoxy na Slici 1.). Supstrat od silicijuma i poklopac od epoksi smole su postavljeni na fleksibilan kabl od kaptona (debljine 0.25 mm, širine 2 mm) u koji su inkapsulirane dve žice od zlata. Dozimetrijski osetljiva zapremina ima u bazi površinu dimenzija 0.2 mm x 0.2 mm, a debljina SiO₂ sloja je 1 μm. Ova osetljiva zapremina je formirana između supstrata i epoksi smole. Ovde navedene dimenzije svake pojedinačne geometrijske zone su proizašle od informacija dobijenih od proizvođača komponente. Eventualna neodređenost u proračunima koja potiče od geometrijskog modela je prisutna zbog geometrijskog oblika zone sa epoksi smolom. Iako se tokom simulacija na bazi numeričkog metoda Monte Karlo koristi poluelipsoid za zonu sa epoksi smolom, procenjuje se da odstupanje od stvarnog geometrijskog oblika stvara zanemarljivi doprinos u ukupnoj neodređenost rezultata simulacije. Nadalje, iznad zone sa epoksi smolom dolazi vakumirani sloj debljine 250 μm, a iznad dolazi zaštitni oklop poklopca pakovanja sa debljinom od 250 μm. U našim numeričkim eksperimentima za materijale od

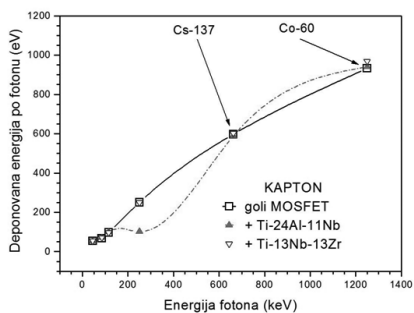
kjih su načinjeni zaštitni oklopi su izabrane dve titanijumske legure: 1. Ti-24Al-11Nb i 2. Ti-13Nb-13Zr .

3. Rezultati i diskusija

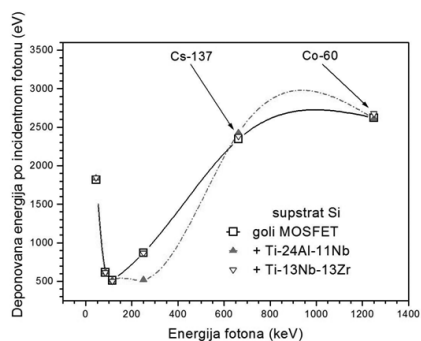
Iako je energetski odziv MOS uređaja i načina njihovog pakovanja u polju gama i X-zračenja ispitivan eksperimentalno i analitički, do skora nisu obavljena odgovarajuća istraživanja u pravcu koji bi bio specifičan i neophodan za razvoj metodologije u dizajniranju poluprovodničkih komponenti. Takav iskorak je ostvaren korišćenjem naprednih numeričkih metoda od kojih je metoda Monte Karlo primer jedne od numeričkih tehnika koja doživljava veliku ekspanziju u zadnjih nekoliko godina.

Karakterizacija radijaciono osetljivog MOSFET je sprovedena softverskim paketom FOTELP-2K10 zasnovanog na primeni numeričkog metoda Monte Karlo u slučajevima simulacije interakcije fotona različitih izabranih energija sa ovom elektronskom komponentom na kojoj su izvršene modifikacije u pogledu izbora materijala za poklopac pakovanja. U proteklom periodu, softver FOTELP-2K10 je stekao značajnu pozitivnu reputaciju na uspešnom rešavanju radijacionih transportnih problema. To je prikazano preko publikovanja rezultata simulacija interakcije gama i X-zračenja sa elektronskim komponentama i uređajima, kao što su MOSFET dozimetri [7][9], CdZnTe detektor [10], dijamantski detektor [11] i detektor od Silicijum karbida (SiC) [12].

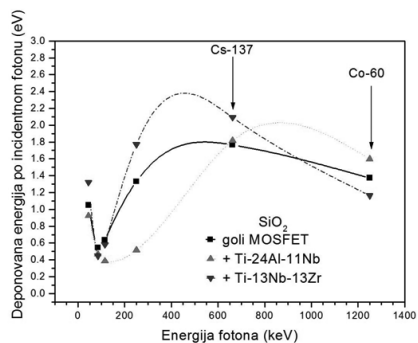
U ovom radu rezultati proračuna za deponovanu energiju su dobijeni numeričkom tehnikom Monte Karlo sa 10^7 incidentnih fotona u jednoj simulaciji i prikazani su na slikama 2. do 5.



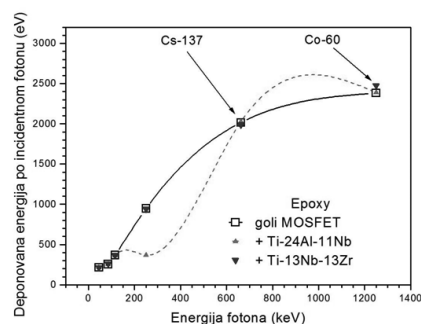
Slika 2. Energetska zavisnost za kapton.



Slika 3. Energetska zavisnost za Si supstrat.



Slika 2. Energetska zavisnost za kapton.



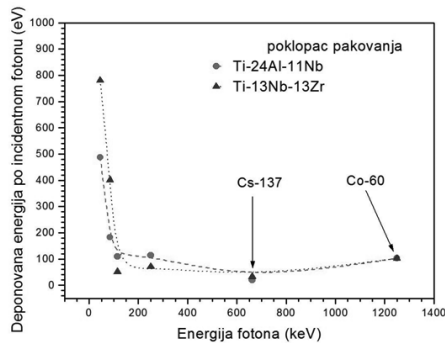
Slika 3. Energetska zavisnost za Si supstrat.

U svakoj pojedinačnoj simulaciji, primarni fotonski snop je imao pravac takav da je osa snopa bila normalna na gornju horizontalnu površinu zone SiO₂. Kada su dobijene vrednosti deponovane energije za svaku od materijalnih zona u geometrijskoj strukturi RADFET-a pristupilo se proračunavanju energetske zavisnog faktora zaštite (SEDF). Proračunate vrednosti za faktor SEDF za prvu leguru koja se sastoji od titanijuma (Ti) sa aluminijumom (Al) i niobijumom (Nb) i druge legure koja sadrži titanijum (Ti) sa cirkonijumom (Zr) i niobijumom (Nb) su prikazane u Tabeli 1:

Tabela 1. Energetski zavisani faktor zaštite (SEDF) za izabrane titanijumske legure

Energija fotona	SEDF _{TiAlNb}	SEDF _{TiNbZr}
45 keV	0.880	1.257
85 keV	0.856	0.821
115 keV	0.605	0.909
250 keV	0.387	1.330
662 keV	1.029	1.185
1250 keV	1.163	0.847

Generalno gledano, značajne razlike između srednjih atomskih brojeva za materijale od kojih je napravljen RADFET i poklopci pakovanja od titanijumskih legura, stvaraju razliku u energetskom odzivu elektronske komponente za različite načine pakovanja. Deponovana energija u materijalima kao što su kapton (na Slici 2.) i epoksi smola (na Slici 5.) imaju sličan trend u zavisnosti od energije zračenja zbog sličnih radijacionih karakteristika, kao što je primera radi efektivni efikasni presek za interakciju ovih materijala sa fotonima [13]. U slučajevima kada se razmatraju materijalne zone supstrata od Silicijuma (na Slici 3.) i oksida gejtja (SiO₂) (na Slici 4.) sa smanjenjem energije incidentnih fotona ispod 150 keV može se uočiti nagli porast vrednosti deponovane energije. Ovakva pojava svakako da zahteva konstrukciona rešenja kojima bi se obezbedila energetska kompenzacija. Što se tiče procene upotrebne vrednosti titanijumskih legura u pogledu karakteristika u zaštiti od zračenja za oklopljeni RADFET dozimetar, kao jedan od kriterijuma ocenjivanja mogu da se uzmu iznosi vrednosti deponovane energije u materijalnoj zoni SiO₂. Po ovom kriterijumu titanijumska legura sa aluminijumom znatno manje pogodna za funkcionalnu upotrebu kao material za fizičku zaštitu pri oklapanju RADFET-a. Ukoliko se na Slici 6. uoči da obe titanijumske legure imaju slično ponašanje što se tiče energetske zavisnosti, postoje značajne razlike u vrednostima faktora SEDF u Tabeli 1.



Slika 6. Energetska zavisnost za poklopcu pakovanja od izabranih Ti legura.

Za energetski opseg od 45 keV do nominalno srednje energije Co-60 od 1250 keV energetska kompenzacija je za leguru Ti-13Nb-13Zr bi trebala da se sprovede u najnepovoljnijem slučaju vrednosti SEDF od 33 %. U drugom slučaju, veći je problem sa titanijumskom legurom Ti-24Al-11Nb na energijama od 115 keV i 250 keV, jer su vrednosti SEDF oko 40% i veće. To znači da prilično teško može da se računa na mogućnost efikasnog konstrukcionog izvođenja oklapanja RADFET-a sa ovom legurom kako bi se uspešno stiglo do zadovoljavajućeg nivoa energetske kompenzacije u širokom energetskom opsegu.

4. Zaključak

U ovom radu koristio se softverski paket FOTELP-2K10 koji je pre ostvarenja numeričkih eksperimenata prilagođen tako da se očekivani rezultati simulacija mogu iskoristiti za analizu uticaja materijala od kojeg bi se napravio poklopac pakovanja RADFET dozimetra na njegov energetski odziv. Efekat uticaja tipa pakovanja sa dve različite titanijumske legure je istraživao tako što je izvršeno poređenje ukupne deponovane energije u različitim materijalnim zonama RADFET-a. Posebno težište je stavljeno na određivanje odnosa između vrednosti deponovane energije u dozimetrijski osetljivoj zapremini oksida SiO_2 u slučajevima kada je osnovna struktura RADFET dozimetra oklopljena sa poklopcem pakovanja i onda kada je njegova struktura bila bez poklopca pakovanja. U ovu svrhu, definisan je energetski zavisani faktor zaštite (SEDF) i proračunate su njegove vrednosti za legure Ti-24Al-11Nb i Ti-13Nb-13Zr koje su korišćene za pravljenje poklopca pakovanja RADFET dozimetra. Uzimajući u obzir vrednosti SEDF za različite vrednosti incidentnih energija fotona i dobijene odgovarajuće deponovane energije u materijalnim zonama RADFET dozimetra, ustanovljeno je da je titanijumska legura sa cirkonijumom, Ti-13Nb-13Zr, pogodniji material za izradu poklopca za pakovanje. Pored ovoga zaključka, potvrđeno je da je od velike koristi primeniti numeričku metodu zasnovanu na tehnici Monte Carlo u cilju predikcije rezultata za fizičke veličine od interesa prilikom transporta fotona kroz složene geometrijske strukture i različite materijalne zone, pre planiranja i realizacije stvarnog fizičkog eksperimenta u laboratorijskim uslovima ili pravljenja prototipa elektronske komponente ili uređaja.

6. Literatura

- [1] A. Holmes-Siedle, The space-charge dosimeter-general principles of a new method of radiation detection, *Nuclear Instruments and Methods*, 121(1974),pp.169-179.
- [2] G.J. Brucker, S. Kronenberg, F. Gentner, Effects of Package Geometry, Materials, and Die Design on Energy Dependence of pMOS Dosimeters, *IEEE Transaction on Nuclear Science*, 42(1995), pp.33-40.
- [3] Z. Savic et al., Energy dependence of pMOS Dosimeters, *Radiation Protection Dosimetry*, 64(1996), pp.205-211.
- [4] M.A.R. Othman et al., Monte Carlo study of MOSFET packaging, optimized for improved energy response: single MOSFET filtration, *Radiation Protection Dosimetry*, 141(2010), pp.10-17.
- [5] FOTELP-2K6, Photons, Electrons and Positrons Transport in 3D by Monte Carlo Techniques, IAEA-1388, <http://www.nea.fr/tools/abstract/detail/iaea1388>.
- [6] FOTELP-2K10, <http://www.vinca.rs/%7Erasa/doc/FOTPEN10.PDF>
- [7] S.J. Stankovic et al., Computer Simulation of Gamma Irradiation Energy Deposition in MOSFET Dosimeters, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 34 (2006), 1715-1718.
- [8] E.A. Siegbahn et al., MOSFET dosimetry with high spatial resolution in intense synchrotron-generated x-ray microbeams, *Medical Physics*, 36(2009), pp.1128-1137.
- [9] S.J. Stankovic et al., Radiological Characterization of Semiconductor Materials in Field Effect Transistor Dosimeter by Monte Carlo Method, *Materials Science Forum*, 518 (2006), pp.361-365.
- [10] S.J. Stankovic et al., Monte Carlo Calculation of X-Rays Deposited Energy in CdZnTe Detector, *Materials Science Forum*, 555 (2007), pp.141-146.
- [11] S.J. Stankovic et al., Characterization of X-ray Diamond detector by Monte Carlo Method, *Acta Physica Polonica A*, 115 (2009), pp.816-819.
- [12] S.J. Stankovic et al., Characterization of new structure for Silicon Carbide X-Ray detector by method Monte Carlo, *Acta Physica Polonica A*, 120 (2011), pp.252-255.
- [13] XCOM: Photon Cross Sections Database, (2010), <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

ISPITIVANJE PONAŠANJA JONIZACIONE KOMORE I GM BROJAČA U POLJIMA X I GAMA ZRAČENJA

Sandra ČEKLIĆ, Olivera CIRAJ-BJELAC, Ivana NIKOLOVSKI
Univerzitet Beograd, Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Beograd

SADRŽAJ

U ovom radu su prikazani rezultati ispitivanja uređaja namjenjenih mjerenju jačine doze X ili gama zračenja. Ispitivanjem su obuhvaćeni jonizaciona komora Victoreen 451P i Gajger Milerov brojač MRK-M87. Ispitivane su greška mjerenja jačine doze, zavisnost odgovora od energije zračenja, zavisnost odgovora od upadnog ugla zračenja i rad u uslovima preopterećenja. Iz rezultata se može vidjeti da se skoro sve karakteristike nalaze u granicama greške koje propisuje standard osim što Gajger Milerov brojač pokazuje veće odstupanje na nižim energijama.

1. Uvod

Detekcija i mjerenje jonizujućeg zračenja predstavljaju značajan element zaštite od zračenja [1]. Prenosni monitori zračenja ubrajaju se u najčešće korišćene dozimetre. Iz ove grupe najčešće korišćeni dozimetri su jonizaciona komora i Gajger Milerov brojač zbog svoje jednostavne konstrukcije i niske cijene. Od niza svojstava koje treba imati dozimetrijski sistem u zaštiti od zračenja, posebno je važna energetska zavisnost tj. odziv detektora na različite vrste i energije zračenja. Zavisnost odgovora od upadnog ugla zračenja između ostalog značajna je za pravilno rukovanje uređajem, što omogućava preciznije mjerenje i doprinosi tačnosti određivanja doze. Odabir dozimetra mora biti u skladu sa namjenom. Cilj ovog rada jeste proučavanje navedenih karakteristika detektora u poljima X i gama zračenja što je i dosad bio predmet brojnih istraživanja [2].

2. Materijali i metode

Mjerač radioaktivne kontaminacije M87, MRK – M87 je prenosni elektronski uređaj namjenjen za otkrivanje i mjerenje stepena radioaktivne kontaminacije: ljudi, vode, hrane, naoružanja, vojne opreme, objekata i vozila kontaminiranih radioaktivnim padavinama. Mjerni opseg brojača je od 0.5 $\mu\text{Gy/h}$ do 10 mGy/h. Standardna greška je manja od $\pm 20\%$. Senzor predstavlja GM brojač ZP 1400 koji se koristi u impulsnom režimu [3].

Jonizaciona komora Victoreen 451P je detektor koji se najčešće koristi za detektovanje rasejanog i curećeg zračenja u rendgen dijagnostici i radioterapiji [4]. Mjerni opseg detektora je do 50 mSv/h, a dizajniran je da mjeri gama i X-zračenje iznad 25 keV-a i beta zračenje iznad 1 MeV-a. Tačnost mjerenja je $\pm 10\%$ [5].

Ispitivanja su vršena prema standardu Međunarodne elektrotehničke emisije IEC 1017-1 [6]. Za ispitivanje su korišćena polja gama zračenja ^{60}Co i ^{137}Cs (S-Co i S-Cs). Kao izvor X-zračenja korišćen je rendgen aparat Phillips MG320, napona 30-320kV, kojim su generisani ISO standardni kvaliteti snopova za napone 60, 100, 150 i 250 kV kojima odgovaraju efektivne energije zračenja 45, 82, 115 i 210 keV, respektivno [7].

Ispitivane su sledeće karakteristike gore pomenutih uređaja: greška mjerenja jačine doze gama zračenja, zavisnost odgovora od energije zračenja, zavisnost odgovora od upadnog ugla zračenja i preopterećenje. Greška mjerenja jačine doze gama zračenja je vršena u polju ^{60}Co i procenjena je na osnovu sledećeg izraza:

$$I(\%) = \frac{K_I - K_T}{K_T} \times 100,$$

gdje je K_I - očitana jačina doze, K_T - usvojena stvarna jačina doze. Zavisnost odgovora od energije upadnog zračenja je ispitivana u poljima ^{60}Co , ^{137}Cs i u polju X zračenja pri jačini doze zračenja od oko 1mSv/h. Provjera odziva u zavisnosti od ugla upadnog zračenja se vršila za 360° u jednoj ravni u pomacima od 20° u polju ^{60}Co i polju X zračenja. Preopterećenje se ispitivalo u polju gama zračenja ^{60}Co gdje je jačina doze desetostruko veća od maksimalnog opsega merenja i posmatrao se rad detektora.

3. Rezultati i zaključak

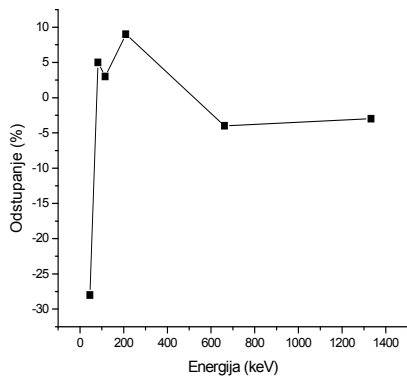
U Tabelama 1 i 2 su prikazana odstupanja izmjerenih vrijednosti od usvojenih stvarnih vrijednosti jačina doza za jonizacionu komoru 451P i GM brojač MRK-M87, respektivno. Rezultati mjerenja su pokazala da je u cijelom opsegu odstupanje u granicama koje predviđa proizvođač [3,5]. Na slici 1.a i 1.b su prikazana pokazivanja detektora 451P i MRK, respektivno, u zavisnosti od energije zračenja. Maksimalno odstupanje detektora 451P se javlja na najnižoj energiji od 45 keV-a i ne prelazi 30% kao što je i predviđeno standardom IEC 1017-1 [6]. Maksimalno odstupanje detektora MRK-M87 se javlja na energiji od 82 keV-a i iznosi 69%. Ovo odstupanje se javlja jer je GM brojač nekompenzovan [8]. Na slici 2 i 3 su prikazani odgovori detektora 451P i MRK-M87 od upadnog ugla zračenja u polju X i gama zračenja, respektivno. Odziv detektora sa jonizacionom komorom je najveći ukoliko je upadno zračenje pod uglom od 80°, a najmanji pod uglom od 180°. Isto se može primjetiti za GM brojač u polju gama zračenja. U polju X zračenja, na energiji od 82 keV-a, odziv GM brojača je najveći pod uglom od 0°, a najmanji pod uglom od 180° i iznosi samo 8% jačine doze. U uslovima preopterećenja na displeju se pojavio trepćući signal. Jonizaciona komora 451P je pokazivala 70mSv/h dok je GM brojač prikazivao 6.97 mGy/h, što je u granicama greške od ±20% [6].

Tabela 1. Rezultati provjere mjerenja jačine doze gama zračenja za 451P

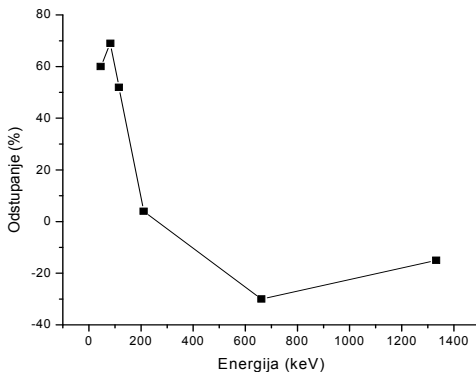
Nominalna jačina doze (μSv/h)	Izmjerena vrijednost (μSv/h)	Odstupanje (%)
2.00	2.04	+1.8
4.00	4.02	+0.5
20.00	19.42	-2.9
40	38	-4.2
200	192	-4
400	379	-5.2
800	782	-2.2
2000	1946	-2.7
4000	3830	-4.2
20000	18100	-9.5
40000	36000	-10

Tabela 2. Rezultati provjere mjerenja jačine doze gama zračenja za MRK-M87

Nominalna jačina doze (μGy/h)	Izmjerena vrijednost (μGy/h)	Odstupanje [%]
0.700	0.707	+1
2.00	1.75	-12.5
7.00	6.01	-14.1
20.00	17.70	-11.5
70	65	-7.1
200	166	-17
700	568	-18.8
2000	1900	-5
7000	7660	+9.4
12000	14000	+16.6

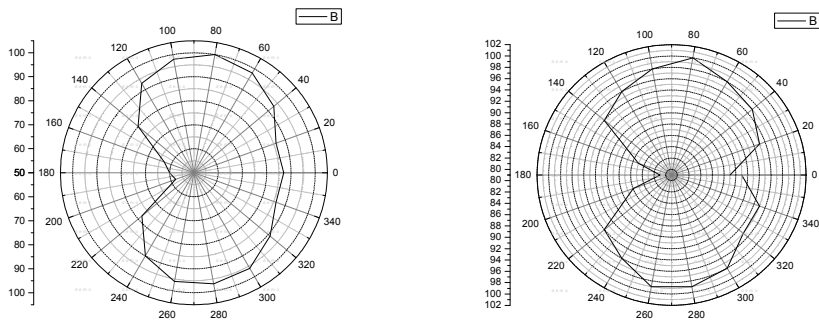


a)

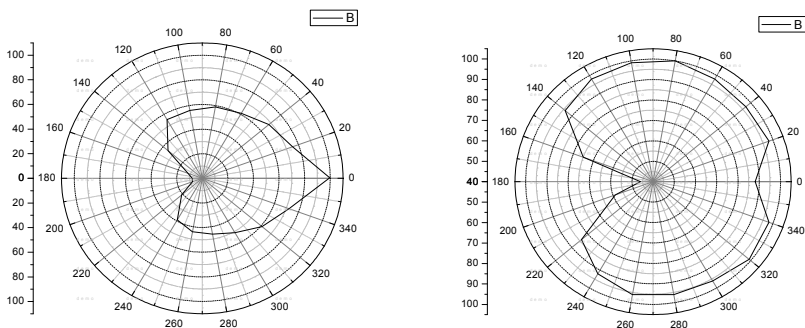


b)

**Slika 1.a) Pokazivanje detektora 451P, Victoreen, u zavisnosti od energije zračenja
b) Pokazivanje detektora MRK-M87 u zavisnosti od energije zračenja**



Slika 2. Ugaona raspodjela za 451P, Victoreen, u polju X zračenja i polju gama zračenja



Slika 3. Ugaona raspodjela za MRK-M87, u polju X zračenja i polju gama zračenja

4. Literatura

- [1] UNSCEAR 2008: Volume I: *Sources and effects of ionizing radiation*
- [2] K. Stanković, M. Vujisić, *Influence of radiation energy and angle of incidence on the uncertainty in measurements by GM counters*, 1451-3994, 23 (2008), 2, pp.41-42
- [3] Merač radioaktivne kontaminacije M 87, MRK – M 87, Savezni sekretarijat za narodnu odbranu, 1989.
- [4] O. Ciraj-Bjelac, D. Arandjić, D. Košutić, Đ. Lazarević, *An assessment of scattered radiation during fluoroscopic procedures in diagnostic radiology*, Nuclear technology & Radiation Protection, 2009, pp. 82-83
- [5] Victoreen, 451P & 451P-DE-SI, Ion Chamber Survey Meter, Operators Manual, 2005.
- [6] International Electrotechnical Commission. *Portable, transportable or installed X or gamma radiation ratemeters for environmental monitoring*, Part 1. IEC 1017-1 (1991).
- [7] International Organization for Standardization. *X and gamma reference for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy*, ISO 4037 (1996).
- [8] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurements*, New York, John Wiley and Sons, USA, 1999

BEHAVIOR OF IONIZATION CHAMBER AND GM COUNTER IN X AND GAMMA RADIATION FIELDS

Sandra ČEKLIĆ, Olivera CIRAJ-BJELAC, Ivana NIKOLOVSKI
University of Belgrade, Insitute for Nuclear Sciences „Vinča“, Belgrade

ABSTRACT

The aim of this paper was to study characteristics of survey meters intended to measure dose rate of X and gamma radiation: ionization chamber Victoreen 451P and GM counter MRK-M87. We examined the error, energy dependence, angle dependence and overload characteristics. From the results we can see that almost all properties are within uncertainty prescribed by the standard while GM tube shows larger deviation at lower energies.

NEJONIZUJUĆA ZRAČENJA

UREĐAJ ZA MERENJE INTENZITETA RF ZRAČENJA EMITOVANOG OD STRANE BEŽIČNIH KOMUNIKACIONIH SISTEMA

Marko S. ANDELKOVIĆ, Goran S. RISTIĆ

*Laboratorija za primenjenu fiziku, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Niš, Srbija
marko.andjelkovic2@elfak.ni.ac.rs, goran.ristic@elfak.ni.ac.rs*

SADRŽAJ

U ovom radu predstavljeno je tehničko rešenje uređaja za detekciju i merenje intenziteta radio-frekvencijskog (RF) zračenja koje emituju sistemi bežičnih komunikacija. Uređaj je koncipiran kao kompaktan sistem, uz mogućnost povezivanja sa personalnim računarom preko USB-a. Kalibracija je sprovedena korišćenjem spektrometra Spectran HF-60105, firme Aaronia, i direktione antene HyperLOG 6080, osetljive u opsegu frekvencija od 680 MHz do 8 GHz, takođe iz proizvodnog asortimana firme Aaronia. Testiranje je realizovano u uslovima dalekog polja, izlaganjem realizovanog uređaja kontinualnom signalu iz opsega GSM900, koji je generisan pomoću ometača signala mobilnih telefona. Dobijeni rezultati pokazali su da realizovani uređaj može da izmeri vrlo niske nivoe RF zračenja, koji su daleko ispod maksimalno dozvoljenih nivoe propisanih međunarodnim standardima.

1. Uvod

Kao rezultat široke rasprostranjenosti uređaja koji funkcionišu u radio-frekvencijskom (RF) području elektromagnetnog spektra, tj. na frekvencijama do 300 GHz, drastično je povećan nivo ambijentalnog RF zračenja u poslednje dve decenije [1, 2]. To je uslovalo značajno povećanje zabrinutosti u vezi potencijalnih opasnosti koje izloženost RF zračenju može da ima na ljudsko zdravlje [2]. Shodno tome, redovno praćenje intenziteta RF zračenja je od izuzetne važnosti za procenu rizika izloženosti i prevenciju mogućih posledica zračenja.

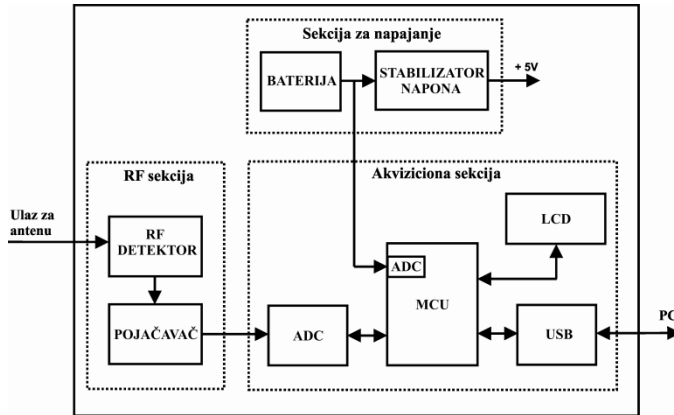
Među mnogobrojnim izvorima RF polja najveći doprinos ukupnom RF zračenju imaju sistemi bežičnih komunikacija, tj. sistemi mobilne telefonije i bežične računarske mreže [3]. Sistemi mobilne telefonije obuhvataju nekoliko frekvencijskih opsega u području od 820 MHz do 2.2 GHz, a najzastupljeniji su svakako sistemi na bazi GSM900 standarda. Sa druge strane, sistemi bežičnih računarskih mreža zauzimaju frekvencijske opsege između 2.4 GHz i 5 GHz. Stoga je veoma bitno da se prilikom procene nivoa RF zračenja posebna pažnja posveti zračenju pri frekvencijama od 820 MHz do 5 GHz.

Praćenje RF zračenja izvodi se merenjem odgovarajućih parametara RF polja. Kako je RF polje u suštini elektromagnetno polje, najbitniji parametri za karakterizaciju su: snaga P , gustina snage S , jačina električnog polja E i jačina magnetnog polja H . Za merenje parametara RF zračenja mogu se koristiti dva tipa instrumenta: širokopojasni RF metri koji pokrivaju širok frekvencijski opseg i mere srednji nivo zračenja u celom opsegu, i RF spektrometri koji omogućavaju merenje nivoa RF zračenja u užim frekvencijskim opsezima i procenu doprinosa svakog opsega ukupnom nivou zračenja [4]. U suštini, svaki uređaj za merenje intenziteta RF zračenja sadrži dva osnovna elementa: senzor RF zračenja, tj. antenu za prijem visokofrekventnog signala, i RF detektor kojim se visokofrekventni napon iz antene konvertuje u jednosmerni napon, pri čemu je nivo dobijenog jednosmernog napona proporcionalan određenom parametru RF zračenja [5].

U ovom radu je predstavljen jednostavan i vrlo jeftin laboratorijski prototip širokopojasnog RF metra za detekciju izvora RF zračenja i merenje osnovnih parametara RF zračenja u frekvencijskim opsezima predviđenim za sisteme bežičnih komunikacija. Struktura uređaja i njegove funkcionalne osobine ukratko su opisane u drugom poglavlju, dok su rezultati kalibracije sprovedene u opsegu GSM900 prikazani u trećem poglavlju.

2. Struktura RF metra

Realizovani uređaj za merenje intenziteta RF zračenja izveden je kao širokopojasni RF metar sa ugrađenim baterijskim napajanjem i LCD displejom za prikaz rezultata merenja, uz opcionu podršku za komunikaciju sa personalnim računom preko USB interfejsa. Ceo uređaj je smešten u metalno kućište dimenzija 15 cm × 14.5 cm × 5.5 cm. Na slici 1 prikazana je blok šema realizovanog sistema sačinjenog od tri osnovne funkcionalne jedinice: RF sekcije, akvizicione sekcije i sekcije za napajanje.



Slika 1. Struktura RF metra

Ulazni stepen sistema je RF sekcija sastavljena od RF detektora i naponskog pojačavačkog stepena. Iskorišćen je integrisani RF detektor AD8314 [6], firme Analog Devices, osetljiv u frekventijskom opsegu od 100 MHz do 2.7 GHz. Ovaj detektor obezbeđuje konverziju ulazne snage u odgovarajući jednosmerni napon, sa odličnom linearnošću u opsegu snaga od - 45 dBm do 0 dBm. Napon iz RF detektora se pojačava neinvertujućim pojačavačem, zasnovanim na operacionom pojačavaču LMC6482, firme Linear Technology.

Akviziciona sekcija digitalizuje napon sa izlaza RF sekcije i prosleđuje isti personalnom računaru. Primenom kalibracionih jednačina, akviziciona sekcija određuje parametre RF zračenja i ispisuje dobijene vrednosti na LCD-u. Osnovu akvizicione sekcije čini 8-bitni mikrokontroler PIC18F4550, firme Microchip, dok je za potrebe AD konverzije upotrebljen 12-bitni AD konvertor MCP3201, firme Microchip. Zahvaljući integrisanoj USB podršci mikrokontrolera PIC18F4550, komunikacija sa PC-jem preko USB interfejsa je značajno pojednostavljena. Korišćenjem razvojnog okruženja Visual C# 2005 Express, realizovan je odgovarajući aplikacioni softver za obradu, prikaz i arhiviranje izmerenih rezultata. Za napajanje sistema iskorišćena je nepunjiva alkalna baterija nominalnog napona od 9 V i kapaciteta od 500 mAh. Napon baterije se transformiše, pomoću linearnog stabilizatora napona LM7805, firme Fairchild Semiconductor, u jednosmerni stabilisani napon od 5 V kojim se napajaju ostali elementi sistema. Ukupna strujna potrošnja je oko 77 mA, što znači da je sa izabranom baterijom omogućen nesmetan rad u trajanju od oko 6.5 sati. Da bi se obezbedilo praćenje stanja baterije, napon baterije se preko otpornog razdelnika napona vodi na interni AD konvertor mikrokontrolera.

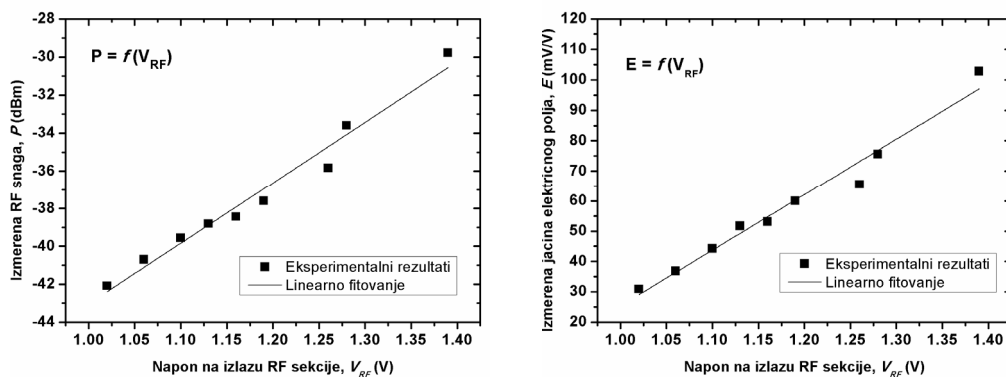
Pored baterijskog napajanja, omogućeno je i napajanje iz USB priključka računara, što je izuzetno pogodno u slučajevima kada se zahteva neprekidno merenje u dužim vremenskim intervalima. USB priključak računara obezbeđuje stabilisani napon od 5 V i struju do 100 mA, što je sasvim dovoljno za napajanje sistema.

3. Analiza performansi sistema

S obzirom da se iz RF sekcije dobija jednosmerni napon proporcionalan ulaznoj RF snazi, neophodno je odrediti kalibracione jednačine pomoću kojih će biti moguće proračunati ostale parametre RF polja na osnovu izmerenog napona. Kalibracija je sprovedena *transfer standard* metodom [7], tj. poređenjem napona izmerenim RF metrom sa parametrima RF zračenja (RF snaga i jačina električnog polja) izmerenim referentnim RF metrom.

Kao referentni RF metar korišćen je spektrometar Spectran HF-60105, firme Aaronia, a za prijem signala je upotrebljena direkcionalna antena HyperLOG 6080, firme Aaronia, osetljiva u opsegu od 680 MHz do 8 GHz. Komercijalni ometač signala mobilne telefonije P30, koji emituje signal u opsezima GSM, DCS i 3G, upotrebljen je kao izvor RF zračenja. Ometač ima domet do 15 m, sa maksimalnom izlaznom snagom od 20 dBm. U ovom slučaju je korišćen samo signal iz GSM opsega (900 MHz).

Testiranje je sprovedeno u zatvorenoj prostoriji, u okruženju bez dodatnih izvora RF signala, u uslovima dalekog polja [7 - 9]. Pri fiksnoj poziciji prijemne antene, menjano je rastojanje između RF izvora i antene, i za svako rastojanje je izmeren odziv realizovanim sistemom i odziv referentnog RF metra. Na slici 2 prikazane su ekperimentalno dobijene zavisnosti između izmerene RF snage i napona na izlazu RF sekcije, $P = f(V_{RF})$, odnosno između jačine električnog polja i napona na izlazu RF sekcije, $E = f(V_{RF})$.



Slika 2: Odnos između RF snage i napona na izlazu RF sekcije (levo), i između jačine električnog polja i napona na izlazu RF sekcije (desno)

Primenom linearnog fitovanja određene su kalibracione jednačine,

$$P [dBm] = 32 \times V_{RF} - 75.03 \quad (1)$$

$$E [mV/m] = 183.76 \times V_{RF} - 158.37 \quad (2)$$

Na osnovu kalibracione jednačine (1) može se zaključiti da se za ulazne snage od -45 dBm do 0 dBm dobija napon na izlazu RF sekcije u opsegu od 0.94 V do 2.32 V. Analizom kalibracione jednačine (2) dobija se da je merni opseg jačine električnog polja od 14.34 mV/m do 286.6 mV/m. Slično, primenom relacije koja definiše odnos između E , H i S u dalekom polju, $E = 377 * H = (377 * S)^{1/2}$ [8], utvrđeno je da je dinamički opseg za jačinu magnetnog polja od 0.038 mA/m do 0.712 mA/m, a za gustinu snage od 0.55 mW/m² do 191.36 mW/m².

Preliminarni rezultati evaluacije realizovanog sistema pokazuju da je moguće detektovati veoma niske nivoe RF zračenja, koji su daleko ispod dozvoljenih maksimalnih novoa. Na primer, ovim sistemom moguće je detektovati jačine električnog polja od 14.34 mV/m, dok maksimalna dozvoljena jačina električnog polja za stanovništvo, u opsegu frekvencija od 400 MHz do 2 GHz, iznosi $1.375f^{1/2}$ V/m [4], gde je f frekvencija emitovanog signala, što je za GSM900 opseg oko 52.5 V/m.

Ipak, predstavljeno rešenje zahteva dodatne modifikacije kako bi se ostvarila veća konkurentnost u odnosu na postojeće komercijalne sisteme. Pre svega, zamenom direkcione antene odgovarajućom izotropnom antenom biće omogućena detekcija RF signala u svim pravcima. Osim toga, uzak dinamički opseg realizovanog sistema onemogućava praćenje jačih izvora. U cilju povećanja dinamičkog opsega, planirana je izmena konfiguracije sistema koja bi se ogledala u primeni oslabljivača ulaznog RF signala kako bi se omogućila detekcija snaga većih od 0 dBm, a sasvim tim i detekcija viših nivoo jačine električnog i magnetnog polja, odnono gustine snage.

4. Zaključak

Predstavljen je sistem za merenje nivoo RF zračenja emitovanog od strane servisa mobilne telefonije. Sistem je realizovan komercijalno dostupnim komponentama. Koncipiran je tako da može da funkcioniše samostalno, ali je zbog ograničenog trajanja baterije obezbeđena i mogućnost povezivanja sa personalnim računarom preko USB interfejsa, čime je omogućeno dugotrajnije napajanje iz USB-a kao i obrada, prećenje i arhiviranje rezultata merenja korišćenjem namenski razvijenog softvera. Za kalibraciju sistema *transfer standard* metodom korišćen je spektrometar Spectran HF-60105, dok je za prijem signala korišćena direkcionalna antena HyperLOG 6080, firme Aaronia. U praktičnim primenama moguće je koristiti i druge antene uz prethodnu kalibraciju. Preliminarnim testiranjem analiziran je odziv sistema pod dejstvom GSM900 signala dobijenim iz komercijalnog ometača signala mobilne telefonije. Eksperimentalni rezultati su pokazali da sistem može da detektuje veoma niske nivoo RF zračenja u opsegu GSM900, što je izuzetno korisno sa stanovišta zaštite od RF zračenja. U narednim fazama razvoja sistema analiziraće se odziv pri drugim frekvencijama koje se koriste u mobilnim komunikacijama (DCS i 3G), a značajna pažnja biće posvećena i unapređenju tehničkih performansi sistema.

5. Zahvalnica

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta III43011, finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

6. Literatura

- [1] Roosli M, et al., *Conduct of a Personal Radiofrequency Electromagnetic Field Measurement Study: Proposed Study Protocol*, Environmental Health, Volume 23, Issue 9, 2010.
- [2] Cooper T G, et al., *Assessment of Occupation Exposure to Radiofrequency Fields and Radiation*, Radiation Protection Dosimetry, Volume 11, Issue 2, pp. 191 – 203, 2004.
- [3] Kitchen R, *RF and Microwave Radiation Safety Handbook*, Newnes, 2001.
- [4] ICNIRP: *Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*. Health Physics, Volume 74, Issue 4, pp. 494 – 522, 1998.
- [5] Frenzel L E, *RF Detectors for Wireless Devices*, Frequently Asked Questions, Analog Devices.
- [6] http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8314.pdf.
- [7] IEEE Std. C95.1, 1999 Edition, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz.
- [8] CENELEC EN 504013, 2008, Basic Standard on Measurement and Calculation Procedures for Human Exposure to Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (0 Hz – 300 GHz), 2008.
- [9] Vuletic B D, Osmokrovic P V, Kovacevic D, *Survey of Radiofrequency Radiation Levels Around GSM Base Stations and Evaluation of Measurement Uncertainty*, Nuclear Technology and Radiation Protection, Volume 26, Issue: 3, pp. 214 – 217, 2011.

A DEVICE FOR MEASUREMENT OF THE RF RADIATION INTENSITY EMITTED BY WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS

Marko S. ANĐELKOVIĆ, , Goran S. RISTIĆ

*Applied Physics Laboratory, Faculty of Electronic Engineering, University of Niš, Niš, Serbia,
marko.andjelkovic2@elfak.ni.ac.rs, goran.ristic@elfak.ni.ac.rs*

ABSTRACT

In this paper, a design of a device for detection and measurement of the radio-frequency (RF) radiation emitted by wireless communication systems, is presented. The system has been realized as a compact stand-alone unit, but it also supports interfacing with a PC over USB. The calibration has been performed with the spectrometer Spectran HF-60105, from Aaronia, and a directional antenna HyperLOG 6080, from Aaronia, sensitive in the frequency range from 680 MHz to 8 GHz, has been used for signal reception. Testing has been conducted in the far field, by exposing the system to a continuous GSM900 signal generated by a commercial mobile phone jammer. Obtained results have shown that the realized system is capable of detecting low levels of RF radiation, far below the maximum levels defined by the relevant regulatory standards.

PONOVLJIVOST USKOPOJASNIH MERENJA NIVOA ELEKTROMAGNETSKOG POLJA U BLIZINI PREDAJNE STANICE SOFTVERSKOG RADIJA

Miloš DAVIDOVIĆ^{1,2}, Srboljub STANKOVIĆ^{1,2}

1) Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

2) Institut Vinča, Laboratorija za Radijaciona Merenja, Beograd, Srbija,
davidovic@vinca.rs

SADRŽAJ

Uskopojasno merenje nivoa elektromagnetskog polja je jedna od opšteprihvaćenih metoda za procenu izloženosti stanovništva nejonizujućim zračenjima. Ova metoda je naročito potrebna kada na nekoj lokaciji od interesa sa aspekta zaštite od nejonizujućih zračenja postoji više izvora nejonizujućeg zračenja (često u bliskom frekventnom opsegu), i kada je potrebno razdvojiti njihov uticaj na stanovništvo. Da bi se merenja izvršila kvalitetno, potrebno je poznavanje relevantnih karakteristika merne opreme kao i što bolje poznavanje izvora nejonizujućeg zračenja čije elektromagnetsko polje merimo. U ovom radu će biti dat primer uskopojasnog merenja nejonizujućeg zračenja, uz analizu njegove ponovljivosti, gde je kao merni instrument korišćen analizator spektra sa odgovarajućom antenom, a kao izvor stanica softverskog radija u predajnom režimu.

1. Uvod

Merenje nivoa elektromagnetskih polja koja potiču od veštačkih izvora propisano je zakonom o zaštiti od nejonizujućih zračenja [1]. Zakon određuje granice izloženosti i relevantne standarde koji se koriste pri proceni izloženosti stanovništva. Međutim, opšteprihvaćene procedure za merenje koji bi omogućile visoku ponovljivost pri merenju realnog izvora zračenja, još uvek nisu strogo definisane [2], i predmet su intenzivnog istraživačkog rada [3,4]. Ovo je donekle i teško učiniti, zbog mnogih praktičnih problema, kao što je na primer automatska kontrola snage zračenja 3G UMTS baznih stanica [4]. Situacija je znatno drugačija u laboratorijskim uslovima, gde je moguće mnogo bolje definisanje položaja izvora i mernog instrumenta i bolje poznavanje karakteristika izvora. Ovo je značajno iz nekoliko razloga. Pre svega moguće je da metrolog stekne neophodno iskustvo u merenju elektromagnetskog polja, pri tome koristeći izvore koje sam kontroliše. Dodatno, korišćenje fleksibilnog i programabilnog izvora kao što je softverski radio omogućava metrologu da stiče praksu u merenju izvora koji još nisu u masovnoj upotrebi kao npr. izvori kakvi će se koristiti u 4G LTE tehnologiji.

2. Opis eksperimentalne postavke

U ovom radu je kao izvor korišćena stanica softverskog radija u predajnom režimu, model National Instruments NI2920 (koji je zasnovan na Ettus USRP matičnim pločama), koja ima mogućnost rada u frekvencijskom opsegu od 50 MHz do 2.2 GHz. Maksimalna izlazna snaga ove stanice varira sa frekvencijskim opsegom i iznosi do 20 dBm u opsegu 50 MHz do 1.2 GHz, i nešto manje (do 18 dBm) u ostatku radnog opsega stanice. Dobitak predajne stanice je moguće menjati u opsegu od 0 dB do 31 dB sa korakom od 1 dB. Za predajnu antenu korišćena je bikonična antena (BicoLOG 20300, Aaronia) koja radi u opsegu 20MHz do 3GHz, sa maksimalno podržanom predajnom snagom od 1W (30 dBm), i nominalnom impedansom od 50 oma. Kao merni instrument je korišćen ručni analizator spektra Spectran HF 60105 sa širokopojasnom sondom HyperLOG 60100 (proizvođač Aaronia) koja može da radi u frekvencijskom opsegu 680 MHz-10 GHz. Bikonična antena i merna sonda (HyperLOG antena) su postavljene na istoj visini, orijentisane tako da se pravac maksimalnog zračenja obe antene podudara i nalazi u horizontalnoj ravni. Merenja su vršena na nekoliko frekvencija, u opsegu od 5 MHz, sa širinom frekventne rezolucije od 3MHz.

3. Rezultati merenja

U tabeli 1 su prikazani rezultati merenja električnog polja, na učestanostima 700 MHz, 900 MHz i 1200 MHz. Pri merenju izvor je emitovao QAM modulisan signal, sa nominalnim dobitkom od 15 i od 30 dB, a analizator spektra je podešen da detektuje srednju kvadratnu vrednost merenog signala (RMS). Kada je izvor isključen izmerena vrednost električnog polja na svim merenim opsezima od interesa je bila oko 0.001 V/m. Srednja vrednost i standardna devijacija merenog polja su dati u tabeli 2.

Tabela 1. Izmerena RMS vrednost električnog polja E [V/m], na učestanostima 700 MHz, 900 MHz i 1200 MHz, pri dobitcima od 15 dB i 30 dB

Frekvencija		Frekvencija		Frekvencija	
700 MHz		900 MHz		1200 MHz	
dobitak		dobitak		dobitak	
15dB	30dB	15dB	30dB	15dB	30dB
E (V/m)	E (V/m)	E (V/m)	E (V/m)	E (V/m)	E (V/m)
0.015	0.148	0.026	0.164	0.042	0.471
0.027	0.116	0.046	0.159	0.052	0.410
0.017	0.164	0.025	0.156	0.051	0.422
0.035	0.193	0.023	0.157	0.056	0.386
0.036	0.117	0.032	0.168	0.057	0.471
0.024	0.130	0.023	0.155	0.044	0.416
0.025	0.154	0.026	0.157	0.045	0.393
0.014	0.157	0.021	0.174	0.041	0.420
0.018	0.160	0.022	0.156	0.052	0.455
0.017	0.155	0.031	0.160	0.055	0.423

Tabela 2. Srednja vrednost E_{av} i standardna devijacija σ za skup izmerenih RMS vrednosti električnog polja E [V/m], na učestanostima 700 MHz, 900 MHz i 1200 MHz, pri dobitcima od 15 dB i 30 dB

		E_{av} (V/m)	σ (V/m)
700 MHz	15 dB	0.023	0.008
	30 dB	0.149	0.022
900 MHz	15 dB	0.027	0.007
	30 dB	0.161	0.006
1200 MHz	15 dB	0.049	0.006
	30 dB	0.427	0.028

U tabeli 3 su prikazani rezultati merenja električnog polja, na učestanostima 1500 MHz, 1800 MHz i 2100 MHz. Pri merenju izvor je emitovao QAM modulisan signal, sa nominalnim dobitkom od 15 dB i od 30 dB, a analizator spektra je podešen da detektuje srednju kvadratnu vrednost merenog signala (RMS). Srednja vrednost i standardna devijacija merenog polja za ove slučajeve su dati u tabeli 4.

Tabela 3. Izmerena RMS vrednost električnog polja E [V/m], na učestanostima 1500 MHz, 1800 MHz i 2100 MHz, pri dobitcima od 15 dB i 30 dB

frekvencija		frekvencija		frekvencija	
1500 MHz		1800 MHz		2100 MHz	
dobitak		dobitak		dobitak	
15dB	30dB	15dB	30dB	15dB	30dB
E(V/m)	E(V/m)	E(V/m)	E(V/m)	E(V/m)	E(V/m)
0.021	0.129	0.011	0.085	0.021	0.125
0.022	0.128	0.013	0.084	0.019	0.128
0.019	0.129	0.012	0.085	0.018	0.123
0.018	0.130	0.013	0.085	0.020	0.121
0.020	0.131	0.011	0.084	0.021	0.113
0.021	0.093	0.012	0.083	0.022	0.126
0.020	0.116	0.011	0.085	0.024	0.120
0.019	0.122	0.013	0.081	0.023	0.127
0.020	0.125	0.010	0.090	0.021	0.130
0.018	0.120	0.012	0.085	0.022	0.127

Tabela 4. Srednja vrednost E_{av} i standardna devijacija za skup izmerenih RMS vrednosti električnog polja E [V/m], na učestanostima 1500 MHz, 1800 MHz i 2100 MHz, pri dobitcima od 15 dB i 30 dB

		E_{av} (V/m)	σ (V/m)
1500 MHz	15 dB	0.020	0.001
	30 dB	0.122	0.011
1800 MHz	15 dB	0.012	0.001
	30 dB	0.085	0.002
2100 MHz	15 dB	0.021	0.002
	30 dB	0.124	0.005

4. Diskusija i zaključci

Rezultati prikazani u tabelama pokazuju da je na višim učestanostima nešto bolja ponovljivost merenja. Jedno od prihvatljivih objašnjenja za ovakve rezultate bi moglo da bude zasnovano na sledećem fenomenološkom pristupu. Zona dalekog zračenja, ili Fraunhofer-ova zona, određena je Fraunhofer-ovim rastojanjem d_f . Ovaj parametar zavisi od najveće linearne dimenzije predajne antene D i radne talasne dužine λ prema relaciji:

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

pri čemu je $d_f \gg D$, $d_f \gg \lambda$. Pritom, za rastojanje d između predajnika i prijemnika neophodno je da važi da je $d > d_f$ kako bi sva razmatranja mogla da budu u skladu sa Friisovom formulom [5] za prostiranje elektromagnetskog talasa u slobodnom prostoru. U našim eksperimentima rastojanje između predajnika i

prijemnika je bilo konstantno, tako da su na višim frekvencijama u većem stepenu bili ostvareni uslovi za primenu empirijskog razmatranja u slučaju prostiranje elektromagnetskog talasa u zoni dalekog polja iz relacije (1). To znači da bolja ponovljivost merenja na višim frekvencijama u slučaju predajnika kontrolisanog pomoću uređaja tipa softverskog radija i mernog sistema (kao prijemnika) koji se sastoji od spektralnog analizatora sa odgovarajućom antenom, značajno zavisi od ispunjenosti uslova za merenja u zoni dalekog polja.

Takodje, kako je na učestanostima koje su od interesa u mobilnoj telefoniji (GSM 900 MHz, GSM 1800 MHz i UMTS 2100 MHz) uočena veoma dobra ponovljivost merenja, predajna stanica softverskog radija kao izvor nejonizujućeg zračenja bi se mogla efikasno koristiti u periodičnoj kontroli kvaliteta analizatora spektra sa pratećom sondom (antenom). Dalje mogućnosti za istraživanje u narednom periodu su između ostalog i analiza merenja koja bi bila vršena pri raznim modulacijama generisanog signala.

5. Zahvalnica

Autori zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja za podršku preko projekata ON171028, ON171007 i III43009. Takodje, zahvaljujemo se kompaniji National Instruments i kolegi Dušanu Vukašinoviću na dragocenoj tehničkoj podršci.

6. Literatura

- [1] Zakon o zaštiti od nejonizujućih zračenja, "Sl. glasnik RS", br. 36/2009
- [2] David A. Sánchez-Hernández, High Frequency Electromagnetic Dosimetry, Artech House, (2009)
- [3] Olivier, Christof, and Luc Martens. "Optimal settings for narrow-band signal measurements used for exposure assessment around GSM base stations." *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 54.1 (2005): 311-317.
- [4] Olivier, Christof, and Luc Martens. "Optimal settings for frequency-selective measurements used for the exposure assessment around UMTS base stations." *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 56.5 (2007): 1901-1909.
- [5] H. T. Friis, „A note on a simple transmission formula“, Proc.IRE. (1946), vol.34: 254-256.

ANALYSIS OF FREQUENCY SELECTIVE MEASUREMENTS IN THE VICINITY OF SOFTWARE RADIO TRANSMITTER

Miloš DAVIDOVIĆ^{1,2}, Srboljub STANKOVIĆ^{1,2}

1) University of Belgrade – School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia

2) Institute Vinča, Radiation Measurement Laboratory, Belgrade, Serbia, davidovic@vinca.rs

ABSTRACT

Frequency selective narrowband measurement of electromagnetic field level is one of the generally accepted methods for estimating exposure to nonionizing radiation. This method is especially needed when there are several sources of nonionizing radiation on measuring site (often very close in frequency) and it is necessary to separate their influence on population. In order to perform good quality measurements, it is needed to know all the relevant facts about measuring equipment and also as many details as possible about the source of nonionizing radiation whose electromagnetic field is measured. In this paper we will give an example and analysis of frequency selective narrowband measurement of nonionizing radiation in which handheld spectrum analyzer is used as a measuring device and a software radio transmitter as a source.

INDEX AUTORA

ADROVIĆ Feriz	139
ADRUHOVIĆ Sergej	435
AJTIĆ Jelena	76
ALIGRUDIĆ Irena	205
ANDELIĆ Tomislav	118
ANDELKOVIĆ Marko	455, 459
ANDRIĆ Velibor	61
ANIČIN Ivan	122, 126, 390, 393, 394, 397
ANTIĆ Vojislav	189, 226
ANTOVIĆ Ivanka	72, 300
ANTOVIĆ Nevenka	435, 439
ARANDIĆ Danijela	177, 181, 185, 189, 213, 226, 259
ARBUTINA Dalibor	130
ARSENIĆ Ilija	152
ARSIĆ Vesna	69, 71, 83, 87, 97, 100, 156, 160, 161, 166
ASKOUNIS Panayiotis	237
ATANACKOVIĆ Jovica	251
AVRAMOVIĆ Ivana	368, 371
BALIN Marijana	364, 367, 372, 375
BANJAC Radomir	122, 126, 143
BANJANAC Radomir	167, 170, 171, 174, 390, 393, 394, 397
BASARIĆ Borko	193, 196, 201, 204, 357
BAUCAL Milutin	193, 196, 201, 204, 357
BERESTOV Aleksandar	435
BIKIT Ištvan	88, 91, 92, 379, 402, 406, 410
BIKIT Kristina	88, 91, 92, 379
BOGAVAC Danijela	241
BOGOJEVIĆ Suzana	69, 71, 83, 87, 97, 100, 156, 160, 161
BOŽOVIĆ Predrag	181, 185, 189, 197, 200, 213
CARINOU Eleftheria	237
ČEKLIĆ Sandra	448, 452
CIRAJ-BJELAC Olivera	177, 181, 185, 189, 226, 259, 271, 285, 289, 448, 452
ČUČULOVIĆ Ana	57
ČUČULOVIĆ Rodoljub	57
ČUDIĆ Ozren	193, 196, 201, 204, 357
ĆUJIĆ Mirjana	80
DAVIDOVIĆ Miloš	460
DOBRIJEVIĆ Rajko	285, 289
BORIĆ Goran	193, 196, 201, 204
DRAGIĆ Aleksandar	122, 126, 143, 167, 170, 171, 174, 390, 393, 394, 397
Dragomir PAUNOVIĆ	357
DRAGOVIĆ Snežana	80
DRAMLIĆ Dragan	130
DRAMLIĆ Stefan	130
ĐUKIĆ Milenko	313
ĐURAŠEVIĆ Mirjana	427, 430, 431, 434
EREMIĆ SAVKOVIĆ Maja	69, 71, 161, 166
EREMIĆ-SAVKOVIĆ MAJA	160
EREMIĆ-SAVKOVIĆ Maja	83, 87, 97, 100, 156, 422, 426

FILIPOVIĆ Jelena	167, 170, 171, 174
FORKAPIĆ Sofija	88, 91, 92, 402, 406, 410
GENCEL Ivan	209
GLIŠIĆ V.	217
GRABEŽ Bojana	143, 171, 174
GRDOVIĆ Svetlana	61
GRŠIĆ Zoran	130
GULAN Ljiljana	139, 142
HADŽIBRAHIMOVIĆ Mirzeta	72, 300
HANSMAN Jan	49, 88, 91, 92, 402, 406, 410, 414
ILIĆ Jovana	69, 71, 83, 87, 97, 100, 156, 160, 161, 166
ILIĆ Radovan	443
ILIĆ Strahinja	414
ILIĆ Zorana	53
JAKOVLJEVIĆ Milica	110
JANJIĆ Vladimir	368, 371
JANKOVIĆ Marija	65, 68, 106, 109, 114, 117, 418, 421
JANKOVIĆ-MANDIĆ Ljiljana	80
JAVORINA Ljiljana	69, 71, 83, 87, 97, 100, 156, 160, 161, 166, 422, 426
JEVREMOVIĆ Milutin	337, 342
JOKOVIĆ Dejan	122, 126, 143, 167, 170, 171, 174, 390, 393, 394, 397
JOKSIĆ Jasminka	364, 367
JOKSIMOVIĆ Dušan	130
JOVANČEVIĆ Nikola	414
JOVANOVIĆ Zoran	290, 292
JOVIČIĆ Dubravka	295, 304
KALJEVIĆ Jelica	130, 259, 309
KANDIĆ Aleksandar	427, 430, 431, 434
KIČEVIĆ Dušan	343, 346
KNEŽEVIĆ Ivan	255, 258, 267, 270, 275, 279, 280, 284, 347
KOLAREVIĆ Goran	357
KOŠUTIĆ Duško	197, 221, 233, 285, 289, 317
KOVAČEVIĆ Milojko	27, 213
KOZMIDIS-LUBURIĆ Uranija	92
KRAJCAR BRONIĆ Ines	35, 39
KRGA Dejan	193, 196
KRIŽMAN J. Milko	40
KRMAR Miodrag	49, 88, 91, 152, 402, 406, 410, 414
KRSTIĆ Dragana	251, 290, 292, 360, 363
LAŠTOVIČKA-MEDIN Gordana	300
LAZAREVIĆ Đorđe	185, 246, 271
LAZAREVIĆ Nataša	255, 258, 275, 279, 280, 284, 347
LEKIĆ Marija	343, 346
LOŇČAR Boris	443
LUČIĆ Silvija	226
MALETIĆ Dimitrije	122, 126, 143, 167, 170, 171, 174, 390, 393, 394, 397
MANDIĆ Miodrag	347
MARINKOVIĆ Jelena	237
MARINKOVIĆ Olivera	364, 367, 372, 375

MARINKOVIĆ Predrag	213
MARKOVIĆ Vladimir	241, 251, 263
MIHAILOVIĆ Aleksandar	49
MIHAILOVIĆ Dragutin	152
MILENKOVIĆ Aleksandra	323
MILENKOVIĆ Biljana	101, 233, 251, 263
MILIĆ Gordana	139
MILJANIĆ Saveta	35, 39
MILOŠEVIĆ Zoran	427, 430, 431, 434
MILUTINOVIĆ Predrag	130
MITRIĆ Miodrag	350
MITROVIĆ Branislava	61
MRĐA Dušan	88, 91, 92, 379, 410
MRĐA Duššan	402, 406
Nikezić Dragoslav	3
NIKEZIĆ Dragoslav	233, 241, 251, 263, 290, 292, 360, 363
NIKOLIĆ Jelena	65, 68, 76, 106, 109, 114, 117, 147, 151, 418, 421
NIKOLIĆ Mladen	110
NIKOLOV Jovana	88, 91, 92, 143, 146, 402, 406, 410
NIKOLOVSKI Ivana	448, 452
NINKOVIĆ M. Marko	9
OMAHEN Gregor	40
OSMOKROVIĆ Predrag	443
PAJIĆ Jelena	304, 313
PANTELIĆ Gordana	65, 68, 106, 109, 114, 117, 147, 151, 418, 421
PANTELIĆ Gordana	398, 422, 426
PAPOVIĆ-ĐUKIĆ G.	217
PAVLOVIĆ Nina	357
PAVLOVIĆ Snežana	337, 342
PERAZIĆ Luka	255, 258, 267, 270, 275, 280, 284
PETROVIĆ Biljana	237
PETROVIĆ Borislava	193, 196, 201, 204, 357
PETROVIĆ Jelena	80
PETROVIĆ Milan	337, 342
PLEČAŠ Ilija	350
POPOVIĆ Dragana	76
PRASKALO Jovica	237
RADENKOVIĆ Mirjana	364, 367, 368, 371
RAFAJLOVIĆ Stefan	364, 367, 372, 375
RAGOJLOVIĆ Luka	357
RAIČEVIĆ Slavica	350
RAJAČIĆ Milica	65, 68, 106, 109, 114, 117, 147, 151, 418, 421
RAJOVIĆ Zoran	177, 213
RAKIĆ Boban	304, 313
RANOGAJEC-KOMOR Mária	35
RISTIĆ Goran	455, 459
RISTIĆ Olga	221
RUTONJSKI Laza	193, 196, 201, 204, 357
SARAP Nataša	65, 68, 106, 109, 114, 117, 350, 418, 421

SAVIĆ Danijela	360, 363
ŠEŠLAK Bojan	427, 430, 431, 434
SIMOVIĆ Rodoljub	110
SLIVKA Jaroslav	402, 406, 410
ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ Marija	323, 326, 333, 336
SMIČIKLAS Ivana	333, 336
SMILJANIĆ Ljubica	193, 196, 201, 204, 357
SOLDATOVIĆ Danijela	343, 346
SPASOJEVIĆ-TIŠMA Vera	317
STAJIĆ Jelena	101, 241
STANIĆ Vojislav	350
STANIŠIĆ Slaviša	285, 289
STANKOVIĆ Jelena	177, 189, 213, 226, 259, 309, 357
STANKOVIĆ Koviljka	309
STANKOVIĆ Srboljub	246, 271, 443, 460
STEVANOVIĆ Nenad	233, 241, 263
STOJANOVIĆ Dalibor	72
STOŽINIĆ D.	217
SVRKOTA Nikola	72, 439
SVRKOTA Ranko	118
TANASKOVIĆ IRENA	426
TANASKOVIĆ Irena	69, 71, 83, 87, 97, 100, 156, 161, 166, 422
TEODOROVIĆ Milan	193, 196, 201, 204, 357
TODOROVIĆ Dragana	65, 68, 76, 106, 109, 114, 117, 147, 151, 418, 421
TODOROVIĆ Nataša	49, 88, 91, 92, 209, 226, 402, 406, 410
UDOVIČIĆ Vladimir	126, 134, 138, 143, 152, 167, 170, 171, 174, 390, 393, 394, 397
UROŠEVIĆ Vlade	221
VESELINOVIĆ Dragan	57
VESELINOVIĆ Nikola	122, 126, 167, 170, 390, 393, 394, 397
VESKOVIĆ Miroslav	88, 91, 92, 209, 402, 406, 410
VIĆENTIJEVIĆ Mihajlo	398
VIDIĆ Alfred	53
VITOROVIĆ Duško	61
VITOROVIĆ Gordana	61
VUČINIĆ-VASIĆ Milica	49
VUČKOVIĆ Biljana	139
VUČKOVIĆ Dejan	110
VUJOVIĆ Milan	368, 371
VUKANAC Ivana	427, 430, 431, 434
VUKOTIĆ Perko	118
VUKOVIĆ Dubravka	398
VUKOVIĆ Slađana	313
VULETIĆ Vedrana	422, 426
ZDJELAREVIĆ Nevena	255, 258, 267, 270, 275, 279, 280, 284, 347
ŽIVANOVIĆ Miloš	147, 151, 271, 443
ŽIVKOVIĆ RADOVANOVIĆ Jelena	263
ŽIŽIĆ Ranka	72

SADRŽAJ

50 GODINA ZAŠTITE OD ZRAČENJA	7
ZAŠTITA OD ZRAČENJA, ZNAČAJNI DATUMI I DOGAĐJI	9
ON THE OCCASION OF THE 50TH ANNIVERSARY OF ORGANISED RADIATION PROTECTION 27	
50 GODINA ZAŠTITE OD ZRAČENJA I HRVATSKO DRUŠTVO ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA	35
RADIATION PROTECTION IN SLOVENIA OVER THE PAST FIFTY YEARS (1963-2013) AND THE	
SLOVENIAN SOCIETY OF RADIATION PROTECTION	40
RADIOEKOLOGIJA I IZLAGANJE STANOVNIŠTVA	47
ANALIZA NEKIH FAKTORA KOJI BI MOGLI UTICATI NA AKUMULACIJU ²¹⁰ Pb U ZEMLJIŠTU 49 ..	49
MULTIVARIJATNA ANALIZA URANA U PODZEMNIM VODAMA REJONA HAĐIČA	53
PROCENA RADIJACIONOG OPTEREĆENJA MAHOVINA SOKOBANJE I BANJE JOŠANICE IZ 2010. I	
2012. GOD.	57
AKTIVNOST ¹³⁷ Cs I ⁴⁰ K U LEKOVITOM BILJU SA PODRUČJA ZLATIBORA	61
PROCENA DOZE OD GRAĐEVINSKOG MATERIJALA KOJI SE NEKADA DAVNO KORISTIO ZA	
STAMBENE OBJEKTE	65
MEĐUNARODNA INTERKOMFARACIJA GAMASPEKTOMETRIJSKE ANALIZE VODE	69
POČETNA RADIOEKOLOŠKA ISTRAŽIVANJA U NOVOM PAZARU - PODRUČJE NOVOPAZARSKA	
BANJA	72
BERILIJUM-7 I OLOVA-210: DEVET GODINA MONITORINGA NA DVE LOKACIJE	
U BEOGRADU	76
EXTERNAL EFFECTIVE GAMMA DOSE RATES ORIGINATING FROM ¹³⁷ Cs IN THE SURFACE SOILS OF	
BELGRADE URBAN AREA	80
SADRŽAJ PRIRODNIH RADIONUKLIDA I PROCENA RADIACIONOG RIZIKA U OKOLINI	
TERMoeLEKTRANA U SRBIJI	83
MONITORING VODA SRBIJE U PERIODU OD MAJA 2011. DO APRILA 2012. GOD.	88
PRIRODNA RADIOAKTIVNOST U OKOLINI BIVŠEG RUDNIKA URANA GABROVNICA	92
MONITORING RADIOAKTIVNOSTI U LJUDSKOJ HRANI U REPUBLICI SRBIJI	
U 2011. I 2012. GOD	97
SADRŽAJ PRIRODNIH I VEŠTAČKIH RADIONUKLIDA U UZORCIMA ZEMLJIŠTA KOSOVSKE	
MITROVICE	101
RADIOAKTIVNOST ZEMLJIŠTA U OKOLINI TERMoeLEKTRANA U SRBIJI	106
PROCENA IZLAGANJA ZRAČENJU U STANOVIMA IZRAĐENIM OD SIPOREKS BLOKOVA OBAVLJENA	
RESRAD-BUILD PROGRAMOM	110
UKUPNA ALFA I BETA AKTIVNOST U SOKOVIMA IZ SRBIJE	114
FON TERESTRIJALNOG GAMA-ZRAČENJA U BARAMA KRALJSKIM	118
VREMENSKI PROMENLJIVE KOMPONENTE FONA GAMA ZRAČENJA	
I MERENJE MALIH AKTIVNOSTI	122
KOMPOZICIJA NISKOENERGIJSKOG DELA FONSKOG SPEKTRA GAMA ZRAČENJA U NADZEMNOJ I	
PODZEMNOJ NISKOFONSKOJ LABORATORIJI	126
PROVERA MODULA ZA ATMOSFERSKU DIFUZIJU RADIONUKLIDA KROZ GRANIČNI SLOJ	
ATMOSFERE U MODELU NFS_VINČA	130
NACIONALNI PROGRAM ZA RADON, REGULTIVA I STRATEGIJA	134
RADON U ZATVORENIM PROSTORIJAMA U SEVEROZAPADNOM DELU KOSOVA I METOHIJE ..	139
MONTE CARLO SIMULACIJA ZA PROCENU RADONSKE AKTIVNOSTI UNUTAR OLOVNE ZAŠTITE	
GERMANIJUMSKIH DETEKTORA	143
UTICAJ KALIBRACIONOG FAKTORA NA REZULTAT KONCENTRACIJE RADONA	147
VREMENSKE SERIJE MERENIH VREDNOSTI ²²² Rn ANALIZIRANE METODOM STOHAŠTIČKE	

KOMPLEKSNOSTI	152
KONCENTRACIJA RADONA U ŠKOLSKIM I PREDŠKOLSKIM USTANOVAMA U BEOGRADU U PERIODU 2011.-2012.	156
KONTROLA KVALITETA GAMASPEKTROMETRIJSKOG ISPITIVANJA KONCENTRACIJE RADONA U ZATVORENOM PROSTORU	161
PRIMENA RAZLIČITIH METODA U ANALIZI VREMENSKIH SERIJA KONCENTRACIJE RADONA ..	167
KORELACIONA ANALIZA UTICAJA ATMOSFERE NA VARIJACIJU KONCENTRACIJE RADONA U RAZLIČITIM SREDINAMA	171
ZAŠTITA OD ZRAČENJA U MEDICINI	175
MERENJE I PRORAČUN KERME U VAZDUHU NA DIJAGNOSTIČKIM RENDGEN -APARATIMA.....	177
PROCENA DOZE OD MEDICINSKIH IZLAGANJA U REPUBLICI SRBIJI	181
OPTIMIZACIJA PROTOKOLA KOD SNIMANJA GLAVE U CT DIJAGNOSTICI	185
UTICAJ STEPENA UVEĆANJA SLIKE NA NIVO RASEJANOG ZRAČENJA U OKOLINI PACIJENTA U INTERVENTNOJ RADIOLOGIJI	189
IZLAGANJE JONIZUJUĆEM ZRAČENJU U TOKU TEHNIČKOG ODRŽAVANJA I SERVISNE INTERVENCIJE LINEARNIH AKCELERATORA	193
RENDGEN APARATI U DIJAGNOSTIČKOJ RADIOLOGIJI NA TERITORIJI SRBIJE U 2012, GOD.	197
DNEVNA KONTROLA KVALITETA ZRAČNOG SNOPA LINEARNOG AKCELERATORA	201
NEKOLIKO REZULTATA BRAHITERAPIJSKE GINEKOLOŠKE <i>IN VIVO</i> DOZIMETRIJE	205
PRORAČUN MERA ZAŠTITE ZA MDCT SISTEM	210
ODREĐIVANJE KVALITETA SNOPA X-ZRAČENJA UPOTREBOM SPEKTOMETRA U DIJAGNOSTIČKOJ RADIOLOGIJI	214
OCENA RADNE SPOSOBNOSTI LICA PROFESIONALNO IZLOZENIH JONIZUJUĆIM ZRAČENJIMA - PRIKAZ SLUČAJA	218
RAZVOJ WEB APLIKACIJE ZA OSIGURANJE KVALITETA RENDGEN APARATA U MEDICINSKIM USTANOVAMA U SRBIJI	222
DOZA OD PROFESIONALNIH IZLAGANJA U NUKLEARNOJ MEDICINI	
SA PET/CT PRAKSOM U SRBIJI	227
DOZIMETRIJA	231
PROCENA JAČINE DOZNOG EKVIVALENTA NEUTRONA CR-39 DETEKTOROM	223
STUDY OF THE TIME - TEMPERATURE PROFILES OF LiF: Cu, P PELLETS	237
JONIZACIJA I EKSCITACIJA MOLEKULA VODE U ČELIJAMA USLED PROLASKA ALFA ČESTICE	241
PROVERA DOZA U RADIOTERAPIJSKIM USTANOVAMA SRBIJE U 2013, GOD.	246
RAČUNANJE ABSORBOVANE DOZE U PLUĆIMA ORNL FANTOMA ZA BNCT TERAPIJU	251
SPECIFIČNA AKTIVNOST ¹³⁷ Cs I ⁶⁰ Co U URINU KOD PROFESIONALNO IZLOŽENIH LICA PRILIKOM PREPAKIVANJA OZRAČENOG NUKLEARNOG GORIVA	255
OPTIMIZACIJA FILTRA TERMOLUMINESCENTNOG DOZIMETRA SIMULACIJOM MONTE CARLA	259
SIMULACIJA NISKOENERGETSKIH PROTONA KROZ ČELIJE	263
PRIMENA DOZIMETARA SA OPTIČI STIMULISANOM LUMINESCENCIJOM (OSL) U LIČNOJ DOZIMETRIJI	267
ODREĐIVANJE MERNE NESIGURNOSTI ETALONSKIH POLJA U METROLOGIJA DOZE ZRAČENJA	271
RADIOLOŠKA KARAKTERIZACIJA TRANSPORTNOG PAKOVANJA TIPA TUK-19 PRILIKOM UTOVARA I TRANSPORTA OZRAČENOG NUKLEARNOG GORIVA IZ ISTRAŽIVAČKOG REAKTORA RA U RUSKU	

FEDERACIJU	275
RADIOLOŠKA KARAKTERIZACIJA TRANSPORTNOG PAKOVANJA TIPA ŠKODA VPVR/M PRILIKOM UTOVARAI TRANSPORTA OZRAČENOG NUKLEARNOG GORIVA IZ ISTRAŽIVAČKOG REAKTORA RA U RUSKU FEDERACIJU	280
PROCENA DOZE PRILIKOM DEKOMISIJE I INSTALACIJE IZVORA ZRAČENJA ⁶⁰ Co U UREĐAJU ZA TELETERAPIJU	285
PODEŠAVANJE INPUT FAJLA ZA VOXEL FANTOME U MCNP PROGRAMU	290
BIOLOŠKI EFEKTI JONIZUJUĆIH ZRAČENJA	293
CITOGENETIČKE PROMENE U LIMFOCITIMA PERIFERNE KRVI OSOBA PROFESIONALNO IZLOŽENIH RADIONUKLIDIMA	295
DA LI SE EFEKTI USLED ZRAČENJA PRIRODNIH RADIOIZOTOPA I CEZIJUMA-137 KOD DVE VRSTE RIBA IZ JUŽNOG JADRANSKOG MORA (<i>MUGIL CEPKALUS</i> LINNAEUS, 1758 I <i>LIZA SALIENS</i> RISSO, 1810) MOGU OČEKIVATI?	300
INTERINDIVIDUALNA VARIJABILNOST U EVALUACIJI GENOTOKSIČNIH EFEKATA JONIZUJUĆIH ZRAČENJA	304
MONITORING ŠAKA PROFESIONALNO IZLOŽENIH LICA U NUKLEARNOJ MEDICINI	309
MIKRONUKLEUSI KAO PREDIKTORI KARCINOMA U PROFESIONALNOJ EKSPOZICIJI GENOTOKSIČNIM AGENSIMA - PRIKAZ SLUČAJA	313
PRIMENA VISOKIH AKTIVNOSTI ¹³¹ I U LEČENJU KARCINOMA ŠTITASTE ŽLEZDE	317
RADIOAKTIVNI OTPAD I DEKONTAMINACIJA	321
IMOBILIZACIJA JONA ⁹⁰ Sr U PRISUSTVU ⁶⁰ Co UPOTREBOM CRVENOG MULJA	323
MATHEMATICAL MODELLING OF TRANSPORT PHENOMENA IN CONCRETE POROUS MEDIA ...	476
UTICAJ KOŠTANOG SORBENTA KAO ADITIVA ZEMLJIŠTU NA KOLIČINU JONA ⁹⁰ Sr IZLUŽENIH U VODENI RASTVOR	333
NOVI OBJEKTI ZA SKLADIŠTENJE RADIOAKTIVNOG OTPADA U REPUBLICI SRBIJI.....	337
PREGLED TEHNOLOGIJA TRETMANA TEČNOG RAO	343
DEKONTAMINACIJA MANIPULATORA PRIMENOM ULTRAZVUČNE TEHNIKE	347
SINTEZA NANOČESTIČNOG HIDROKSIAPATITA EMULZIONOM METODOM, KAO POTENCIJALNOG SORBENTA JONA TEŠKIH METALA I RADIONUKLIDA	350
REGULATIVA, EDUKACIJA I JAVNO INFORMISANJE	355
USAGLAŠENOST NACIONALNE LEGISLATIVE SA DIREKTIVOM 97/43 EURATON SAVETA EVROPSKE UNIJE I KLINIČKA IMPLEMENTACIJA U SRBIJI	357
NOVE PREPORUKE MEĐUNARODNE KOMISIJE ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA ZA GRANIČNU EKVIVALENTNU DOZU ZA OČNO SOČIVO	360
IMPLEMENTACIJA PROPISA U OBLASTI ZAŠTITE OD JONIZUJUĆIH ZRAČENJA	364
REGULATORNI POSLOVI U OBLASTI NUKLEARNE SIGURNOSTI I BEZBEDNOSTI I UPRAVLJANJA RADIOAKTIVNIM OTPADOM	368
DOGRADNJA OSNOVNIH STANDARDNA RADIJACIONE SIGURNOSTI U MEĐUNARODNIM PREPORUKAMA	372
METODE DETEKCIJE I MERNI INSTRUMENTACIJA	377
O KALIBRACIJI GAMA-SPEKTROMETARA	379

<p>SPEKTRALNA I VREMENSKA ANALIZA U DIGITALNOJ SPEKTROKOPIJI - RAZVOJ SOFTVERA I PRIMENI 390</p> <p>KOMPOZICIJA KOSMIČKOG ZRAČENJA ZAUSTAVLJENOG U VETO DETEKTORIMA..... 394</p> <p>REZULTATI INTERKOMPARACIJE ODREĐIVANJA SADRŽAJA RADIONUKLIDA U VODI I ZEMLJIŠTU IAEA-2011-03 398</p> <p>ISTRAŽIVANJE KVALITETA GAMASPEKTROMETRIJSKIH MERENJA 402</p> <p>PROJEKTOVANJE ZAŠTITE ZA NISKOFONSKI SPEKTROMETAR WETYN (WELL TYPE NATRIUM IODIDE) 406</p> <p>TESTIRANJE 9"X9" NaI(TL) SPEKTROMETRA OBLIKA JAME 410</p> <p>UTICAJ GAMA ZRAČENJA FISIONIH PRODUKATA NA PROMENU GAMA KONSTANTE ²⁵²Cf 414</p> <p>RAČUNANJE EFEKTIVNE DUBINE INTERAKCIJE HPG_e DETEKTORA KORIŠĆENJEM EFTRAN SOFTVERA 418</p> <p>KALIBRACIJA EFIKASNOSTI GERMANIJUMSKIH DETEKTORA ZA POTREBE MERENJA UZORAKA IZ ŽIVOTNE SREDINE 422</p> <p>IZRAČUNAVANJE KOREKCIONIH FAKTORA ZA KOINCIDENTNO SUMIRANJE ZA ¹⁵²Eu - ZAPREMINSKI IZVORI 427</p> <p>PRORAČUN KOREKCIONIH FAKTORA ZA KOINCIDENTNO SUMIRANJE ZA NEKE PRIRODNE RADIONUKLIDE PRIMENOM EFTRAN SOFTVERA 431</p> <p>EFIKASNOST DETEKCIJE FOTONA 662 keV 32 - DETEKTORSKIM SISTEMOM TIPA <i>CRISTAL BALL</i> - SA I BEZ KOLIMATORA 435</p> <p>PROMJENE U BRZINI BROJANJA DETEKTORA U ZAVISNOSTI OD POZICIJE IZVORA U DETEKCIONJOJ KOMORI VIŠEDETEKTORSKOG 4π SPEKTROMETRA 439</p> <p>PROCENA UTICAJA POKLOPCA PAKOVANJA OD IZABRANIH TITANIJUMSKIH LEGURA NA ENERGETSKU ZAVISNOST RADFET DOZIMETARA U POLJIMA GAMA I X-ZRAČENJA 443</p> <p>ISPITIVANJE PONAŠANJA JONIZACIONE KOMORE I GM BROJAČA U POLJIMA X I GAMA ZRAČENJA 448</p> <p>NEJONIZUJUĆA ZRAČENJA 453</p> <p>UREĐAJ ZA MERENJE INTENZITETA RF ZRAČENJA EMITOVANOG OD STRANE BEŽIČNIH KOMUNIKACIONIH SISTEMA 455</p> <p>PONOVLJIVOST USKOPOJASNIH MERENJA NIVOA ELEKTROMAGNETSKOG POLJA U BLIZINI PREDAJNE STANICE SOFTVERSKOG RADIJA 460</p> <p>INDEX AUTORA 465</p> <p>SADRŽAJ 471</p>	
---	--

