

HDZZ CRPA

**ZBORNIK
RADOVA
DVANAESTOG
SIMPOZIJA
HRVATSKOG
DRUŠTVA ZA
ZAŠTITU OD
ZRAČENJA**

**PROCEEDINGS
OF THE
TWELFTH
SYMPOSIUM OF
THE CROATIAN
RADIATION
PROTECTION
ASSOCIATION**

Urednici / Editors

**Jelena Popić
Ivana Coha
Ines Krajcar Bronić
Željka Knežević Medija**

**Zagreb
2019**

ISBN 978-953-7941-29-1

Zbornik radova Dvanaestog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja
Varaždin, 10. – 12. travnja 2019.

nakladnik: Hrvatsko društvo za zaštitu od zračenja, Zagreb

mjesto izdanja: Zagreb

godina izdanja: 2019

urednici: Jelena Popić, Ivana Coha, Ines Krajcar Bronić, Željka Knežević Medija

ISBN 978-953-7941-29-1

**Zbornik radova 12. simpozija
HRVATSKOG DRUŠTVA ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA**

*Proceedings of the 12th Symposium of the
CROATIAN RADIATION PROTECTION ASSOCIATION*

Izdavač / Published by

HRVATSKO DRUŠTVO ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA
CROATIAN RADIATION PROTECTION ASSOCIATION



Urednici / Editors

**Jelena Popić
Ivana Coha
Ines Krajcar Bronić
Željka Knežević Medija**

ISBN 978-953-7941-29-1

HDZZ – CRPA
Zagreb, 2019



**12. SIMPOZIJ
HRVATSKOG DRUŠTVA ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA
s međunarodnim sudjelovanjem
Varaždin, Hrvatska
10.-12. travnja 2019.**

*12th SYMPOSIUM OF THE
CROATIAN RADIATION PROTECTION ASSOCIATION
with international participation
Varaždin, Croatia
April 10-12, 2019*

Organizator / Organiser

**HRVATSKO DRUŠTVO ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA
CROATIAN RADIATION PROTECTION ASSOCIATION**

Suorganizatori / Co-organisers

Institut Ruđer Bošković, Zagreb
Ruđer Bošković Institute, Zagreb

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb

Hrvatsko društvo za biomedicinsko inženjerstvo i medicinsku fiziku
Croatian Biomedical Engineering and Medical Physics Society, Zagreb

Znanstveni odbor / *Scientific Committee*

Jelena Popić
(predsjednica / *chairwoman*)
Verica Garaj Vrhovac
Hrvoje Hršak
Željka Knežević Medija
Ines Krajcar Bronić
Marija Majer
Gordana Marović
Mario Medvedec
Iva Mrčela
Nevenka Novosel
Branko Petrincec
Vanja Radolić

Organizacijski odbor / *Organising Committee*

Ivana Coha
(predsjednica / *chairwoman*)
Ana Buinac
Željko Grahek
Martina Ivković
Sanja Krča
Katja Magdić Košiček
Katarina Marušić
Marijana Nodilo
Marina Poje Sovilj
Jasminka Senčar
Marko Šoštarić
Ivana Tartaro Bujak
Ivana Tucaković
Saša Vidaković
Ivana Zamboni

Pokrovitelji / Patrons

Grad Varaždin
City of Varaždin

Ministarstvo zdravstva
Ministry of Health

Ministarstvo gospodarstva, poduzetništva i obrta
Ministry of Economy, Entrepreneurship and Craft

Sponzori i izlagači / Sponsors and Exhibitors

Fond za financiranje razgradnje i zbrinjavanja radioaktivnog otpada i istrošenoga
nuklearnog goriva Nuklearne elektrane Krško

Canberra Packard Central Europe GmbH

LKB Vertriebs Ges.m.b.H.

GAŠPAR medicinska oprema i servis d.o.o.

Turistička zajednica grada Varaždina

Hrvatska turistička zajednica

Dragi članovi HDZZ-a, poštovani sudionici 12. simpozija,

Proteklo razdoblje od našeg zadnjeg druženja na 11. simpoziju u Osijeku 2017. godine, obilježilo je niz aktivnosti Društva.

Tijekom 11. simpozija održana je Izborna skupština Zbora HDZZ-a na kojoj je izabrano novo vodstvo Društva. Uslijedila je sjednica na kojoj je izvršena primopredaja dužnosti novom Upravnom odboru i Nadzornom odboru, a novo vodstvo Društva redovito održava sjednice ili elektroničke sjednice. Broj članova raste tako da trenutno HDZZ ima 212 članova. U skladu s direktivom o zaštiti osobnih podataka (GDPR) provedena je anketa o suglasnosti za primanje elektroničkih poruka te je tako stvorena nova lista primatelja obavijesti. U Osijeku je predstavljen novi dizajni internetske stranice www.hdzz.hr koja se redovito obnavlja i puni korisnim informacijama. Uvedena je i *on-line* pristupnica za one koji se žele učlaniti. Prijave za ovaj simpozij su se prvi puta obavljale preko web stranice simpozija <http://www.hdzz.hr/hdzz12/>, a na njoj će biti dostupna i elektronička verzija Zbornika radova ovog simpozija. Ove godine nismo tiskali knjigu, već smo se priklonili sada već uobičajenom izdanju zbornika samo u pdf obliku.

U proteklom je razdoblju HDZZ bilo suorganizator tribine „Medicinska fizika i kliničko inženjerstvo u Hrvatskoj i svijetu”, koja je održana 7.11.2017. na KBC Zagreb. Uspostavljena je dobra suradnja s Hrvatskim društvom za biomedicinsko inženjerstvo i medicinsku fiziku. Ovom prilikom čestitamo medicinskim fizičarima i kliničkim inženjerima te radiološkim tehnologima kojima je odobren status zdravstvenih radnika.

Raspisali smo 2017. godine 5. natječaj za najbolji rad ili disertaciju mladih članova Društva (do 35 godina) iz područja zaštite od zračenja ili znanosti o zračenju, ali se nitko nije prijavio, tako da nažalost nismo imali predstavnika u natjecanju mladih na Europskom kongresu IRPA u Haagu 2018. godine. Ove godine ponovno ćemo raspisati natječaj, nadajući da ćemo imati pristupnike i da će nas pobjednik natječaja predstavljati na svjetskom kongresu IRPA 2020. u Seulu.

Mladi članovi društva održali su 1. skup sekcije mladih HDZZ-a 16. siječnja 2018. godine. Na ovom simpoziju organizirali smo posebno druženje mladih članova kako bismo im omogućili da se međusobno bolje upoznaju.

HDZZ preko svojih članova sudjeluje u e-savjetovanjima, a u ime Društva komentare odobrava Upravni odbor. Jedno od značajnijih savjetovanja bilo je o ukidanju Državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS) i njegovom pripajanju Ministarstvu unutarnjih poslova, u kojem su naše primjedbe „primljene na znanje“.

Nastavili smo suradnju s drugim društvima za zaštitu od zračenja, posebno s europskim društvima. Sudjelovali smo na godišnjim sastancima predstavnika europskih društava za zaštitu od zračenja u Beču 2017. godine i u Parizu 2018. godine. Na tom je sastanku odlučeno da HDZZ bude organizator 16. sastanka europskih društava za zaštitu od zračenja u Zagrebu 28.10.2019. Sudjelovali smo na 29. simpoziju Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore (DZZ SCG) na Srebrnom jezeru 2017. godine.

Rad 12. simpozija odvijat će se kroz 10 znanstveno-stručnih sekcija. Glavna tema ovog simpozija posvećena je izazovima u zaštiti od zračenja. U Zborniku se nalazi ukupno 64 rada. Objavljeni su svi u roku pristigli radovi. Radovi odražavaju stanovišta autora, a urednici su ispravili samo očite pogreške u tekstovima, te tehnički uredili i ujednačili izgled radova prema zadanom predlošku. Radovi su pisani ili na hrvatskom jeziku ili na engleskom jeziku, a svi radovi imaju i sažetke na engleskom jeziku. Kvaliteta i standard engleskog jezika odgovornost su autora jer tekstovi nisu posebno lektorirani. Svi sažeci na engleskom jeziku bit će poslani nakon završetka simpozija u međunarodnu bazu INIS (*International Nuclear Information System*) koju održava IAEA (<http://www.iaea.org/inis/>) i u kojoj se već nalaze sažeci s prethodnih simpozija HDZZ-a. Kvaliteta grafičkih priloga također je odgovornost autora i u pojedinim slučajevima na nju nismo mogli utjecati.

Podsjećamo da je službeno glasilo HDZZ-a znanstveno-stručni časopis *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju* (<http://hrcak.srce.hr/aiht>), koji u 2017. godini ima čimbenik odjeka (*Impact Factor*) 1,117. U časopisu se redovito objavljuju informacije vezane uz rad Društva. Ovom prigodom sve sudionike 12. simpozija HDZZ-a i članove Društva pozivamo da svoje znanstvene i stručne radove objavljuju u *Arhivu* i time aktivno pridonose njegovom daljnjem napretku. Uredništvu časopisa na razmatranje se mogu poslati i radovi pripremljeni za ovaj zbornik koje, ukoliko dosad nisu objavljivani, treba urediti prema uputi autorima za objavljivanje u *Arhivu*. Radovi će biti objavljeni ukoliko prođu uobičajeni znanstvenu recenziju.

Vjerujemo da ćemo u zajedničkom druženju i razmjeni iskustava na ovom Simpoziju uspostaviti novu ili unaprijediti postojeću znanstvenu i stručnu suradnju. Organizatori zahvaljuju suorganizatorima, pokroviteljima, sponzorima i izlagačima na podršci i pomoću tijekom organizacije.

Na kraju, nadamo se da će čitatelji u ovom zborniku naći korisne informacije i poticaj za svoj znanstveni i stručni rad u području znanosti o zračenju te zaštite od zračenja. Svim sudionicima simpozija želimo uspješan rad i ugodan boravak u Varaždinu.

*Jelena Popić, predsjednica ZO 12. HDZZ-a i urednica Zbornika
Ivana Coha, predsjednica OO 12. HDZZ-a i urednica Zbornika
Ines Krajcar Bronić, predsjednica HDZZ-a i urednica Zbornika
Željka Knežević Medija, tajnica HDZZ-a i urednica Zbornika*

Zagreb, travanj 2019.

SADRŽAJ
CONTENTS

Opće teme u zaštiti od zračenja / General topics in radiation protection

Tibor Bujtás, János Petrányi <i>European IRPA Congress 2022 in Hungary</i>	3
Alemka Knapp, Ivica Levanat, Diana Šaponja-Milutinović Može li Hrvatska na vrijeme prihvatiti polovicu radioaktivnog otpada iz Nuklearne elektrane Krško? <i>Can Croatia accept half of the radioactive waste from the Krško Nuclear Power Plant in time?</i>	9
Saveta Miljanić <i>The impact of the revised eye lens dose limits – Report of IRPA Task Group Phase 2</i>	15
Zdenko Franić Pčele i zračenje <i>Bees and radiation</i>	20
Ivana Tartaro Bujak, Mirjana Šimić, Branka Mihaljević, Sandra Šuto, Jasna Knežević Sterilizacija i sterilnost <i>Sterilization and sterility</i>	26
Yu. P. Chukova <i>Radiation hormesis and Hygienic standards of safety in light of fundamental physical laws</i>	32

Izazovi u zaštiti od zračenja / Key challenges in radiation protection

Borut Breznik, Primož Mlakar, Marija Zlata Božnar, Marjan Pavlin <i>Dose projection capabilities for operation of Krško Nuclear Power Plant</i>	41
Ines Krajcar Bronić, Maria Ranogajec-Komor, Saveta Miljanić, Željka Knežević Prvih 40 godina Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja i izazovi budućnosti <i>The first 40 years of the Croatian Radiation Protection Association and future challenges</i>	47
Jelena Popić, Marko Slavica, Ivana Kralik Moderni izazovi u opravdanosti radioloških snimanja <i>Modern challenges in justification of radiological examinations</i>	53
Vanja Radolić, Sanja Krča, Marina Poje Sovilj, Dinko Babić Radonski akcijski plan u Republici Hrvatskoj <i>The Radon Action Plan in the Republic of Croatia</i>	57
Robert Bernat, Nikolina Mišak, Maja Vojnić Kortmiš Kategorizacija izloženih radnika <i>Categorisation of exposed workers</i>	64
Mario Medvedec Izazovi transponiranja Direktive 2013/59/Euratom u hrvatske propise o zaštiti od ionizirajućeg zračenja u medicine <i>Challenges in transposing Directive 2013/59/Euratom into Croatian legislation on radiation protection in medicine</i>	68
Mario Medvedec Od (su)mraka do zore zdravstvenih (su)radnika <i>From dusk til dawn of the health (co)workers</i>	74

**Dozimetrija zračenja/
Radiation dosimetry**

- Mihaela Justić, Luka Pavelić, Marija Surić Mihić, Ivica Prlić** 83
Izrada fantoma za mamografiju
Construction of the mammography phantom
- Nevena Obajdin, Đeni Smilović Radojčić, Manda Švabić Kolacio, David Rajlić, Slaven Jurković** 86
Evaluation of radiotherapy treatment dose distributions at University Hospital Rijeka – four-year experience
- Marija Surić Mihić, Jerko Šiško, Ana Pavić Grego** 92
Ekvivalentna doza za kožu i šake izloženih radnika u nuklearnoj medicini
The equivalent dose for the skin and hands of exposed workers in nuclear medicine
- Branimir Zauner, Mihaela Justić, Marija Surić Mihić, Ivica Prlić** 97
Kalibracija indikatora doze u dentalnoj medicine
Calibration of dose indicators (KAP/DAP meters) in dental medicine

**Biološki učinci zračenja /
Biological effects of radiation**

- Nikola Šegedin, Hrvoje Hršak, Kristina Serec, Sanja Dolanski Babić** 103
Promjene vibracijskih svojstava deoksiribonukleinske kiseline pod utjecajem ionizirajućeg zračenja
Changes in the vibrational properties of the deoxyribonucleic acid under the influence of ionizing radiation
- Mirta Milić, Ružica Rozgaj, Vilena Kašuba, Nevenka Kopjar, Snježana Ramić, Anica Horvat Knežević, Vesna Benković** 110
Cytogenetic status of workers exposed to low doses of ionizing radiation with dosimetry and importance of the distribution of DNA damage in different biodosimetry methods in the results estimation
- Mirta Milić, Đurđica Milković, Marko Gerić, Marijana Nodilo, Mária Ranogajec-Komor, Goran Gajski** 116
Buccal micronucleau assay: An introductory study on X-ray exposed child population
- Andreja Jurić, Irena Brčić Karačonji, Suzana Žunec, Anja Mikolić, Nevenka Kopjar** 121
Cito/genoprotektivni i antioksidacijski učinci meda obične planike na oštećenja ljudskih limfocita izazvana UVB zračenjem u uvjetima *in vitro*
Assessment of cyto/genoprotective and antioxidative properties of strawberry tree honey against UVB radiation in vitro
- Vesna Benković, Željka Modrić, Anica Horvat Knežević, Nives Marčina, Nikola Borojević, Nada Oršolić, Nevenka Kopjar, Mirta Milić** 127
Primary DNA damage in peripheral blood and kidney cells of Swiss albino mice after Isoflurane anesthesia and whole body γ -radiation exposure
- Jadranka Pejaković Hlede, Silvijo Vince, Ivona Žura Žaja, Marija Majer, Marinko Vilić** 133
Broj eritrocita, leukocita te odnos heterofila i limfocita u krvi pilića izleženih iz jaja ozračenih malom dozom gama-zračenja
Number of erythrocytes, leukocytes and heterophil/lymphocyte ratio in blood of chickens hatched from eggs irradiated with low dose gamma radiation

**Izloženost stanovništva zračenju /
Radiation protection of the public**

- Amira Kasumović, Amela Kasić, Feriz Adrović** 141
Ambient dose equivalent rate in the area of Tuzla city
- Marija Surić Mihić, Branko Petrinec, Gordana Marović, Jasminka Senčar** 147
Procjena očekivane efektivne doze udisanjem ^{106}Ru početkom listopada 2017. godine
An estimate of the committed effective dose due to inhalation of ^{106}Ru at the beginning of October 2017
- Jerko Šiško, Marija Surić Mihić, Mihaela Justić** 152
Procjena efektivne doze za servisera helikoptera
Effective dose estimation for helicopter repair workers
- Nikola Marković, Martin Hjellström, Mats Isaksson** 156
Mjerenje tjelesne radioaktivnosti u slučaju nuklearne nesreće velikih razmjera
Large-scale measurements of internal contamination in case of a nuclear accident

**Zaštita od zračenja u medicini /
Radiation protection in medicine**

- Jelena Popić, Nikola Ivan Leder, Vinko Vidjak** 163
CT kolonografija – koliko se zračimo kod metode probira?
CT colonography – radiation exposure due to screening method?
- Ana Buinac, Katarina Ružić, Vedran Manestar** 168
Kontrola kvalitete zaštitnih olovnih pregača u KBC-u Zagreb
Quality control of the protective lead aprons in UHC Zagreb
- Dea Dundara Debeljuh, Svjetlana Grbac-Ivanković, Ivan Pribanić, Neva Giroto, Slaven Jurković** 173
Implementation of patient radiation dose assessment system for nuclear medicine diagnostic procedures at the University Hospital Rijeka
- Ivana Kralik, Hrvoje Vavro, Jelena Popić, Katarina Ružić, Ana Buinac, Renata Vrtarić, Ivana Bjelobrk, Damir Štimac, Dario Posedel, Dario Faj** 179
Uvjeti očitavanja radioloških snimki u četiri zdravstvene ustanove
Diagnostic images viewing conditions in four healthcare institutions
- Marija Majer, Željka Knežević, Saveta Miljanić** 188
Sekundarno zračenje u fotonskoj radioterapiji – pregled dozimetrijskih istraživanja unutar EURADOS-ove radne grupe 9
Dosimetry of stray radiation in photon radiotherapy – results of EURADOS Working Group 9
- Ivana Kralik, Tomislav Lauc, Hrvoje Brkić, Dario Posedel, Hrvoje Vavro, Jelena Popić, Ivana Rupiće, Dario Faj** 194
Utjecaj parametara snimanja dentalnim CBCT uređajem na doze organa i efektivnu dozu pacijenta
Influence of scanning parameters on organ doses and effective dose of the patient undergoing dental CBCT examinations
- Nikola Ivan Leder, Jelena Popić, Željka Knežević, Vinko Vidjak** 207
Uspješnost zaštite dojke izvan primarnog područja snimanja u slikovnoj dijagnostici abdomena kompjuteriziranom tomografijom – preliminarni rezultati
Effectiveness of breast shielding device in out-of-plane computerized tomography imaging of the abdomen – preliminary results

**Radioekologija/
Radioecology**

- Gina Branica, Zdenko Franić, Gordana Marović** 217
Istraživanje kontaminacije pileline radiocezijem u sjeverozapadnoj Hrvatskoj
Radiocaesium contamination in chicken meat from Northwestern Croatia
- Dijana Pavičić-Hamer, Ivana Tucaković, Delko Barišić** 221
Sezonsko praćenje koncentracija aktivnosti ^7Be , ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{226}Ra i ^{238}U u suhom tkivu dagnji *Mytilus Galloprovincialis* u priobalnim vodama Jadrana
*Seasonal monitoring of activity concentrations of ^7Be , ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{238}U in dry tissue of *Mytilus Galloprovincialis* mussels in Croatian Adriatic coastal sea*
- Gordana Marović, Slaven Reljić, Josip Kusak, Djuro Huber, Zdenko Franić, Mak Avdić, Jasminka Senčar** 227
Cezij u vukovima kao mjerilo radiološke čistoće okoliša u Hrvatskoj
Caesium in wolves as an indicator of environmental radiological purity in Croatia
- Milica Kovačić, Ljerka Petroci, Iva Franulović, Mak Avdić** 231
 ^{90}Sr u povrću u Zagrebu i Zadaru
 ^{90}Sr in vegetables in the city of Zagreb and Zadar
- Gordana Peh nec, Jasmina Rinkovec, Gordana Marović, Branko Petrincec, Jasminka Senčar** 236
Radioaktivnost i elementi platinske skupine u zraku Zagreba
Radioactivity and platinum elements in the air of Zagreb
- Nataša B. Sarap, Milica M. Rajačić, Marija M. Janković, Dragana J. Todorović, Jelena D. Krneta Nikolić** 242
Analysis of influence of meteorological parameters to cosmogenic radionuclides in fallout
- Tomislav Meštrović, Branko Petrincec, Marko Šoštarić, Ana Heđi, Katarina Marjanović, Igor Miklavčić, Dinko Babić** 247
Određivanje brzine ambijetalnog ekvivalenta doze ($H^*(10)/t$) u Kopačkom Ritu
Ambient dose equivalent rate ($H^(10)/t$) in Kopački Rit Nature Park*
- Gorana Karanović, Ivana Coha, Ivana Tucaković, Aleš Volčanšek, Borut Breznik, Željko Grahek** 251
Retrospektivni prikaz radioaktivnosti tekućih efluenata in Nuklearne elektrane Krško
Retrospective review of radioactivity of liquid effluents from the Nuclear Power Plant Krško
- Jadranka Barešić, Zoran Kovač, Jelena Parlov, Ivona Mijatović, Ines Krajcar Bronić, Andreja Sironić, Damir Borković** 257
Izotopne analize u zagrebačkom vodonosniku – vodocrpilište Kosnica
Isotopic analyses of Zagreb Aquifer – Kosnica well field
- Tomislav Bituh, Božena Skoko, Branko Petrincec, Gordana Marović** 263
Procjena radiološkog utjecaja fosfogipsa na biotu uporabom programa ERICA Tool
Assessment of the phosphogypsum deposition site impact on the environment using ERICA Tool

**Radon/
Radon**

- Gordana Pantelić, Igor Čeliković, Miloš Živanović, Ivana Vukanac, Jelena Krneta Nikolić, on the behalf of MetroRADON** 271
European project MetroRADON – to improve radon measurement in Europe

Gregor Omahen, Peter Jovanovič	277
<i>Radon survey in Slovenia in 2018 according to EU EURATOM</i>	
Vanja Radolič, Denis Stanič, Marina Poje Sovilj, Igor Miklavčič	283
Dnevne varijacije radona u nekim školama i vrtićima Istarske županije u kojima je prosječna koncentracija radona viša od referentne vrijednosti – implikacije na procjenu primljene doze	
<i>Daily variations of radon in some schools and kindergartens with elevated radon levels in Istria county – Implications on estimation of received doses</i>	
Peter Jovanovič	289
<i>New dose coefficients for radon in mines and karst caves</i>	
Jovana Nikolov, Nataša Todorović, Ivana Stojković, Andrej Vraničar	295
<i>Influence of ²²⁶Ra on ²²²Rn in water measurements</i>	
Marina Poje Sovilj, Jovana Nikolov, Ivana Coha, Ana Pavlačić, Ivana Tucaković, Nataša Todorović, Vanja Radolič	301
Interkomparacija metoda mjerenja radona u vodi	
<i>Intercomparation of methods for radon in water determination</i>	
Instrumentacija i mjerne tehnike/ <i>Instrumentation and measuring techniques</i>	
Branko Petrincec, Marko Šoštarić, Dinko Babić, Mak Avdić	309
Razvoj terenskih metoda za nadzor radioaktivnosti okoliša	
<i>Development of in-situ methods for environmental radioactivity monitoring</i>	
Andrej Vraničar, Jovana Nikolov, Goran Stanič, Ivana Tucaković, Nataša Todorović, Dušan Mrđa, Jan Hansman, Ivana Coha, Željko Grahek	314
<i>Comparison of different mathematical calculations (LabSOCS, ANGLE and EFFTRAN) for HPGe efficiency calculations</i>	
Ivana Tucaković, Željko Grahek, Delko Barišić	320
Matematička kalibracija efikasnosti nekarakteriziranih detektora korištenjem programskog paketa LabSOCS	
<i>Mathematical efficiency calibration of the non-characterized detectors by LabSOCS software</i>	
Ivana Smičiklas, Marijana Nodilo, Ivana Coha, Mihajlo Jović, Marija Šljivić-Ivanović, Ivana Tucaković, Željko Grahek	326
<i>Removal/preconcentration of Cs and Pb ions by natural clinoptilolite and synthetic Zeolite 4A</i>	
Luka Pavelić, Marija Surić Mihić, Igor Lacković, Mladen Hajdinjak, Ivica Prlić	331
Razvoj i simulacija dozimetrijske akvizicijske elektronike za scintilacijske detektore	
<i>Development and simulation of dosimetric acquisition electronics for scintillation detectors</i>	
Martina Ivković, Marijana Nodilo, Željko Grahek, Ivana Coha	336
Optimizacija detekcije radioaktivnog stroncija Čerenkovljevim brojenjem	
<i>Detection optimization of radioactive strontium by Cherenkov counting</i>	
Nataša Todorović, Jovana Nikolov, Ivana Stojković	341
<i>Analysis of ²¹⁰Pb in water by Cherenkov counting</i>	
Silva Žužul, Silvije Davila, Jasmina Rinkovec, Ivan Bešlić	346
Upotreba ED-XRF metode u odabiru filtarskog medija za uzorkovanje lebdećih čestica u zraku	
<i>Use of ED-XRF analysis in selection of filters for airborne particulate matter sampling</i>	

Silvije Davila, Ivan Bešlić	350
Usporedba elementne analize triju frakcija lebdećih čestica ED-XRF spektrometrijom <i>Comparison of element analysis of three particulate matter fractions with ED-XRF spectrometry</i>	
Ines Krajcar Bronić, Jasmina Kožar Logar, Romana Krištof, Jovana Nikolov, Nataša Todorović, Ivana Stojković, Jadranka Barešić, Andreja Sironić, Damir Borković	355
Rezultati sudjelovanja u međunarodnoj usporednoj studiji za biogenu komponentu u tekućim gorivima <i>Results of participation in the international intercomparison study for biogenic component in liquid fuels</i>	
Andreja Sironić, Ines Krajcar Bronić, Jasmina Kožar Logar, Romana Krištof	364
Interlaboratorijske usporedbe aktivnosti organski vezanog tricija (OBT) <i>Organically bound tritium (OBT) interlaboratory comparison results</i>	
Ines Krajcar Bronić, Jadranka Barešić	370
Usporedba karakteristika različitih scintilacijskih koktela i kiveta za mjerenje koncentracije aktivnosti ^3H <i>Comparison of scintillation cocktails and vials for determination of ^3H activity concentration</i>	
Neionizirajuća zračenja/ Non-ionizing radiation	
Dragan Poljak, Mario Cvetković, Anna Šušnjara, Hrvoje Dodig	379
<i>Review of deterministic-stochastic procedures in electromagnetic-thermal dosimetry of the realistic human head model exposed to non-ionizing radiation</i>	
Marin Galic, Dragan Poljak	385
<i>On the measurement and calculation of the low frequency electric and magnetic fields generated by 110 kV power line</i>	
Indeks autora	391
<i>Author index</i>	

OPĆE TEME U ZAŠTITI OD ZRAČENJA

GENERAL TOPICS IN RADIATION PROTECTION

EUROPEAN IRPA CONGRESS 2022 IN HUNGARY

Tibor Bujtás¹, János Petrányi²

¹Paks NPP, Paks, Hungary, ²GAMMA ZRt., Budapest, Hungary
bujtast@npp.hu gamma@gammatech.hu

INTRODUCTION OF THE HUNGARIAN IRPA AS

The Hungarian Associate Society (AS) of the International Radiation Protection Association (IRPA) is The Health Physics Section of the Roland Eötvös Physical Society (REPS-HPS). Its recently renewed webpage may be visited at the following address: www.elftsv.hu.

The Roland Eötvös Physical Society (REPS) was founded in 1891 by Roland Eötvös, while the Health Physics Section (HPS) of Hungary was founded much later, in March 1962.

IRPA MEMBERSHIP

Our Section was one of the founding Societies at the first IRPA Congress, which was held in Rome from 5-10 September 1966.

The first IRPA Congress held in Rome had participants from 15 societies representing 20 countries. Professor L. Bozóky, the president of the Hungarian Health Physics Section became one of the six members of the first IRPA Executive Council.

The Health Physics section founded a prize, named after László Bozóky for those who achieved paramount results in the sciences of radiation physics or environmental sciences.

INTERNATIONAL MEETINGS

The REPS-HPS has a long tradition to collaborate with IRPA, as the Second European Congress on Radiation Protection was the next, fully international meeting organized by the Section in Budapest in the period of 3–5 May 1972. The congress was dedicated to health physics problems of internal contamination. The total number of participants was 325 from 25 countries including representatives from the International Atomic Energy Agency and the International Commission on Radiological Protection.

The next event organised by the REPS-HPS was held in September 1980, as the International Workshop on Environmental Monitoring Around Nuclear Installations located at Dobogókő in a mountain resort close to Budapest. About 50 registered participants arrived from 8 countries and presented 22 papers in three days.

The following event organised by the REPS-HPS was from 22 to 27 August 1999 in Budapest, the meeting entitled „IRPA Regional Congress on Radiation Protection in Central Europe” (27 countries, 200 participants, 141 oral and poster presentations).

THE SCIENTIFIC ACTIVITY OF THE HUNGARIAN SOCIETY MEMBERS

The scientific activities of the REPS-HPS members encompass a wide range of studies: dosimetry, nuclear safety analysis, environmental impact assessment, radiation chemistry, radioactive waste management, decommissioning, low dose risk calculation, radon measurements, atmospheric dispersion calculations, estimations and prediction of public dose rates, activity dispersion calculations for surface waters, food-chain modelling, biological sample analysis, supervision of security of nuclear facilities, emergency response, Monte Carlo methods, equipment development for nuclear power applications, medical physics, radiation protection of radiotherapy, in-situ measurement, chemical decontamination techniques, radiological assessment of drinking-, mineral- and spring-water.

SUPPORTING AND SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTIONS

As wide as the spectra of its associate members' research, the diversity of supporting institutions are the: Hungarian Academy of Sciences Centre for Energy Research, National Public Health Centre, Hungarian Atomic Energy Authority, Budapest University of Technology and Economics, Institute of Nuclear Techniques, Semmelweis University, University of Pannonia, MVM Paks Nuclear Power Plant, Gamma Technical Co.

IRPA 2022

Three years ago, the idea of hosting the European IRPA Congress was born in the minds of the Hungarian Health Physics Section's Board of the REPS. A small group formed by the committee's various specialities (medical, research, industrial, governmental etc.) and the work has begun. At the 15th meeting of the European IRPA Associate Societies (AS), it turned out that two other countries would like to host the 2022 IRPA Congress (Austria and Spain in addition to Hungary).

The voting took place at the 2018 European IRPA Congress in The Hague. Austria stepped back in favour of Hungary, if it will obtain the privilege of hosting the conference. Every European IRPA AS had one vote to decide the outcome. The Hungarian team won the privilege to host next European IRPA Congress.

ACTUALITIES

The first local organizer committee (LOC) meeting took place in Budapest on 4 September 2018. At the moment, the organizing committee identified members and tasks and looks for cooperation possibilities with other national organisations. The first bilateral meeting took place in Budapest on 26 September 2018 as the ÖVS – REPS-HPS meeting. REPS-HPS is looking for cooperation with neighbouring countries to establish a strong scientific committee.



Figure 1. Budapest, 26 September 2018, ÖVS – REPS-HPS meeting

The planned date of the next European IRPA Congress is 6-10 June 2022. The LOC secured the website domain: IRPA2022.eu which will be in operation in due time. Contracting with IRPA, the Professional Congress Organiser (PCO), Akadémiai Kiadó Zrt (Congress), and the venue is in progress.

The LOC put a lot of effort in arranging possibility for publication of the congress contribution. The LOC plans to start a new journal. There is a proposal from a publisher. Publications will be free for the author and open access for the first 5 years. It can start in 2020.

PROGRAMS

The motto of the 2022 IRPA Conference is: “RADIATION PROTECTION FOR EVERYONE”. Radiation protection is an interdisciplinary field, requiring expertise from different interests and research activities. We wish to include every interested party, so we open topics for fields less commonly associated with mainstream radiation protection, such as medical, NORM, non-ionising, radiochemistry, nuclear power, industry, emergency preparedness and response and military, etc. beside nuclear and industrial uses. The exploration of the connections between these fields are the goal, while seeking their common aim: “How to protect people against detrimental effects of radiation”.

The following programs are planned:

- Plenary and parallel sessions,
- Poster section,
- Art and fun corner. A part of the poster section is waiting for any artist to exhibit his/her pieces of art inspired by radiation protection,
- Refreshing courses,
- Clever ideas in application. Competition for any idea or good practice which makes our work easier, safer.
- Relax and learn. There are topics which do not need any traditional demonstrating infrastructure like a projector or a loudspeaker, etc. This program allows the participants to enjoy the service of a thermal bath (Figure 2) and during relaxation listen into interesting stories.
- Competition for young scientists.
- Opportunity for publication of papers.
- Cultural events and further programs.

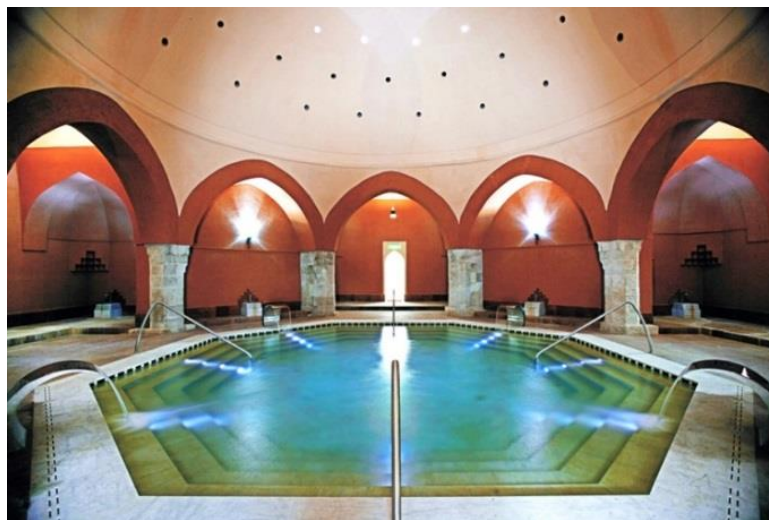


Figure 2. Planned place for “Relax and learn” program: Irgalmasok Veli Bej Turkish Spa [2]

ORGANISATION STRUCTURE

A simple organisation chart is given in Figure 3.

Roland Eötvös Physical Society has many sections. The radiation protection related section is the Roland Eötvös Physical Society-Health Physics Section (REPS-HPS). The managing board of REPS-HPS has elected and appointed the congress president from its members: János Petrányi. The local organizer committee consists of the congress president

(also acting as contact person for the REPS-HPS), the chairmen of the Scientific Programme Committee (SPC) and the Professional Conference Organiser (PCO). REPS will work together exclusively with Akadémiai Kiadó Zrt (Congress) as the PCO.

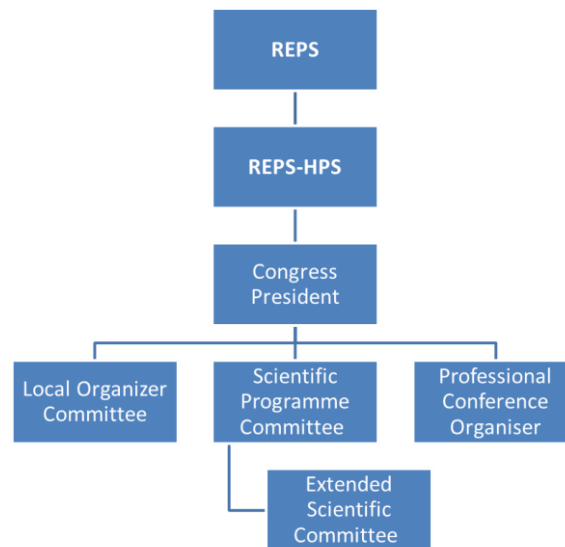


Figure 3. Organisation structure of the IRPA 2022 congress

The local organizing committee consists of:

- János Petrányi, congress president
- Tamás Pázmándi, Scientific Programme Committee
- Csilla Pesznyak, Scientific Programme Committee
- László Szűcs, Metrology
- Árpád Vincze, Regulatory topics
- Gabriella Taba, Nuclear Medicine
- Richárd Elek, Medical exposures (medical physics)
- Ádám Bodó, Industry
- Dorottya Jakab, Young Professional
- Erna Sári, Professional Conference Organizer (PCO)
- Tibor Bujtás, Reactors and power plants
- Csilla Csöme, International organisations
- Anna Pántya, Clever Ideas

Klaus Henrichs will be IRPA's EC liaison member for this Regional Congress.

WHY BUDAPEST?

We would like to invite anyone who is interested in a radiation protection congress and would like to visit a beautiful city. It is a place where tradition meets innovation. A convenient place, as almost everything is in walking distance from the centre of the city, 5 star hotels, restaurants awarded with Michelin star, historical sights, The Danube River, the famous Budapest spas. An ideal location in the heart of Europe, easily accessible from all corners of the continent. Short travel time ensures that more time is left for fun. Cost effective, i.e., cost is as low as reasonably achievable. The quality of service is excellent but the price level is lower than in most of Europe. You can have much more fun for the same amount of money.

In addition, the current national developments in Hungary mark a growth of interest in radiation protection as two new units are planned to be commissioned in Paks Nuclear Power Plant.

EVENT VENUE

Budapest Congress Centre (BCC) will be the venue of the IRPA 2022 Congress (Figure 3). Meetings and catering up to 2000 people 20 multifunctional rooms. Lots of natural daylight in the public areas. The Novotel Budapest City connects to the BCC and offers 319 recently renovated rooms.



*Figure 3. The venue of the European IRPA 2022 Congress:
The Budapest Congress Centre [3]*

TECHNICAL VISITS

The following locations are planned for technical visits:

- Research: Research Reactor (Hungarian Academy of Sciences Centre), Extreme Light Infrastructure (ELI)
- Medical: Semmelweis University Health Care Institutions,
- Regulatory: Hungarian Atomic Energy Authority, National Public Health Centre,
- Education: Training Reactor Budapest University of Technology and Economics
- Power plant: MVM Paks Nuclear Power Plant,
- Industry: Nuclear measuring instrument production Gamma Technical Co.
- Waste management: Public Limited Company for Radioactive Waste Management (PURAM), The Seibersdorf laboratories in Austria, Austrian Carbon Beam Radiotherapy Centre

GAINING EXPERIENCE

The local organisers are not limiting themselves only to European Congress IRPA2022, but have several further events on their agenda - the LOC members will participate in the preparation of smaller meetings to gain more experience:

April 17-19, 2019, in Hajduszoboszló - Local REPS-HPS AS meeting with a dedicated International section. REPS-HPS invited guests from neighbouring IRPA AS members.

May 5-10, 2019, in Budapest - JRNC-RANC 2nd International Conference on Radioanalytical and Nuclear Chemistry, <https://jrnc-ranc.akcongress.com/>

April 19-24, 2020, in Budapest - Individual Monitoring of Ionising Radiation (IM-2020) <http://www.im2020.org/>

CONCLUSION

Significant local interest. Building procedure of two new nuclear reactors at Paks has been started. The number of cancer patients in Hungary is extremely high and still increasing. A lot of new working places will be established until 2022. IRPA conference perfect opportunity for young colleagues to learn.

The organization of the European IRPA 2022 Congress is gaining momentum. The IRPA conference is a perfect opportunity for colleagues to learn, study, exchange experience. This is not only an opportunity to nurture the mind, as the exploration of the local amenities also contribute to the content. See you in Budapest!

ACKNOWLEDGMENT

The REPS-HPS would like to express its gratitude for the support and votes of the following IRPA AS members from Germany/Switzerland, Austria, Czech Republic, Slovakia, Slovenia, Belgium, Romania, The Netherlands, Croatia, Russia, Serbia-Montenegro, Poland.

REFERENCES

- [1] 5th European IRPA Congress <https://irpa2018europe.com/>
- [2] Irgalmasok Veli Bej Turkish Spa <https://www.termalfurdo.hu/furdo/irgalmasok-veli-bej-furdoje-215>
- [3] The Budapest Congress Centre <https://www.bcc.hu/>

EUROPEAN IRPA CONGRESS 2022 IN HUNGARY

Tibor Bujtás¹, János Petrányi²

¹Paks NPP, Paks, Hungary, ²GAMMA ZRt., Budapest, Hungary
bujtast@npp.hu gamma@gammatech.hu

The name of the Hungarian IRPA AS Radiation Protection Association is The Health Physics Section of the Roland Eötvös Physical Society (REPS-HPS) www.elftsv.hu. The Health Physics Section of the Roland Eötvös Physical Society, Hungary was founded in March 1962.

6-10 June 2022 REPS-HPS will organise the 6th European IRPA Congress in Budapest. This article reviews the way how REPS-HPS earned this privilege, what are the actual issues and what will the future bring.

MOŽE LI HRVATSKA NA VRIJEME PRIHVATITI POLOVICU RADIOAKTIVNOG OTPADA IZ NUKLEARNE ELEKTRANE KRŠKO?

Alemka Knapp, Ivica Levanat, Diana Šaponja-Milutinović
Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb
ivica.levanat@tvz.hr

UVOD

Još 2014. godine Sabor je usvojio Strategiju zbrinjavanja radioaktivnog otpada, istrošenih izvora i iskorištenoga nuklearnog goriva (u daljnjem tekstu: Strategija) [1], u kojoj je Hrvatska odlučila da će na svojem teritoriju zbrinuti polovicu nisko i srednje radioaktivnog otpada (NSRAO) iz Nuklearne elektrane Krško (NEK). U siječnju 2016. godine izrađen je prijedlog Nacionalnog programa provedbe Strategije, ali Vlada ga je napokon usvojila tek u studenom 2018. godine [2]. Za skladištenje NSRAO iz NEK predviđena je lokacija Čerkezovac.

Prema Međudržavnom ugovoru o NEK [3], Hrvatska bi trebala otpad iz skladišta u elektrani preuzeti od 2023. do 2025. godine. To znači da bi trebala imati izgrađeno i licencirano skladište radioaktivnog otpada (RAO) najkasnije u 2022. godini.

Ogroman je to posao koji bi trebalo odraditi u 3 godine, a nakon što u prethodnih skoro 5 godina od usvajanja Strategije nije praktično ni započeto. Treba vojni objekt na Čerkezovcu prenamijeniti, provesti karakterizaciju lokacije te provesti upravni postupak, gradnju i pokusni rad, da bi skladište na temelju dokaza radiološke sigurnosti moglo biti licencirano.

Paralelno treba ugovoriti gdje će se i kako otpad iz NEK dodatno obraditi i prepakirati, i to tako da ispuni uvjete prihvaćanja u buduće odlagalište, o kojemu se vrlo malo zna (točna lokacija još nije određena, pa su i pretpostavke o tipu građevine nepouzdana).

Napokon, treba naći rješenje i za problem da se lokalna zajednica već godinama protivi prihvaćanju radioaktivnog otpada

NUŽNI KORACI PREMA USPOSTAVI SKLADIŠTA RAO

Prvi korak prema uspostavi skladišta za NSRAO iz NEK na lokaciji Čerkezovac je iseljavanje vojske te prijenos vlasništva vojnog objekta i rješavanje drugih imovinsko-pravnih odnosa u okolici, kako bi se uopće mogao planirati unos lokacije u prostorno-plansku dokumentaciju. Taj korak zahtijeva sudjelovanje Ministarstva obrane, Ministarstva zaštite okoliša i energetike te Ministarstva državne imovine, i treba omogućiti da daljnje vođenje projekta skladišta preuzme hrvatski Fond za financiranje razgradnje i zbrinjavanja radioaktivnog otpada i istrošenoga nuklearnog goriva Nuklearne elektrane Krško (u daljnjem tekstu: Fond). Planirano skladište je dio planiranog Centra za zbrinjavanje RAO, a Fond je operativna organizacija u čijem sastavu će biti planirani Centar.

Taj prvi korak mogao bi potrajati barem pola godine, a mogao je već odavno biti dovršen da se ozbiljno postupalo prema odredbama Strategije.

Dalje slijedi izrada arhitektonskih i geodetskih elaborata, koji bi nakon snimke postojećeg stanja trebali završiti geodetskim projektom za potrebe izgradnje novih građevina. Potrebno je barem nekoliko mjeseci, ali moglo bi se početi za vrijeme provedbe prethodnog koraka.

Tek tada počinju ozbiljni pripremni radovi usmjereni na uspostavu konkretnog objekta za skladištenje RAO, koji još ne obuhvaćaju projektiranje i gradnju skladišta. Čak i u slučaju savršene organizacije i koordiniranja, takvi radovi traju bar jednu do dvije godine.

Radi prikupljanja ulaznih podataka u svrhu projektiranja skladišta, za izradu procjena sigurnosti, te izradu studije o utjecaju na okoliš, potrebni istražni radovi i mjerenja uključuju:

- geološka istraživanja (geomorfologiju, geotehnička istraživanja, strukturu i dinamiku; hidrogeologiju; tektoniku i seizmotektoniku; seizmologiju)
- geofizička istraživanja (litostratigrafiju, hidrologiju i tektoniku)
- koriste se istražna bušenja i odgovarajuće analize (potrebno je više plitkih bušotina, nekoliko desetaka metara, i bar jedna duboka, oko 200 metara; provode se barem petrološke, geomehaničke i geokemijske analize)
- inicijalna radiološka mjerenja obuhvaćaju detaljnu snimku zatečenog stanja (tzv. nulto stanje) na lokaciji Čerkezovac, te doza u okolnom području
- istraživanja šireg područja, koja moraju obuhvatiti brojne stavke koje zahtijevaju različiti propisi (npr. hidrografsku i hidrološku analizu, pedološku i agroekološku analizu, analizu rudno-mineralnih ležišta, analizu klimatsko-meteoroloških obilježja, demografsku i socioekonomsku analizu, analizu načina korištenja zemljišta, područja zaštićene prirodne i kulturne baštine, analizu prometa, pa čak i radiološka mjerenja, analizu kvalitete vode i stanja zdravlja na širem području oko rijeke Une)

Nakon provedbe navedenih i drugih istraživanja i analiza, te njihova prikaza u odgovarajućim dokumentima, slijede aktivnosti prema ministarstvima i drugim tijelima državne uprave potrebne za uvrštenje Centra za zbrinjavanje RAO u Državni plan prostornog razvoja. U slučaju iznimno racionalnog planiranja, moguće je te aktivnosti vremenski bar djelomično preklopiti s prethodnom i narednom fazom uspostave skladišta RAO, pa možda nije nužno planirati dodatni višemjesečni period za njihovo provođenje, jer bi to plan o licenciranju skladišta prije 2023. godine učinilo posve neostvarivim.

Ipak, treba još imati na umu i da je Hrvatska obvezna o namjeri uspostave Centra za zbrinjavanje RAO obavijestiti Europsku komisiju, koja će na temelju priložene tehničke dokumentacije, u proceduri na koju ne možemo utjecati ali je moramo poštovati, donijeti zaključak koji se odnosi na procjenu mogućnosti prekograničnog radiološkog onečišćenja (o čemu smo već imali prigovore od strane Bosne i Hercegovine).

Prethodna se procedura možda može vremenski uklopiti u završnu fazu uspostave skladišta RAO, koja se sastoji od upravnog postupka i gradnje skladišta. U slučaju savršene organizacije i prethodnog planiranja, ta faza traje bar jednu do dvije godine.

Prvom koraku upravnog postupka, ishodu lokacijske dozvole, moći će se pristupiti kad bude riješen problem protivljenja lokalne zajednice, a stručne podloge za uvrštenje Centra za zbrinjavanje RAO u Državni plan prostornog razvoja budu prihvaćene od strane Ministarstva graditeljstva i prostornog uređenja.

Za lokacijsku dozvolu potrebno je, između ostaloga, izraditi idejno rješenje, izraditi prethodne sigurnosne studije i izvješća sigurnosne studije, izraditi idejni projekt, te studiju utjecaja na okoliš odnosno provesti procjenu utjecaja na okoliš.

Za ishodu građevinske dozvole, te gradnju skladišta, a potom dobivanje dozvole za pogon (licenciranje skladišta) potrebna dokumentacija obuhvaća: glavni projekt, izvedbeni projekt, izradu sigurnosne studije i izvješća sigurnosne studije, dozvolu za pokusni rad i uporabnu dozvolu.

Malo je vjerojatno da bi se sve navedene aktivnosti mogle dovršiti prije 2023. godine. Bila bi potrebna odlučnost, precizno planiranje, predan i usklađen rad svih sudionika u procesu, i još puno sreće.

Usto, paralelno bi trebalo (a to vremenski nije nemoguće) postići dogovor sa Slovenijom o takvom rješenju, uključujući sve detalje podjele i preuzimanja otpada. Također, trebalo bi ugovoriti gdje će se i kako otpad iz NEK dodatno obraditi i prepakirati, te prevesti u skladište.

RAO U NEK JOŠ UVIJEK JE ZAJEDNIČKI OTPAD

Bez obzira na svoju Strategiju i Nacionalni program, Hrvatska zasad nema pravo po svojoj volji raspolagati s radioaktivnom otpadom iz NEK, iako ima obavezu simetrično sudjelovati u njegovu zbrinjavanju i to zbrinjavanje sufinancirati.

Međudržavni ugovor o NEK predviđa da bi Slovenija i Hrvatska trebale naći zajedničko rješenje za odlaganje RAO, a tek ako ne postignu dogovor do 2023. godine, obvezuju se da će 2025. godine završiti s preuzimanjem i odvoženjem RAO s lokacije NEK (svaka pola).

Za dogovaranje o provedbi Međudržavnog ugovora u ovome području predviđena je izrada zajedničkog Programa odlaganja RAO, koju nadgleda Međudržavno povjerenstvo (MDP) u kojemu obje države imaju simetrična izaslanstva. Do sada je usvojena samo prva revizija Programa iz 2004. godine, koja je praktično bila namijenjena samo potrebama financiranja. Druga revizija je 2010. godine puno detaljnije obradila tehničke aspekte i opcije zbrinjavanja RAO, ali nije bilo obostrane političke volje za njezinim prihvaćanjem. Umjesto toga, na 10. sjednici MDP 2015. godine pokrenuta je izrada treće revizije Programa (nakon što je odobreno produljenje radnog vijeka NEK, te postignut dogovor o dugoročnom skladištenju istrošenog goriva na lokaciji elektrane, zbog čega se ono u ovome tekstu ne spominje).

Ako se dvije države u zadanom roku i ne dogovore o zajedničkom rješenju za odlaganje RAO iz NEK, daljnje postupanje s tim otpadom mora svejedno biti dogovoreno u zajedničkom Programu. Prije toga nijedna država ne može samostalno raspolagati sa „svojom“ polovicom.

Ne samo da se prije dogovora ne zna točno što je čija polovica, nego regulatorna tijela dviju država ne mogu izdati odgovarajuća odobrenja sukladno nacionalnim zakonima i propisima te obvezujućim međunarodnim dokumentima.

Kako smo upozoravali na prošlom simpoziju, kod preuzimanja RAO u Hrvatsku radi se o prekograničnom prijevozu RAO koji regulira zakonski obvezujuća Zajednička konvencija [4]. Ni slovensko ni hrvatsko regulatorno tijelo ne smiju odobriti prijevoz ako nisu uvjereni da zemlja odredišta ima administrativna i tehnička sredstva, kao i upravnu strukturu, potrebnu za zbrinjavanje toga RAO.

Usto, za Hrvatsku je trenutno dodatna nepovoljna okolnost da su reorganizacijom uprave, barem za sada, otvorene nejasnoće u vezi funkcioniranja regulatornog tijela (Slika 1).

Republika Hrvatska
Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost

Pretraži web...

NUKLEARNA SIGURNOST RADIOLOŠKA SIGURNOST IAEA PROJEKTI PROPISI I DRUGI DOKUMENTI OKOLIŠ

Ustrojstvo

OBAVIJEST

Od 01. siječnja 2019., **presta**o je s radom **Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS)**, a poslove, opremu, pismohranu i drugu dokumentaciju, sredstva za rad, financijska sredstva, prava i obveze Državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost **preuzelo je Ministarstvo unutarnjih poslova (MUP)** temeljem članka 26. i članka 27. Zakona o izmjenama i dopunama Zakona o ustrojstvu i djelokrugu ministarstava i drugih središnjih tijela državne uprave (NN 116/2018).

Od 8. veljače 2019. godine smo na novoj adresi:

Ministarstvo unutarnjih poslova
dr.sc. Damir Trut, pomoćnik ministra
Nehajska 5, Zagreb

Slika 1. Snimka web stranice (8. 3. 2019.) ostavlja dvojbe o hrvatskom regulatornom tijelu

ISHOD DOGOVARANJA SA SLOVENIJOM JOŠ UVIJEK JE NEIZVJESTAN

Dogovaranje je zapravo počelo tek 2017. godine, na 11. sjednici MDP-a, kad je hrvatska strana odgovorila slovenskoj da ne prihvaća raniju ponudu o sudjelovanju u projektu Vrbina.

Tu ponudu je Slovenija dala na prethodnoj sjednici MDP-a, pri čemu „sudjelovanje“ u projektu slovenskog odlagališta nije bilo osobito precizno definirano, osim poziva da se NSRAO iz NEK ne dijeli nego sav odlaže na Vrbini.

Nasuprot tome, hrvatski je odgovor bio pažljivo formuliran i nijansiran: za hrvatsku stranu nije prihvatljiva ponuda za uključivanje u projekt kako je definiran u slovenskom Investicijskom programu za odlagalište Vrbina revizija C.

Prema javno dostupnim informacijama, nije te 2017. godine bilo jasno o čemu se radi (a nije čak ni danas, ako se ograničimo na informacije iz službenih izvora), osim da hrvatska strana ne isključuje svaku opciju uključivanja u projekt Vrbina.

No, autori ovoga teksta i ranije su na stručnim skupovima analizirali za Hrvatsku potencijalno nepovoljne aspekte sudjelovanja u slovenskom projektu odlagališta Vrbina:

- a) Projekt predviđa odlaganje NSRAO iz NEK (ukupnoga ili samo slovenskog dijela), te slovenskog institucionalnog RAO. No, i Hrvatska mora planirati zbrinjavanje svojeg institucionalnog RAO (puno manji volumen od polovice NSRAO iz NEK, ali usporediva ili veća radioaktivnost). Ako slovenskoj strani prepusti (i plati) odlaganje samo NSRAO iz NEK, Hrvatska rješava tek dio svog problema zbrinjavanja RAO.
- b) Projekt Vrbina je tako skup, da bi Hrvatska za polovicu cijene (koliki bi bio njezin udio) mogla na svom teritoriju zbrinuti i polovicu NSRAO iz NEK i svoj RAO. Pritom bi odlučujuća prednost bila da taj novac ostaje u Hrvatskoj, jer to rade domaće tvrtke i naknade prima lokalna zajednica.

Stoga su autori na prošloj konferenciji Hrvatskog nuklearnog društva [5] naveli i opciju (suprotnu Strategiji) da se sav NSRAO iz NEK može odlagati na Vrbini, ali pod uvjetom da se tamo odlaže i hrvatski institucionalni RAO. Do tada ta opcija nije javno razmatrana, no čini se da pregovori koji se sada vode pod okriljem MDP-a idu u tom smjeru.

Još na prošloj sjednici MDP je osnovalo Koordinacijski odbor (KO) zadužen da pripremi mogući zajednički prijedlog za odlaganje NSRAO, a na 12. sjednici u siječnju ove godine pozvalo KO da dodatno optimizira troškove odlaganja i u rujnu izvijesti je li pronađeno moguće zajedničko rješenje.

Hrvatska javnost nije službeno upoznata niti sa sastavom KO niti s polazištima za zajedničko rješenje koja je KO do sada formulirao. No, prema pisanju slovenskog tiska, upoznata je Općina Krško (u kojoj se planira odlagalište Vrbina), te je Općinski savjet 4. ožujka izrazio protivljenje prijedlogu da se sav hrvatski RAO odlaže na Vrbini (tzv. 2. polazište) kao i da Hrvatska ravnopravno sudjeluje u gradnji i pogonu odlagališta (tzv. 4. polazište).

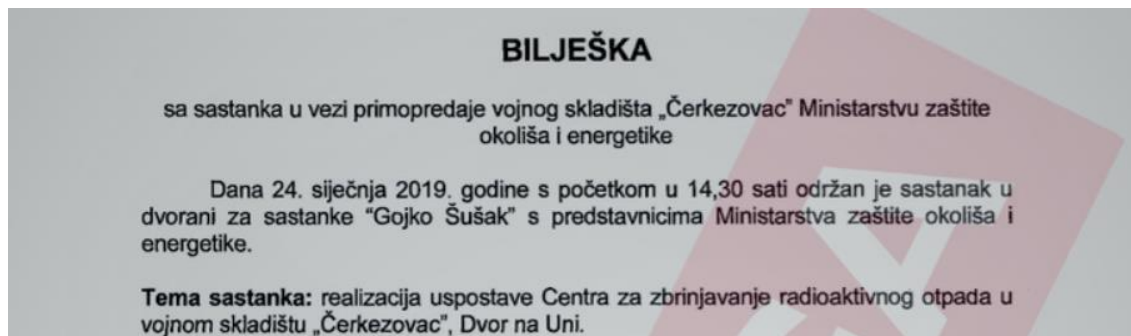
ČEMU SLUŽE HRVATSKA STRATEGIJA I NACIONALNI PROGRAM

Postupanje prema hrvatskoj Strategiji i Nacionalnom programu može se u ovome periodu smatrati alternativnim rješenjem za slučaj da se ne postigne dogovor o Vrbini. To se naslućuje iz šturih službenih priopćenja s 12. sjednice MDP-a (te iz odgovora nadležnih ministara novinarima, ako je za vjerovati medijima).

No, treba imati na umu da vjerojatno ne bi bilo slovenske ponude za uključivanje u projekt Vrbina na 10. sjednici MDP-a, niti spremnosti na ustupke na kasnijim sjednicama, da Strategija i Nacionalni program nisu pokazali namjeru Hrvatske da samostalno riješi svoju obvezu prema NSRAO iz NEK. Slovenci bi mogli odgađati razgovor o tome (kao što nisu htjeli usvojiti 2. reviziju zajedničkog Programa) sve do trenutka kad Hrvatska više ne bi imala drugog izbora osim Vrbine (zbog ugovorene odredbe o preuzimanju 2023. do 2025. godine).

Međutim, u posljednjih par godina Hrvatska nije bila osobito uvjerljiva u deklariranoj namjeri, jer je nepotrebno otezala s usvajanjem Nacionalnog programa. Ali još uvijek nije kasno da se ubrzaju pripreme za uspostavu hrvatskog skladišta RAO na Čerkezovcu, jer ni projekt Vrbina nije puno bliže dovršenju.

U tom smislu ohrabruje da su u međuvremenu konačno poduzeti ozbiljni koraci da se vojni objekt Čerkezovac prenamijeni u lokaciju za planirano skladište RAO. Jedino što pomalo iznenađuje je tajnovitost procesa, suprotna općim načelima transparentnosti u postupcima zbrinjavanja RAO. „Tajnu“ su ipak razotkrili novinari RTL-a, koji su nekako pribavili povjerljivu bilješku sa sastanka na Čerkezovcu (Slika 2).



Slika 2. Snimka s web stranice VIJESTI.hr/POTRAGA od 1. 3. 2019. godine

ZAKLJUČAK

Postoje značajni izgledi da će Hrvatska i Slovenija dogovoriti zajedničko odlaganje NSRAO iz NEK na Vrbini, pod uvjetima koji su povoljni i za Hrvatsku: odlaganje ukupnog hrvatskog RAO i ravnopravno sudjelovanje Hrvatske u gradnji i pogonu odlagališta. Dobitak za Sloveniju je da ne bi morala sama financirati vrlo skupi projekt.

Ako se takav dogovor postigne, neće biti potrebno da se NSRAO dijeli i hitno odvozi iz NEK, što može značajno racionalizirati daljnje postupanje.

U međuvremenu, Hrvatska mora uvjerljivo i ubrzano provoditi pripreme za preuzimanje svog dijela NSRAO iz NEK, kao alternativno rješenje. Preuzimanje toga NSRAO do kraja 2025. godine vjerojatno neće biti izvedivo, ali Hrvatska sada treba poduzimati sve radnje da to pokuša ostvariti.

U konačnici, ako se ne postigne dogovor o zajedničkom odlaganju na Vrbini, može se očekivati pomicanje rokova u Međudržavnom ugovoru o NEK, jer nije nimalo vjerojatno ni da bi slovensko odlagalište bilo spremno za prihvrat polovice NRAO iz NEK do kraja 2025. godine.

LITERATURA

- [1] Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva, NN 125/14.
- [2] Odluka Vlade o donošenju Nacionalnog programa provedbe Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva, NN 100/18.
- [3] Ugovor između Vlade Republike Hrvatske i Republike Slovenije o uređenju statusnih i drugih pravnih odnosa vezanih uz ulaganje, iskorištavanje i razgradnju NEK, NN MU 9/02.
- [4] Zajednička konvencija o sigurnosti zbrinjavanja istrošenog goriva i sigurnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada, NN MU 3/99.
- [5] Knapp A, Levanat I, Šaponja-Milutinović D. Issues in Croatian Plans for Radioactive Waste Management. Proceedings of the 12th International Conference of the Croatian Nuclear Society, RWM&D-126, Zadar (2018).

CAN CROATIA ACCEPT HALF OF THE RADIOACTIVE WASTE FROM THE KRŠKO NUCLEAR POWER PLANT ON TIME?

Alemka Knapp, Ivica Levanat, Diana Šaponja-Milutinović
Zagreb University of Applied Sciences, Zagreb, Croatia
ivica.levanat@tvz.hr

In 2014 Croatian Parliament adopted the National Strategy declaring that Croatia would take its share of radioactive waste (RW) from the Nuclear power plant (NPP) Krško and manage it in Croatia.

In January 2016 draft of the National RW Management Program was completed, but it was approved by the Government only at the end of 2018.

According to the bilateral Slovenian-Croatian Agreement on the NPP, the accumulated RW should be removed from the NPP, one half by each side, between 2023 and 2025, if no joint solution for disposal is agreed upon before that. This means that Croatia should build and license a RW storage by 2022 at the latest.

It is a tremendous undertaking that should be completed within about 3 years, whereas practically nothing has been done in the 5 years following the Strategy adoption. The odds that the storage can be established on time are extremely low, if any.

However, this Croatian declaration of intent has finally spurred the Slovenian side to formally propose (4 years ago) disposal of the Croatian share of the NPP waste into the Vrbina facility planned in Slovenia.

Croatia tentatively declined the offer 2 years ago, because in the form presented it would not resolve all Croatian needs for RW management and it would be effectively more expensive than its own solution.

Presently, negotiations are under way, in which Slovenia and Croatia may agree that Vrbina repository will be the joint solution, under favorable conditions for Croatia: Croatian institutional RW will also be accepted, and both countries will equally participate in construction works and operation of the facility. Slovenian gain would be joint financing of the very expensive project.

In the case agreement is reached, there will be no need for division of the NPP waste, and no need for urgent removal from the NPP, which may result in significant rationalization of necessary activities and costs.

But it is still of paramount importance that Croatia, at least for some time, intensifies all activities aimed at establishment of its planned RW storage on time. Presently it may seem to be only an alternative solution, yet it could become the only solution for Croatia.

Besides, if the joint disposal is not agreed, the 2025 deadline from the Agreement on the NPP will probably be relaxed, not only for Croatia but also because the Vrbina facility is very unlikely to be ready on time.

THE IMPACT OF THE REVISED EYE LENS DOSE LIMITS – REPORT OF IRPA TASK GROUP PHASE 2

Saveta Miljanić
Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
saveta@irb.hr

INTRODUCTION

The International Commission on Radiological Protection (ICRP), after reviewing epidemiological evidence on tissue reactions, in its statement on tissue reactions, April 2011, and ICRP (2012) [1] suggested a reduced nominal threshold of 0.5 Gy in absorbed dose for effects in the eye lens. At the same time the Commission recommended a reduction in the eye lens dose limit for occupational exposure in planned exposure situations from 150 mSv yr⁻¹ to 20 mSv yr⁻¹, averaged over defined periods of 5 years, with no single year exceeding 50 mSv.

This recommendation has been incorporated into the new International Basic Safety Standards IAEA [2] and in the current Euratom Basic Safety Standards [3].

Limits of the equivalent dose to the lens of the eye in the 2014 edition of the International Basic Safety Standards (BSS) and previous 1996 edition of the BSS [4] are shown in Table 1.

Table 1. Limits of the equivalent dose to the lens of the eye in the 2014 BSS [3] and previous 1996 edition of the BSS [4]

Occupational exposure of workers		Occupational exposure of apprentices and students	
>18 years		16 – 18 years	
2014 edition	1996 edition	2014 edition	1996 edition
20 mSv per year		20 mSv per year	
Averaged 5 consecutive years and 500 mSv in a single year	150 mSv per year	50 mSv per year	50 mSv per year

Note: Public exposure the same for both editions (15 mSv per year)

The European Member States are required to implement the new BSS by February 2018 and accordingly, for monitoring and surveillance, workers with lens exposure likely to exceed 15 mSv yr⁻¹ will be classified as category A workers.

Following this, in 2012 the International Radiation Protection Association (IRPA) initiated a process to survey the views of the Associate Societies (ASs) worldwide for discussion on the implementation of the new limits for the lens of the eye in occupational exposure. IRPA Task Group (TG) was established to identify key issues in the implementation. The TG reported its conclusions in 2013 [5].

In January 2015 IRPA established a TG Phase 2 to review progress with the implementation of the recommendation from the previous report and to collate current practitioner experience. The TG developed a questionnaire based on 22 questions within the four topics:

(1) Implications for dosimetry

Q1-Q8: implications for monitoring and assessing dose to the lens of the eye and the interpretation of the results.

(2) Implications for methods of protection

Q9-Q12: implication for methods (e.g. procedures or design of equipment, facilities and protective equipment) used to reduce dose to the eye.

(3) Wider implications of implementing the revised limit

Q13-Q18: long term impact on working activities; changes in health surveillance; more claims for compensation

(4) Legislative and other general aspects

Q19-Q22: guidelines addressing monitoring related to new limit; consultation for legislation; wider issue of tissue reactions, also circulatory disease

Questionnaire was sent to all IRPA associate societies (ASs) in April 2015. A total of twenty-two IRPA ASs, covering 40 countries from Africa, North and South America, Asia, Australia and Europe, actively contributed by collecting, with their own internal procedures, views and comments from their professionals, on the impacts related to the implementation of the new limit for the lens of the eye, and by filling in the questionnaire. The TG Phase 2 has received the completed questionnaire from the associations of: Argentina, Australia and New Zealand, Austria, Belgium, Canada, Croatia, Eastern Africa, France, German-Swiss, Hungary, Israel, Italy, Japan, Korea, Netherlands, Nordic societies, Romania, Russia, Southern Africa, Spain, United Kingdom, USA.

CONCLUSIONS FROM THE IRPA SURVEY

Direct implications in dosimetry and protection

ASs gave the most attention to the medical area, **non uniform exposure (interventional radiology and cardiology)**

- A dosimeter measuring $H_p(3)$ close to the eye is considered the best method and used in pilot studies;
- Because of limited availability of $H_p(3)$ dosimeters $H_p(0.07)$ and $H_p(10)$ are predominantly used;
- **When a dosimeter close to the eye is used:** It should be on a **head band**; suggested positions: **the side of the head, the eyebrow ridge, on the forehead, or attached into the protective glasses**;
- **Half of ASs** reported the use of a dosimeter **worn at the collar** outside the lead apron as **an indication** of eye dose but **no correction factor is applied**;
- **Protective systems** are not always available in hospitals.

In nuclear installations, shielding masks, glove boxes and remote systems **were in use before the introduction** of the new limit, and **no major changes are expected**;

For all areas of use, discomfort associated with using **lead glasses** was emphasized:

- They are heavy, and
- Not being suitably fitted for individuals.

Legislative processes regarding the new limits

The majority of countries initiated the legislative processes **of considering the new limits**. Many ASs are directly involved **in the consultation process regarding the national legislation on RP**;

- **A reduction of lens dose in two stages** is one example towards a new regulation: 50 mSv yr⁻¹ for 5 yr followed by consideration of a further reduction;
- **In EU Member States the processes are well advanced**, since EURATOM 2013/59 has to be implemented by Feb 2018;
- **National guidelines are planned** or in the completion phase in the large majority of the countries.

Consideration on tissue effects other than eye lens effect

The IRPA ASs are informed about the **wider issue of tissue reaction, such as circulatory diseases** and the related nominal threshold dose (0.5 Gy). **The large majority have not yet** taken into consideration this issue.

Costs

It is commonly understood that application of the new limit **will generate additional costs**:

- Any additional protection measure
- Extra dosimeters, time for evaluation ...
- In EU countries possible reclassification of workers (B to A)
- Training

Scientific and regulatory aspects

A number of ASs have concern about:

- The **availability** of suitable dosimeters;
- The lack of **established calibration facilities for $H_p(3)$** ;
- The associated arrangements for regulatory approval.

Issues which need still to be addressed:

- **Harmonization** of the approach to monitoring lens of the eye dose;
- **Agreement on the optimum location of dosimeters**, i.e. the use of head dosimeters;
- Consensus about **suitable methods for evaluating the protection by lead glasses**.

The results of the survey were published in 2017 [6].

TG phase was also working towards the development of practical recommendations about when and how eye lens dose should be monitored and of guidance on use of protective tools depending on the exposure levels which was approved by IRPA EC on 31 January 2017 [7]. In IRPA guidance recommendations for dose monitoring based on potential doses are given in Table 2 and in Table 3 the protection recommendations depending on the annual doses are summarized (both tables are prepared according to ref. [8])

Table 2. Proposed dose levels for eye lens for implementation of dose monitoring [8]

Dosimeter position	Dose quantity*	Annual dose (mSv)	Dose monitoring recommendations
Collar or headband	$H_p(3)$	1 – 6	Initial monitoring with collar or head dosimeter to establish dose levels. Regular monitoring recommended.
Collar or headband	$H_p(3)$	>6 (15)**	Regular monitoring with collar or head dosimeter is required.

* in photon fields, characteristics of fluoroscopically guided procedures $H_p(0.07)$ or $H_p(10)$ may also be used

** dose constraint in brackets

Table 3. Proposed dose levels for eye lens for guidance on use of protection for the eyes [8]

Annual unprotected dose (mSv)	Protection recommendations
3 – 6	Ceiling suspended screens where available . Protective eyewear may be considered .
> 6	Protection essential . Both ceiling suspended shield and eyewear, at least one form used. Training for suspended screens when they are used.

Acknowledgement

The paper was prepared in order of dissemination the results of IRPA Task Group Phase 2 published in 2017 [6].

REFERENCES

- [1] International Commission on Radiological Protection (ICRP) 2012 ICRP statement on tissue reactions/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.
- [2] International Atomic Energy Agency (IAEA). Radiation and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements No. GSR Part 3. Vienna: IAEA; 2014.
- [3] Euratom 2013/59 2014 European Council Directive laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation and repealing Directives 89/618/ Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom Official Journal of the European Communities. Euratom; 2014.
- [4] International Atomic Energy Agency (IAEA). International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. Vienna: IAEA; 1996.
- [5] Broughton J, Cantone MC, Ginjaume M, Shah B. Report of task group on the implications of the implementation of the ICRP recommendations for a revised dose limit to the lens of the eye. J Radiol Prot 2013; 33: 855-868.
- [6] Cantone MC, Ginjaume M, Miljanić S, Martin CJ, Akahane K, Mpete L, Michelin SC, Flannery CM, Dauer LT, Balter S. Report of IRPA task group on impact of the eye dose limits. J Radiol Prot 2017; 37: 527-550.
- [7] Cantone MC, Ginjaume M, Miljanić S, Martin CJ, Akahane K, Mpete L, Michelin SC, Flannery CM, Dauer LT, Balter S. IRPA Guidance on Implementation of Eye Dose Monitoring and Eye Protection of Workers. International Radiation Protection Association (IRPA) 2017.
- [8] Martin CJ, Magee JS. Assessment of eye and body dose for interventional radiologists, cardiologists and other interventional staff. J Radiol Prot 2013; 33: 445-460.

THE IMPACT OF THE REVISED EYE LENS DOSE LIMITS – REPORT OF IRPA TASK GROUP PHASE 2

Saveta Miljanić

Ruđer Bošković Institute, 10000 Zagreb, Croatia

saveta@irb.hr

In April 2011 statement on tissue reaction and in Publication 118 of the International Commission on Radiological Protection (ICRP), a reduction in the equivalent eye dose limit in occupational exposure was recommended. Following this, in 2012 the International Radiation Protection Association (IRPA) initiated a process to survey the views of the Associate Societies (ASs) worldwide for discussion on the implementation of the new limits for the lens of the eye in occupational exposure. IRPA Task Group (TG) was established to identify key issues in the implementation. The TG reported its conclusions in 2013.

In January 2015 IRPA established a TG Phase 2 to review progress with the implementation of the recommendation from the previous report and to collate current practitioner experience. The TG defined and promoted a survey with reference to: i) the best applied methods for monitoring dose to the lens; ii) the updated and optimized methods used to reduce dose to the eye; iii) the ongoing path towards implementation in the different countries at a legislative level. At the same time, this TG provides an opportunity to obtain the views of professionals of the IRPA ASs concerning and related to the wider generic issue of tissue reactions. The results of the survey on the view of the professionals of the IRPA ASs on the new limit to the lens of the eye and on the wider issue of tissue reactions are presented in the IRPA document 'Report of Task Group on the impact of the Eye Lens Dose Limits'. TG was also working towards the development of practical recommendations about when and how eye lens dose should be monitored and of guidance on use of protective tools depending on the exposure levels.

PČELE I ZRAČENJE

Zdenko Franić

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb

zdenko.franic@imi.hr

UVOD

Pčelarstvo je u Republici Hrvatskoj tradicionalna poljoprivredna grana koja ima veliki gospodarski značaj. Pčelinji proizvodi (med, pelud, vosak, propolis, matična mliječ itd.) imaju široku primjenu u prehrani, apiterapiji, kozmetičkoj industriji itd. Međutim, osim proizvodnje pčelarskih proizvoda, pčelarstvo je ključno za proizvodnju poljoprivrednih kultura i osiguravanje bioraznolikosti putem oprašivanja. Procjenjuje se da je ekonomska vrijednost oprašivanja koje vrše pčele nekoliko desetaka puta veća od pčelinjih proizvoda. Upravo zbog usluga oprašivanja koje pružaju, smatra se da su medonosne pčele jedna od najvažnijih životinjskih vrsta. Svijet bez pčela znači svijet bez voća, povrća, žitarica, sjemena i orašastih plodova. Posljednjih godina došlo je do alarmantnog smanjivanja pčelinjih populacija širom svijeta, a kao jedan od razloga tog izumiranja često se navodi i zračenje, elektromagnetsko i ionizirajuće.

U radu su prezentirani određeni urbani mitovi i miskonceptije vezani uz pčele i zračenje te radioekološka i ostala istraživanja, s posebnim naglaskom na Republiku Hrvatsku.

MATERIJALI I METODE

Materijali za ovaj prikaz pronađeni su na Internetu, u arhivama Grupe „Ekološko pčelarstvo Klinac“ te u pčelarskoj biblioteci Obiteljskog poljoprivrednog gospodarstvu OPG „Franić Davorka“.

REZULTATI

Urbane legende i bizarne priče nekad su se širile usmenom predajom, a u današnje je vrijeme njihov glavni izvor Internet. Prikazat ćemo ovdje nekoliko tema koje povezuju fenomen alarmantnog nestajanja pčela sa zračenjem. U tom kontekstu, nuklearna nesreća u Černobilu zauzima gotovo centralno mjesto, a odmah potom nesreća u japanskoj nuklearnoj elektrani Fukushima Daiichi.

Nuklearna nesreća u Černobilu

Nakon nuklearne nesreće u Černobilu na dan 1986-04-26, se u stručnoj i znanstvenoj literaturi gotovo odmah počelo raspravljati o opsegu radioaktivne kontaminacije meda i pčelarskih proizvoda te posljedicama na zdravlje pčela. Tako je u stručnom časopisu *Pčela*, glasilu Hrvatskog pčelarskog saveza i Saveza pčelara Bosne i Hercegovine, već u lipanjskom broju, dakle dva mjeseca poslije nesretnog događaja, objavljen članak *Pitaju pčelari – Što nakon Černobila?* [1]. U tom se članku autor Zoran Bukša osvrće na reakcije pčelara koji se pitaju: što je s pčelinjim proizvodima, kako je povišena radijacija utjecala na pčele, što će biti s medom, a što s ostalim pčelinjim proizvodima i kolika je opasnost od radioaktivne kontaminacije. Bukša ističe kako su pčelari, kao i većina pučanstva zbunjeni stručnim riječima i izrazima kao što su mikrorendgeni, bekereli, radionuklidi, miliremi... reagirali onako kako ljudi obično reagiraju u takvim situacijama, dakle ekstremno; od potpunog ignoriranja opasnosti pa do pretjerane zaplašenosti. Autor u članku ne nudi nikakve odgovore jer je bilo proteklo prekratko vrijeme od nuklearne nesreće (i posljedične pojave radioaktivne kontaminacije) do uzorkovanja, analiza i procjene rizika. Međutim već u slijedećem broju *Pčele*, isti autor [2] u članku *Radijacija i pčelarstvo* iznosi nešto potpunije informacije, iako

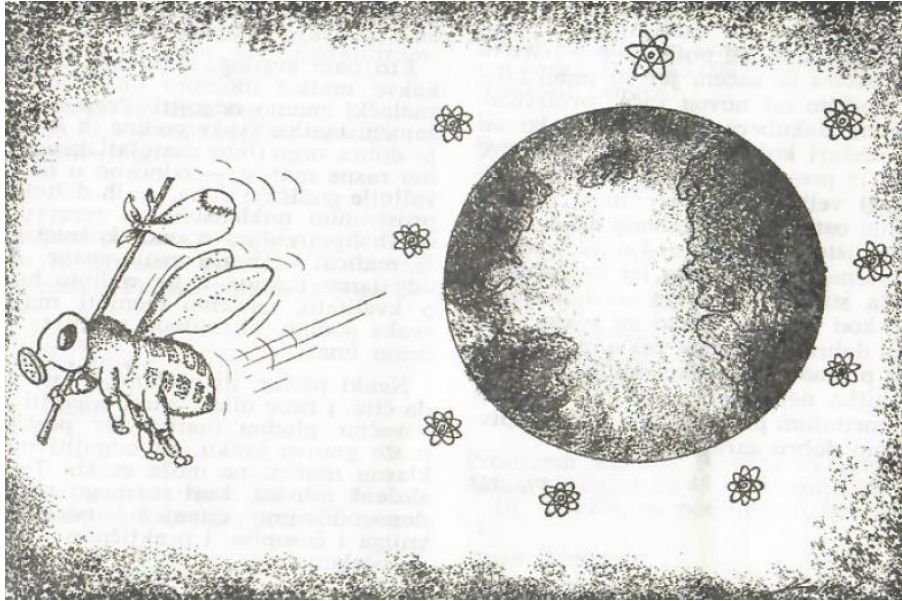
još uvijek bez konkretnih podataka o koncentracijama aktivnosti pojedinih radionuklida u pčelinjim proizvodima. Autor je predvidio, s obzirom da se radioaktivni jod već raspao i nestao iz okoliša, dugoročniju kontaminaciju hrane radionuklidima ^{137}C , ^{134}Cs , ali i $^{89,90}\text{Sr}$, što se u pogledu $^{89,90}\text{Sr}$ pokazalo netočno. Autor, ispravno, ali prilično oprezno, ukazuje na činjenicu da su razvijene zemlje Europske ekonomske zajednice (EEZ) iskoristile černobilsku nesreću da nametnu protekcionističke mjere na uvoz hrane iz ostalih zemalja, iako nisu imale usklađene i [znanstveno opravdane] kriterije. Međutim, u članku se prilično hlabro iznosi mišljenje da će stalna i dugotrajna prisutnost dugovječnih radionuklida u prirodnoj okolini pčela neminovno prouzročiti vjerojatne genetske mutacije pčela, naročito na područjima koja su jače zagađena.

Autor na kraju članka napominje da će o rezultatima [radioloških] analiza pčelari biti i dalje obavještavani jer će se oni redovito objavljivati u časopisu *Pčela*. I zaista, u istom godištu *Pčele*, u listopadu, zagrebački pčelar i član izdavačkog savjeta časopisa *Pčela* osvrnuo se na strahovanja za pčele nakon katastrofe s eksplozijom reaktora nuklearne centrale „Lenjin“ u Černobilu kraj Kijeva, koja je rezultirala disperzijom radionuklida u svjetskim razmjerima [3]. Loc napominje da je još 5 godina prije černobilske nesreće na temelju naučno-istraživačke literature i u praksi, a osobito u pčelarskom radu sve svoje košnice postavljao na geobiološke, odnosno terestričke trake radijacija, jer je i po literaturi i po vlastitim ispitivanjima dokazano da pčele na njima bolje uspijevaju. Valja napomenuti da Loc nikakvu literaturu nije citirao, ali nastavlja objašnjavati kako pčele kada same biraju stan uvijek se smjeste na trakama geobioloških radijacija, koje su inače tako kobne za ljude i većinu drugih živih bića pa i biljaka. Te geobiološke radijacije su, doduše, vrlo slabe, ali su vrlo prodorne, npr. 18 puta prodornije od rendgenskih zraka [sic!]. Autor također navodi neka istraživanja, ne precizirajući izvore, da mravi, pčele i mačke [zašto baš mačke??] imaju neki biološki štiti u kojem odlučnu ulogu ima mravlja kiselina te predstavljaju izuzetak u odnosu na kobne posljedice traka geobioloških radijacija. Autor stoga zaključuje da pčele od tih radijacija neće pretrpjeti nikakvu štetu. Na ovom mjestu se autor vraća problematici radionuklida koji nas prema njegovom mišljenju biju iz bezumnog baratanja nuklearnom energijom pa kroz tlo [zašto ne i putem zraka i vode?] dospijevaju u ljuske žitarica i plodova ali se **ne pokazuju** u nektaru i medu. Taj (pogrešni) podatak o kontaminaciji meda (malenoj, ali mjerljivoj) autor potom tumači vlastitim opažanjem da poslije černobilske nesreće nije primjećivao pčele na cvjetovima voćaka i maslačaka budući su one radije išle na pašu u šumske predjele.

Loc je dakle ionizirajuće zračenje kao posljedicu radioaktivne kontaminacije izjednačio s ezoterijom tipa geobioloških / terestričkih trake radijacije. Valja napomenuti da se danas sličnim fenomenima (Hartmannovih čvorovi - "demonova vrata") pokušava na pojedinim pčelarskim forumima objasniti tzv. kolaps pčelinjih zajednica (*colony collapse disorder* - CCD) kako se naziva zabrinjavajući fenomen izumiranje pčela posebice izražen posljednjih godina [4]. Inače u znanstvenoj literature CCD se objašnjava čitavim spektrom nepovoljnih okolnosti za pčele (i ostale oprašivače) od kojih prednjače klimatske promjene i prekomjerna uporaba pesticida [5].

Ipak, članak Dragutina Loca bio je popraćen duhovitom ilustracijom na kojoj je prikazana pčela koja je spakirala svoje stvari u pohabani „pinklec“ i napušta Zemlju kontaminiranu različitim radionuklidima, a na licu ima zaštitnu masku (Slika 1).

Prva dostupna mjerenja radioaktivne kontaminacije meda, s validiranim i javno dostupnim podacima, provedena su u Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada već u svibnju 1986. godine, odnosno nakon bagremove paše. Ta su istraživanja bila dio ekstenzivnog programa nadzora radioaktivne kontaminacija okoliša u Republici Hrvatskoj koji je započet još godine 1959. Rezultati su objavljeni u redovnom godišnjem izvještaju Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada [6], a potom u časopisu *Pčela* [7].



Slika 1. Ilustracija prenijeta iz časopisa *Pčela* 1986;10:317.

Godine 1986. koncentracija aktivnosti ^{137}Cs u uzorcima meda iznosila je $32,2 \pm 20,6$ Bqkg^{-1} , a ^{134}Cs $26,4 \pm 3,6$ Bqkg^{-1} . Maksimalna koncentracija aktivnosti godine 1986. u medu za ^{131}I bila je 112 Bqkg^{-1} . O radioaktivnoj kontaminaciji meda i pčelinjih proizvoda na području Republike Hrvatske kasnije su detaljno izvijestili Barešić i sur. [8,9] te Franić i Branica koji su obradili cjelokupno razdoblje 1986-2017 [10].

Valja napomenuti da je poslije nesreće u Černobilu u radijusu od 30 kilometara od mjesta nuklearne nesreće proglašena tzv. Zabranjena zona u kojoj su pčelari morali napustiti svoje pčelinjake. Pčele su se dakle snalazile bez pomoći pčelara što je uključivalo i potragu za pitkom vodom. Prilikom posjete Zabranjenoj zoni u okviru projekta međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) u ljeto godine 1997., članovi Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja Delko Barišić i autor ovoga prikaza svjedočili su pravoj najezdi pčela i osa koje su se skupljale oko dostupne vode. Naime, tada je vladala je velika suša te su se insekti sakupljali posebice oko praonika za dekontaminaciju obuće (nogoper) na kontrolnoj postaji za ulazak i izlazak iz Zabranjene zone. Na slici je prikazana jedna takva lokvica, ali nažalost pčele nisu naročito vidljive zbog slabe rezolucije (Slika 2)

Veliki broj pčela oko Černobila potaknuo je bujanje urbanih legendi o mutiranim pčelama. Zanimljivo da (još uvijek) kontaminirano područje u Zabranjenoj zoni ne sprječava ljude da ilegalno u nju zalaze, čak i pčelare. Tako je globalna ruska informativna mreža RT godine 2010. prenijela pomalo bizarnu vijest da su bjeloruski policijski službenici pronašli dvije osobe koje su u 30-kilometarskoj zoni isključenosti oko nuklearne stanice u Černobilu uzgajali pčele i medvjede [11]. Nije posebice elaborirano što su pčelari činili s medom i ostalim proizvodima, tj. jesu li ga koristili za vlastitu uporabu ili plasirali na tržište.

Nuklearna nesreća u japanskoj elektrani Fukushima Daiichi

Na dan 2011-03-11 zbog razornog tsunamija, koji je bio posljedica također razornog potresa u japanskoj regiji Tōhoku, a koji je razorio spremnike s gorivom i dizelske agregate namijenjene za proizvodnju električne energije potrebne za hlađenje nuklearnih reaktora, došlo je do katastrofalne nesreće u nuklearnoj elektrani Fukushima Daiichi. Posljedično, zbog neadekvatnog hlađenja, dio gorivih šipki u reaktorima ostao je bez vode što je uzrokovalo oslobađanje, a potom i eksploziju vodika te širenja radioaktivnog materijala u okoliš. Ova je nesreća ocijenjena maksimalnim 7. stupnjem po INES skali, odnosno kao nesreća s globalnim posljedicama. Iako je i nesreća u Černobilu također ocijenjena stupnjem 7, u havariji

Fukushime oslobođeno je tek 10 % radioaktivnog materijala u usporedbi s nesrećom u Černobilu.



Slika 2. Kontrolna postaja za ulazak u Zabranjenu zonu (Černobil), snimio autor god. 1997.

Uz različita pretjerivanja o posljedicama nesreće, zanimljiva je priča kako je izloženost zračenju iz Fukushime dovela do pojave mutiranih divovskih stršljena koji su bili odgovorni za brojne povrede ljudi u američkoj saveznoj državi Nebraska, a o čemu je pisano na satiričnoj web stranici National Report [12]. Ti su stršljeni, prema glasinama koje su se odmah proširile, bili četverostruko veći od „običnih“ stršljena, hiper-agresivni, a slučajno su uvezeni u Nebrasku tijekom nabave robe u lokalnim prodavaonicama azijske hrane. Navodno su uzrokovali nekoliko smrtnih slučajeva. Priča se neko vrijeme nekontrolirano širila, bilo Internetom bilo usmenom predajom, posebice u Nebraski.

Chemtrails

Među teoretičarima zavjera izuzetno je popularna 'Chemtrails' teorija koja polazi od pretpostavke da zrakoplovi osim normalnih nusprodukata izgaranja mlaznog goriva ispuštaju i razne kemijske, čak i biološke agense, što može uključivati i radioaktivne materijale. Vezano uz pčele, pristalice 'Chemtrails' teorije objašnjavaju da su za već spomenuti kolaps pčelinjih zajednica odgovorni Chemtrailsi. Štoviše, iznose se i „precizne“ brojke: npr. „za oko 44 % pčelinjih zajednica koje su u Sjedinjenim američkim državama umrle godine 2011., odgovorni su Chemtrailsi [13].

Valja li uopće objašnjavati da su hidrološki fenomeni, odnosno kondenzacijski tragovi koji proizlaze iz fizikalnih procesa u atmosferi, a koji su znanstveno obrađeni u nebrojenim istraživanjima koja su provedena još od samoga početka zrakoplovstva, među teoretičarima zavjere poznati kao Chemtrails, samo još jedan vid pseudoznanosti [14]. Ovoga puta ta je pseudoznanost iskorištena da se „objasni“ alarmantno izumiranje pčela.

Pčele i neionizirajuće zračenje

U posljednje se vrijeme kao jedan od mogućih uzroka izumiranja pčela sve više spominje i neionizirajuće zračenje, odnosno elektromagnetski valovi. Mnogi pčelari stoga izbjegavaju sa sobom na pčelinjake nositi svoje bežične telefone, tj. „mobitele“. Zbog potencijalne opasnosti od kronične izloženosti niskoj razini radijskim frekvencijama mikrovalnog zračenja, korištenje mobitela je postala zanimljiva tema mnogih javno-zdravstvenih istraživanja [15]. Posljedično, provedeno je mnoštvo epidemioloških i eksperimentalnih istraživanja kod ljudi i životinja, uključujući i pčele. Pčele su naime

pouzdati pokazatelji stanja okoliša zbog nekoliko važnih ekoloških, etoloških i morfoloških karakteristika. One su npr. ponajbolje eksperimentalne životinje za proučavanje učinka elektromagnetskih valova, jer u svojim abdomenima posjeduju magnetitne granule koje pomažu pčelama u njihovom orijentacijskom letu.

Rezultati određenih istraživanja, upućuju na zaključak da se unatoč primijećenim promjenama u ličinkama pčela ne može jednoznačno zaključiti ima li izlaganje pčela radiofrekvencijskim magnetskim poljima (RF-EMF) toliko izraženi štetni učinak na pčele da to može dovesti do gubitka cijele zajednice [16, 17]. S druge strane valjalo bi sustavnije proučiti ima li izloženost RF-EMF kakvog učinka na nametnika *Varroa destructor*, što bi zapravo bio pozitivan učinak na zdravlje i preživljavanje pčela. [18].

Također, valjalo bi bolje istražiti i utjecaj elektromagnetskog zračenja na dezorijentiranost pčela tijekom orijentacijskih letova kod procesa sakupljanja hrane.

ZAKLJUČAK

Obrađeni su dostupni izvori iz sredstava informiranja, internetskih portala kao i znanstvene i stručne literature. Vezano uz radioaktivnu kontaminaciju okoliša, med i pčelinji proizvodi prepoznati su kao izuzetno dobri bioindikatori stanja zagađenosti okoliša. Ozbiljan problem nestajanja pčela pokušava se objasniti utjecajem zračenja, što nažalost skreće pažnju s pravih problema: klimatske promjene i pesticidi.

Zahvala

Zahvaljujemo Obiteljskom poljoprivrednom gospodarstvu OPG „Franić Davorka“ i Grupi „Ekološko pčelarstvo Klinac“ iz sela Klinac na Banovini na omogućavanja korištenja njihovih arhiva i bogate pčelarske biblioteke s dragocjenim knjigama i časopisima iz povijesti pčelarstva.

LITERATURA

- [1] Bukša Z. Pitaju pčelari – Što nakon Černobila? *Pčela* 1986;6:181.
- [2] Bukša Z. Radijacija i pčelarstvo. *Pčela* 1986;7:198-199.
- [3] Loc D. Strahovanje za pčele. *Pčela* 1986;10:316-317.
- [4] Pčelarski forum na Web stranicama hrvatskog pčelarskog saveza. Položaj košnice u pčelinjaku i zračenje iz Zemlje. <http://www.pcela.hr/forum/viewtopic.php?f=5&t=11742>. Pristupljeno: 2019-02-13.
- [5] Rhodes C J. Pollinator decline - an ecological calamity in the making? *Science Progress*. 2018;101(2)121-160.
- [6] Bauman A, Kovač J, Cesar D, Lokobauer N, Marović G, Franić Z, Maračić M, Bajlo M, Baumstark M, Petroci Lj, Sokolović E, Stampf Dj, Senčar J. Rezultati mjerenja radioaktivnosti životne sredine u SR Hrvatskoj, Izvještaj o radioaktivnoj kontaminaciji SR Hrvatske nakon akcidenta u NE “Lenjin” u Černobilu i odgovarajuća doza na populaciju. Zagreb: Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada; srpanj 1986.
- [7] Franić Z, Marović G, Bauman A. Kontaminacija meda radiocezijem. *Pčela* 1991;6:124-126
- [8] Barišić D, Lazarić K, Lulić S, Vertačnik A, Dražić M, Kezić N. ^{40}K , ^{134}Cs and ^{137}Cs in pollen, honey and soil surface layer in Croatia. *Apidologie* 1994;25:585-595.
- [9] Barišić D, Bromenshenk JJ, Kezić N, Vertačnik A. The role of honey bees in environmental monitoring in Croatia. In: Devillers J, Pham-Delègue M-H (eds) *Honey Bees, Estimating the environmental impact of chemicals*. New York: Taylor & Francis, 2002, pp 160–185

- [10] Franić Z, Branica G. Long-term investigations of ^{134}Cs and ^{137}Cs Activity Concentrations in Honey from Croatia. Bulletin of Environmental Toxicology and Contamination, 2019. Online at: <https://dx.doi.org/10.1007/s00128-019-02571-8>
- [11] RT News Channel. Belarusian police expel illegal beekeepers from Chernobyl zone. Published 5 Feb. <https://www.rt.com/news/bears-bees-chernobyl-expelled/>
Pristupljeno: 2019-03-05
- [12] **Mutated Fukushima Giant Hornet Responsible For Multiple Nebraska Casualties** <http://nationalreport.net/>: October 2013.
- [13] Bees in global extinction! <https://2012patriot.wordpress.com/2012/03/26/bees-colonies-extinction-by-monsanto-bayer/>. Pristupljeno: 2019-03-05
- [14] Jordi Mazon J, Costa M, Pino D. Aircraft clouds - from chemtrail pseudoscience to the science of contrails. *Mètode Science Studies Journal* 2018;8:181-187.
- [15] Favre D. Disturbing Honeybees' Behavior with Electromagnetic Waves: a Methodology. *Journal of Behavior* 2017; 2(2): 1010
- [16] Manger M. Učinak zračenja frekvencije 900 MHz na oksidacijski stres i aktivnost antioksidacijskih enzima ličinke medonosne pčele *Apis mellifera* Linné, 1758. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Prirodoslovno-matematički fakultet Biološki odsjek. Zagreb, 2016.
- [17] Odemer R, Odemer F. Effects of radiofrequency electromagnetic radiation (RF-EMF) on honey bee queen development and mating success. *Science of The Total Environment* 2019; 661:553-562.
- [18] Frey E, Odemer R, Blum T, Rosenkranz P. Activation and interruption of the 440 reproduction of *Varroa destructor* is triggered by host signals (*Apis mellifera*). *J 441 Invertebr Pathol* 2013;113:56–62.

BEES AND RADIATION

Zdenko Franić

Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Republic of Croatia
zdenko.franic@imi.hr

Because of the pollination services they provide, honey bees are considered one of the most important animal species. A world without bees means a world without fruit, vegetables, grains, seeds and nuts. In recent years, there has been an alarming decline in bee populations around the world, known as colony collapse disorder. Ionizing and electromagnetic radiation are frequently mentioned among the reasons for this extinction. This paper presents some urban legends and misconceptions regarding bees and radiation as well as radioecological and other similar topics, with special emphasis on the Republic of Croatia. The main source of such misinformation is the internet and tabloid journalism, although some misinformation could even be found in professional bee-keeping journals. As expected, the consequences of the Chernobyl nuclear accident are mentioned to have had a profoundly negative impact on bees and beekeeping, which is fortunately not entirely true. However, in scientific journals covering the field of radiation science and radioecology, honey and honey-bee products are recognized as excellent bio-indicators of environmental pollution.

STERILIZACIJA I STERILNOST

Ivana Tartaro Bujak¹, Mirjana Šimić², Branka Mihaljević¹, Sandra Šuto², Jasna Knežević²

¹Institut Ruđer Bošković, Zagreb

²Nastavni zavod za javno zdravstvo dr. Andrija Štampar, Zagreb

itartaro@irb.hr

UVOD

Sterilizacije i sterilnosti su pojmovi čije se razlike u značenju često ne razaznaju i neadekvatno primjenjuju u praksi. To su dva različita postupka koja se provode sa različitom svrhom. Prema normi ISO13485: Medicinska oprema: Sustav upravljanja kvalitetom, sterilizacija je postupak kojim se odstranjuju ili uništavaju svi mikroorganizmi sa predmeta, instrumenata i materijala do te mjere da se na standardnim hranjivim medijima ne može dokazati njihova prisutnost [1]. Jedna od često korištenih metoda za sterilizaciju različitih materijala i proizvoda poput medicinske opreme i pribora za jednokratnu upotrebu, farmaceutskih sirovina, gotovih proizvoda i ambalaže je γ -zračenje [2,3]. To je efikasna, brza i sigurna nekontaktna fizikalna metoda za inaktivaciju i eliminaciju svih bioloških onečišćenja odnosno mikroorganizama u svim njihovim životnim ciklusima. Kontrola odnosno validacija sterilizacije provodi se fizikalnim, kemijskim i biološkim postupcima kako bi se potvrdila uspješnost postupka. Jedan od najpouzdanijih, najprikladnijih i najjednostavnijih načina kojim se dokazuje učinkovitost sterilizacije odnosno načina kojim se dokazuje prisutnost mikrobnog onečišćenja ispitivanog materijala je biološka kontrola. Biološka kontrola sterilizacije provodi se uporabom bioloških indikatora koji sadrže posebno pripremljene mikrobiološke spore vrlo visoke otpornosti. Primjenom bioloških indikatora prati se i ocjenjuje proces sterilizacije na temelju određivanja preživljavanja mikroorganizama nakon sterilizacije [4]. Samo se tim postupkom može dokazati je li neki predmet, instrument ili materijal koji je bio podvrgnut sterilizaciji uistinu sterilan ili ne. Postupak ispitivanja sterilnosti provodi se u strogo aseptičnim uvjetima na podlogama s hranjivim medijem koji omogućuje rast mikroorganizmima. Ispitivani materijal je sterilan ako nakon sterilizacije nema rasta na podlozi. Mikrobiološke podloge koriste se u mikrobiološkoj dijagnostici, istraživanjima, kontroli voda i živežnih namirnica, a sa razvojem biotehnologije sve više nalaze primjenu u različitim proizvodnim procesima.

Podloge se najčešće koriste u sljedećim postupcima [5,6] :

- Uzgoj i održavanje mikrobioloških kultura;
- Izolacija i identifikacija mikroorganizama;
- Ispitivanje biokemijskih i fizioloških osobina mikroorganizama;
- Određivanje osjetljivosti mikroorganizama na antimikrobne agense;
- Testovi sterilnosti materijala ili proizvoda, opreme i prostora

U ovom radu istražen je učinak γ -zračenja na čvrstim hranjivim podlogama te fizikalno kemijske osobine i mikrobiološke karakteristike standardnih mikrobioloških medija nakon γ -zračenja uz korištenje komercijalnog biološkog indikatora za postupak utvrđivanja sterilnosti, spore *Bacillus pumilus* kroz tri ciklusa zračenja [7]. U svakom ciklusu ozračivanja se svi postupci pripreme, dozimetrije, zračenja, obrade podloga i mjerenja nakon zračenja provode jednakim načinom.

MATERIJALI I METODE

Mikrobiološke podloge "ready to use" pripravljene su iz komercijalnih dehidriranih podloga u Nastavnom zavodu za javno zdravstvo dr. A. Štampar prema HRN EN ISO 11133. Nakon otapanja, podloge se steriliziraju vrućom vodenom parom pri 121 °C kroz 15 minuta.

Punjenje mikrobioloških podloga u sterilne polistirenske Petrijeve zdjelice izvedeno je pomoću aparata za punjenje u klasi zraka A. Mikrobiološke podloge (proizvodi) podvrgnuti su strogoj provjeri kakvoće prema HRN EN ISO 11133.

U ovom istraživanju korištene su 2 vrste mikrobioloških podloga, Tryptone soja agar (TSA) i Sabouraud dekstroze agar (SDA) koje su zapakirane u trostruku termoskupljajuću foliju i umetnute u kartonsku kutiju (20 × 20 × 10 cm). Po kutiji/mikrobiološkim podlogama raspoređeno je 7 bioloških indikatora MESA STRIP kat. br. SGMR/6 *Bacillus pumilus*, lot BPUM-289. Kutija s mikrobiološkim podlogama zračena je dozom od 12,5 kGy i uz brzinu doze 0,36 Gy/s. Tri ciklusa ozračivanja provedena su na panoramskom izvoru ⁶⁰Co na Institutu Ruđer Bošković. Dozimetrija je uspostavljena etanol-klorobenzenkim dozimetrijskim sustavom (ISO / ASTM 51538: 2017). Nakon zračenja biološki indikatori su inkubirani u hranjivom bujonu 7 dana na 35 °C te su očitani rezultati testiranja.

REZULTATI

Rezultati biološke kontrole sterilizacije u sva tri ciklusa zračenja su pokazala da nema porasta *Bacillus pumilus* (Tablica 1).

Tablica 1. Rezultati biološke kontrole sterilizacije nakon zračenja dozom od 12,5 kGy uz brzinu doze 0,36 Gy/s.

12,5 kGy (1. ciklus)		12,5 kGy (2. ciklus)		12,5 kGy (3. ciklus)	
Biološki indik/ Uzorci	Rezultat	Biološki indik/ Uzorci	Rezultat	Biološki indik/ Uzorci	Rezultat
1-7	Nema porasta <i>Bacillus pumilus</i>	1-7	Nema porasta <i>Bacillus pumilus</i>	1-7	Nema porasta <i>Bacillus pumilus</i>
Pozitivna kontrola	Porast <i>Bacillus pumilus</i>	Pozitivna kontrola	Porast <i>Bacillus pumilus</i>	Pozitivna kontrola	Porast <i>Bacillus pumilus</i>

Nakon zračenja od 12,5 kGy TSA i SDA ispitani su fizikalno-kemijski parametri (pH, boja, homogenost i konzistencija) (Tablica 2) i mikrobiološke karakteristike - produktivnost, prema HRN EN ISO 11133 (Slika 1 i 2). Produktivnost se kvantitativno određuje kao omjer između broja poraslih kolonija na ispitnoj podlozi i broja poraslih kolonija na referentnoj podlozi te se radi u duplikatu. Produktivnost ispitivane podloge mora biti iznad zadane granice. Faktor produktivnosti (P_R), računa se po formuli:

$$P_R = N_s / N_o,$$

gdje je:

N_s ukupan broj poraslih kolonija na ispitnoj podlozi

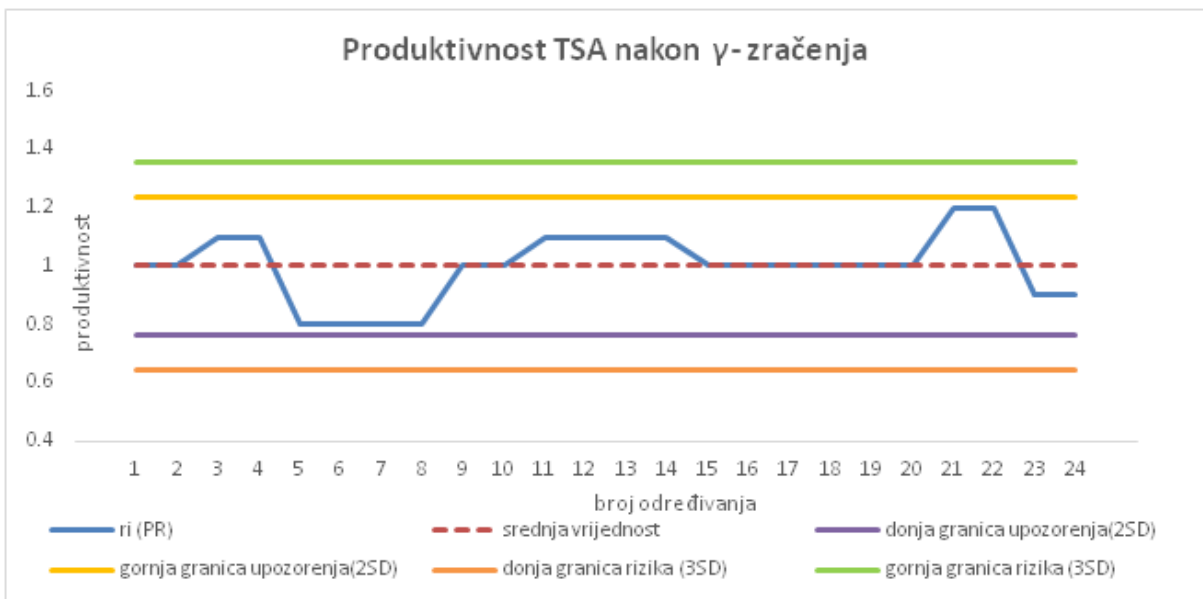
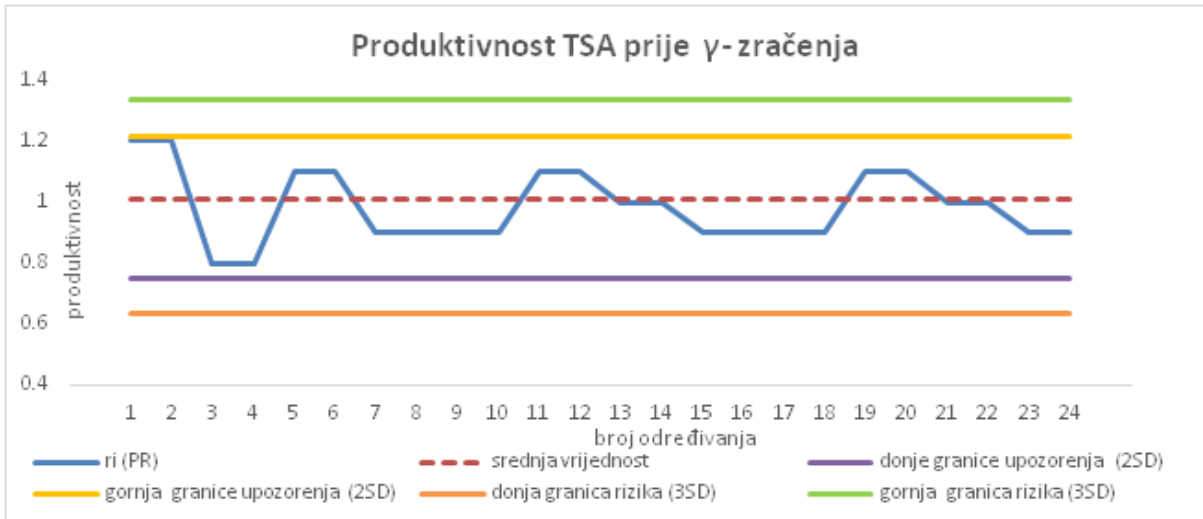
N_o ukupan broj poraslih kolonija na referentnoj podlozi

Kod TSA korištena su četiri kontrolna soja mikroorganizama i to *Escherichia coli* ATCC 8739, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Bacillus subtilis* subs. *spizizenii* ATCC 6633 i *Listeria monocytogenes* 4b ATCC 13932. Kod SDA korištena su dva kontrolna soja mikroorganizama i to *Aspergillus brasiliensis* ATCC16404 i *Saccharomyces cerevisiae* ATCC 9763.

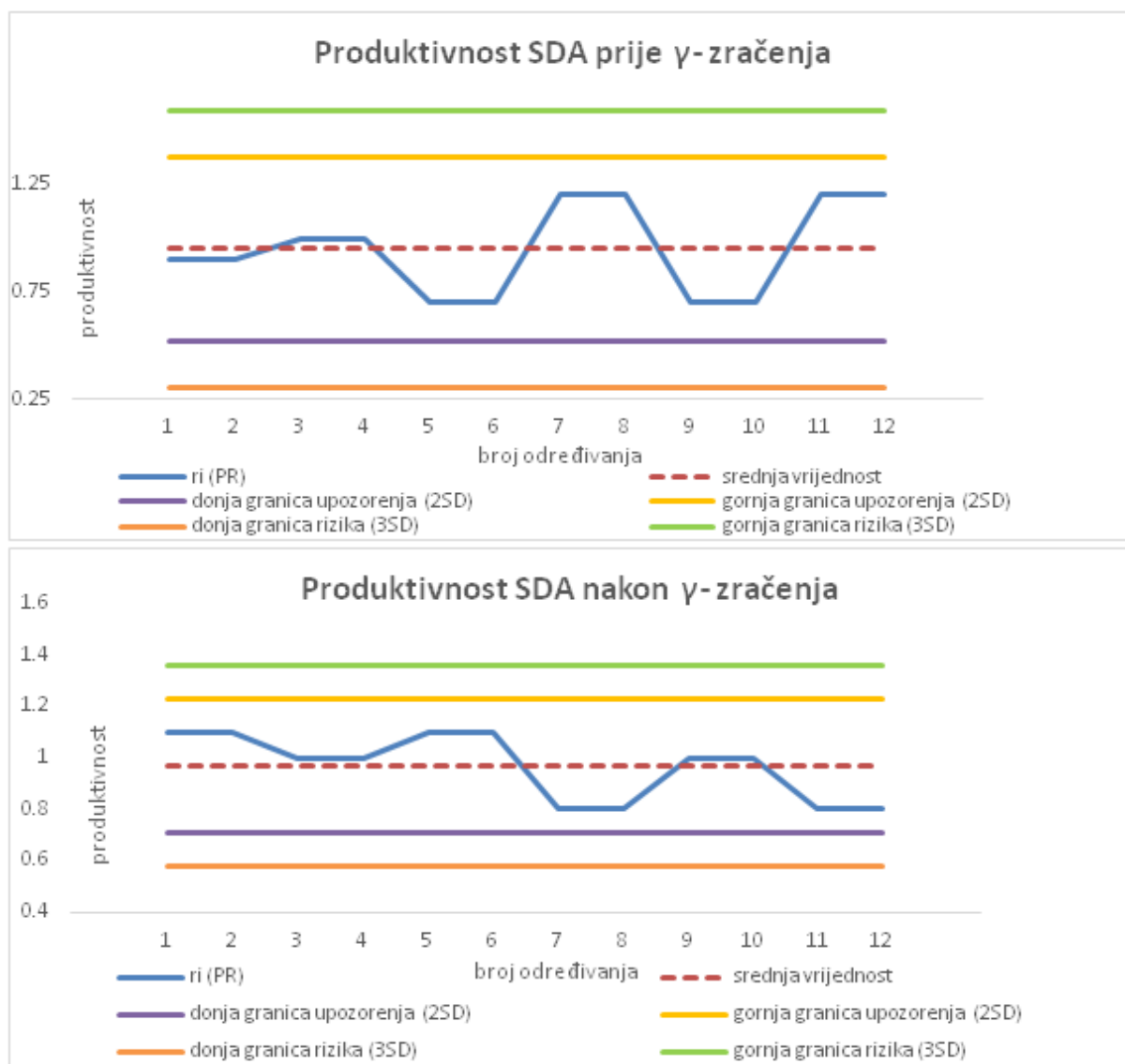
Vizualnim pregledom mikrobioloških podloga utvrđeno je da niti u jednom slučaju nije došlo do promjene boje nakon zračenja.

Tablica 2. Ispitivanje fizikalno-kemijskih parametara i mikrobioloških karakteristika prije i nakon zračenja dozom od 12,5 kGy uz brzinu doze 0,36 Gy/s.

12,5 kGy (1. ciklus)	Rezultati ispitivanja serije prije gamma zračenja - Nulto vrijeme-	Rezultati NAKON gamma zračenja od 12,5 kGy
TSA - TRIPTON SOJA AGAR lot 220318 (pH 7,4±0,2)	pH =7,45 P _R = 1,2; 1,2 (<i>Escherichia coli</i> ATCC 8739) P _R = 0,8; 0,8 (<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923) P _R = 1,1; 1,1 (<i>Bacillus subtilis subs spizizenii</i> ATCC 6633) P _R = 0,9; 0,9 (<i>Listeria monocytogenes 4b</i> ATCC 13932)	pH =7,3 P _R = 1,0; 1,0 (<i>Escherichia coli</i> ATCC 8739) P _R = 1,1; 1,1 (<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923) P _R = 0,8; 0,8 (<i>Bacillus subtilis subs spizizenii</i> ATCC 6633) P _R = 0,8; 0,8 (<i>Listeria monocytogenes 4b</i> ATCC 13932)
Sabouraud Dextrose agar lot 240518 (pH 5,6±0,2)	pH =5,8 P _R = 0,9; 0,9 (<i>Aspergillus brasiliensis</i> ATCC 16404) P _R = 1,0; 1,0 (<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ATCC 9763)	pH =5,4 P _R = 1,1; 1,1 (<i>Aspergillus brasiliensis</i> ATCC 16404) P _R = 1,0; 1,0 (<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ATCC 9763)
12,5 kGy (2. ciklus)	Rezultati ispitivanja serije prije gamma zračenja - Nulto vrijeme-	Rezultati NAKON gamma zračenja od 12,5 kGy
TSA - TRIPTON SOJA AGAR lot 170518 (pH 7,4±0,2)	pH =7,21 P _R = 0,9; 0,9 (<i>Escherichia coli</i> ATCC 8739) P _R = 1,1; 1,1 (<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923) P _R = 1,0; 1,0 (<i>Bacillus subtilis subs spizizenii</i> ATCC 6633) P _R = 0,9; 0,9 (<i>Listeria monocytogenes 4b</i> ATCC 13932)	pH =7,1 P _R = 1,0; 1,0 (<i>Escherichia coli</i> ATCC 8739) P _R = 1,1; 1,1 (<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923) P _R = 1,1; 1,1 (<i>Bacillus subtilis subs spizizenii</i> ATCC 6633) P _R = 1,0; 1,0 (<i>Listeria monocytogenes 4b</i> ATCC 13932)
Sabouraud Dextrose agar lot 050718 (pH 5,6±0,2)	pH =5,7 P _R = 0,7; 0,7 (<i>Aspergillus brasiliensis</i> ATCC 16404) P _R = 1,2; 1,2 (<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ATCC 9763)	pH =5,4 P _R = 1,1; 1,1 (<i>Aspergillus brasiliensis</i> ATCC 16404) P _R = 0,8; 0,8 (<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ATCC 9763)
12,5 kGy– (3. ciklus)	Rezultati ispitivanja serije prije gamma zračenja - Nulto vrijeme-	Rezultati NAKON gamma zračenja od 12,5 kGy
TSA - TRIPTON SOJA AGAR lot 220318 (pH 7,4±0,2)	pH =7,5 P _R = 0,9; 0,9 (<i>Escherichia coli</i> ATCC 8739) P _R = 1,1; 1,1 (<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923) P _R = 1,0; 1,0 (<i>Bacillus subtilis subs spizizenii</i> ATCC 6633) P _R = 0,9; 0,9 (<i>Listeria monocytogenes 4b</i> ATCC 13932)	pH =7,3 P _R = 1,0; 1,0 (<i>Escherichia coli</i> ATCC 8739) P _R = 1,0; 1,0 (<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923) P _R = 1,2; 1,2 (<i>Bacillus subtilis subs spizizenii</i> ATCC 6633) P _R = 0,9; 0,9 (<i>Listeria monocytogenes 4b</i> ATCC 13932)
Sabouraud Dextrose agar lot 240518 (pH 5,6±0,2)	pH =5,7 P _R = 0,7; 0,7 (<i>Aspergillus brasiliensis</i> ATCC 16404) P _R = 1,2; 1,2 (<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ATCC 9763)	pH =5,4 P _R = 1,0; 1,0 (<i>Aspergillus brasiliensis</i> ATCC 16404) P _R = 0,8; 0,8 (<i>Saccharomyces cerevisiae</i> ATCC 9763)



Slika 1: Produktivnost TSA prije i nakon γ -zračenja.
 Kontrolni sojevi: *Escherichia coli* ATCC 8739, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923,
Bacillus subtilis subs spizizenii ATCC 6633 i *Listeria monocytogenes 4b* ATCC 13932.



Slika 2. Produktivnost SDA prije i nakon γ -zračenja. Kontrolni sojevi: *Aspergillus brasiliensis* ATCC 16404 i *Saccharomyces cerevisiae* ATCC 9763.

ZAKLJUČAK

Rezultati ispitivanja fizikalno-kemijskih parametara i mikrobioloških karakteristika kod Trypton soja agara i Sabouraud Dextrose agar (pH, boja, homogenost i konzistencija) nakon tri ciklusa zračenja u jednakim uvjetima i kod doze zračenja od 12,5 kGy zadovoljavaju zahtjevu za sterilnost prema normi ISO 11137, te zadovoljavaju zahtjevima u pogledu ispitivanja fizikalno-kemijskih parametara i mikrobioloških karakteristika prema HRN EN ISI 11133.

Vrijednosti produktivnosti (P_R) SDA odnosno TSA prije i nakon γ -zračenja podloga nalaze se unutar dvije standardne devijacije.

Rezultati provedenih ispitivanja na TSA i SDA su pokazali da je primjena γ -zračenja za dobivanje sterilnih Petrijevih zdjellica koje su trostruko pakirane u termoskupljajuću foliju, kao gotovog proizvoda učinkovita metoda budući su zahtjevi za sterilnost, fizikalno-kemijske parametre i mikrobiološke karakteristike-produktivnosti, sukladno smjernicama EU i odgovarajućim europskim normama, u potpunosti zadovoljeni. Gama zračenje nije narušilo fizikalno-kemijska svojstva kao ni mikrobiološke karakteristike u ispitivanom hranjivom mediju. Biološki indikatori koji su pritom bili upotrijebljeni dokazuju da su vegetativni oblici spora uništeni u procesu sterilizacije do nivoa zahtjevanog za postizanje stanja sterilnosti.

Gama ozračene Petrijeve zdjelice TSA i SDA trostruko omotane, mogu se koristiti za praćenje okoliša u farmaceutskoj proizvodnji, čistim prostorima, kao ploče za taloženje ili kao potrošni materijal za uzimanje uzoraka zraka.

REFERENCE

- [1] <https://www.iso.org/standard/59752.html>; Bojić-Turčić V. Sterilizacija i dezinfekcija u medicini, Zagreb, Medicinska naklada, 1994.
- [2] Ražem D, Katušin-Ražem B, Starčević M, Galeković B. Radiation decontamination of pharmaceutical raw materials as an integral part of the good pharmaceutical manufacturing practice (GMP). Rad Phys Chem 1990;35:377-381.
- [3] Katušin-Ražem B, Novak B, Ražem D. [Microbiological decontamination of botanical raw materials and corresponding pharmaceutical products by irradiation](#). Rad Phys Chem 2001;62: 261-275.
- [4] Khattri S, Bhardwaj M, Shrivastava S. Sterilization monitoring by biological indicators and conventional swab test of different sterilization processes used in orthodontics: A comparative study. J. Ind Orthodontic Soc 2015;49:67-70.
- [5] Hala N. El-Hifnawi. Radiation Sterilization of Two Commonly Culture Media Used for Bacterial Growth: National Centre for Radiation Research and Technology P.O. Box29, Nasr City, Cairo, Egypt
- [6] Bogokowsky B, Eisenberg E, Altmann G. Sterilization of MacConkey agar and CLED medium by γ -radiation. [Int J Appl Radiat Isotop](#) 1983;34: 1441-1443.
- [7] HRN EN ISO 11133: Priprema, proizvodnja, skladištenje i ispitivanje hranjive podloge.

STERILIZATION AND STERILITY

Ivana Tartaro Bujak¹, Mirjana Šimić², Branka Mihaljević¹, Sandra Šuto², Jasna Knežević²

¹Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

²Educational Institute of Public Health "Dr. Andrija Štampar", Zagreb, Croatia

itartaro@irb.hr

Sterilization is a process in which all microorganisms and even the most resistant bacterial spores are destroyed. The sterilization control can be carried out by physical, chemical and biological procedures. However, the chemical and physical parameters of sterilization do not show the success of the sterilization process but confirm that the material was subjected to sterilization by the selected process. One of the most reliable, most convenient and simplest ways to prove the effectiveness of sterilization is biological control.

One of the frequently used methods for sterilization of various materials and products such as disposable medical supplies, pharmaceutical raw materials, finished products and packaging is gamma radiation. It is an efficient, fast and safe method for inactivating and eliminating all biological contaminants in all life cycles. In collaboration with the Institute of Public Health Andrija Štampar and the Ruđer Bošković Institute, a study was carried out on the efficacy of ionizing radiation in the sterilization process of TSA and Sabouraud Dextrose agar Petri dishes and the influence on their physico-chemical parameters and microbiological characteristics in the presence of biological indicators, containing spores of *Bacillus pumilus*. The results have shown that gamma radiation is efficient in achieving sterile Petri dishes as a finished product which is in accordance with the EU guidelines and the corresponding European standards.

RADIATION HORMESIS AND HYGIENIC STANDARDS OF SAFETY IN LIGHT OF FUNDAMENTAL PHYSICAL LAWS

Yu. P. Chukova

The Moscow Society of Researchers of Nature
Krasnopresnenskiy Ecological Fund, Moscow, Russia
y.chukova2015@yandex.ru; y.chukova@mtu-net.ru

INTRODUCTION

Hygienic standards of safety are the regulatory framework of radiation protection. It is a social decision, and therefore may be different in different countries. Its natural-scientific basis is the dose-effect dependence obtained in the experiment. On the basis of this dependence, it was initially thought that the harmful effect increases linearly with the dose and any arbitrarily small doses are dangerous. The second (threshold) theory argued that there is a threshold above which all doses are dangerous, and effects are absent below the threshold. The discovery of radiation hormesis is contrary to both theories [1-3]. The aim of my paper is to explain this situation.

MATERIALS AND METHODS

All results currently available in the field of radioactivity have been obtained by experimenters using inductive methods. Results to be reported in this paper are obtained by deductive method. The deductive method is the most powerful one among physical methods. The fundamental laws of physics (the law of energy conservation and the law of entropy increase) were obtained by it.

Quantum thermodynamic of irreversible processes developed in the second half of the 20th century brought clarity to the situation with hormesis [3-5]. U-shaped dose-effect dependence is a general phenomenon for different materials and systems and was observed in different frequency regions of electromagnetic radiation (for example, MM radiation) and in chemical reactions. Thus, the method used in my work is the opposite to the method employed by narrow specialists dealing with the problems of α -, β -, and γ - radiation and radiation safety.

RESULTS

The open system under electromagnetic radiation (0 - 10^{22} Hz) was considered by thermodynamic method. Experimenters divide the whole scale of electromagnetic radiation into 7 parts according to the equipment used to generate different frequencies. Gamma radiation is the highest frequency part of electromagnetic radiation.

In theoretical (thermodynamic) consideration, the whole scale splits into two parts, familiar to physicists according to the laws of thermal equilibrium radiation. This is the W. Wien region and the Rayleigh-Jeans region. The basis of this division is the degree of filling of electronic levels in the equilibrium radiation of different frequencies, which can be higher than 1 (Rayleigh-Jeans region) and lower than 1 (region W. Wien). This magnitude is usually denoted by ρ .

The experimenters are also familiar with this division as the ratio of the energy of the quantum of thermal radiation kT and the energy of the quantum of electromagnetic radiation with a certain frequency $h\nu$. In the W. Wien region $h\nu \gg kT$, and in the Rayleigh-Jeans region $h\nu \ll kT$. In these two areas the laws of efficiency of conversion of energy of electromagnetic radiation into free energy of Helmholtz (into energy of chemical bonds) differ radically. This fundamental difference for isothermal processes is schematically illustrated in Figure 1.

REGION OF ELECTROMAGNETIC WAVES (Hz)

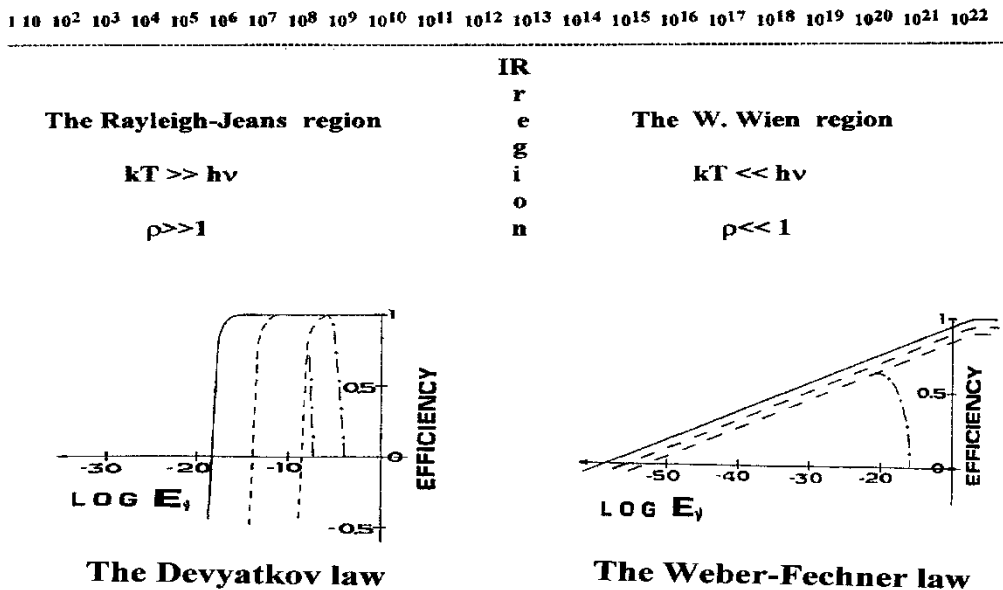


Figure 1. Plan for electromagnetic radiation

The left part of the scheme refers to the long-wave part of electromagnetic radiation (Rayleigh–Jeans region), and the right part to the short-wave part (W. Wien region). The solid lines represent the thermodynamic limit of efficiency for reversible lossless processes, which are no interest to experimenters, and the dashed lines represent the efficiency for real processes with linearly increasing entropy S , which is of maximum interest to experimenters.

In semi-logarithmic coordinates in the Wien region we have a straight line, which means that the studied function is the logarithm of the acting stimulus. This is a well-known to physiologists the Weber-Fechner law. In the long-wave part of the scale, the dependence of efficiency on the stimulus resembles a step. This is Devyatkov's law. In both regions along the abscissa axis the spectral density of the radiation E_ν , which characterizes the amount of energy per unit frequency interval, is deposited. Instead of E_ν on this axis, the absorbed energy or the intensity of the acting radiation or some other magnitude, for example, the dose, which is convenient for the experimenter, and which is proportional to E_ν , can be postponed.

Gamma radiation, being the highest frequency part of electromagnetic radiation, belongs to the Wien region, which will be the object of our attention.

As shown in Figure 1, under very strong influence, the dependence of the efficiency on the magnitude of absorption is changed (dot-and-dash lines). Efficiency begins to fall and can reach zero. As a result, the experimenter receives the dependence shown in Figure 2 by the solid line. Here, as well as in Figure 1, semi-logarithmic scale is used, since the ordinate axis has linear scale, and the abscissa axis has logarithmic.

On the curve of Figure 2 the position of all isothermal processes under the Wien radiation can be shown schematically. Objectively four most well-studied processes are presented in Figure 2. The dash line shows the area of functioning of the human eye, the dot-and-dash line - the area of photosynthesis of plants, the dots are the area of operation of solar cells, and the photomovement of simplest organisms can be at any place of the entire continuous curve up to zero efficiency, when the simplest organism dies. This is the law of energy conversion with a weak influence on any system by any radiation of the W. Wien region.

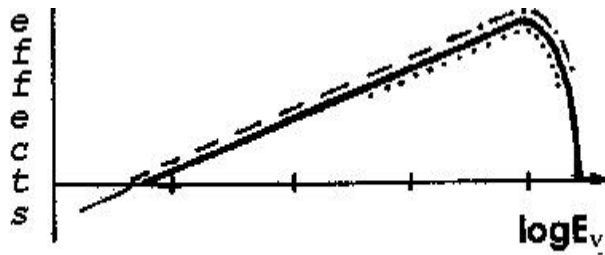


Figure 2. Correlation theory with an experiment

The effects of gamma radiation on living organisms have been studied under conditions of severe lethal exposure. To be more precise, hygienists took the 100 % point of death as the main point and then, by reducing the dose of exposure, received the full dependence, which was usually linear (Figure 3).

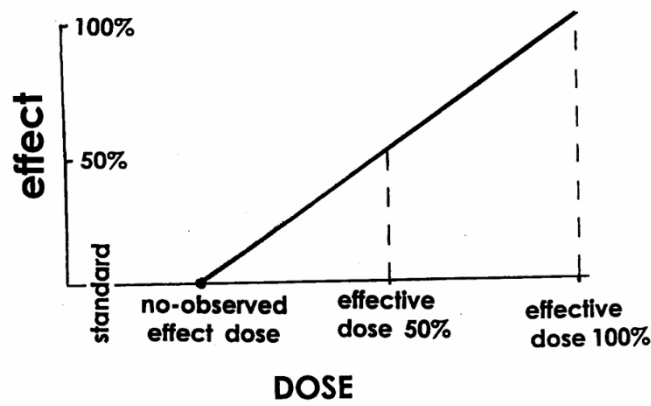


Figure 3. Dependence dose-effect for thermal processes.

Having fixed the position of no-observed effect dose, then the position of the safety standard was determined. It was located at a lower dose, and its position was the result of a social decision, so hygienic safety standards are different in different countries. The distance from the position of the safety standard to no-observed effect dose is called the buffer coefficient. These experimental curves gave rise to the statement that the effect depends on the dose linearly, and all doses are dangerous (harmful). But no-observed effect dose lies not at zero coordinates. It lies at some value other than zero. So there was a threshold theory. According a threshold theory there is a threshold above which all effects are harmful. And below its influences do not exist.

However, the detection of hormesis at very low exposure gave rise to many uncertainties and questions among the experimenters. The hormesis is the situation when the factor which is known as harmful effects in high doses, it is useful – in small doses. A special place among the experiments took the U-shaped hormesis. Two such results are shown in Figure 4 [7]. These excellent results allowed theorists to give a comprehensive explanation of the dependence of the effect of gamma radiation when its intensity changes by many orders of magnitude.

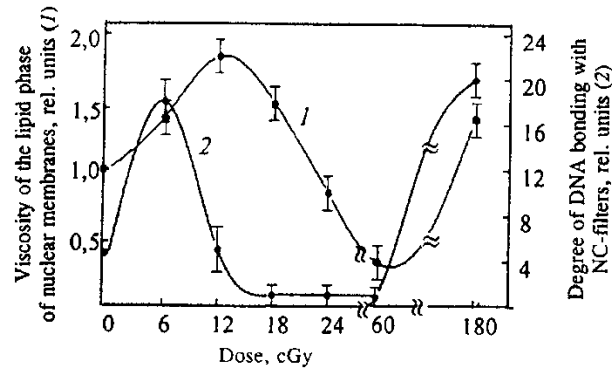


Figure 4. Dependence dose-effect in [7]

As the quantum thermodynamics of irreversible processes shows, isothermal processes occur under very weak influence, which follow the law presented in Figures 1 and 2. At strong influences the thermal processes presented in Figure 3. If they are depicted in one figure, for example, in linear coordinates, we get a Figure 3, where all isothermal processes will be compressed at zero point. And if you use a semi-logarithmic scale, then all thermal processes will be compressed. Only when the semi-logarithmic scale is used for weak effects (left part of Figure 5), and at strong – linear on both axes (the right part Figure 5), the picture is completely clear and vivid.

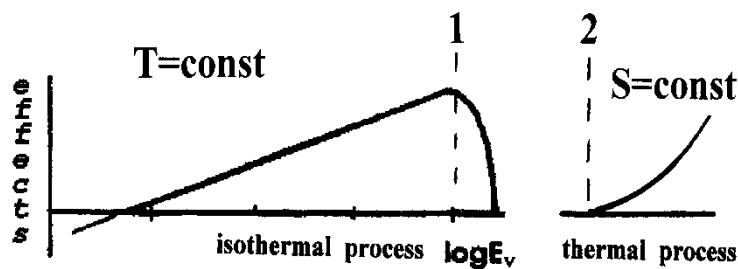


Figure 5. Thermodynamic zone of silence.

What is the meaning of the interval between perpendiculars 1 and 2? It is extremely simple, and its explanation goes back to the works of the luminaries, who initiated the science of thermodynamics. They divided all system interactions with the environment into two categories. At one case the temperature T of system is constant, and at second case the entropy S of system is constant. These two types of conservation determine the two types of interaction of the system with the environment. Thus, the silence interval of the system with increasing exposure to it indicates changes in the system itself, allowing it to exist at very wide change in the intensity of gamma radiation affecting it.

CONCLUSION

In thermodynamics, there is no concept of harmfulness, so the above thermodynamic laws are equally valid for both harmful and for useful processes. The amazing fact of the beneficial effect of low doses of gamma radiation has attracted the attention of not only scientists but also businessmen. Their tasks did not coincide, but funding was provided. That is the historical significance of the term "hormesis". It gave the opportunity to attract attention and money to the study of the influence of small doses. As a result, the question of hygienic safety standard received a clear answer, but not on the example of gamma radiation, rather on the example of millimeter radiation (microwaves) [5]. This answer is simple.

Those standards of hygienic safety, which are based on the results of Figure 3, are standards for strong exposure and are usually relevant for professional staff and occupational diseases. Those standards which are based on weak effects, namely the zero point of isothermal processes in Figure 5, are relevant to the population. This standard was adopted in the 70s in the USSR and is still valid in Russia for microwave radiation [5].

With regard to gamma radiation, experimenters working in this field have yet to make experiments on the basis of which the existing safety standards can be changed.

All of the above is true not only for gamma radiation, but is true for α - and β - radiation as shown in [6].

Acknowledgment

I thank the John D. and Catherine T. MacArthur Foundation for the grant support of my work

REFERENCES

- [1] Кузин А.М. Стимулирующее действие ионизирующего излучения на биологические процессы (к проблеме биологического действия малых доз). М. Атомиздат, 1977, 135 с
- [2] Luckey T.D. Hormesis with ionizing radiation. Boca Raton, Fla.;CRC Press, 1980, 222p.
- [3] Яблоков А.В. Миф о безопасности малых доз радиации. М.2002. Центр экологической политики.
- [4] Chukova Yu.P. Advances in nonequilibrium thermodynamics of systems under electromagnetic radiation. Moscow, Khrizostom, 2001, 116 pp.
- [5] Chukova Yu.P. Thermal vs. nonthermal effects. The Devaytkov law and the health safety standard in post industrial society. Молодёжь в постиндустриальном обществе. Дюссельдорф-Саратов, АНО «Пресс-Лицей», 2013, с.62-74. <http://hsjournal.org/conference/youth001>
- [6] Chukova Yu.P.. Introduction to quantum thermodynamics of nonequilibrium isothermal processes. Moscow. Megapolis, 2018, 480 pp
- [7] Бурлакова Е.Б.. Особенности действия сверхмалых доз биологически активных веществ и физических факторов низкой интенсивности. Российский химический журнал (Журнал российского химического общества им. Д.И. Менделеева), 1999, т. XLIII, № 5, с.3-11.

RADIATION HORMESIS AND HYGIENIC STANDARDS OF SAFETY IN LIGHT OF FUNDAMENTAL PHYSICAL LAWS

Yu.P. Chukova

The Moscow Society of Researchers of Nature
Krasnopresnenskiy Ecological Fund, Moscow, Russia
y.chukova2015@yandex.ru; y.chukova@mtu-net.ru

Hygienic standards of safety are the regulatory framework of radiation protection. It is a social decision, and therefore may be different in different countries. Its natural-scientific basis is the dose-effect dependence obtained in the experiment. On the basis of this dependence, it was initially thought that the harmful effect increases linearly with the dose and any arbitrarily small doses are dangerous. The second (threshold) theory argued that there is a threshold above which all doses are dangerous, and effects are absent below the threshold. The discovery of radiation hormesis is contrary to both theories [1-3]. The aim of my paper is to explain this situation.

Quantum thermodynamic of irreversible processes developed in the second half of the 20th century brought clarity to the situation with hormesis [1-3]. U-shaped dose-effect dependence is a general phenomenon for different materials and systems and were observed in different frequency regions of electromagnetic radiation (for example, MM radiation) and in chemical reactions. Thus, the method used in my work is the opposite to the method employed by narrow specialists dealing with the problems of α -, β -, and γ - radiation and radiation safety.

Quantum thermodynamic of irreversible processes divided all interactions with the environment into two categories. At one case the temperature T of system is constant, and at second case the entropy S of system is constant. These two types of conservation determine the two types of interaction of the system with the environment. Thus, the silence interval of the system with increasing exposure to it indicates changes in the system itself, allowing it to exist at very wide change in the intensity of α -, β -, and γ - radiation affecting it.

In thermodynamics, there is no concept of harmfulness, so the above thermodynamic laws are equally valid for both harmful and for useful processes. The amazing fact of the beneficial effect of low doses of gamma radiation has attracted the attention of not only scientists but also businessmen. Their tasks did not coincide, but funding was provided. That is the historical significance of the term "hormesis". It gave the opportunity to attract attention and money to the study of the influence of small doses. As a result, the question of hygienic safety standard received a clear answer, but not on the example of gamma radiation, rather on the example of millimeter radiation (microwaves) [2].

Up-to-date standards of hygienic safety are standards for strong exposure and are usually relevant for professional staff and occupational diseases. Those standards which are based on weak effects are relevant to the population. This standard was adopted in the 70s in the USSR and is still valid in Russia for microwave radiation [3].

With regard to gamma radiation, experimenters working in this field have yet to make experiments on the basis of which the existing safety standards can be changed.

- [1] Chukova Yu P. Advances in nonequilibrium thermodynamics of systems under electromagnetic radiation. Moscow, Khrizostom, 2001, 116 pp.
- [2] Chukova Yu P. Thermal vs. nonthermal effects. The Devaytkov law and the health safety standard in post-industrial society. Молодёжь в постиндустриальном обществе. Дюссельдорф-Саратов, АНО «Пресс-Лицей», 2013, с.62-74.
<http://hsjournal.org/conference/youth001>
- [3] Chukova Yu P. Introduction to quantum thermodynamics of nonequilibrium isothermal processes. Moscow. Megapolis, 2018, 480 pp

IZAZOVI U ZAŠTITI OD ZRAČENJA

KEY CHALLENGES IN RADIATION PROTECTION

DOSE PROJECTION CAPABILITIES FOR OPERATION OF KRŠKO NUCLEAR POWER PLANT

Borut Breznik¹, Primož Mlakar², Marija Zlata Božnar², Marjan Pavlin¹

¹NEK, Krško, Slovenia

²MEIS, Grosuplje, Slovenia

borut.breznik@nek.si

marija.zlata.boznar@meis.si

INTRODUCTION

Expert system for dose projection (ESDOS) for the diagnosis and prognosis of doses for the population in the environment is presented in this paper as it is currently designed for the operational releases and for the case of radiological accident releases.

During the last decades, Krško Nuclear Power Plant (NPP) has established ecological information system (EIS) connected to the environmental radiation system (ER) and plant radiation monitoring system (RMS). The ESDOS is the result of multi-annual development at Krško NPP. The basic version started to operate in 1997 [1]. The upgrades were required from experiences during the operational use of the system in Krško NPP and also from the research work. Fields of experiences include dose assessment, radiation protection, emissions estimation, and dispersion modelling with meteorological monitoring.

Using the ESDOS, the user can get all the necessary information to calculate or best estimate the doses of the population living in the villages and towns in the surroundings of the Krško NPP. The strategy was to start with the lowest possible uncertainties in radioactivity determination and in effluent air dispersion calculation. The later requires state of the art air dispersion model. In addition, the programme has to run continuously to be available in case of emergency in a user friendly way.

Meteorological measurements at the site are capable of providing vertical wind and atmospheric temperature profiles with the height. These data are necessary for accurate reconstruction of 3D wind field in Krško basin for dispersion modelling. The diagnostic capabilities of the system are based on Lagrangian particle model and the programme calculates relative concentrations every half an hour. These have been automatically calculated and stored since year 2002. In 2014, the prognosis was added to forecast the dispersion as well as population doses during normal plant operation or accidental release for the distance up to 12.5 km from the plant.

The system programme results are available on the computer primarily at the location of Krško NPP and at the locations of the support centres. They are used in case of emergency and drills. One programme is installed on the lap-top in the radiological mobile laboratory having access to the meteorological data through the internet.

METHODOLOGY

The challenge is to provide an expert tool for the decision makers in case of nuclear emergency and this tool should be technically relevant, validated and user friendly as much as possible to provide a reliable result almost within a real time or as a forecast. The real advantage of the ESDOS is that atmospheric modelling is established automatically in real time and to have a prognosis of dispersion available. Another advantage is to have activity calculation in the reactor in real time for about 50 radionuclides which have been screened and selected based on their dispersion significance and contribution to the internal or external dose. Besides the monitoring data of the environment and radioactive effluent or post-accident radiation in the containment, there are also some other plant's parameters available

for a quick accident assessment. It is necessary for a user to have a broader technical knowledge in nuclear power plant and also a specific radiation protection expertise.

The system and the methodology behind it include nuclear/radiation physics related to radionuclide production and of atmosphere monitoring and meteorological modelling. The authors work in the professional or scientific fields dealing either with the radiation, source term calculations, or with atmosphere measurements and modelling system.

The system provides results of dose projection in the environment using:

- diagnosis and prognosis of meteorological conditions with air pollution dispersion of the atmosphere, and characteristics of the terrain around the plant;
- diagnosis of the plant conditions based on the radiation measurements and supporting information;
- definition of radionuclides release source term based on reactor power follow up and calculation of the reactor core activity in real time;
- continuous radioactive effluent monitoring by radiation monitors;
- dose projection module;
- pre-calculated accident release scenarios of plant probabilistic safety assessments or regulatory defined release source terms.

Diagnosis and prognosis of radioactivity dispersion in atmosphere

The processes of calculation of relative concentrations (dilution or dispersion coefficients) are automated to the highest possible degree of operation and run in real-time. The diagnostic mode using meteorological measurements is in operation since end of 2002 [2]. Five years ago, automated calculation of prognosis for the future (up to seven days in advance) was added – forecasting dilution coefficients [3]. Using diagnostic or forecasting mode, the operator can visualise and use in different ways time sequence results of pre-calculated dilution coefficients for the whole spatial domain.

The meteorological data include acoustic wind profiling (sonic detection and ranging – SODAR) and radio acoustic sounding system (RASS) measurements at the site. These measurements are capable of providing vertical wind and atmospheric temperature profiles with the height, and are necessary for accurate reconstruction of wind field in the area around the plant and for dispersion modelling. In addition, there are 4 ground level meteorological stations in the surroundings. The plant receives from an outside organisation, MEIS, d.o.o., a fine resolution, small scale meteorological forecast for seven days. The modelling area of 25 km × 25 km is set over the terrain. Numerical Lagrangian particle model developed by Arianet [4] was installed, and it was also validated in Slovenia [5]. Meteorological forecast was validated using on site measured data.

Diagnosis of plant conditions

One of main parameters for radiological diagnosis of the accident is the radiation in the reactor containment. There are several monitors installed capable of monitoring the release into the containment also in the most severe conditions. Input data of radiation monitors' response to evaluate reactor core damage or in-containment release were prepared in advance [6]. There are also other indications available in parallel such as pressure, temperature, water levels, and operation of some safety systems to allow heat removal. There are several release points possible and different filtering capabilities of each of them are taken into account. The active filtering systems include charcoal filter beds and HEPA filters. After Fukushima accident, the plant installed passive containment filtering system for high pressure release from the containment. This system is capable of filtering almost all radioactive caesium and iodine and protects the environment from the pollution or minimizes the doses to the population in case of extreme and beyond-design basis conditions as set initially by nuclear regulators and designers.

Diagnosis of plant conditions is possible automatically on-line using containment radiation monitors and the thermocouples above the reactor core. The ESDOS receives some other relevant data from plant process information system (PIS). The user can verify the parameters according to actual situation and has a possibility for consideration or manual correction of the automatic results before they are taken into further calculation. Also, the accident evaluation related to the projection of the release source term is possible either on-line being directly connected to plant status parameters or off-line with manual data input.

This diagnosis is a help to the user in his evaluation of the situation. The aim is to track and define the radionuclides having a potential to be released.

Radionuclides follow-up based on reactor power

To determine radioactivity before the release, the system uses reactor power measurement and an algorithm for calculation of instantaneous radioactivity of about 50 important radionuclides and their pre-calculated steady state activity. Calculation procedures were derived for the response of radionuclides' activities to reactor power changes [6]. Steady state activities are taken into account for different reactor core burn-ups. The equations and calculations were also verified.

The safety study [7] showed that the following chemical forms of fission products are possible: noble gases, CsI, TeO₂, SrO, MoO₂, CsOH, BaO, La₂O₃, CeO₂, Sb, Te₂, UO₂, Ag, CH₃I, and I₂. Some of their physical characteristics have an important role in case of release, namely their volatilities and fission yields. In addition, their dose impact is another factor to be considered. The number of radionuclides produced in the reactor core is quite abundant (NEA, ORIGEN) [8]. Therefore, for running the ESDOS, it was necessary to provide a list of important radionuclides according to their specific dose effects and their effective radiotoxicity. The limited number of radionuclides and their contribution to the dose effect has been prepared and installed for further processing and more transparent presentation within the ESDOS.

Another module of the ESDOS has been introduced for follow-up of the radionuclides relevant for the release in the spent fuel pool [9] and therefore for dose assessment in case of the release from the spent fuel during refuelling operations or after the refuelling.

Dose projection module

The overall computer programme is designed to provide the dose projection of the population around the plant. The modules are designed to fulfil diagnosis of the radioactivity and the environmental conditions before the release. These modules with a few options are:

- accident assessment with necessary automated or manual inputs;
- containment or gas decay tank batch sampling data with manual input of the radionuclides;
- effluent monitors information with automatic or manual input;
- spent fuel radioactivity and projection module;
- release source terms based on safety analysis;
- release pathway definition with manual selection of filtering design options;
- air dispersion automated input with manual selection of either history, diagnosis, or prognosis option;
- different dose presentations with a possibility of presenting input data;
- module for setting the parameters regarding nuclear fuel and accident related source term data; and user "help" module.

The results are presented in 2D over the map of the domain. It includes several options such as pre-prepared maps of geographical information system, calculation of distance from the plant, colour coding of calculated integrated dose of the release and a few days of ground

shine on the map, or with actual dose rate information provided by the environmental monitoring system. An example is showed in Figure 1. It is also possible to present time dependant decay of selected radionuclides, tables with dose contribution of different groups of the radionuclides, averted dose, and main input data having influence on the dose calculation.

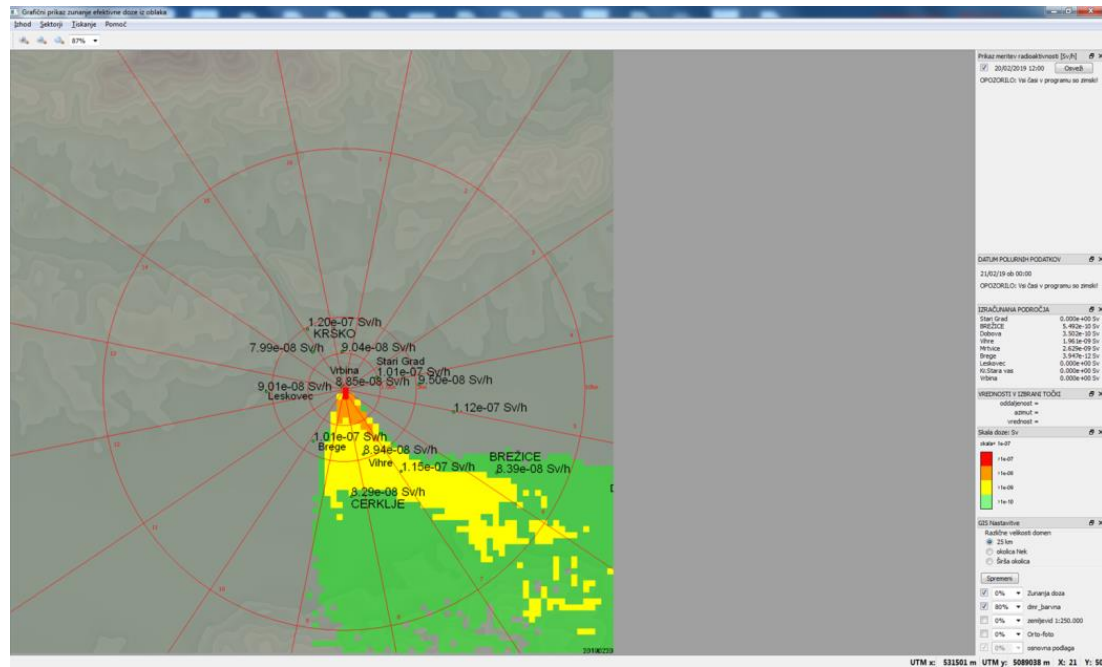


Figure 1: Example of the ESDOS result: dose calculated in 2D map for a ventilation release scenario. (Note that there are readings of environmental radiation monitors in the background).

An additional description of the modules is available in the literature [10]. Different parts of the system are automated and measurements are available online. Diagnosis and forecast are pre-calculated for every half-hour (24/7) and stored in database. All these data are available for final dose estimation.

Standard pre-calculated accident release scenarios

The plant performed the probabilistic safety review on accident release scenarios and different release source terms have been described [11]. These are also input data to have an additional analytical option. It is useful in the cases when automated measurements are not available. Two typical scenarios with a higher probability frequency in case of Krško NPP (compared to the other scenarios such as ones with containment failure) are:

- in-containment release from the reactor core with intact containment (almost no release to the environment, only due to design basis containment leakage), having probability frequency $PF = 9.25 \times 10^{-6} \text{ y}^{-1}$ (21.5 % of PF of all possible scenarios);
- filtered release from the containment through the passive filtering system (PCFVS), having $PF = 3.01 \times 10^{-5} \text{ y}^{-1}$ (69.8 % of PF of all possible scenarios).

There are ten pre-calculated plant cases available altogether in the ESDOS taking into account a total release within 48 hours. In addition, there is also a highest release source term based on the scenario as prescribed by the standard NUREG-1465 (Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants, U.S. NRC, 1995). The data of specific release source terms include different amounts of noble gases, volatile and non-volatile elements or their chemical forms.

CONCLUSIONS

The expert system for dose projection has been built to enable diagnosis and prognosis of meteorological conditions with air pollution dispersion in the atmosphere, evaluation of the plant conditions based on the radiation measurements and supporting information and definition of radionuclides source term based on reactor power follow up or using radioactive effluent monitoring. The system provides user friendly dose projection in case of normal plant operation or an emergency, and a possibility of analysing pre-calculated accident release scenarios in real time by using actual meteorological conditions.

Acknowledgement

The authors would like to thank the staff of the Krško NPP who is supporting the operation of the ESDOS and the management who assured the resources for the development of the system. The MEIS authors acknowledge that one part of overall research work (“Method for the forecasting of local radiological pollution of atmosphere using Gaussian process models”, ID L7-8268) was financially supported by the Slovenian Research Agency.

REFERENCES

- [1] Breznik B, Božnar MZ, Mlakar P, Tinarelli G. Dose projection using dispersion models. *International journal of environment and pollution*, ISSN 0957-4352, Geneva: Interscience Enterprises. 2003;20/1-6:278-285.
- [2] Mlakar P, Božnar MZ, Breznik B. Operational air pollution prediction and doses calculation in case of nuclear emergency at Krško Nuclear Power Plant. *Int. J. Environ. Pollut.* 2014;15:184-192. <http://dx.doi.org/10.1504/IJEP.2014.065119.54>
- [3] Mlakar P, Grašič B, Božnar MZ, Breznik B. Online relative air dispersion concentrations one week forecast for Krško NPP prepared for routine and emergency use. In: Jenčič, I. (Ed.), 24th International Conference Nuclear Energy for New Europe - NENE 2015, Portorož, Slovenia. Nuclear Society of Slovenia, Ljubljana, 2015. pp. 601-602.
- [4] Tinarelli G, Anfossi D, Trini Castelli S, Bider M, Ferrero E. A new high performance version of the Lagrangian particle dispersion model Spray, some case studies. In: Gryning S-E, Batchvarova E. (Eds.), *Air Pollution Modeling and its Application XIII*. Springer US, Boston, MA, 2000.pp. 499-507.
- [5] Grašič B, Mlakar P, Božnar MZ. Method for validation of Lagrangian particle air pollution dispersion model based on experimental field data set from complex terrain. In: Nejadkoorki DF. (Ed.), *Advanced Air Pollution*. INTECH Open Access Publisher, 2011. pp. 535-556. <http://dx.doi.org/10.5772/17286>.
- [6] Breznik B. Activity calculation for DOZE computer programme, bases and verification, Krško NPP Report, DCM-RP-093, 2012. Rev-1.
- [7] IPE - Individual Plant Examination of Krško NPP, Level 2 report, Vol.3, Source Term Notebook, WENX/94/42, NEK-Westinghouse Report, 1994.
- [8] NEA. Nuclear Energy Agency. ORIGEN-JR, Radiation Source and Nuclide Transmutation with In-Core Burnup. (<http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/nea-0622/>).
- [9] Breznik B, Pirc M, Mlakar P. Dose Projection Software for Assessment of Spent Fuel Activity, NENE, 25th International Conference Nuclear Energy for New Europe, Portorož, Slovenia, Nuclear Society of Slovenia, Ljubljana. 2016.
- [10] Mlakar P, Božna, MZ, Grašič B, Breznik B. Integrated system for population dose calculation and decision making on protection measures in case of an accident with air emissions in a nuclear power plant. *Sci. Total Environ.* in press, 2019;15.
- [11] Manojlović S, Špalj S, Pirc M, Breznik B. Krško NPP Report, NEK ESD-TR-01/15, 2016. “Opis izpustnih kategorij z radionuklidno sestavo”.

DOSE PROJECTION CAPABILITIES FOR OPERATION OF KRŠKO NUCLEAR POWER PLANT

Borut Breznik¹, Primož Mlakar², Marija Zlata Božnar², Marjan Pavlin¹

¹NEK, Krško, Slovenia

²MEIS, Grosuplje, Slovenia

borut.breznik@nek.si

marija.zlata.boznar@meis.si

For about two decades, Krško NPP has been using dose projection module in the field of airborne dispersion calculation and estimation of consequences in case of emergency. The software capabilities and monitoring features have been upgraded during the last years. The dose projection module is now capable of assessing radioactive source term before the release based on reactor core activity calculation or taking into account relevant measurements of effluent monitors or pre-calculated accident scenarios.

The system is designed to deal with challenges in case of emergency situation. The meteorological data include acoustic wind profiling and radio acoustic sounding system measurements. In addition, there are 4 ground level meteorological stations in the surroundings. The plant receives from an outside technical organisation a fine resolution, small scale meteorological forecast for seven days in half hour intervals. The air pollution dispersion modelling area of 25 km × 25 km is set over the complex terrain. Validated numerical Lagrangian particle model is used. Different parts of the system are automated as much as possible. Measurements are available online. Diagnosis and forecast up to 7 days in advance of air pollution dispersion is automatically pre-calculated for every half-hour (24/7) and stored in database. All these data are available to the user for final dose estimation.

Health physicist or a user can model release parameters according to actual situation. The dose projection is possible either on-line being directly connected to plant status parameters or off-line with manual data input. Also, a history of meteorological measurements enables analysing the impact of gaseous effluents over actual local weather data.

PRVIH 40 GODINA HRVATSKOG DRUŠTVA ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA I IZAZOVI BUDUĆNOSTI

Ines Krajcar Bronić, Maria Ranogajec-Komor, Saveta Miljanić, Željka Knežević
Institut Ruđer Bošković, Zagreb
krajcar@irb.hr

UVOD

Hrvatsko društvo za zaštitu od zračenja (HDZZ) osnovano je 1979. godine kao neprofitna udruga sa svrhom promidžbe i razvoja znanstvenih, obrazovnih i kulturnih aktivnosti u području zaštite od zračenja i znanosti o zračenju. Najprije je djelovalo unutar Jugoslavenskog društva za zaštitu od zračenja (JDZZ), koje je osnovano u Portorožu 1963. godine i u kojem je većina članova novoosnovanog društva već djelovala. Međunarodno društvo za zaštitu od zračenja (IRPA – *International Radiation Protection Association*, www.irpa.net) osnovano je 1965. godine, a JDZZ mu se pridružuje već 1969. godine. IRPA je tada imala 17 društava-članova iz 22 zemlje [1]. Od samostalnosti Republike Hrvatske HDZZ djeluje samostalno i od 1992. je punopravni član IRPA-e. HDZZ je jedno od prvih hrvatskih strukovnih društava koje je primljeno u neko međunarodno udruženje. Ove godine obilježavamo 40. obljetnicu osnivanja Društva. Godine 2009. obilježili smo 30. obljetnicu HDZZ-a [2], a obilježavanju 50 godina organizirane zaštite od zračenja u regiji bio je posvećen 9. simpozij HDZZ-a (Krk, 2013) na kojem je detaljno opisana povijest HDZZ-a [3] te ćemo se stoga ovdje više posvetiti sadašnjim aktivnostima Društva i osvrnuti se na izazove budućnosti koji stoje kako pred Društvom tako i pred područjem zaštite od zračenja.

PROŠLOST I SADAŠNJOST

HDZZ okuplja znanstvenike i stručnjake iz različitih područja znanosti, medicine, primjene, industrije, regulatornih tijela itd. Preko 200 znanstvenika i stručnjaka iz cijele Hrvatske članovi su Društva, a od toga više od polovice sudjeluje u svakodnevnim aktivnostima. Društvo je interdisciplinarno, kao što je i samo područje znanosti o zračenju i zaštite od zračenja interdisciplinarno. Tako su članovi društva fizičari i kemičari, biolozi, medicinski (liječnici, osobito radiolozi) i zdravstveni radnici (odnedavno medicinski fizičari i klinički inženjeri, radiološki tehnolozi) koji koriste razne vrste zračenja u dijagnostici i radioterapiji. HDZZ daje kontinuiranu podršku medicinskim fizičarima i kliničkim inženjerima u njihovom nastojanju da im se prizna status zdravstvenih djelatnika, što je uspješno ostvareno 2018. godine. Posebna se pozornost posvećuje mjerenju radioaktivnosti u okolišu i proučavanju utjecaja radioaktivnosti na čovjeka i njegov okoliš (radioekologija). Također, 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.

Od 2009. godine časopis *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju* (dostupan je na <http://hrcak.srce.hr/aiht>) je službeno glasilo HDZZ-a u kojem se uz redovne znanstvene i stručne članke najavljuju i prikazuju aktivnosti Društva.

Jedna od najvažnijih zadaća HDZZ-a je organizacija i održavanje nacionalnih simpozija s međunarodnim sudjelovanjem, u pravilu svake druge godine. Simpoziji Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja jedinstvena su prilika susreta znanstvenika i stručnjaka različitih profila kojima je poveznica zračenje, odnosno znanost o zračenju i zaštita od zračenja. Svaki simpozij bio je praćen tiskanjem zbornika radova, a od 9. simpozija sudionici dobiju i memorijski USB štapić. Elektroničke verzije zbornika od 8. simpozija nadalje mogu se pronaći i na internetskim stranicama www.hdzz.hr koje su obnovljene nakon 11. simpozija u Osijeku. Svaki simpozij imao je uvodna ili pozvana predavanja, odnosno na neki način

posebno izdvojene teme kojima su se pratili aktualni svjetski događaji i obilježavale obljetnice važne za zaštitu od zračenja općenito (npr., stotinu godina zaštite od zračenja, deset godina nesreće u Černobilu, nesreća u Fukushima 2011.) kao i one važne za zaštitu od zračenja u Hrvatskoj (npr., sudjelovanje članova HDZZ u radu Jugoslavenskog društva za zaštitu od zračenja, sudjelovanje članova HDZZ-a na regionalnim i svjetskim kongresima IRPA-e, 50 godina organizirane zaštite od zračenja u regiji) [4]. 11. simpozij bio je posvećen etici i kulturi zaštite od zračenja [5], a ovaj, 12. simpozij, okreće se budućnosti i izazovima koji stoje pred nama.

Uz sudionike iz Hrvatske, na skupu redovno sudjeluju i kolege iz inozemnih društava za zaštitu od zračenja, ukazujući tako na potrebu za međunarodnom razmjenom iskustava i znanja u ovom interdisciplinarnom području koje ne poznaje državne granice.

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 (Austrija, Češka, Mađarska, Poljska, Rumunjska, Slovačka, Slovenija, Srbija i Crna Gora), kao i sa stručnjacima iz zemalja u regiji koje nemaju nacionalno udruženje (Bosna i Hercegovina, Sjeverna Makedonija, Kosovo).

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*) te je organizirao regionalni kongres o zaštiti od zračenja u centralnoj Europi s temom "*Radiation Protection and Health*" (Zaštita od zračenja i zdravlje) u Dubrovniku 2001. godine, na kojem je sudjelovalo 229 znanstvenika i stručnjaka iz 29 zemalja sa 180 priopćenja [3].

Članovi Društva sudjeluju u radu IRPA-e u cjelini, a posebno u grupi europskih pridruženih društava od samog početka neformalnih sastanaka 2004. godine. Redovni sastanci europskih društava za zaštitu od zračenja pridruženih IRPA-i (*European IRPA Associate Societies*) održavaju se svake godine i predstavnici HDZZ-a sudjelovali su na svakom od njih. HDZZ je organizirao 6. sastanak 2009. godine u Zagrebu, a dobili smo čast da organiziramo i 16. skup ove godine (2019.) ponovno u Zagrebu.

Europska društva su pokrenula inicijativu za poticanje mladih znanstvenika i stručnjaka na području zaštite od zračenja i znanosti o zračenju. Usuglašeni su kriteriji za raspisivanje nacionalnih natječaja za najbolji rad (znanstveni ili stručni rad ili disertacija) mladih znanstvenika i stručnjaka do 35 godina starosti u dvogodišnjem razdoblju koje prethodi velikim europskim ili svjetskim kongresima IRPA-e. Ustanovljena je nagrada za mlade *Young Scientists and Professionals Award* (YSPA) koja se dodjeljuje na tim kongresima najboljem mladom predstavniku nacionalnog društva za zaštitu od zračenja od 2010. godine. HDZZ je 2009. raspisao prvi natječaj, a nakon toga još 4 natječaja 2011., 2013., 2015. i 2017. godine, ali su nagrade dodijeljene samo na prva 3 natječaja, dok na posljednja dva nije bilo prijavljenih kandidata.

Prvi sastanak mladih članova HDZZ-a (do 35 godina starosti) održan je 16. siječnja 2018. godine. Sudjelovalo je 11 sudionika koji su održali 10 predavanja na osnovu kojih su dogovorene neke formalne i neformalne suradnje. Zaključeno je da je vrlo korisno da se mladi redovito sastaju i predloženo je da to bude svake 2 godine te da se na redovnim simpozijima HDZZ-a organizira druženje mladih članova Društva. Istaknut je problem visokih kotizacija za svjetskim i europskim kongresima IRPA-e čak i za mlade predstavnike svojih društava koji sudjeluju u natjecanju mladih za nagradu YSPA.

IZAZOVI BUDUĆNOSTI

U narednom razdoblju HDZZ će nastaviti i poboljšavati suradnju sa srodnim stručnim društvima u Hrvatskoj. Zasad je najaktivnija suradnja uspostavljena s Hrvatskim društvom za biomedicinsko inženjerstvo i medicinsku fiziku. Nekada vrlo intenzivna suradnja s Hrvatskim društvom radiologa je pomalo zamrla te bi ju trebalo obnoviti.

Raditi će se također na poboljšavanju suradnje među srodnim društvima u regiji koja se zasad zasniva na razmjeni sudjelovanja na nacionalnim simpozijima, a izazov bi svakako predstavljala zajednička organizacija skupa od regionalnog značenja. Organizacija nacionalnog simpozija HDZZ-a treba se dalje nastaviti uz poticanje većeg sudjelovanja naših kolega iz Europe. Također treba nastaviti raditi na uključivanju mladih (i srednje generacije) u organizaciju takvih skupova, i u vodeća tijela Društva.

Svojim djelovanjem u međunarodnoj zajednici posvećenoj zaštiti od zračenja članovi HDZZ-a podižu i međunarodni ugled Društva u Europi i svijetu. Kako bi se to ostvarilo, potrebno je uključivati se u aktivnosti IRPA-e, npr. u različite grupe (*Task groups*) u organizaciji IRPA-e. Imenovali smo predstavnika Društva u grupu za sigurnost izvora i u Grupnu za neionizirajuća zračenja (*IRPA Task Group on Non-ionizing Radiation*) i imali smo predstavnicu u grupi za očnu leću (*IRPA Task Group on the Impact of the Eye Lens Dose Limits*). Ovakve aktivnosti zahtijevaju i određena financijska sredstva i nadamo se da će HDZZ i dalje poslovati uspješno i na financijskom planu. I tu trebamo između ostalog pomoć članova Društva koji doprinose redovnim plaćanjem (još uvijek niske) članarine i sudjelovanjem u radu simpozija u organizaciji HDZZ-a.

Sudjelovanje članova Društva na europskim i međunarodnim kongresima postalo je veliki izazov, prvenstveno iz financijskih razloga. Naime, kotizacije za sudjelovanje na svjetskim i europskim kongresima postale su izrazito visoke, kongresi se organiziraju u skupim gradovima, a često su i daleko od Hrvatske, pa se ukupni troškovi sudjelovanja na takvim kongresima vrtoglavo penju. Trend porasta kotizacije i ukupne cijene sudjelovanja na velikim kongresima, doveo je do smanjenja broja sudionika iz Hrvatske, pa tako na 5. Europskom kongresu IRPA-e u Haagu 2018. godine nije bilo naših predstavnika, a najvjerojatnije neće biti ni u Seulu (Koreja) na svjetskom kongresu IRPA-e 2020. godine. Zajedno s ostalim „malim“ europskim društvima upozoravali smo predstavnike IRPA-e na taj problem i na realnu mogućnost da se kongresi IRPA-e pretvore u skup najbogatijih zemalja i društava. Nadu u promjenu ulijeva organizator 6. Europskog kongresa IRPA, u Budimpešti 2022. godine. Najavljena su umjerena kotizacija i pristupačne cijene smještaja, a ni put do Budimpešte ne bi smio predstavljati poseban izazov.

Od 2017. godine pokrenuta je nova internetska stranica www.hdzz.hr, a jedan od izazova za buduće generacije je otvaranje profila Društva na društvenim mrežama, kako bi se ubrzala i poboljšala komunikacija među članovima. Poseban izazov u svim društvima za zaštitu od zračenja predstavlja komunikacija i interakcija s javnošću, te povećanje prisutnosti Društva u medijima sa svrhom informiranja javnosti o različitim stručnim pitanjima. Trebali bismo imati uvijek imati kompetentne osobe zadužene za komunikaciju s javnošću (PR, *public relation*) koje će se uključivati u odgovarajuće teme kojih uvijek ima i za koje postoji zanimanje javnosti te davati priopćenja za javnost zasnovana na znanstvenim i stručnim činjenicama u nekim kriznim situacijama. Možda i organizirati tribine o aktualnim temama, a tu bi suradnja sa srodnim društvima u zemlji zasigurno pomogla. Radioaktivnost, zračenja i zaštita od zračenja često nisu dovoljno jasno predstavljene javnosti i često dolazi do nerazumijevanja i iracionalnog odbijanja bilo kakvih inicijativa uz samo spominjane tih riječi zbog nepoznavanja znanstvenih činjenica.

S druge strane, zahtjevi za radiološkim dijagnostičkim postupcima rastu iako nisu uvijek medicinski indicirani i opravdani. Kako bi korist od radiološkog snimanja nadmašila rizike povezane s izloženošću ionizirajućem zračenju nužno je koristiti načela opravdanosti i optimizacije. Vrijedno je spomenuti kako je Hrvatska među prvima u Europi prevela europske smjernice za opravdanost radioloških pretraga “*e-Guide*”, kao sastavnicu sustava potpore kliničkoj dijagnozi (CDS - *clinical decision support*), o čemu govori rad [6] iz ovog Zbornika radova. Zaštita od zračenja i posebno kultura zaštite od zračenja se trebaju shvatiti i prihvatiti kao dio opće kulture sigurnosti [7,8].

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 svjetskom kongresu IRPA-e u natjecanju za YSPA. Ranije je spomenuto da se na natječaj raspisane 2015. i 2017. godine nije prijavio nijedan kandidat. Ove godine se ponovno raspisuje natječaj i nadamo se da će se prijaviti barem jedan kandidat, jer je Upravni odbor HDZZ-a odlučio da pobjednik dobije trostruku nagradu (kumulativni namjenski iznos iz prethodnih nekonzumiranih natječaja) kako bi mu se olakšalo predstavljanje HDZZ-a na kongresu u Seulu. Ipak, zbog visokih ukupnih troškova sudjelovanja na kongresu vidimo ovdje veliki izazov! HDZZ je i u ovom slučaju, zajedno s drugim „malim“ europskim društvima, ukazivao na problem visokih kotizacija za sudjelovanje na međunarodnim kongresima IRPA-e čak i za mlade koji sudjeluju u natjecanjima YSPA. Predlagali smo da se mladim natjecateljima odobri znatno sniženje kotizacije, ili da ih se potpuno oslobodi plaćanja kotizacije, što nije bilo najbolje primljeno od strane organizatora skupa. Za sudjelovanje mladih natjecatelja na 5. europskom kongresu IRPA-e 2018. godine organizator je ipak odobrio nešto nižu kotizaciju, ali je odluka donesena prekasno za mnoge mlade sudionike.

„Pomlađivanje“ društva nije samo problem HDZZ-a nego i drugih društava u sastavu IRPA-e pa IRPA posebnu pozornost posvećuje uvođenju mladih stručnjaka i znanstvenika u sve svoje aktivnosti, organizira se posebna mreža unutar IRPA-e *Young Generation Network*, nastoji se osigurati članstvo predstavnika mladih u Upravnom odboru (*Executive Council*) IRPA-e. I našem Društvu predstoji izazov nove mlade generacije – kako zaposliti mlade stručnjake u području zaštite od zračenja i znanosti o zračenju, kako spriječiti odlazak mladih stručnjaka iz zemlje, kako pridobiti mlade stručnjake da se aktivno uključe u rad Društva. Potrebno je imati kritičnu masu kako bi se organizirala sekcija mladih, a odlazak članova iz te dobne skupine (do 35 godina starosti, ili prvih deset godina karijere u području zaštite od zračenja) potrebno je nadoknaditi dolaskom mlađih koji u zajedničkom djelovanju unutar HDZZ-a vide svoju budućnost i profesionalni izazov.

Ukidanje Državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS) kao samostalne ustanove i pripajanje osoblja i aktivnosti Ministarstvu unutarnjih poslova (MUP) zasad predstavlja problem prvenstveno u međusobnoj komunikaciji. Jedan od većih izazova već sada i u neposrednoj budućnosti bit će ostvarenje suradnje HDZZ-a i MUP-a, barem na razini kakvu smo ostvarili s DZRNS-om. Posebno trebamo imati aktivnu ulogu u implementaciji europskih dokumenata, te je jedan od izazova budućnosti i aktivnije djelovanje HDZZ-a kao stručne i interdisciplinarne organizacije u donošenju propisa vezanih za zaštitu od zračenja.

Prirodno zračenje je svuda oko nas i neizbježno je, te je i rizik (hipotetski ili epidemiološki) od prirodnog zračenja sastavni dio života [8]. Ta neizbježna izloženost prirodnom zračenju predstavlja i prirodnu donju granicu za zaštitu od zračenja što se tiče smanjivanja doze i rizika. Smanjenje doprinosa izloženosti zračenju ispod prirodnih granica nije opravdano i razumno, predstavlja neopravdano trošenje resursa i povećava ionako neopravdan/iracionalan strah od zračenja u široj javnosti [8]. Optimizacija je jedan od osnovnih principa na kojima se zasniva zaštita od zračenja, ali i ona treba imati (donju) granicu: smanjivanje doze ispod 0,1 mSv/god za opću populaciju (ispod 1 mSv/god za izložene radnike) ne smatra se razumnim u praksi operativne zaštite od zračenja [8].

Radon i njegovi kratkoživići proizvodi raspada u atmosferi najviše doprinose ozračenju (ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi) cjelokupnog stanovništva, a ta činjenica predstavlja i nezanemariv zdravstveni problem. Utvrđena je referentna razina za radon u zatvorenim prostorima i provedena su mjerenja u nekoliko županije koja su pokazala da se unutar pojedinih županije mogu naći lokacije na kojima je koncentracija radona i po nekoliko puta viša od referentne razine. U Republici Hrvatskoj je donesen Akcijski plan za radon za

razdoblje 2019. – 2024. s ciljem smanjenja ozračenja ljudi radonom i smanjenjem rizika od pojave raka pluća. O Akcijskom planu i s njim povezanim izazovima govori rad [9].

Povijest nas je poučila da se nesreće mogu desiti iznenada, nenajavljeno, a uzroci mogu biti različiti. Sjetimo se samo najpoznatijih akcidenata u nuklearnim elektranama u Černobilu 1986. godine i u Fukushima 2011. godine. Takve se nesreće nekada ne mogu spriječiti, ali je potrebno uspostaviti sustav monitoringa/praćenja radioaktivnosti koji će reagirati na povećanu radioaktivnost, što pred laboratorije postavlja novi izazov razvijanja i održavanja metoda koje će brzo i pouzdano dati odgovor postoji li povišeni nivo zračenja.

UMJESTO ZAKLJUČKA

Ovdje navedeni izazovi koji stoje pred područjem zaštite od zračenja općenito kao i pred Hrvatskim društvom za zaštitu od zračenja zasigurno ne predstavljaju potpuni spisak svih mogućih izazova u budućnosti, već samo one koje smo u sadašnjem trenutku prepoznali. Navedeni izazovi ukazuju da je područje zaštite od zračenja vrlo „živo“ i da pruža mogućnosti brojnim pojedincima da u njemu nađu svoj profesionalni interes.

Zahvala

Svim članovima HDZZ-a kao i svim sudionicima simpozija na brojnim i kvalitetnim priložima. Bez aktivnih članova ne bi bilo ni uspješnog Društva.

LITERATURA

- [1] <http://www.irpa.net/page.asp?id=111>
- [2] Krajcar Bronić I, Miljanić S. Hrvatsko društvo za zaštitu od zračenja – prvih 30 godina. U: Mjesta dodira: Fizika i medicina, Kroz život i djelo prof. dr. sc Bože Metzgera. Pećina M, Fatović-Ferenčić S, ur. Zagreb. HAZU; 2011. str. 127-139.
- [3] Krajcar Bronić I, Miljanić S, Ranogajec-Komor M. Hrvatsko društvo za zaštitu od zračenja: od Jugoslavije do Europe. U: Zbornik radova Devetog simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja, 10-12 travnja 2013; Krk, Hrvatska. Ur: Knežević Ž, Majer M, Krajcar Bronić I, ISBN 978-953-96133-8-7, Zagreb. HDZZ; 2013. Str. 14-25-
- [4] Krajcar Bronić I. Deset simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja 1992 – 2015. U: Zbornik radova Desetog simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja, 15-17. travnja 2015; Šibenik, Hrvatska. Ur: Petrincec B, Bituh T, Milić M, Kopjar N, ISSN 1849-5060, Zagreb. HDZZ; 2015. Str. 3-9.
- [5] Zbornik radova Jedanaestog simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja, 5-7. travnja 2017; Osijek, Hrvatska. Ur: Radolić V, Poje Sovilj M, Krajcar Bronić I. ISSN 1849-5060, Zagreb. HDZZ; 2017
- [6] Popić J, Slavica M, Kralik I. Moderni izazovi u opravdanosti radioloških snimanja. U: Zbornik radova 12. simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja, 10-12 travnja 2019; Varaždin, Hrvatska. Zagreb, HDZZ; 2019. str 53-56.
- [7] Popić Ramač J, Kralik I, Knežević Ž. Kultura zaštite od zračenja u medicini. U: Zbornik radova Jedanaestog simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja, 5-7 travnja 2017; Osijek, Hrvatska. Ur: Radolić V, Poje Sovilj M, Krajcar Bronić I. ISSN 1849-5060, Zagreb. HDZZ; 2017. Str. 15-26.
- [8] Michel R, Lorenz B, Völkle H. Radiation protection today – success, problems, recommendation for the future. Statement paper of the “Club of the Philosophers” of the German-Swiss Association for Radiation Protection. 2018. https://fs-ev.org/fileadmin/user_upload/09_Themen/Philosophen/Future_of_Radiation_Protection_20180921.pdf
- [9] Radolić V, Krča S, Poje Sovilj M, Babić D. Radonski akcijski plan u Republici Hrvatskoj. U: Zbornik radova 12. simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja, 10-12 travnja 2019; Varaždin, Hrvatska. Zagreb, HDZZ; 2019. str 57-63.

THE FIRST 40 YEARS OF THE CROATIAN RADIATION PROTECTION ASSOCIATION AND FUTURE CHALLENGES

Ines Krajcar Bronić, Maria Ranogajec-Komor, Saveta Miljanić, Željka Knežević
Ruđer Bošković Institute, Zagreb
krajcar@irb.hr

Croatian Radiation Protection Association (CRPA) was founded in 1979 and joined the International Radiation Protection Association (IRPA) in 1992. It was one of the first professional societies in independent Republic of Croatia that joined any of the the international associations. Therefore, this year at the 12th Symposium we celebrate the 40th anniversary. The past of CRPA has been reviewed and presented at the former symposia, so here we describe the present status of the society and some challenges that we expect to cope with both in CRPA and in the radiation protection area.

Members of CRPA are scientists and professionals from different fields of sciences, medicine, applications, industry, regulatory bodies. Special attention has been devoted to monitoring environmental radioactivity and studies of the influence of radioactivity on humans and the environment. Increasing use of ionizing radiation in medical procedures, both in diagnostics and in radiotherapy, make radiation protection in medicine extremely important.

The following key challenges have been recognized:

- improvement of cooperation among radiation protection societies in the region
- involvement in IRPA activities and task groups
- participation at international and regional IRPA congresses
- higher involvement of young generation into CRPA activities and constant rejuvenation of the society
- better communication with general public and more visible presence in media, define a person in charge for public relations
- accept and recognize radiation protection culture, especially in medicine, as a part of general safety culture
- better involvement in legal regulations and implementation of European Directives into the national legislation

The list of recognized challenges, although relatively comprehensive, is certainly not a complete list of future challenges to both the radiation protection in general and to the Croatian Radiation Protection Association. The recognized challenges prove that the radiation protection is a very vivid area that opens various opportunities to different scientists and professionals, including the young generation, for their professional accomplishment.

MODERNI IZAZOVI U OPRAVDANOSTI RADIOLOŠKIH SNIMANJA

Jelena Popić^{1,2}, Marko Slavica³, Ivana Kralik⁴

¹Medicinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

²Klinička bolnica Merkur, Zagreb

³Klinički bolnički centar Sestre milosrdnice, Zagreb

⁴Klinička bolnica Dubrava, Zagreb

popic.je@gmail.com

UVOD

Zadnjih nekoliko desetljeća najveći doprinos porastu broja pretraga, te značajnom povećanju ukupne doze izloženosti populacije zračenju bilježi se iz medicinskih izvora, među kojima prednjače radiološke dijagnostičke pretrage osobito kompjutorizirana tomografija (CT). Usprkos prepoznatim koristima od ionizirajuće medicinske dijagnostike, raste zabrinutost zbog porasta ekspozicijske doze, pogotovo doživotnog rizika za razvoj zračenjem induciranih sekundarnih karcinoma (poglavito karcinoma bronha, dojke i štitnjače) te leukemija. Uvažavajući znanstvene činjenice o porastu populacijskih doza zračenja najvećim dijelom iz medicinskih izvora potrebno je sustavno posvetiti veliku pažnju učinkovitoj zaštiti pacijenata od potencijalno neželjenih posljedica koje proizlaze iz medicinskog izlaganja ionizirajućem zračenju. Jednako je važno posvetiti pozornost zaštiti radnika i opće javnosti od povezanog profesionalnog i javnog izlaganja [1]. Medicinsko radiološko snimanje dokazano je bitna sastavnica moderne medicinske dijagnoze i liječenja koja i ako se provodi na odgovarajući način, pruža medicinsku korist koja nadmašuje rizike povezane s izloženosti zračenju. Kako bi korist nadmašila rizike nužno je koristiti načela opravdanosti i optimizacije, koja su u cijelosti primjenjiva na medicinsko izlaganje i za zaštitu pacijenata. Podaci govore o ekspanzijskom porastu broja radioloških pretraga [2]. Stoga se zadnjih godina u Europskom društvu radiologa naglašava kako je ponajprije potrebno osigurati primjenu načela opravdanosti. Isto se nastoji postići uključivanjem elektronskog sustava odabira prikladnih pretraga u bolnički informatički sustav. Također se nastoji i podići opću razinu svijesti o važnosti provedbe tih načela opravdanosti u nacionalnim zdravstvenim strategijama [3].

Opravdanost pretrage je pravo i odgovornost liječnika koji upućuje pacijenta na pretragu i onog koji tu pretragu radi. Stoga valja raditi na optimizaciji i interdisciplinarnom pristupu pacijentu kako bi se poštovala sve mjere radiološke sigurnosti. Republika Hrvatska kao država članica Europske unije u obavezi je definirati uloge i odgovornosti svih zdravstvenih djelatnika koji sudjeluju u procesu donošenja odluke o opravdanosti pojedinih pretraga [1]. Jednako tako nameće se i potreba ostvarivanja međudržavne suradnje na objavi kriterija i postupaka za medicinska snimanja asimptomatskih pojedinaca, osobito onih koji ne sudjeluju u programima zdravstvenog probira. Prospektivno, u budućnosti zbog stalnog napretka u tehnikama i opremi za medicinska radiološka snimanja potrebno je iznalaziti mjesto novih kategorija pregleda posebno u područjima programa probira (engl. *screening*).

Do danas su utemeljene kvalitetne i detaljne vodilje za opravdanost pojedinih radioloških postupaka: kao npr: “*ACR appropriateness criteria*”, “*European Commission Referral guidelines for imaging*”, “*European Society of Urogenital Radiology (ESUR) guidelines on contrast media*”. Pravila kojima se uređuje opravdanost pojedinih medicinskih radioloških snimanja dio su zakonodavstva Euratoma od 1980-ih. Smjernice i praktični savjeti o opravdanosti medicinskih radioloških snimanja već su mnogo godina dostupni diljem Europe, no njihova primjena nije jednako zaživjela u svim državama EU. Znatan dio medicinskih radioloških snimanja koja se obavljaju u Europskoj uniji možda nije potreban, što za posljedicu ima sve višu i neopravdanu razinu izloženosti pacijenata i povezane

izloženosti radnika i opće populacije. Direktiva Vijeća 2013/59/Euratom sadržava nekoliko odredbi primjenjivih na opravdavanje medicinskih radioloških snimanja, kao i o medicinskoj primjeni ionizirajućeg zračenja:

- 1) Direktiva Vijeća 80/836/Euratom od 15. srpnja 1980. o izmjeni direktiva kojima se utvrđuju osnovne sigurnosne norme za zaštitu zdravlja opće javnosti i radnika od opasnosti ionizirajućeg zračenja
- 2) Direktiva Vijeća 84/466/Euratom od 3. rujna 1984. o utvrđivanju osnovnih mjera za zaštitu od zračenja osoba koje se podvrgavaju zdravstvenom pregledu ili liječenju 14617/15 LT/md 4 PRILOG DGE 2B HR. (3,4)

Direktiva Vijeća 2013/59/Euratom, iako se temelji na prethodno utvrđenim načelima i uvjetima opravdanosti, optimizacije i ograničenja doze, sadrži važne promjene zbog kojih je učinjena revizija postojećih nacionalnih mehanizama 2018. godine.

Predanost Europske unije, Euratoma i njihovih država članica održanju visoke razine zaštite pacijenata, zdravstvenih radnika i opće javnosti, među ostalim poboljšanom provedbom načela opravdanosti nameće nam i obvezu primjene suvremenih dijagnostičkih smjernica (algoritama). Države članice pozvane su poduzeti odgovarajuće korake za podizanje razine svijesti zdravstvenih djelatnika i pacijenata [5,6]. U prvom redu podizanje razine svijesti o potrebi informiranja i organiziranja javnih kampanja u suradnji s nacionalnim zdravstvenim tijelima, a kako bi se olakšala i poboljšala pojedinačna opravdanja za medicinsko snimanje i potaknuo bolji dijalog o koristima i rizicima zračenja. Najvažnija mjera su pravilno utvrđene i redovito ažurirane te opće dostupne smjernice za upućivanje na medicinska snimanja, odnosno smjernice opravdanosti. Nakon toga potrebno je osigurati ispravnu provedbu nacionalnih smjernica i njihovo redovito kliničko revidiranje uzimajući u obzir savjete relevantnih medicinskih društava i nadležnih tijela. Opravdanost pretrage bi trebala postati izričit i sastavan dio standardne radiološke prakse [7]. Svi zdravstveni djelatnici stoga moraju proći odgovarajuće teorijsko i praktično osposobljavanje u svrhu medicinske radiološke prakse i primjena mjera zaštite od zračenja barem u elementu opravdanosti. Neophodno je uspostaviti odgovarajuće mehanizme za početno osposobljavanje i trajno usavršavanje tih zdravstvenih djelatnika kojima im se omogućuje ispunjavanje svoje odgovornosti za dobru zdravstvenu skrb u koju se uključuje odgovarajuća zaštita od zračenja [8,9].

HRVATSKA REALNOST

Općeniti je pristup u hrvatskoj kliničkoj praksi odraditi svaku zaprimljenu uputnicu bilo prema zahtjevu liječnika obiteljske medicine ili specijalista drugih kliničkih struka. Uz nepostojanje preporuka vezano uz kriterije za predlaganje dijagnostičkog pregleda te intervencijskog ili terapijskog postupka uporabom izvora ionizirajućeg zračenja, razlog je tome i opći trend prakticiranja defenzivne medicine, u prvom redu udovoljavanje zahtjevima i pacijenata i pritiscima rodbine, koji većinom svoje zaključke i zahtjeve temelje na podacima dostupnim na internetskim tražilicama i forumima te iskustvima drugih pacijenata, a bez temeljnog medicinskog znanja i sagledavanja ukupne situacije. Drugi je uzrok mediko-legalni, odnosno sve su češće tužbe pacijenta, tako da se kliničari štite što većim brojem pretraga kako bi potkrijepili svoje odluke i izbjegli tužbe. To, nažalost, znači i da se bez stvarnih uporišta u kliničkoj slici i simptomatologiji rade i pretrage koje uključuju uporabu ionizirajućeg zračenja [10,11]. No nije zanemariv i trend sve većeg obima posla i pritiska na liječnike čiji se posao mjeri brojem učinjenih pretraga i odrađenih pacijenata, a skraćuje se vrijeme potrebno za razgovor s pacijentom. U većini slučajeva to se nadoknađuje propisivanjem velikog broja dodatnih pretraga. Suradnja liječnika obiteljske medicine i kliničara drugih struka s kliničkim radiolozima nedostaje u većini zdravstvenih ustanova. U hrvatskoj praksi radiolog se rijetko doživljava kao konzultant. Specijalisti drugih struka nisu poput radiologa educirani o mogućim štetnim posljedicama uporabe ionizirajućeg zračenja.

Kako je većina danas radećih kliničara završavala svoje školovanje davnih godina, a u međuvremenu je radiologija kao struka izrazito napredovala, promijenile su se i vrste pregleda i postupaka te posljedično tome i doze pacijenata, kao i smjernice o uporabi pojedinih metoda. Jasno je kako kliničari drugih struka zbog obima posla i napretka vlastitih struka često nisu u stanju pratiti sve nastale promjene, a hrvatske preporuke vezano uz predlaganje dijagnostičkih pregleda i intervencijskih postupaka uporabom izvora ionizirajućeg zračenja nisu im na raspolaganju jer još nisu donesene. Iako propisi zahtijevaju odbijanje pojedinih pregleda ili postupaka koji uključuju uporabu izvora ionizirajućeg zračenja ukoliko nisu potrebni, u kliničkoj praksi se to prečesto doživljava kao sukob na osobnom nivou. Radiolozima je pak jednostavnije i vremenski manje zahtjevno pretragu učiniti, nego pisati opsežna obrazloženja i doživljavati sukobe s drugim kolegama. U rijetkim se zdravstvenim ustanovama u formi indikacijskog sastanka pokušava uspostaviti nužna suradnja.

ZAKLJUČAK

Najveći utjecaj na povećanje radiološke sigurnosti pacijenata imalo bi donošenje nacionalnih smjernica vezano uz kriterije za predlaganje dijagnostičkog pregleda i intervencijskog postupka uporabom izvora ionizirajućeg zračenja čime bi se primarno smanjio broj nepotrebnih ozračivanja. Drugi veliki doprinos bila bi i sustavna edukacija osobito liječnika obiteljske medicine i drugih kliničkih struka čija je uloga u propisivanju pretraga neosporno iznimno velika.

I konačno, uključivanje EU smjernica CDS (engl. *Clinical decision support*) prevedenih na hrvatski jezik u bolničke informatičke sustave bio bi značajan korak naprijed u poštivanju pravila opravdanosti u kliničkoj praksi.

LITERATURA

- [1] Kralik I, Šegota D, Boban D. et al., Procjena doze pacijenta u dijagnostičkim pregledima i intervencijskim postupcima - EU projekt IPA 2008 Zaštita od zračenja prilikom medicinskog ozračivanja. Radiološki vjesnik 2015;1:34-44.
- [2] Hendee WR, Becker GJ, Borgstede JP, Bosma J, Casarella WJ, Erickson BA, Maynard CD, Thrall JH, Wallner PE. Addressing Overutilization in Medical Imaging. published Online: <https://doi.org/10.1148/radiol.10100063>. Oct 1 2010
- [3] Direktiva Vijeća 2013/59/Euratom od 5. prosinca 2013. o osnovnim sigurnosnim standardima za zaštitu od opasnosti koje potječu od izloženosti ionizirajućem zračenju, i o stavljanju izvan snage direktiva 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom (Sl L 13, 17. 1. 2014.).
- [4] Direktiva Vijeća 97/43/Euratom od 30. lipnja 1997. o zaštiti zdravlja pojedinaca od opasnosti od ionizirajućeg zračenja u vezi s medicinskim izlaganjem i o stavljanju izvan snage Direktive 84/466/Euratom (Sl L 180, 9. 7. 1997.)
- [5] Vassileva J, Rehani MM, Al-Dhuhli et al., IAEA Survey of Pediatric CT Practice in 40 Countries in Asia, Europe, Latin America, and Africa: Part 1, Frequency and Appropriateness. AJR Am. J. Roentgenol. 2012; 198/5: 021-1031.
- [6] Vassileva J, Rehani MM, Applegate K et al., IAEA survey of paediatric computed tomography practice in 40 countries in Asia, Europe, Latin America and Africa: procedures and protocols, Eur Radiol. 2013;23/3:623-31.
- [7] Šegota D, Jurković S, Posedel D, Kralik I, Miletić D, Faj D. Uspostava lokalnih dijagnostičkih referentnih razina (LDRL) za CT preglede u KBC-u Rijeka i usporedba s preporukama Europske komisije, Knjiga sažetaka 6. Kongresa Hrvatskog društva radiologa, 2.-5. listopada 2014., str. 82.

- [8] Royal College of Radiologists. iRefer: Making the best use of clinical radiology, 7th edition. London: The Royal College of Radiologists, 2012. Available via <http://www.rcr.ac.uk/content.aspx?PageID=995>.
- [9] Eccles M, Steen N, Grimshaw J, Thomas L, McNamee P, Soutter J, Wilsdon J, Matowe L, Needham G, Gilbert F, Bond S. Effect of audit and feedback, and reminder messages on primary-care radiology referrals: a randomised trial. *Lancet*. 2001;5;357(9266):1406-9.
- [10] UK Department of Health. Ionising Radiation (Medical Exposure) Regulations. Her Majesty's Stationery Office, London. 2000. <https://www.gov.uk/government/publications/the-ionising-radiation-medical-exposure-regulations-2000>
- [11] Royal College of Radiologists. iRefer: Making the best use of clinical radiology. MBUR7/iRefer V. 7. 2011. <http://guidelines.irefer.org.uk/>

MODERN CHALLENGES IN JUSTIFICATION OF RADIOLOGICAL EXAMINATIONS

Jelena Popić^{1,2}, Marko Slavica³, Ivana Kralik⁴

¹School of Medicine University of Zagreb, Zagreb, Croatia

²University Hospital Merkur, Zagreb, Croatia

³Clinical Hospital Sisters of Mercy, Zagreb, Croatia

⁴University Hospital Dubrava, Zagreb, Croatia

popic.je@gmail.com

Radiology imaging is proved as the one of the most important tools for modern diagnostics and therapy. The benefits from ionizing methods are higher than risks if we use them reasonably. Therefore it is necessary to follow the principles of justification and optimization to protect the patients from potential radiation risks. In modern medicine justification has become the most important tool.

In our clinical practice in Croatia a radiologist is rarely seen as a consultant. We perform most of the radiology requests on demand. There are many reasons for this situation: defensive medicine practice, patients pressure, medico-legal reasons and others. Large amount of performed tests on waiting lists is also not negligible. Our work is measured mostly by the number of patients and rarely on the complexity of our work or time dedicated to the individual patient.

Most of the other specialists are not aware of potential radiation risks and their education in the field of radiation protection is insufficient. So it is important to implement education in radiation protection for general practitioners and other specialists to ensure a proper implementation of clinical decision support systems (CDS).

It is equally important to raise awareness of using CDS, to integrate them in hospital information systems (HIS) on national level and to implement this important tool in national health strategies.

RADONSKI AKCIJSKI PLAN U REPUBLICI HRVATSKOJ

Vanja Radolić¹, Sanja Krča², Marina Poje Sovilj¹, Dinko Babić³

¹Odjel za fiziku, Sveučilište u Osijeku, Osijek

²Ministarstvo unutarnjih poslova, Zagreb

³Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb

vanja@fizika.unios.hr

UVOD

Radon (^{222}Rn) je radioaktivni plin koji nastaje radioaktivnim raspadom radija (^{226}Ra) unutar uranijevog (^{238}U) niza radioaktivnih raspada. Vrijeme poluraspada ^{222}Rn je 3,825 dana, a njegovim raspadom u kaskadi se stvara više radionuklida koji emitiraju alfa, beta i gama zračenje. Radon i njegovi kratkoživi proizvodi raspada u atmosferi najviše doprinose ozračenju (ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi) cjelokupnog stanovništva. To predstavlja nezanemariv zdravstveni problem, naročito zbog alfa zračenja u dišnom sustavu, koje se povezuje s pojavom raka pluća. Prema epidemiološkim istraživanjima i statistikama Svjetske zdravstvene organizacije (WHO), radon je nakon pušenja najveći uzročnik raka pluća [1]. Procjenjuje se da je radon odgovoran za između 3 % i 14 % svih slučajeva raka pluća, ovisno o prosječnoj razini radona u pojedinoj zemlji i duljini boravka u takvom prostoru. Tako je za RH procijenjeno da je 2012. godine bilo 538 smrtnih slučajeva zbog karcinoma pluća, a koji se mogu pripisati radonu kao uzročniku što čini ukupno 4 % svih smrtnih slučajeva zbog karcinoma [2].

Za najveći broj ljudi do ozračenja radonom dolazi u zatvorenim prostorima. Glavni izvori radona u zatvorenim prostorima su: tlo neposredno ispod zgrade (85 – 90 %), građevni materijal (5 – 10 %), podzemne vode (oko 5 %). Pritom se parametri koji utječu na koncentraciju radona u zatvorenim prostorima mogu podijeliti na prirodne (geološki sastav, količina radija u tlu i stijenkama, struktura tla, klimatski i meteorološki parametri), tehničke (način i kvaliteta gradnje i održavanja zgrada – broj i veličina mikropukotina u zgradama) odnosno tehnološke (životne navike ljudi – provjetravanje prostorija, način zagrijavanja i sl.). Radon u zatvorene prostore ulazi kroz pukotine na podu ili na spojevima zidova, međuprostore oko cijevi i instalacija, odvoda i sl. te su i koncentracije radona obično najveće u podrumu i prizemlju.

Sukladno Direktivi Vijeća 2013/59/Euratom od 5. prosinca 2013. o osnovnim sigurnosnim standardima za zaštitu od opasnosti koje potječu od izloženosti ionizirajućem zračenju za zemlje članice EU utvrđeno je da referentna razina za radon u zatvorenim prostorima i na radnim mjestima ne bi trebala prelaziti 300 Bq m^{-3} [3]. Navedena referentna razina prenesena je u hrvatsko zakonodavstvo Pravilnikom o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja [4].

Prvo sustavnije istraživanje koncentracija aktivnosti radona u stambenim zgradama (*radon survey*) u RH provedeno je u periodu od 2003. do 2005. godine s ciljem utvrđivanja prosječnog ozračenja stanovništva. U tu svrhu mjerenje koncentracije radona je provedeno pasivnom metodom pomoću detektora nuklearnih tragova izloženih godinu dana u 1000 nasumično odabranih stambenih zgrada u RH (790 detektora je vraćeno na obradu) u svim županijama primjenjujući princip gustoće naseljenosti. Tim načinom utvrđeno je da se izmjerene vrijednosti radona kreću u rasponu od $4 - 751 \text{ Bq m}^{-3}$, s prosječnom vrijednosti od 68 Bq m^{-3} . Geometrijska sredina svih mjerenja je bila 50 Bq m^{-3} s pripadnom standardnom devijacijom 2,3, a empirijske vrijednosti su pripadale log-normalnoj razdiobi. Primjenom teorijske distribucije procijenjeno je da se u oko 3 % stambenih zgrada u RH može očekivati vrijednost koncentracije radona veća od 300 Bq m^{-3} [5].

Kako bi se dobio detaljniji i reprezentativniji uvid o stanju radona u zatvorenim prostorima te da bi se lakše utvrdila i definirala područja RH u kojima se očekuje povećana koncentracija radona (tzv. prioriteta područja), 2012. godine započelo se s provođenjem detaljnijih mjerenja i mapiranjem radona u obimu u kojem su to dozvoljavali financijski kapaciteti. Uz to, mjerenja radona su se počela sustavno provoditi u svim školama i vrtićima u pojedinoj županiji. Do sada su provedena mjerenja u zatvorenim prostorima sa sveukupno oko 6000 detektora (727 škola, 228 vrtića te 1400 stambenih zgrada) u 8 županija (Brodsko-posavskoj, Virovitičko-podravskoj, Ličko-senjskoj, Karlovačkoj, Istarskoj, Požeško-slavonskoj, Sisačko-moslavačkoj i Vukovarsko-srijemskoj), a u Primorsko-goranskoj su u tijeku. Utvrđeno je da se koncentracije radona, ovisno od županije do županije kreću u rasponu od 10 – 1600 Bq m⁻³, tj. unutar pojedinih županija mogu se naći mikrolokacije s vrlo visokim razinama radona i po nekoliko puta iznad referentne razine [6,7].

AKCIJSKI PLAN ZA RADON ZA RAZDOBLJE 2019. – 2024.

Pravna osnova za donošenje Akcijskog plana za radon je članak 65.a stavak 1. Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti [8]. Sukladno njemu, Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS) donosi Akcijski plan za radon uz prethodno mišljenje ministarstava nadležnih za zdravstvo, graditeljstvo i prostorno uređenje, zaštitu okoliša i energetiku te za znanost i obrazovanje. Ovom odredbom se u hrvatsko zakonodavstvo prenosi obveza prema Direktivi Vijeća 2013/59/Euratom [3] za rješavanje dugoročnih rizika od ozračenja radonom u stambenim zgradama, zgradama javne namjene te na radnim mjestima, bez obzira potječe li radon iz tla, građevnog materijala ili vode. Akcijski plan je izradila radna skupina osnovana Odlukom o osnivanju radne skupine koju je donio ravnatelj DZRNS-a. Četnaest članova radne skupine su predstavnici ovlaštenih tehničkih servisa (4), Ministarstva zdravstva (2), Ministarstva graditeljstva i prostornog uređenja (2), Ministarstva zaštite okoliša i energetike (1), Ministarstva obrazovanja i znanosti (1), Ministarstva turizma (1), Hrvatske gospodarske komore (1), Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta (1) i DZRNS-a (1). Nakon provedene javne rasprave, Akcijski plan za radon je 27. prosinca 2018. godine objavljen u službenom listu RH [9].

Dugoročni cilj Akcijskog plana je smanjenje ozračenja radonom ljudi koji žive u RH te posljedično i smanjenje rizika od pojave raka pluća povezanog s povećanim ozračenjem radonom. U svrhu njegovog realizacije, u razdoblju od 2019. do 2024. godine planiraju se provesti sljedeće aktivnosti:

- a) povećati kapacitete za mjerenje i procjenu ozračenja radonom na teritoriju RH korištenjem postojećeg zakonskog okvira te organiziranjem stručne koordinacije unutar državnih i drugih tijela;
- b) razviti/uspostaviti sustav za postupanje u slučaju povišenih koncentracija radona;
- c) razviti/uspostaviti sustav za identifikaciju prioriteta područja primjenom objektivnih, specijaliziranih i metodološki opravdanih kriterija;
- d) razviti sustav za primjenu odgovarajućih mjera zaštite kojima će se postupno smanjiti broj postojećih zgrada u kojima razina radona prelazi referentnu razinu te otežati ulazak radona u zgrade koje se tek planiraju izgraditi;
- e) izraditi/uspostaviti komunikacijski plan za podizanje opće i ciljane svijesti stanovnika o zdravstvenom riziku zbog povećanog ozračenja.

Ovih pet osnovnih aktivnosti su u akcijskom planu detaljnije razrađene u jedanaest manje-više zasebnih projektnih zadataka koji će se kontinuirano odvijati za vrijeme trajanja akcijskog plana. Ovi projektni zadaci obuhvaćaju:

1. Mjerenje koncentracije radona u zraku u zatvorenim prostorima
2. Mjerenje radona u tlu
3. Mjerenje radona u vodi za ljudsku potrošnju

4. Izrada radonskih zemljovida i razvoj sustava za prepoznavanje prioriternih područja
5. Mjerenje ekshalacije radona iz građevnog materijala u zatvorenom prostoru
6. Mjerenje radona na radnim mjestima
7. Osiguranje kvalitete
8. Postupanje u slučaju povećanih koncentracija radona u zatvorenom prostoru
9. Smanjenje izloženosti radonu u zatvorenim prostorima
10. Komunikacijsku strategiju
11. Upravljanje podacima

1. Mjerenje koncentracije radona u zraku u zatvorenim prostorima

Koncentracije radona u zraku ne samo da se bitno razlikuju od godišnjeg doba do godišnjeg doba, već i od dana do dana, pa čak i od sata do sata. Zbog tih fluktuacija, određivanje prosječne godišnje koncentracije radona u zatvorenom prostoru zahtijeva dugotrajno mjerenje (idealno godinu dana). Ukoliko mjerenje nije moguće provoditi godinu dana, tada se ono provodi u razdoblju u kojem se očekuje najviša koncentracija, tijekom sezone grijanja i traje najmanje 6 mjeseci u razdoblju listopad-travanj. Mjerenja se vrše metodom/uređajima kojima je moguće dobiti reprezentativne rezultate u utvrđenom mjernom razdoblju. Godišnja prosječna koncentracija radona u stambenim prostorima računa se kao aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti u dnevnom boravku i/ili spavaćoj sobi.

Za vrijeme trajanja ovog Akcijskog plana potrebno je uspostaviti preduvjete i provesti pregled stanja koncentracije radona u stambenim zgradama (*radon survey*), a s obzirom da je od prethodnog prošlo petnaest godina. Procjenjuje se da bi oko 6000 detektora trebalo biti dovoljno da se rasporede na način da rezultati budu reprezentativni za procjenu ozračenja stanovništva, a da se istovremeno ispune i drugi istraživački ciljevi.

Jednotjedna kontinuirana mjerenja se preporučuju kao kontrolna mjerenja kvalitete zraka u zgradi koja se nalazi u prioriternom području odmah nakon njezine izgradnje ili nakon što su provedene korektivne aktivnosti na smanjenju koncentracije radona. Mjerenja koncentracije radona trebaju se ponoviti u zgradama ako se uvjeti koji utječu na promjenu koncentracije radona mogu promijeniti osobito ukoliko se te zgrade nalaze u prioriternim područjima.

2. Mjerenje radona u tlu

Protokol i metodologija mjerenja koncentracije radona u tlu te izrada standardnog obrasca za opis mjerne lokacije izradit će se u roku od šest mjeseci po donošenju Akcijskog plana. Godišnje je poželjno napraviti barem 100 mjerenja radona u tlu u okviru nacionalnog programa s ciljem izrade zadovoljavajućih zemljovida u idućih desetak godina. Mjerenje koncentracije radona u tlu omogućava pouzdaniju identifikaciju područja s potencijalno povišenom razinom radona u zgradama.

3. Mjerenje radona u vodi za ljudsku potrošnju

Dosadašnja mjerenja koncentracije radona u vodi, provedena u posljednje 3 godine, u zonama opskrbe koje u RH opskrbljuju najmanje 10 000 ljudi, pokazuju da su koncentracije aktivnosti radona niske i da su uglavnom red veličine ispod parametarske vrijednosti koja je 100 Bq l^{-1} . Akcijska razina za smanjenje koncentracije radona u vodi iznosi 1000 Bq l^{-1} . Daljnja dinamika praćenja koncentracije radona u vodi za ljudsku potrošnju provodit će se godišnjim planom monitoringa radioaktivnih tvari u vodi za ljudsku potrošnju.

4. Izrada radonskih zemljovida i razvoj sustava za prepoznavanje prioriteta područja

Zemljovidi se izrađuju kako bi se vizualizirali i bolje interpretirali rezultati mjerenja te olakšalo daljnje planiranje aktivnosti vezanih uz postojeće i zgrade koje namjeravaju izgraditi. Izradit će se zemljovidi koncentracije radona u zraku u stambenim zgradama, zemljovidi radonskog geogenog potencijala po različitim kriterijima (npr. administrativnim jedinicama, po kvadratnoj mreži, postotku stambenih zgrada u kojima koncentracija radona prelazi referentnu razinu i sl.).

U ovom razdoblju provođenja Akcijskog plana predviđen je razvoj sustava za prepoznavanje prioriteta područja na temelju objektivnih, specijaliziranih i metodološki utemeljenih kriterija. Prioritetna područja su koristan alat za optimiziranje i utvrđivanje prioriteta za pronalaženje zgrada s povećanom razinom radona te poduzimanje korektivnih aktivnosti usmjerenih na redukciju koncentracije radona kao i uvođenje preventivnih mjera prilikom gradnje novih zgrada.

5. Mjerenje ekshalacije radona iz građevnog materijala u zatvorenim prostorima

Potrebu za provođenjem mjerenja ekshalacije radona u zatvorenim prostorima utvrđuje stručnjak za zaštitu od ionizirajućeg zračenja, a Protokol i metodologija ovih mjerenja bit će u skladu s relevantnim ISO normama i izradit će se tijekom trajanja ovog akcijskog plana.

6. Mjerenje radona na radnim mjestima

Mjerenje radona na radnim mjestima provodi se sukladno odredbama članka 39. Pravilnika o praćenju stanja u okolišu [10]. Nastavljaju se mjerenja u školama i vrtićima u sklopu nacionalnog programa monitoringa radionuklida u okolišu.

7. Osiguranje i kontrola kvalitete mjerenja radona

Kontrola i kvaliteta mjerenja radona osigurava se primjenom Pravilnika o ovlašćivanju stručnih tehničkih servisa za obavljanje poslova radiološke sigurnosti [11] i odredbama članka 17. i Priloga 3. stavak 7. Pravilnika o praćenju stanja u okolišu [10].

8. Postupanje u slučaju povećanih koncentracija radona u zatvorenom prostoru

Ako prosječna godišnja koncentracija radona u zatvorenom prostoru prelazi referentnu razinu preporuča se često i intenzivno provjetravanje prostora u kojima se boravi te skraćivanje vremena zadržavanja u takvoj prostoriji ili preseljenje osoba u drugu prostoriju. Također, potrebno je ponoviti mjerenja da se utvrdi uzrok povećanja koncentracije radona. Vrstu, trajanje i način mjerenja preporučit će stručnjak za zaštitu od ionizirajućeg zračenja ovisno o pojedinom slučaju. Ako su ponovljene vrijednosti opet više od referentne razine, tada treba implementirati sustav pasivne i/ili aktivne ventilacije zraka ili drugih zaštitnih mjera. U zgradama javne namjene, osobito školama i vrtićima, u kojima su utvrđene povećane koncentracije radona potrebno je, u dogovoru s lokalnom upravom i stručnjakom za zaštitu od ionizirajućeg zračenja, u najkraćem mogućem roku, a najdulje u roku od 2 godine od dana stupanja na snagu ovog Akcijskog plana ponoviti mjerenja na način preporučen od stručnjaka za zaštitu od ionizirajućeg zračenja te ukoliko su vrijednosti opet više od referentne koncentracije, poduzeti odgovarajuće mjere zaštite.

Iskustva drugih zemalja pokazuju da je korištenje pasivnih preventivnih mjera tijekom građenja novih zgrada najisplativiji način zaštite stanovništva od ozračenja radonom. Stoga se u jedinicama lokalne uprave i regionalne samouprave u prioriteta područjima prije gradnje nove zgrade javne namjene moraju provesti mjerenja radona u tlu na predviđenoj lokaciji građenja, te se primijeniti odgovarajuće preventivne mjere zaštite.

9. Smanjenje izloženosti radonu u zatvorenim prostorima

Postoje učinkovite metode smanjenja visokih vrijednosti koncentracije radona u zatvorenim prostorima. Zaštitne mjere obuhvaćaju:

1. često i intenzivno provjetravanje prostora u kojima se boravi;
2. brtvljenje svih prolaza/pukotina između tla i zgrade (cijevi, kabeli, pumpe za sustave grijanja itd.), između podruma (ako postoji) i zgrade (uključujući i ulazno stepenište i vrata) te osiguravanje kvalitetne ventilacije prostora (ukoliko takav sustav postoji);
3. posebne zaštitne mjere koje uključuju dodatno i instalaciju/postavljanje vodonepropusne barijere (radonskog štita);
4. opsežne mjere zaštite uključuju dodatno i instalaciju/postavljanje sustava za drenažu radona ispod ploče propusnog sloja.

Za vrijeme trajanja ovog Akcijskog plana planira se organizirati odgovarajuća obuka/stručno usavršavanje građevinskih radnika i stručnjaka kako bi se osiguralo poznavanje tehnika za pravilnu i uspješnu primjenu financijski pristupačnih i učinkovitih kako preventivnih mjera zaštite za zgrade koje se tek planiraju izgraditi tako i korektivnih akcija u svrhu smanjenja koncentracija radona u postojećim zgradama s povišenom koncentracijom radona.

10. Komunikacijski plan

U RH ne postoji relevantno istraživanje o problematici radona i povezanim zdravstvenim rizicima, a dosadašnja iskustva prikupljena tijekom provedbe mjerenja ukazuju na vrlo nisku razinu informiranosti javnosti o tome. Stoga je potrebno poduzeti aktivnosti usmjerene na povećanje razine svijesti u općoj populaciji o riziku od radona te ukazati na mogućnosti njegovog smanjenja na jasan i razumljiv način kako bi svaka faza u procesu (mjerenje, sanacija, kontrola učinkovitosti, itd.) bila što jednostavnija i pristupačnija.

Spektar dionika koji se odnosi na problematiku radona je širok i obuhvaća vlasnike obiteljskih kuća i stanova, poslodavce, lokalnu upravu i samoupravu, izvršnu vlast, sudionike u gradnji i zdravstvene djelatnike. Svrha komunikacijskog plana koji će se izraditi tijekom trajanja ovog Akcijskog plana je pronaći komunikacijske kanale i strategije kojima će se potaknuti ove dionike na poduzimanje odgovarajućih mjera za smanjenje zdravstvenog rizika od radona.

11. Upravljanje podacima

Postojanje nacionalne baze podataka je važan instrument za podršku Akcijskom planu koji omogućuje uvid u rezultate, vrednovanje i provjeru provedenih aktivnosti. U nacionalnoj bazi podataka trebaju se čuvati podaci o mjerenjima, poduzetim preventivnim mjerama i provedenim korektivnim akcijama i sl. kao i sve dodatne informacije usmjerene na podizanje razine svijesti opće populacije o riziku od radona, a u skladu s propisima koji uređuju pristup informacijama i zaštitu osobnih podataka.

Zahvala

Autori zahvaljuju svim članovima radne skupine za izradu Akcijskog plana na suradnji i doprinosu u izradi Akcijskog plana za radon kao i svim dobronamjernim i konstruktivnim komentarima i sugestijama tijekom javne rasprave.

LITERATURA

- [1] World Health Organization (WHO). WHO Handbook on indoor radon: A public health perspective. WHO, Geneva. 2009.

- [2] Gaskin J, Coyle D, Whyte J, Krewski D. Global Estimate of Lung Cancer Mortality Attributable to Residential Radon. *Environmental Health Perspective* 2018;126: 057009; <https://doi.org/10.1289/EHP2503>
- [3] Council directive 2013/59/EURATOM of laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. *Office Journal of the European Union*, 5 December 2013; L13: 1-73.
- [4] Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja, NN 38/2018.
- [5] Radolić V, Vuković B, Stanić D, Katić M, Faj Z, Šuveljak B, Lukačević I, Faj D, Lukić M, Planinić J. National survey of indoor radon levels in Croatia. *J Radioanal Nucl Chem* 2006;269:87-90.
- [6] Radolić V, Miklavčić I, Stanić D, Poje M, Krpan I, Mužević M, Petrincec B, Vuković B. Identification and mapping of radon-prone areas in Croatia - preliminary results for Lika-Senj and the southern part of Karlovac Counties. *Radiat Prot Dosim* 2014;162:29-33.
- [7] Radolić V, Miklavčić I, Poje Sovilj M, Stanić D, Petrincec B, Vuković B. The natural radioactivity of Istria, Croatia. *Radiat Phys Chem* 2019;155:332-340.
- [8] Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti, NN 141/2013, 39/2015 i 130/2017.
- [9] Akcijski plan za radon za razdoblje 2019. – 2024. NN 118/2018 (27.12.2018.).
- [10] Pravilnik o praćenju stanja u okolišu, NN 40/2018.
- [11] Pravilnik o ovlašćivanju stručnih tehničkih servisa za obavljanje poslova radiološke sigurnosti, NN 40/2018.

THE RADON ACTION PLAN IN THE REPUBLIC OF CROATIA

Vanja Radolić¹, Sanja Krča², Marina Poje Sovilj¹, Dinko Babić³

¹Department of Physics, J. J. Strossmayer University of Osijek, Osijek, Croatia

²Ministry of the Interior, Zagreb, Croatia

³Institut for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia

vanja@fizika.unios.hr

The Act on radiological and nuclear safety (OG 141/13, OG 39/15, OG 130/17) especially Article 65.a gives a legal framework for establishing the Radon Action Plan (RAP) which is a requirement of the Article 103 within EC Directive 2013/59/Euratom. The State Office for Radiation and Nuclear Safety (SORNS) appointed in January 2018 the Working group for development, management and implementation of RAP and the whole process started. The draft version was discussed within the Working group and written by September 2018. After the Public Hearing and minor revisions, the RAP has been published on December 27th of 2018 (OG 118/18) and it describes planned activities within 5 years period (2019-2024).

The long-term goal of this and following RAPs is to reduce radon exposure in dwellings, public buildings (schools, kindergartens, hospitals, etc.), underground workplaces and workplaces in radon priority areas and consequently risk of lung cancer from radon within global population in Croatia. In order to achieve this goal, following activities will be necessarily performed in the next 5 years: continuing of systematic indoor radon measurements in schools and kindergartens and designing and conducting of national indoor radon survey in dwellings; performing radon measurements at underground workplaces (mostly touristic caves), developing a number of protocols and guidelines (i.e., for radon in soil gas and soil permeability and other measurements; protocols for reducing radon concentrations in dwellings and public buildings with elevated radon levels, as well as for preventing radon ingress in new dwellings and workplaces); a development of different radon maps which will be used for different purposes. Furthermore, developing and implementing of the Communication Plan to increase public and other stakeholders (teachers, local government, health, construction and other institutions) awareness of the risks of radon, developing criteria for definition of radon priority areas and developing and managing national radon database is also planned in this period.

The RAP presents a long-term strategy for reducing radon exposure and consequently radon-induced lung cancer. Its near-term goals are described in this first five-year (2019-2024) plan that offer bold and important milestones, but they are not the endpoints. The ultimate goal is to reduce radon-induced lung cancer at achievable level by incorporating radon measurements, radon mitigation and radon-resistant construction into the national legislations that govern constructing and renovating homes, schools, kindergartens and other buildings, using simple and proven technologies.

KATEGORIZACIJA IZLOŽENIH RADNIKA

Robert Bernat, Nikolina Mišak, Maja Vojnić Kortmiš
Institut Ruđer Bošković, Zagreb
rbernat@irb.hr

UVOD

Široka uporaba ionizirajućeg zračenja te nuklearnih tehnologija uzrokovala je povećanje broja izloženih radnika. Prema izvještaju UNSCEAR (engl. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*), oko 23 milijuna radnika izloženo je ionizirajućem zračenju pri čemu je oko 75% zaposleno u polju medicine.

UNSCEAR redovito ispituje te skuplja podatke o izloženosti radnika ionizirajućem zračenju širom svijeta s ciljem da identificira glavne doprinose i raspodjelu izlaganja unutar različitih kategorija izloženih radnika.

Zaštita od izloženih radnika regulirana je zakonima i pravilnicima. Izmjenama i dopunama Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN 141/13, 39/15, 130/17, 118/18, dalje: Zakon) [1] iz 2017. godine uvedena je kategorizacija izloženih radnika. Radnici će se kategorizirati kao izloženi radnici kategorije A ili kategorije B te neizloženi radnici. Kategorizaciju provode stručnjaci za zaštitu od zračenja za mjerenje vanjskog ozračenja izloženih radnika. Ovaj rad bavi se izazovima u kategorizaciji izloženih radnika kao i (ne)usklađenosti propisa koji uređuju područja zaštite na radu i zaštite od zračenja.

RASPRAVA

Sukladno Pravilniku o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja (NN 58/2018, dalje: Pravilnik) [2], vanjski izvođač i nositelj odobrenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja ili rješenja o registraciji (dalje: nositelj odobrenja) obavezan je u roku 18 mjeseci od njegovog stupanja na snagu provesti kategorizaciju svojih izloženih radnika.

Radnici se kategoriziraju u dvije, odnosno tri kategorije: izloženi radnici kategorije A, izloženi radnici kategorije B te neizloženi radnici. Izloženi radnici kategorije A (Tablica 1) su radnici koji bi mogli u jednoj godini primiti:

- efektivnu dozu višu od 6 mSv ili
- ekvivalentnu dozu višu od 15 mSv za očnu leću ili
- ekvivalentnu dozu višu od 150 mSv za kožu i ekstremitete.

Izloženi radnici kategorije B su radnici koji nisu klasificirani kao radnici kategorije A. (Tablica 1).

Prilikom provedbe kategorizacije pojedinog izloženog radnika potrebno je uzeti u obzir najmanje sljedeće:

- vrijednosti ukupne efektivne ili ekvivalentne doze za pojedinog izloženog radnika ili izložene radnike na istim ili sličnim poslovima dobivene iz rezultata njihovog osobnog dozimetrijskog nadzora u neprekinutom trajanju od godine dana s početkom u mjesecu stupanja na snagu Pravilnika,
- procijenjene vrijednosti efektivne ili ekvivalentne doze iz mjerenja u sklopu radiološkog nadzora mjesta rada sukladno posebnom propisu, uzimajući u obzir sve poslove koje obavlja pojedini izloženi radnik te pripadajuće radno opterećenje,
- moguće ozračenje,
- rizik.

Tablica 1. Dozna ograničenje i granice doza za kategorizaciju za pojedini organ / cijelo tijelo

Organ / cijelo tijelo	Godišnje dozno ograničenje [mSv]	Godišnje granice doza za kategoriju B [mSv]	Godišnje granice doza za kategoriju A [mSv]
Cijelo tijelo	20	1	6
Očna leća	20	15	15
Koža	500	50	150
Ruke, podlaktice, stopala, gležnjevi	500	50	150

Nositelj odobrenja i vanjski izvođač obvezni su najmanje jednom godišnje preispitivati kategorizaciju svojih izloženih radnika, a osobito pri svakoj izmjeni radnih uvjeta ili opisa posla koji mogu utjecati na rizik od ozračenja izloženih radnika te na temelju preporuke iz zdravstvenog nadzora izloženog radnika sukladno posebnom propisu. Nositelj odobrenja i vanjski izvođač dužni su u pisanom obliku obavijestiti svog izloženog radnika o rezultatima kategorizacije. Nositelj odobrenja i vanjski izvođač prilikom provedbe kategorizacije i preispitivanja kategorizacije svojih izloženih radnika dužni su savjetovati se sa stručnjakom za zaštitu od ionizirajućeg zračenja.

Gore navedeno su citati iz Pravilnika odnosno iz Direktive Vijeća 2013/59/Euratom od 5. prosinca 2013. [3]. Kako do sada izloženi radnici nisu bili kategorizirani, odnosno svi izloženi radnici imali su obvezu obavljanja periodičkog liječničkog pregleda te prijave na dozimetrijski nadzor. Ranije se nametalo pitanje, tko je izloženi radnik, odnosno je li to svaki radnik koji može ući u područje nadgledanja jer tada postoji mogućnost ozračenja višeg od 1 mSv/god, a koja je granica ozračenja za pojedinog stanovnika.

Sada se granica jasno definirala preko osobnog dozno ekvivalenta, Hp(10), no zadnja stavka pri nabranjanju činjenica koje je potrebno uzeti u obzir pri kategorizaciji je moguće ozračenje. Moguće ozračenje ostavlja stručnjaku za zaštitu od zračenja određeni manevarski prostor.

Pozitivna je stvar da su Pravilnikom o stručnjacima za zaštitu od ionizirajućeg zračenja (NN 36/18) [4] propisani uvjeti za imenovanje stručnjaka za zaštitu od ionizirajućeg zračenja koji daju savjete u vezi sa zaštitom od ionizirajućeg zračenja za pojedino područje.

Ako se uzima u obzir ekvivalentna doza za očnu leću, ostaje nejasno da li postoji izloženi radnik kategorije B, obzirom da je granica ozračenja za kategorije A i B (što odgovara doznom ograničenju za pojedinog stanovnika) ista.

Smatra se da su radnici kategorije A izloženi većem riziku od radnika kategorije B i kao posljedica toga zahtijevaju veći stupanj kontrole. Ta se kontrola očituje kroz sljedeće:

- obvezna procjena vanjskog ozračenja,
- vođenje evidencije o dozama,
- obvezan periodički liječnički pregled.

Za radnike kategorije A mora se osigurati procjena vanjskog ozračenja, a ozračenje se može pratiti kroz osobne dozne ekvivalente Hp(10), Hp(0,07) i Hp(3). Pravilnikom se više ne ograničava procjena vanjskog ozračenja putem pasivnih termoluminiscentnih dozimetara već se mogu koristiti i drugi pasivni i aktivni dozimetri. Jedini je zahtjev da se doza procjenjuje kroz standardne, gore navedene, dozimetrijske veličine. Svim radnicima jednom godišnje mora se preispitati jesu li ispravno kategorizirani. To se može osigurati procjenom vanjskog ozračenja i za radnike kategorije B ili mjerenjem ambijentalnog dozno ekvivalenta u okolišu prostorije s rendgenskim uređajem, tzv. radiološkim nadzorom mjesta rada.

S obzirom da zbog izloženosti ionizirajućem zračenju, u pojedinim djelatnostima, proizlaze prava i obveze iz radnog odnosa, ovdje postoji velika vjerojatnost da će se stručnjaci

za zaštitu od ionizirajućeg zračenja susresti s preprekama. Za početak, temelj za kategorizaciju je izjava odgovorne osobe za zaštitu od ionizirajućeg zračenja kojom se definiraju zaduženja izloženih radnika i procijenjeno radno opterećenje. Ovime se radi veliki pritisak na odgovornu osobu za zaštitu od ionizirajućeg zračenja, a posredno i na stručnjaka za zaštitu od ionizirajućeg zračenja. Kako odgovorna osoba za zaštitu od zračenja, najčešće ne dobiva naknadu za dodatan rad, vjerojatno je da neće postojati motivacija da se navedena izjava napravi odgovorno prema pravilima struke i s dužnom pažnjom.

Kako je već ranije spomenuto, prava i obveze koje potječu zbog izloženosti ionizirajućem zračenju su velika prepreka za objektivnu kategorizaciju bez izloženosti pritiscima. Pravilnik o poslovima s posebnim uvjetima rada (NN 5/1984) [5] star je 35 godina i većinom nije usklađen s važećim propisima. Prije 35 godina zaštita od ionizirajućeg zračenja te osviještenost stanovnika i izloženih radnika o ionizirajućem zračenju bila je neusporedivo manja nego danas. Dozna ograničenja su postavljena tako da niti radnik kategorije A niti radnik kategorije B ne bi trebao biti raspoređen na poslove s posebnim uvjetima rada.

Za vrijeme uporabe izvora ionizirajućeg zračenja, većina izloženih radnika nalazi se izvan prostorije s izvorom ionizirajućeg zračenja, odnosno iza zida / vrata / stakla zadovoljavajuće zaštitne moći. Zaštita prostorija s izvorima ionizirajućeg zračenja izvedena je tako da se ozračenje izloženih radnika smanji na minimum i to višestruko ispod dopuštenih doznih ograničenja. Iznimke su radnici koji rade u direktnom snopu rendgenskih uređaja ili radnici koji rade s radioaktivnim izvorima kategorije 1. gdje je uz procijenjeno ozračenje potrebno uzeti u obzir rizik kojim se radnici izlažu.

Stručni tehnički servis Instituta Ruđer Bošković (IRB) u posljednjih 5 godina samo tri puta je izmjerio / procijenio osobni dozni ekvivalent Hp(10) veći od 6 mSv. Broj godišnjih doza većih od 10 mSv je manji od 10. IRB provodi osobnu dozimetriju za 1600 izloženih radnika mjesečno. Kada bi se u obzir uzimala procjena vanjskog ozračenja, broj izloženih radnika kategorije A bi bio ispod 1% od broja trenutno izloženih radnika,

I dalje postoji problem procjena neutronske doze (faktor 20), obzirom da ne postoji zahtjev za procjenom vanjskog ozračenja od neutronske izvora. Također, upitna je mogućnost procjene vanjskog ozračenja od alfa i beta emitera.

ZAKLJUČAK

Sukladno Pravilniku o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja (NN 58/2018, dalje: Pravilnik) [2], vanjski izvođač i nositelj odobrenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja ili rješenja o registraciji (dalje: nositelj odobrenja) obavezan je u roku 18 mjeseci od njegovog stupanju na snagu provesti kategorizaciju svojih izloženih radnika.

Izloženi radnici se kategoriziraju kao izloženi radnici kategorije A, odnosno kategorije B. Izloženi radnici kategorije A obvezni su obavljati periodički liječnički pregled, dok su izloženi radnici kategorije B obvezni obaviti jedino prethodni liječnički pregled prije početka rada u zoni izloženosti.

Svim radnicima jednom godišnje mora se preispitati jesu li ispravno kategorizirani. To se može osigurati procjenom vanjskog ozračenja i za radnike kategorije B ili mjerenjem ambijentalnog doznog ekvivalenta u okolišu izvora ionizirajućeg zračenja, tzv. radiološkim nadzorom mjesta rada.

Pravilnik o poslovima s posebnim uvjetima rada (NN 5/1984) star je 35 godina te nije usklađen s trenutno važećim propisima, odnosno nije usklađen s gore navedenim pravilnikom o procjenjivanju osobnog ozračenja. Zbog navedene činjenice, prava i obveze koje proizlaze iz radnog odnosa radnika izloženih ionizirajućem zračenju mogu ovisiti o ishodu kategorizacije pri čemu se stvara pritisak na odgovorne osobe za zaštitu od zračenja te stručnjake za zaštitu od ionizirajućeg zračenja.

Zahvala

Rad je izrađen uz financijsku potporu Instituta Ruđer Bošković. Autori zahvaljuju bivšem Državnom zavodu za radiološku i nuklearnu sigurnost na pomoći.

LITERATURA

- [1] Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN 141/13, 39/15, 130/17, 118/18).
- [2] Pravilniku o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja (NN 58/2018).
- [3] Direktiva Vijeća 2013/59/Euratom o osnovnim sigurnosnim standardima za zaštitu od opasnosti koje potječu od izloženosti ionizirajućem zračenju, 2013.
- [4] Pravilnik o stručnjacima za zaštitu od ionizirajućeg zračenja (NN 36/18).

CATEGORISATION OF EXPOSED WORKERS

Robert Bernat, Nikolina Mišak, Maja Vojnić Kortmiš
Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
rbernat@irb.hr

The widespread use of ionizing radiation and nuclear technologies has led to an increase in the number of exposed workers. According to United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR, about 23 million workers are exposed to ionizing radiation, with about 75 % of whom are employed in the medical field.

Steps taken to protect exposed workers are individual monitoring, protective equipment, shielding, training and health surveillance. Regulation of exposed workers protection is a national responsibility and regulated by regulations and laws.

Categorization of exposed workers is introduced to the Croatian national legislation with the Amendments to the Radiological and Nuclear Safety Act (OG 141/13, 39/15, 130/17, 118/18) of 2017. Workers shall be categorized as exposed workers of category A, category B and unclassified workers. The categorization is carried out by radiation protection specialists for the measurement of outdoor exposure of exposed workers. This paper deals with the challenges in categorizing exposed workers as well as (non)compliance of regulations governing occupational safety and radiation protection areas.

The technical service at the Ruđer Bošković Institute (IRB) has changed / estimated the personal dose equivalent of Hp(10) higher than 6 mSv only three times in the last 5 years. The number of annual doses greater than 10 mSv is less than 10. The IRB carries out a personal dosimetry for 1600 exposed workers per month. When evaluating external irradiation, the number of exposed workers of category A would fall below 1% of the number of workers currently exposed.

There is still a problem of estimating the neutron dose (factor 20), as there is no requirement for estimating external irradiation from neutrons. Also, it is questionable to estimate the external irradiation of alpha and beta-emitters.

IZAZOVI TRANSPONIRANJA DIREKTIVE 2013/59/EURATOM U HRVATSKE PROPISE O ZAŠTITI OD IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA U MEDICINI

Mario Medvedec

Klinički bolnički centar Zagreb, Zagreb

mario.medvedec@kbc-zagreb.hr

UVOD

Republika Hrvatska (RH) postala je 28. članica Europske unije 1. srpnja 2013. Hrvatski sabor je posljednji Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti donio 27. studenog 2013. [1], usklađen s odredbama jedanaest akata Europske unije - direktivama i uredbama Vijeća (Euroatom) te uredbama Komisije (Euroatom) iz razdoblja 1989. - 2011. Vijeće Europske unije donijelo je 5. prosinca 2013. novu Direktivu Vijeća 2013/59/Euroatom (u daljnjem tekstu Direktiva 2013/59) o osnovnim sigurnosnim standardima zaštite od opasnosti koje potječu od izloženosti ionizirajućem zračenju, i o stavljanju izvan snage direktiva 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom [2], ukupno pet od gornjih jedanaest akata. Direktiva 2013/59 je 17. siječnja 2014. objavljena na svim jezicima država članica u Službenom listu Europske Unije, pa tako i na hrvatskom jeziku [2,3]. Sve države članice Europske Unije trebale su donijeti zakone, pravilnike i druge propise potrebne za usklađivanje s Direktivom 2013/59 najkasnije do 6. veljače 2018. Do danas su u RH donesena još tri zakona o izmjenama i dopunama Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti, prvi 8. travnja 2015., drugi 27. prosinca 2017. koji je usklađen s odredbama osam akata Europske unije – direktivama Vijeća (Euroatom) te uredbama Komisije (Euroatom) iz razdoblja 1993. - 2014. [4], i treći 19. prosinca 2018. Vlada RH donijela je jednu uredbu 9. ožujka 2018., a Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS) u razdoblju 18.4. - 20.7.2018. dvanaest pravilnika usklađenih s odredbama Direktive 2013/59 [5-17].

Svrha ovog rada je prikazati tijek te neke osobitosti i izazove transponiranja Direktive 2013/59 u hrvatsko zakonodavstvo o zaštiti od ionizirajućeg zračenja u medicini.

MATERIJALI I METODE

U ovom su radu analizirana e-savjetovanja otvorena i provedena od strane DZRNS-a (<https://esavjetovanja.gov.hr/ECon/Dashboard?StatusFilterId=106&organizationFilterId=34&TextFilterValue=&WasOpenedDate=>) te pripadajuće im konačne inačice trenutno važećih hrvatskih propisa koji se odnose na zaštitu od ionizirajućeg zračenja u medicini, pri čemu zakonodavac jamči usklađenost tih propisa s pravnom stečevinom Europske unije njihovim deklariranjem kao propisa koji sadrže i odredbe u skladu s Direktivom 2013/59. Tako su razmatrani Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti [4], Pravilnik o stručnjacima za zaštitu od ionizirajućeg zračenja [7], Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja [10], Pravilnik o ovlaštavanju stručnih tehničkih servisa za obavljanje poslova radiološke sigurnosti [11], Pravilnik o uvjetima za primjenu izvora ionizirajućeg zračenja u svrhu medicinskog i nemedicinskog ozračenja [13], Pravilnik o obrazovanju potrebnom za rukovanje izvorima ionizirajućeg zračenja, primjenu mjera radiološke sigurnosti i upravljanje tehničkim procesima u nuklearnim postrojenjima [14], Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja [15] i Pravilnik o zdravstvenim uvjetima izloženih radnika i osoba koje se obučavaju za rad u području izloženosti [17].

REZULTATI I RASPRAVA

Razvijeno građansko (civilno) društvo koje se ostvaruje kroz aktivnu, slobodnu i otvorenu komunikaciju i suradnju građana, organizacija civilnoga društva, odnosno svekolike zainteresirane javnosti s javnim i državnim institucijama jedno je od važnih uporišta suvremenih demokracija. Tako su i u RH tijela javne vlasti nadležna za izradu nacрта zakona i podzakonskih akata dužna radi informiranja javnosti objaviti na svojim internetskim stranicama uz godišnji plan normativnih aktivnosti i plan savjetovanja o nacrtima zakona i drugih propisa koji se odnose na njihovo područje rada, objaviti nacрте zakona i drugih propisa o kojima se provodi javno savjetovanje sa zainteresiranom javnošću, u pravilu u trajanju od 30 dana, uz objavu razloga za donošenje i ciljeva koji se žele postići savjetovanjem te objaviti izvješća o provedenom savjetovanju sa zainteresiranom javnošću koja sadrže prihvaćene i neprihvaćene primjedbe i prijedloge i dostaviti ga Vladi RH. Hrvatske javne i državne institucije prisutne su na web-sjedištu e-savjetovanja od kraja 2014., a Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost od kraja 2015. do kraja 2018.

Pravilnici potrebni za usklađivanje s Direktivom 2013/59 tijekom propisanih pedeset mjeseci donešeni su u RH sa zakašnjenjem od dva do pet mjeseci, a po završetku uredno provedenih jednomjesečnih e-savjetovanja za zainteresiranom javnošću. Propisi su u e-savjetovanju bili dostupni uglavnom bez pravopisnih i gramatičkih provjera te podrobnije međusobne usklađenosti, što je donekle usporavalo i otežavalo njihovo čitanje. Navedena e-savjetovanja su izazvala priličan interes zainteresirane stručne javnosti, koji se očitovao kroz mnogobrojne proaktivne primjedbe i prijedloge, među kojima su prednjačili Hrvatsko društvo za biomedicinsko inženjerstvo i medicinsku fiziku, Ekoteh d.o.o. te pojedini stručnjaci kao fizičke osobe, uz sporadično pokoji drugu pravnu osobu.

Također se mogao steći dojam kako je transponiranje Direktive 2013/59 u hrvatsko zakonodavstvo ipak bilo ponešto necjelovito ili nevjerodostojno, odnosno selektivno i proizvoljno u odnosu na izvorni tekst, a gdje gdje i neprecizno, nedorečeno, nestručno ili diskriminirajuće u smislu praktične implementacije. Notorna ilustracije toga je, primjerice, osebujna prvotna definicija pojma medicinski fizičar koji se uopće ne spominje u Direktivi 2013/59 {trenutno „medicinski fizičar jest stručnjak koji primjenjuje fizikalna načela i metode prigodom korištenja ionizirajućeg zračenja u medicini u područjima dijagnostike, terapije i nuklearne medicine s ciljem osiguranja kvalitete postupaka i zaštite od zračenja“ [13,15]} te pojma stručnjak za medicinsku fiziku {trenutno „stručnjak za medicinsku fiziku jest pojedinac ili skupina pojedinaca koji imaju znanje, osposobljenost i iskustvo djelovati ili davati savjete u pitanjima povezanim s fizikom zračenja primijenjenom u medicinskom ozračenju i čiju je radnu sposobnost za to priznalo nadležno tijelo“ [4] odnosno „osoba koja udovoljava barem jednom od sljedećih uvjeta: 1) specijalist medicinske fizike, 2) osoba sa završenim preddiplomskim i diplomskim sveučilišnim studijem ili integriranim preddiplomskim i diplomskim sveučilišnim studijem iz područja prirodnih ili tehničkih znanosti koja ima znanje, osposobljenost i iskustvo za djelovanje ili davanje savjeta u pitanjima povezanim s fizikom zračenja primijenjenom u medicinskom ozračenju i koja ima najmanje osam godina kliničke prakse u jednom ili više od sljedećih područja: radioterapija, nuklearna medicina, dijagnostička ili intervencijska radiologija“ [13] naspram izvornika „*medical physics expert means an individual or, if provided for in national legislation, a group of individuals, having the knowledge, training and experience to act or give advice on matters relating to radiation physics applied to medical exposure, whose competence in this respect is recognised by the competent authority*“ [2]}.

Daljnji ilustrativni primjeri gornje teze su područja i uvjeti stručne kvalificiranosti glede izdavanja potvrde stručnjacima za zaštitu od ionizirajućeg zračenja (pojedinci ili skupine pojedinaca koji imaju znanje, osposobljenost i iskustvo za davanje savjeta u vezi sa zaštitom od ionizirajućeg zračenja kako bi se osigurala djelotvorna zaštita pojedinaca i čiju je stručnost

za to potvrdio DZRNS): 1. osobni dozimetrijski nadzor - procjena vanjskog ozračenja i 2. osobni dozimetrijski nadzor - procjena unutarnjeg ozračenja: završen preddiplomski i diplomski sveučilišni studij ili integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij ili specijalistički diplomski stručni studij iz područja prirodnih znanosti (polje fizika); 3. djelatnosti u medicini, dentalnoj medicini i veterini gdje se koriste električni uređaji koji proizvode ionizirajuće zračenje, 4. djelatnosti u medicini i veterini gdje se koriste radioaktivni izvori, 5. djelatnosti u industriji i znanosti gdje se koriste radioaktivni izvori i/ili električni uređaji koji proizvode ionizirajuće zračenje: završen preddiplomski i diplomski sveučilišni studij ili integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij ili specijalistički diplomski stručni studij iz područja prirodnih znanosti (polje fizika) ili tehničkih znanosti (polje elektrotehnika); 6. praćenje stanja okoliša i okoliša objekta: završen preddiplomski i diplomski sveučilišni studij ili integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij ili specijalistički diplomski stručni studij iz područja prirodnih znanosti (polje fizika, kemija, biologija), tehnološke struke (polje kemijsko inženjerstvo) ili biotehničke struke (polje biotehnologija, prehrambena tehnologija, nutricionizam); 7. djelatnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih radioaktivnih izvora i 8. djelatnosti vezane uz industriju u kojoj nastaju rezidui, te njihovo korištenje, odlaganje, otpuštanje, skladištenje, uklanjanje ili recikliranje: završen preddiplomski i diplomski sveučilišni studij ili integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij ili specijalistički diplomski stručni studij iz područja prirodnih znanosti (polje fizika, kemija) ili tehničkih znanosti (polje elektrotehnika, strojarstvo, rudarstvo, naftno i geološko inženjerstvo) [7]. Za stručnjake za zaštitu od ionizirajućeg zračenja traži se nadalje poznavanje i razumijevanje načela radiološke sigurnosti, poznavanje mjera radiološke sigurnosti u područjima za koje traže potvrde, operativno znanje potrebno za pripremu i davanje odgovarajućih savjeta u područjima za koje traže potvrdu i najmanje pet godina radnog iskustva na poslovima radiološke sigurnosti u područjima za koja se traži potvrda [7]. U izvorniku Direktive 2013/59 pak piše kako „*radiation protection expert means an individual or, if provided for in the national legislation, a group of individuals having the knowledge, training and experience needed to give radiation protection advice in order to ensure the effective protection of individuals, and whose competence in this respect is recognised by the competent authority*“, a „*radiation protection officer means an individual who is technically competent in radiation protection matters relevant for a given type of practice to supervise or perform the implementation of the radiation protection arrangements*“ [2]. Uvođenjem pojma stručnjaka za medicinsku fiziku i stručnjaka za zaštitu od ionizirajućeg zračenja određeni broj zanimljivih primjedbi i prijedloga tijekom e-savjetovanja bio je usmjeren k usklađivanju aktivnosti i kompetencija s ovlaštenim stručnim tehničkim servisima [7,11,13].

Primijećeno je također kako neke u izvješćima e-savjetovanja prihvaćene primjedbe i prijedlozi u svrhu jasnoće, nedvosmislenosti i konzistentnosti ipak na kraju nisu uvrštene u konačne inačice donešenih pravilnika, primjerice u izričaju glede doza pacijenta kao sastavnog dijela nalaza ili medicinske dokumentacije (jakost električne struje rendgenske cijevi umjesto struja; električni napon rendgenske cijevi umjesto napon; vremensko trajanje ozračivanja umjesto vrijeme ozračivanja, mjesto ulaska rendgenskog zračenja u tijelo pacijenta umjesto mjesto ulaska rendgenskog zračenja; žarište rendgenske cijevi umjesto žarište cijevi, spektar rendgenskog zračenja umjesto spektar ionizirajućeg zračenja; širina rendgenskog snopa umjesto širina snopa; duljina snimanog dijela tijela umjesto duljina, i dr. [13]).

Iako je ključna sastavnica optimizacije pri predlaganju i provedbi medicinskog radiološkog postupka u cijelosti i vjerodostojno transponirana iz Direktive 2013/59, a ona glasi da pri ozračivanju pacijenta u svrhu provođenja radioterapijskog postupka (uključivo i nuklearnomedicinskog), ozračenje ciljanog volumena mora biti planirano za svakog

pojednog pacijenta, a provedba ozračenja na odgovarajući način provjerena pri čemu ozračenje neciljanih volumena i tkiva mora biti toliko nisko koliko je razumno moguće postići i u skladu s namijenjenom terapijskom svrhom ozračivanja, dozimetrijski individualizirano liječenje otvorenim izvorima ionizirajućeg zračenja, ali i osobni unutarnje-dozimetrijski nadzor se i dalje zanemaruje u RH [10,13,15].

Konačno, jedan od izazova transponiranja i implementacije sadašnje i buduće europske pravne stečevine unutar hrvatskog zakonodavnog okvira zaštite od ionizirajućeg zračenja jest svakako i činjenica o ukidanju DZRNS-a i preustroju Ravnateljstva civilne zaštite Ministarstva unutarnjih poslova.

ZAKLJUČAK

Sve države članice Europske unije trebale su najkasnije do 6. veljače 2018. donijeti zakone i druge propise potrebne za usklađivanje s Direktivom Vijeća 2013/59/EURATOM od 5. prosinca 2013. o osnovnim sigurnosnim standardima zaštite od opasnosti koje potječu od izloženosti ionizirajućem zračenju (u daljnjem tekstu „Direktiva“), i o stavljanju izvan snage direktiva 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom.

Može se konstatirati kako je aktivnim i konstruktivnim angažmanom pojedinih stručnjaka i znanstvenika, stručnih i znanstvenih društava, dioničkih društava i zakonodavaca tijekom procesa transponiranja Direktive 2013/59 hrvatsko zakonodavstvo o zaštiti od ionizirajućeg zračenja u medicini općenito u konačnici ipak značajno poboljšano, unatoč različitim specifičnim izazovima s kojima se susreće suvremeno hrvatsko društvo i u ovom području.

LITERATURA

- [1] Hrvatski sabor. Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Izdanje (broj) 141/2013 (3012). Zagreb: Narodne novine; 27.11.2013. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_11_141_3012.html .
- [2] Council Directive 2013/59/Euroatom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. Official Journal of the European Communities 17.1.2014.; No. L-13: 1-73. Dostupno na <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0059&from=HR>
- [3] Direktiva vijeća 2013/59/Euroatom od 5. prosinca 2013. o osnovnim sigurnosnim standardima za zaštitu od opasnosti koje potječu od izloženosti ionizirajućem zračenju, i o stavljanju izvan snage direktiva 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom. Službeni list Europske unije 17.1.2014.; Broj L-13: 1-73.
- [4] Hrvatski sabor. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Izdanje (broj) 130/2017 (2988). Zagreb: Narodne novine; 27.12.2017. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_12_130_2988.htm l.
- [5] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora. Izdanje (broj) 12/2018 (271). Zagreb: Narodne novine; 7.2.2018. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_02_12_271.html .
- [6] Vlada Republike Hrvatske. Uredba o mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja te postupanjima u slučaju izvanrednog događaja. Izdanje (broj) 246/2018 (458). Zagreb: Narodne novine; 9.3.2018. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_03_24_458.html .

- [7] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o stručnjacima za zaštitu od ionizirajućeg zračenja. Izdanje (broj) 36/2018 (699). Zagreb: Narodne novine; 18.4.2018. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_04_36_699.html .
- [8] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o nuklearnom osiguranju. Izdanje (broj) 38/2018 (737). Zagreb: Narodne novine; 25.4.2018. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_04_38_737.html .
- [9] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o sadržaju te uvjetima, kriterijima i načinu odobravanja plana sanacije. Izdanje (broj) 38/2018 (738). Zagreb: Narodne novine; 25.4.2018. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_04_38_738.html .
- [10] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja. Izdanje (broj) 38/2018 (739). Zagreb: Narodne novine; 25.4.2018. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_04_38_739.html .
- [11] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o ovlašćivanju stručnih tehničkih servisa za obavljanje poslova radiološke sigurnosti. Izdanje (broj) 40/2018 (775). Zagreb: Narodne novine; 2.5.2018. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_04_38_739.html .
- [12] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu. Izdanje (broj) 40/2018 (776). Zagreb: Narodne novine; 2.5.2018. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_05_40_776.html .
- [13] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o uvjetima za primjenu izvora ionizirajućeg zračenja u svrhu medicinskog i nemedicinskog ozračenja. Izdanje (broj) 42/2018 (813). Zagreb: Narodne novine; 9.5.2018. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_05_42_814.html .
- [14] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o obrazovanju potrebnom za rukovanje izvorima ionizirajućeg zračenja, primjenu mjera radiološke sigurnosti i upravljanje tehničkim procesima u nuklearnim postrojenjima. Izdanje (broj) 42/2018 (814). Zagreb: Narodne novine; 9.5.2018. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_05_42_814.html .
- [15] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja. Izdanje (broj) 53/2018 (1062). Zagreb: Narodne novine; 8.6.2018. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_06_53_1062.html .
- [16] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o obavješćivanju, registriranju i odobrenjima te prometu izvorima ionizirajućeg zračenja. Izdanje (broj) 54/2018 (1088). Zagreb: Narodne novine; 13.6.2018. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_05_42_814.html .
- [17] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o zdravstvenim uvjetima izloženih radnika i osoba koje se obučavaju za rad u području izloženosti. Izdanje (broj) 66/2018 (1354). Zagreb: Narodne novine; 20.7.2018. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_07_66_1354.html .

CHALLENGES IN TRANSPOSING DIRECTIVE 2013/59/EURATOM INTO CROATIAN LEGISLATION ON RADIATION PROTECTION IN MEDICINE

Mario Medvedec

University Hospital Centre Zagreb, Zagreb, Croatia

mario.medvedec@kbc-zagreb.hr

All Member States of the European Union should have brought into force the laws, regulations and administrative provisions necessary to comply with the Directive 2013/59/Euroatom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom, at the latest by 6 February 2018.

This paper discusses electronic consultations opened and implemented by the State Office for Radiological and Nuclear Safety on draft laws and regulations on radiation protection in medicine supposed to implement and comply with the Directive 2013/59/Euratom, as well as the final versions of that proposed laws and regulations. Namely, the Croatian government has provided the central web portal for public consultations, enabling citizens to take active part in law making by putting direct comments on law proposals, other regulations, strategic documents etc., and tracking the quality of response of governmental bodies on all submitted comments and suggestions which makes the whole process of public consultations more interactive, open and transparent.

The laws and regulations supposed to comply with the Directive 2013/59 have been adopted in the Republic of Croatia in 2018 with a delay of few months. E-consultations have caused a considerable public interest manifested through numerous comments, among which were mostly the comments of the Croatian Biomedical Engineering and Medical Physics Society, EKOTEH Dosimetry Radiation Protection Company and individual experts. It may appear that the transposition of Directive 2013/59 into Croatian legislation was a bit inaccurate and imprecise in wording, as compared to the original text, and somewhat selective and arbitrary in the ways of practical implementation. By introducing the concept of medical physics expert and radiation protection experts, a number of interesting remarks and suggestions during e-counseling focused on coordinating activities and harmonizing competences with authorized technical expert services. Finally, one of the transposing and implementing challenges of the current and future European legislation into Croatian legal framework for radiation protection in medicine is certainly the fact of merging the State Office for Radiological and Nuclear Safety into a part of Civil Protection Directorate of the Ministry of the Interior.

It may be noted that a number of proactive contributions of certain experts and scientists, professional and scientific societies, joint stock companies and legislators during the transposition process of the Directive 2013/59 have significantly improved Croatian legislation on radiation protection in medicine, in spite of various specific challenges which are present in a modern Croatian society in this area too.

OD (SU)MRAKA DO ZORE ZDRAVSTVENIH (SU)RADNIKA

Mario Medvedec

Klinički bolnički centar Zagreb, Zagreb

mario.medvedec@kbc-zagreb.hr

UVOD

Zdravlje je prema definiciji Svjetske zdravstvene organizacije (*World Health Organisation* - WHO) stanje potpunog tjelesnog, duševnog i socijalnog blagostanja, a ne samo odsustvo bolesti i iznemoglost. Zdravstveni radnici su djelatnici kojima je plaćeni posao zaštititi, poboljšati ili očuvati zdravlje ljudi, odnosno djelatnici koji sudjeluju u preventivskim, dijagnostičkim, terapijskim, rehabilitacijskim i palijacijskim postupcima zdravstvene zaštite, a za koje su aktivnosti i plaćeni. Stručno obavljanje većine zanimanja zdravstvenih radnika zahtijeva vještine četvrtoga i najvišeg stupnja složenosti prema standardnoj međunarodnoj (*International Standard Classification of Occupation* - ISCO-08) i hrvatskoj (Nacionalna klasifikacija zanimanja 2010. - NKZ-10) klasifikaciji zanimanja, jer su zdravstveni radnici stručnjaci koji provode istraživanja, unaprjeđuju spoznaje, razvijaju predodžbe, teorije i metode te primjenjuju znanstvena i stručna znanja, vještine i iskustva u medicini, sestrinstvu, stomatologiji, veterinarskoj medicini, farmaciji i promicanju zdravlja [1,2].

Ovaj rad razmatra izazove dosadašnjeg zakonodavnog okvira Republike Hrvatske (RH) o zdravstvenoj zaštiti, u njegovom dijelu definicija, dužnosti i prava zdravstvenih radnika i zdravstvenih suradnika te vrjednovanja njihovog rada. Rad se osvrće i na e-savjetovanje u postupku donošenja najnovijeg Zakona o zdravstvenoj zaštiti, koji je nakon četvrt stoljeća ponovo u RH ovjerovio koncept po kojem se zdravstvenim radnicima smatraju i određeni visokoobrazovani stručnjaci iz područja prirodnih, tehničkih, biotehničkih i društvenih znanosti koji u području biomedicine i zdravstva također obavljaju zdravstvenu djelatnost, a koji koncept ima izravne posljedice i u zaštiti od zračenja odnosno radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti u RH.

MATERIJALI I METODE

U ovom su radu analizirani prvi hrvatski Zakon o zdravstvenoj zaštiti i zdravstvenom osiguranju iz 1991. [3], sljedeći Zakoni o zdravstvenoj zaštiti iz 1993. [4], 2003. [5] i 2008. [6] sa svojim najvažnijim kontekstualnim izmjenama i dopunama iz 2013. [7] te najnoviji Zakon o zdravstvenoj zaštiti [8] iz 2018., u izriječkom naslovljenim dijelovima Zdravstveni radnici u kojima hrvatski zakonodavac definira zdravstvene radnike, ali i zdravstvene suradnike, te opisuju njihova prava i dužnosti.

U radu se također osvrće na izvornu Uredbu o nazivima radnih mjesta i koeficijentima složenosti poslova u javnim službama iz 2001. [9], nakon koje je do danas doneseno daljnjih četrdesetak pripadnih uredaba o njenim izmjenama i/ili dopunama odnosno novih istoimenih inačica te uredbe (<https://narodne-novine.nn.hr/search.aspx?upit=Uredbu+o+nazivima+radnih+mjesta+i+koeficijentima+slo%C5%BEenosti+poslova+u+javnim+slu%C5%BEama&naslovi=da&sortiraj=1&kategorija=1&rpp=10&str=0&qtype=3&pretraga=da>), a koja određuje i nazive radna mjesta pojedinih skupina radnika u zdravstvu kao javnoj službi te ih brojčano vrednuje i kategorizira po složenost poslova, odnosno definira položaj i međusobne odnose na ljestvici složenosti poslova pojedinih zvanja ili zanimanja u zdravstvu.

REZULTATI

Zdravstvena djelatnost je djelatnost od posebnog interesa [3], djelatnost od interesa za RH koja se obavlja kao javna služba i koju obavljaju zdravstvene ustanove i zdravstveni djelatnici u privatnoj praksi [4], odnosno djelatnost koja se obavlja kao javna služba i koju po stručno-medicinskoj doktrini i uz uporabu medicinske tehnologije obavljaju zdravstveni radnici pri pružanju zdravstvene zaštite, pod uvjetima i na način propisan Zakonom o zdravstvenoj zaštiti, pri čemu iznimno zdravstvenu djelatnost na području promicanja zdravlja, prevencije bolesti te zaštite mentalnoga zdravlja mogu obavljati i nezdravstveni radnici na način koji pravilnikom, uz prethodno pribavljeno mišljenje nadležnih komora, propisuje nadležni ministar [5-8].

Prvotno su se (od ožujka 1991.), u RH zdravstvenim radnicima smatrale osobe koje obavljaju poslove zdravstvene zaštite, a koje su stekle obrazovanje zdravstvenog usmjerenja te osobe koje su stekle obrazovanje drugih usmjerenja, a u organizacijama zdravstva sudjeluju u neposrednom pružanju zdravstvene zaštite. Zdravstvenim radnicima zdravstvenog usmjerenja smatrani su liječnik, liječnik stomatolog, diplomirani farmaceut, medicinski biokemičar i sanitarni kemičar; viši zubar, viša medicinska sestra odnosno viši medicinski tehničar i viši zdravstveni tehničar; medicinska sestra odnosno medicinski tehničar i zdravstveni tehničar. Zdravstvenim radnicima smatrane su i osobe koje su, po uputi i pod nadzorom zdravstvenih radnika zdravstvenog usmjerenja, obavljale određene jednostavnije stručne poslove (njega bolesnika, higijensko-epidemiološki poslovi, laboratorijski poslovi), a osposobljene su za taj rad u organizaciji zdravstva odnosno u organizaciji usmjerenog obrazovanja zdravstvenog smjera [3].

Od kolovoza 1993. hrvatski je zakonodavac zdravstvenim djelatnicima smatrao osobe koje imaju obrazovanje zdravstvenog usmjerenja i koje neposredno pružaju zdravstvenu zaštitu pučanstvu, uz obvezno poštivanje moralnih i etičkih načela zdravstvene struke. Pritom su se zdravstveni djelatnici po definiciji obrazovali na medicinskom, stomatološkom ili farmaceutsko-biokemijskom fakultetu te na višim i srednjim školama zdravstvenog usmjerenja. Zdravstvenim suradnicima su pak smatrane osobe koje nisu završile obrazovanje zdravstvenog usmjerenja, a koje su radile u zdravstvenim ustanovama i sudjelovale u dijelu zdravstvene zaštite [4].

Deset godina kasnije (od srpnja 2003.), zdravstvenim radnicima smatrane su osobe koje imaju obrazovanje zdravstvenog usmjerenja i neposredno u vidu zanimanja pružaju zdravstvenu zaštitu stanovništvu, uz obvezno poštovanje moralnih i etičkih načela zdravstvene struke. Zdravstveni radnici su se po definiciji obrazovali se na medicinskom, stomatološkom ili farmaceutsko-biokemijskom fakultetu te drugom visokom učilištu zdravstvenog usmjerenja kao i u srednjim školama zdravstvenog usmjerenja. Zdravstvenim suradnicima su i dalje smatrane osobe koje nisu završile obrazovanje zdravstvenog usmjerenja, a koje su radile u zdravstvenim ustanovama i sudjelovale u dijelu zdravstvene zaštite (dijagnostički i terapijski postupci) [5].

Od prosinca 2008. novi Zakon o zdravstvenoj zaštiti [6] zadržava istu definiciju zdravstvenih radnika i zdravstvenih suradnika iz prethodnog zakona [5], no pet godina kasnije (od lipnja 2013.) hrvatski je zakonodavac zdravstvenim radnicima počeo smatrati osobe koje su obrazovane na medicinskom, dentalnom, ili farmaceutsko-biokemijskom fakultetu, studijskom smjeru logopedije te drugom visokom učilištu zdravstvenog usmjerenja, kao i u srednjim školama zdravstvenog usmjerenja, odnosno učilištu ili u srednjim školama koje imaju odobrenje za provođenje obrazovnog programa zdravstvenog usmjerenja [7].

Konačno, od prosinca 2018. zdravstvenim se radnicima definiraju osobe koje imaju obrazovanje zdravstvenog usmjerenja i neposredno u vidu zanimanja pružaju zdravstvenu zaštitu stanovništvu. Nadalje, zdravstveni se radnici po definiciji obrazuju na medicinskom, dentalnom ili farmaceutsko-biokemijskom fakultetu te drugom visokom učilištu koje izvodi studijski program za zdravstveno zanimanje, kao i na učilištu te srednjim strukovnim školama

koje imaju rješenje nadležnog Ministarstva o odobrenju za izvođenje pojedinog nastavnog plana i programa obrazovanja/strukovnog kurikuluma koji je razvrstan u obrazovni sektor u području zdravstva. Zdravstvenim radnicima smatraju se i logopedi, medicinski tehnolozi, biotehnolozi i biomedicinski inženjeri, biolozi u zdravstvu, klinički psiholozi, medicinski fizičari, fonetičari i nutricionisti ako obavljaju zdravstvenu djelatnost u procesu dijagnostike i liječenja. Zdravstveni radnici osposobljavaju se školovanjem u punoj nastavnoj satnici teorijske i praktične nastave, kojom se postižu ishodi učenja i stječu kompetencije [8].

Određeni zdravstveni radnici obvezni su nakon završenog obrazovanja obaviti pripravnički staž i položiti stručni državni ispit pred ispitnim povjerenstvom nadležnog ministarstva zdravstva koje izdaje uvjerenje o stručnoj osposobljenosti zdravstvenog radnika za samostalni rad [3-8]. Obveza je zdravstvenih radnika da pri pružanju zdravstvene zaštite postupaju prema pravilima zdravstvene struke, na način da svojim postupcima ne ugroze život i zdravlje ljudi [5-8]. Zdravstveni radnici imaju pravo i obvezu stalnog obrazovanja i usavršavanja prema potrebama rada, a radi održavanja i unaprjeđivanja kvalitete zdravstvene zaštite [3-8]. Određeni zdravstveni radnici mogu se specijalizirati [3,4], odnosno specijalizirati i uže specijalizirati u određenoj grani zdravstvene djelatnosti [5-8], a nakon uspješno završenog programa specijalizacije ili uže specijalizacije polažu specijalistički ili užespecijalistički ispit pred ispitnim povjerenstvom i stječu pravo na naziv specijalista određene specijalnosti ili područja uže specijalnosti [3-8]. Doktorima medicine specijalistima i doktorima dentalne medicine specijalistima koji imaju deset godina rada u svojstvu specijalista, objavljene znanstvene i stručne radove i uspješne rezultate na stručnom uzdizanju zdravstvenih radnika, može se priznati naziv primarijus, o čemu odlučuje posebno povjerenstvo koje imenuje nadležni ministar [3-8]. Na prava i dužnosti zdravstvenih radnika te druga pitanja u vezi s obavljanjem djelatnosti zdravstvenih radnika koja nisu uređena Zakonom o zdravstvenoj zaštiti primjenjuju se odredbe posebnih zakona o profesijama u zdravstvu, a prema kojima se zdravstveni radnici obvezno učlanjuju i u strukovne komore koje im, između ostalog, daju, obnavljaju ili oduzimaju odobrenja za samostalan rad te određuju sadržaj, rokove i postupak provjere stručnosti (osim specijalizacije i uže specijalizacije) uz prethodnu suglasnost nadležnog ministra [4-8]. Zdravstveni radnici koji neposredno u vidu zanimanja pružaju zdravstvenu zaštitu stanovništvu mogu odnosno moraju biti osigurani od odgovornosti za štetu koju bi mogli počinili obavljanjem zdravstvene djelatnosti [7,8]. Zdravstveni radnik može obavljati privatnu praksu [4-8] ili sklopiti posao za svoj račun [8]. Privatni zdravstveni radnici mogu pružati zdravstvene usluge u zdravstvenom turizmu, pružati usluge u turizmu i obavljati ugostiteljsku djelatnost sukladno odgovarajućim propisima [8]. Zdravstveni radnici dužni su čuvati kao profesionalnu tajnu sve što znaju o zdravstvenom stanju pacijenta, jednako kao i sve druge koje u obavljanju svojih dužnosti dođu do podataka o zdravstvenom stanju pacijenta [3-8].

Za zdravstvene je radnike propisano 33 koeficijenta složenosti poslova za radna mjesta I. vrste u rasponu 1,115-2,361, dočim je za većinu donedavnih odnosno sadašnjih zdravstvenih suradnika (klinički molekularni biolog, biolog, citogenetičar, psiholog, fonetičar, medicinski fizičar i defektolog/edukacijski rehabilitator koji sudjeluju u procesu dijagnostike i liječenja) predviđen samo jedan koeficijent iznosa 1,571 te tri koeficijenta raspona 1,445-1,571 za ostale zdravstvene suradnike tj. nezdravstvene djelatnike koji sudjeluju u procesu dijagnostike i liječenja [10].

RASPRAVA

Jedna od temeljnih poluga suvremenih demokracija jest razvijeno civilno društvo koje se, između ostalog, ostvaruje u otvorenom dijalogu, suradnji, pa i partnerstvu građana, organizacija civilnoga društva, odnosno, općenito zainteresirane javnosti s javnim i državnim institucijama. Tako je i u RH predviđeno kako su sva tijela javne vlasti nadležna za izradu

nacrta zakona i podzakonskih akata dužna objaviti na internetskim stranicama nacrt zakona i drugog propisa o kojem se provodi javno savjetovanje sa zainteresiranom javnošću, uz objavu razloga za donošenje, i ciljeva koji se žele postići savjetovanjem, a nakon provedenog e-savjetovanja, dužna su o prihvaćenim i neprihvaćenim primjedbama i prijedlozima obavijestiti zainteresiranu javnost putem internetskih stranica na kojima trebaju objaviti izvješće o provedenom savjetovanju sa zainteresiranom javnošću.

Sukladno tome je i dio postupka donošenja najnovijeg Zakona o zdravstvenoj zaštiti [8] bilo e-savjetovanje, tijekom kojeg je upravo prema njegovom članku 155. (između ukupno čak 281 zakonskih članaka) koji definira zdravstvene radnike bilo upućeno na stotine komentara, što je uvjerljivo najveći broj komentara po određenom članku tog zakona. Ta činjenica jasno ukazuje na osobitu važnost definicije zdravstvenih (su)radnika i regulacije njihovog svekolikog profesionalnog i društvenog statusa te na eskalaciju četvrtstoljetne frustracije ali i kontaminacije unutar hrvatskog strukovnog prostora kao posljedica regulative neprimjerene suvremenim tijekovima razvoja biomedicine i zdravstva.

Gore navedena najvažnija prava i dužnosti zdravstvenih radnika spram donedavnih i sadašnjih zdravstvenih suradnika mogu se parafrazirati kao nasušna potreba maksimalne afirmacije, regulacije i valorizacije svih struka u zdravstvu na odgovarajući način. Dio detaljnije argumentacije bio je i jest svakako da i donedavni/sadašnji zdravstveni suradnici neposredno u vidu zanimanja, u izravnom doticaju s pacijentima ili njihovim uzorcima pružaju zdravstvenu zaštitu i skrb stanovništvu, da su i oni također završili visokoškolsko obrazovanje i cjeloživotno su u tijeku daljnjeg obrazovanja koje jest i zdravstvenog usmjerenja te da redovito ostvaruju pravo i obvezu takvog dodatnog stručnog usavršavanja radi održavanja i unapređenja kvalitete zdravstvene zaštite koju pružaju, da i oni pri pružanju zdravstvene zaštite poštuju moralna i etička načela te sva pravila zdravstvene struke, tako da svojim postupcima ne ugrožavaju život i zdravlje ljudi, da i oni čuvaju profesionalnu tajnu o pacijentima, da su i oni neizostavni dio suvremenih zdravstvenih timova koji odlučuju o postupcima prevencije, dijagnostike, liječenja, rehabilitacije i palijacije bolesti te osobno sudjeluju u provođenju tih postupaka u pacijenata i izravno utječu na rezultate tih postupaka, da su i oni prvostupnici/magistri/doktori svojih struka, jednaki prvostupnicima/magistrima/doktorima neki drugih struka koje hrvatski zakonodavac smatra ili će smatrati zdravstvenim radnicima, da je složenost njihovih poslova i uvjeti rada u kojima rabe i najsuvremenije zdravstvene tehnologije barem podjednaka složenosti poslovima i uvjetima rada nekih trenutnih ili buduće smatranih zdravstvenih radnika iste razine obrazovanja, da su podjednako brojni ili brojniji od nekih struka koje hrvatski zakonodavac smatra ili će smatrati zdravstvenim radnicima, da izravno sudjeluju u obrazovanju zdravstvenih radnika pri fakultetima i drugim visokim učilištima zdravstvenog usmjerenja u području biomedicine i zdravstva (medicinski fakulteti, farmaceutsko-biokemijski fakulteti, stomatološki fakulteti, veterinarski fakulteti, zdravstvena veleučilišta, i dr.) te da mnoge donedavne i sadašnje zdravstvene suradnike i struka i politika smatraju zdravstvenim radnicima tragom niza vjerodostojnih domaći i međunarodnih dokumenata.

Proglašenje i stupanje na snagu najnovijeg Zakona o zdravstvenoj zaštiti [8] je tek nova zora još jednog dana i razdoblja u životu dobrog dijela donedavnih i sadašnjih zdravstvenih suradnika u kojemu, nakon četvrt stoljeća tavorjenja, očekuju punu afirmaciju, regulaciju i valorizaciju svojih struka u suradnji s nadležnim ministarstvima i Vladom RH, a na nedvojbenu dobrobit bolesnika i njihovih obitelji, dobrobit svojih profesija, dobrobit osoblja i uprava zdravstvenih ustanova te zdravstvenog sustava i društva u cjelini.

ZAKLJUČAK

Znanost o zračenju odnosno radiološka i nuklearna sigurnost u slučaju svakodnevnog rutinskog rada (primjerice u radiologiji, radioterapiji, nuklearnoj medicini, genetici, javnom

zdravstvu, ekologiji, energetici), kao i u slučaju izvanrednih događaja (primjerice nuklearnih nesreća u Černobilu i Fukushimi), podrazumijevaju multi-, inter- i trans-disciplinarni timski rad koji pripada različitim znanstveno-stručnim poljima: matematika, fizika, kemija, biologija, elektrotehnika, računarstvo, strojarstvo, biotehnologija, prehrambena tehnologija, temeljne i kliničke medicinske znanosti, javno zdravstvo i zdravstvena zaštita, farmacija, pravo, informacijske i komunikacijske znanosti, sociologija, psihologija, filozofija, i druga.

Kako je zdravlje stanje potpunog tjelesnog, duševnog i socijalnog blagostanja, a ne samo odsustvo bolesti i iznemoglost, hrvatski bi zakonodavac za ostvarivanje holističkog pristupa i osiguranje kvalitete u pružanju svekolike zdravstvene zaštite i skrbi primjerene 21. stoljeću u Europi morao omogućiti ravnopravno sudjelovanje svih potrebnih stručnjaka različitih struka i zanimanja, na način da im na odgovarajući način propiše i vrednuje prava i obveze te prostor i načine profesionalnog djelovanja u svim segmentima njihovog statusa zdravstvenih (su)radnika.

LITERATURA

- [1] International Labour Organization (ILO). International Standard Classification of Occupations - ISCO-08 Volume I: Structure, group definitions and correspondence tables [Internet]. Geneve: ILO; 2012. Dostupno na http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/---publ/documents/publication/wcms_172572.pdf .
- [2] Državni zavod za statistiku (DZS). Nacionalna klasifikacija zanimanja 2010. NKZ 10. I. knjiga: Struktura i objašnjenja skupina, II. knjiga: Korespondentne tablice veza, III. knjiga: Abecedno i brojčano kazalo. Zagreb: DZS; 2010.
- [3] Zakon o zdravstvenoj zaštiti i zdravstvenom osiguranju (pročišćeni tekst). Izdanje (broj) 12/1991 (335). Zagreb: Narodne novine; 16.3.1991. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/1991_03_12_335.html .
- [4] Hrvatski sabor. Zakon o zdravstvenoj zaštiti. Izdanje (broj) 75/1993 (1534). Zagreb: Narodne novine; 13.8.1993. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/1993_08_75_1534.html .
- [5] Hrvatski sabor. Zakon o zdravstvenoj zaštiti. Izdanje (broj) 121/2003 (1706). Zagreb: Narodne novine; 29.7.2003. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2003_07_121_1706.html .
- [6] Hrvatski sabor. Zakon o zdravstvenoj zaštiti. Izdanje (broj) 150/2008 (4097). Zagreb: Narodne novine; 22.12.2008. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2008_12_150_4097.html .
- [7] Hrvatski sabor. Zakon o izmjenama i dopunama Zakona o zdravstvenoj zaštiti. Izdanje (broj) 82/2013 (1736). Zagreb: Narodne novine; 30.6.2013. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_06_82_1736.html .
- [8] Hrvatski sabor. Zakon o zdravstvenoj zaštiti. Izdanje (broj) 100/2018, (1929). Zagreb: Narodne novine; 14.11.2018. Dostupno na https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_11_100_1929.html .
- [9] Vlada Republike Hrvatske. Uredba o nazivima radnih mjesta i koeficijentima složenosti poslova u javnim službama. Izdanje (broj) 38/2001 (666). Zagreb: Narodne novine; 27.04.2001. Dostupno na http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2001_04_38_666.html .
- [10] Vlada Republike Hrvatske. Uredba o izmjenama i dopunama Uredbe o nazivima radnih mjesta i koeficijentima složenosti poslova u javnim službama. Izdanje (broj) 9/2014 (148). Zagreb: Narodne novine; 24.1.2014. Dostupno na http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014_01_9_148.html .

FROM DUSK TILL DAWN OF HEALTH (CO)WORKERS

Mario Medvedec

University Hospital Centre Zagreb, Zagreb, Croatia

mario.medvedec@kbc-zagreb.hr

As defined by the World Health Organization (WHO), health is a state of complete physical, mental and social well-being and not merely the absence of disease or infirmity, whereas health workers are people whose job is to protect and improve the health of their communities, i.e., people engaged in paid activities whose primary intent is to protect and enhance health. In addition, radiation science, radiation protection and nuclear safety in the case of daily routine work (e.g., radiology, radiotherapy, nuclear medicine, genetics, public health, ecology, energy), as well as in case of major events (such as nuclear disasters in Chernobyl and Fukushima), imply multi-, inter- and trans-disciplinary team work, which belongs to various scientific and professional fields: mathematics, physics, chemistry, biology, electrical engineering, computing, engineering, biotechnology, food technology, basic and clinical medical sciences, public health and health care, pharmacy, law, information and communication sciences, sociology, psychology, philosophy, and others.

This paper deals with the challenges of the current Croatian legislative framework on health care, in its definitions, duties and rights of health workers as opposed to, literally, health co-workers. Such a health workforce classification was introduced in 1993 stating that university degree health workers are limited to those individuals who have health-orientated education gained at the School of Medicine, School of Dental Medicine or Faculty of Pharmacy and Biochemistry. This classification has been significantly changed at the end of 2018 by re-classifying some of the clinical scientists (language and speech therapists, biotechnologists, biomedical engineers, clinical biologists, clinical psychologists, medical physicists, dieticians and nutritionists, and some others) again as health workers, if they participate in diagnostic or therapeutic procedures. The benefits of being regulated health profession include having well defined and organized professional acts and chambers, internships with exams, licensing, continuing professional development, residency/specialty trainings with exams, fellowship/sub-specialty trainings with exam, postgraduate university specialist study programs, liability insurance, both public and private sector employability, etc. Furthermore, the concept of coefficients of job complexity, i.e., basic salary coefficients in public services provides currently, for example, only three coefficients (range 1.445-1.571) for university degree health co-workers, as opposed to more than 30 coefficients (range 1.659-2.361) for university degree health workers.

It is expected that responsible ministries, together with the interested professional societies, institutions and prominent individuals, will be hard working towards full regulation of all health professions in the forthcoming years, since equal opportunities of professional education and training, as well as career advancement and adequate job evaluation should be facilitated and provided to all clinical professionals in the same way and under the same conditions for the common good.

DOZIMETRIJA

DOSIMETRY

IZRADA FANTOMA ZA MAMOGRAFIJU

Mihaela Justić, Luka Pavelić, Marija Surić Mihić, Ivica Prlić
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
mjustic@imi.hr

UVOD

Mamografija pripada među najzahtjevnije postupke u radiološkoj dijagnostici jer identifikacija kancerogenog tkiva u dojci u najranijim fazama zahtijeva sposobnost razlučivanja finih detalja u širokom rasponu kontrasta. Osnovni sastavi fibroglandularnog i adipoznog tkiva dojke dani su u ICRU 44 [1]. Posljedica zahtjeva da se heterogeno tkivo sa svim detaljima mora dobro razlučivati povlači uvjet da mamografske slike moraju biti najviše kvalitete. Općenito, za ocjenu izvedbe radiografskih uređaja potrebna je slika i interpretacija ispitnih objekata ili "fantoma". Takvi fantomi, jednostavni ili složenije dizajnirani sadrže ugrađene objekte za testiranje s različitim kontrastima.

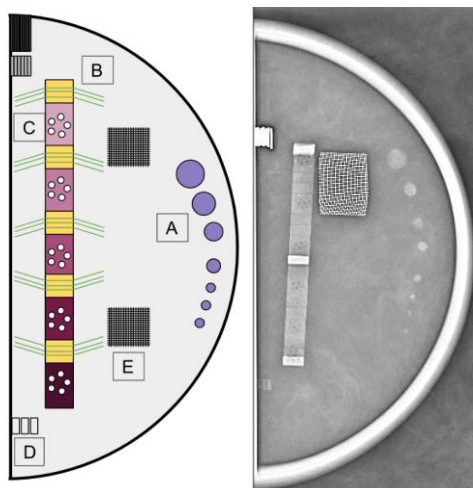
Mamografski fantomi se koriste za evaluaciju rendgenskih uređaja preko različitih protokola za kontrolu kvalitete [2-4]. Dostupni fantomi, bilo komercijalni ili istraživački (objavljeni u literaturi), pokušavaju simulirati složeni sastav prave dojke. Trenutno na tržištu postoji mnogo fantoma, ali je vrlo teško naći jedan koji uistinu može predstavljati tijelo pacijenta, koji nije jako skup ili s kojim je jednostavno rukovati. Ovaj rad predstavlja početak projekta čiji je cilj osmisliti realističan fantom grudi koristeći jeftine materijale. Fantom bi se testirao za uporabu u redovitom programu osiguranja kvalitete za digitalnu mamografiju i tomosintezu.

MATERIJALI I METODE

U našem laboratoriju konstruirali smo fantom s različitim ispunima kako bismo istražili materijale koji se ponašaju slično tkivu dojke te imaju odgovarajuće gustoće i koeficijente atenuacije. Fantom se sastoji od:

- vanjskog polu-cilindra radijusa od 80 mm izrađen od polimetilmetakrilata (PMMA) (kemijska formula $(C_5H_8O_2)_n$, gustoće 1,185 g/cm), prikazana na Slici 1a. Unutar polu-cilindra ugradili smo različite vrste objekata (abnormalnosti) da bi predstavili heterogenost tkiva;
- 3D akrilonitril butadien stiren (ABS) kuglica veličine promjera 0,23, 0,26, 0,30, 0,49, 0,57, 0,61 i 1,07 mm koje predstavljaju mase (A). Isprintan je 3D nosač (dimenzija 1 x 3 x 0,4 cm) kako bi se na njega stavila najlonska vlakna i mikrokalcifikacije jer smo željeli osigurati prostornu raspodjelu u z-smjeru u fantomu;
- najlonskih vlakana debljine 0,23, 0,20, 0,18, 0,16 i 0,14 mm pričvršćenih po tri na svakoj strani nosača (B);
- malih kamenčića ($CaCO_3$) koji predstavljaju mikrokalcifikacije (0,1-0,5 mm) te su grupirani u pet različitih skupina i stavljeni na nosač (C);
- tri različita materijala (žice promjera 1 ili 2 mm) postavljena uzduž ruba kako bi se provjerilo poravnanje polja i receptora slike na strani prsnog zida (D);
- žičane mreže stavljene kako bi se kasnije ocijenila rezolucija (E).

Fina čelična vuna i mineralna vuna stavljene su između dodatnih PMMA ploča kako bi se simulirale komponente žljezdanog i masnog tkiva dojke. Kako bi se istražila optimalna količina, korištene su različite mase ovih materijala te je slikano po pet različitih prostornih raspodjela svake od njih (od široko difuznog rasporeda do čvrsto stisnutog).



Slika 1. a) Shematski prikaz fantoma s ugrađenim različitim vrstama abnormalnosti
b) Digitalna mamografska slika fantoma

Fantomi su snimljeni pomoću digitalnih mamografskih uređaja (Amulet S (Fuji film corporation, Tokyo, Japan), Selenia dimensions 9000 (Hologic, Marlborough, USA) i Mammomat inspiration (Siemens, Erlangen, Njemačka)). Slike tomosinteze su dobivene uređajem Selenia dimensions 9000. Pri slikanju je korišten AEC mod, u kraniokaudalnom prikazu (CC prikaz). Za sva slike upotrijebljena je ista anoda/filter kombinacija volfram/rodij (W/Rh).

REZULTATI

Rekonstruirane slike izrađenog fantoma pokazali su realističnu pozadinu dojke. Slike fantoma su vizualno ocijenjene kako bi se opisala njihova ukupna kvaliteta u predstavljanju tkiva dojke. Korištenjem čelične i mineralne vune identificirali smo potencijalne artefakte u procesu izrade. Primjer digitalne mamografske slike može se vidjeti na Slici 1b. Jedan od glavnih problema koji smo do sada riješili jest kako predstaviti antropomorfizam u fantomu.

ZAKLJUČAK

Naš trenutni rad doveo je do jednostavnog načina izrade modela fantoma koji se može koristiti za validaciju mamografskog uređaja. Naš sljedeći korak će biti točna procjena ugrađenih stavki. Kao što znamo, na konačni izgled fantoma utjecat će mnogi čimbenici, tako da moramo povezati parametre pozicioniranja, kompresije i ekspozicije s karakteristikama ugrađenih objekata u fantomu.

Zahvala

Autori zahvaljuju djelatnicima Kliničke bolnice Dubrava, Zavoda za javno zdravstvo Andrija Štampar i Poliklinike Aviva na pomoći i utrošenom vremenu.

LITERATURA

- [1] ICRU Report 44. Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurements. 1989 International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, Maryland, USA
- [2] Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja (Narodne novine Republike Hrvatske broj 53/2018)

- [3] Engen, R. E. et al., (2010). A supplement to the European Guidelines for Quality Assurance in Breast Cancer Screening and Diagnosis 2 Adaptations Compared to the Fourth Edition of the European. Digital Mammography: 10th International Workshop, IWDM 2010, Girona, Catalonia, Spain, June 16-18 2010 Proceedings, 2006(Perry 2006), 643–650.
- [4] Van Engen, R. E., et al. (2014). A European protocol for technical quality control of breast tomosynthesis systems. Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 8539 LNCS, 452–459.

CONSTRUCTION OF THE MAMMOGRAPHY PHANTOM

Mihaela Justić, Luka Pavelić, Marija Surić Mihić, Ivica Prlić
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
mjustic@imi.hr

Physical phantoms are essential for the development and evaluation of mammography imaging systems. Available phantoms, either commercial or in-house produced and reported in the literature are all trying to simulate the complex composition of the real breast. Currently, there are many phantoms on the present market, but it is very hard to find one phantom that can truly represent the patient's body, which is not very expensive or easy to handle. This work presents the beginning of the project whose objective is to design realistic breast phantom using low-cost materials.

The mammographic projections and tomosynthesis reconstructed images of our homemade phantoms yielded realistic breast background. The images of the phantom were visually evaluated in order to characterize their overall quality in representing breast tissue. Using steel and mineral wool we also identified potential artefacts in the fabrication process. One of the major problems that we encountered so far is how to represent anthropomorphism in phantom. Our current work has introduced an easy way to make the in-house phantom model that may be used for validation of a mammography performance. Our next step will be an exact evaluation of incorporated items. As we know, many factors will have an impact on the final appearance of the phantom image so we need to correlate positioning, compression and exposure parameters with characteristic of incorporated objects in the phantom.

EVALUATION OF RADIOTHERAPY TREATMENT DOSE DISTRIBUTIONS AT UNIVERSITY HOSPITAL RIJEKA – FOUR-YEAR EXPERIENCE

*Nevena Obajdin¹, Đeni Smilović Radojčić¹, Manda Švabić Kolacio¹, David Rajlić¹,
Slaven Jurković^{1,2}*

¹University Hospital Rijeka, Rijeka

²Faculty of Medicine, University of Rijeka, Rijeka

nobajdin@yahoo.com

INTRODUCTION

Accurately calculated absorbed dose is an essential element for the outcome of the radiation therapy treatment. Development and clinical implementation of advanced radiation therapy techniques involves complex absorbed dose distributions demanding high dose calculation accuracy [1]. Uncertainties in the evaluation of absorbed dose distribution should be as high as 3 % [2]. Consequently, this resulted in the need for the establishment of a comprehensive quality assurance program, an important part of which is designed specifically for verification of calculated absorbed dose distributions [3].

An important part of the radiation therapy quality assurance program is 2D dosimetric verification of dose distributions, also known as Patient-Specific Dosimetry (PSD). PSD focuses on dosimetric verification of individual patient radiotherapy treatment absorbed dose distributions by assessing agreement between calculated and measured absorbed dose distributions [4].

At the University Hospital Rijeka (UH Rijeka), 3D conformal radiotherapy (3D CRT) treatment planning began in 2008 and is still used as one of the modalities of treatment delivery. The conformity of calculated absorbed dose distribution to the patient anatomy is achieved by using multiple beam directions by changing gantry and collimator angles, table rotations, using different beam shapes of high conformity formed by the multi-leaf collimator (MLC), and incorporating field-in-field technique. During 2016, Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT) was clinically implemented at UH Rijeka as a logical continuation of a well-established practice. IMRT, being one of the most advanced radiotherapy treatment techniques today, introduces higher complexity to dose distributions by using a higher number of complex fields compared to 3D CRT techniques.

Insight and analysis of the four-year experience of performing PSD at UH Rijeka will be presented.

MATERIALS AND METHODS

Devices which are in clinical use at Radiotherapy Department of UH Rijeka were used to perform the 2D dosimetric verification of absorbed dose distributions: linear accelerator Siemens Oncor Impression (6MV and 15MV photon beams) equipped with an 82 leaf MLC, linear accelerator Siemens Oncor Expression (6MV and 18MV photon beams) equipped with a 160 leaf MLC and CT simulator Somatom Open (Siemens Healthineers, Erlangen, Germany). Dose distributions were calculated by treatment planning systems (TPS) XiO v5.10.00.4. and Monaco v5.11.02. (Elekta, Stockholm, Sweden). For the measurements, a 2D ion chamber array detector IBA MatriXX (IBA Dosimetry, GmbH, Schwarzenbruck, Germany) with 1020 ion chambers was used. For the purpose of PSD, the detector was placed in the IBA MultiCube homogenous phantom (IBA Dosimetry GmbH, Schwarzenbruck, Germany).

Setting up and performing PSD requires a certain number of steps. It begins with using the CT simulator to scan the detector and phantom in the experimental setup which is then imported into the treatment planning system (TPS). After defining the external contour of the detector and phantom setup, and defining the plane of interest, the process of creating a quality assurance (QA) plan for a specific patient can begin. Detector and phantom are then placed on the treatment table of the linear accelerator at the predefined plane of interest and irradiated in accordance with the QA plan (Figure 1).

Due to the technical design of the detector used, all QA plans are irradiated perpendicularly to the ion chamber array. Collimator and table angles remain the same as in the original treatment plans. All QA plans are evaluated before the start of the treatment process following international guidelines.

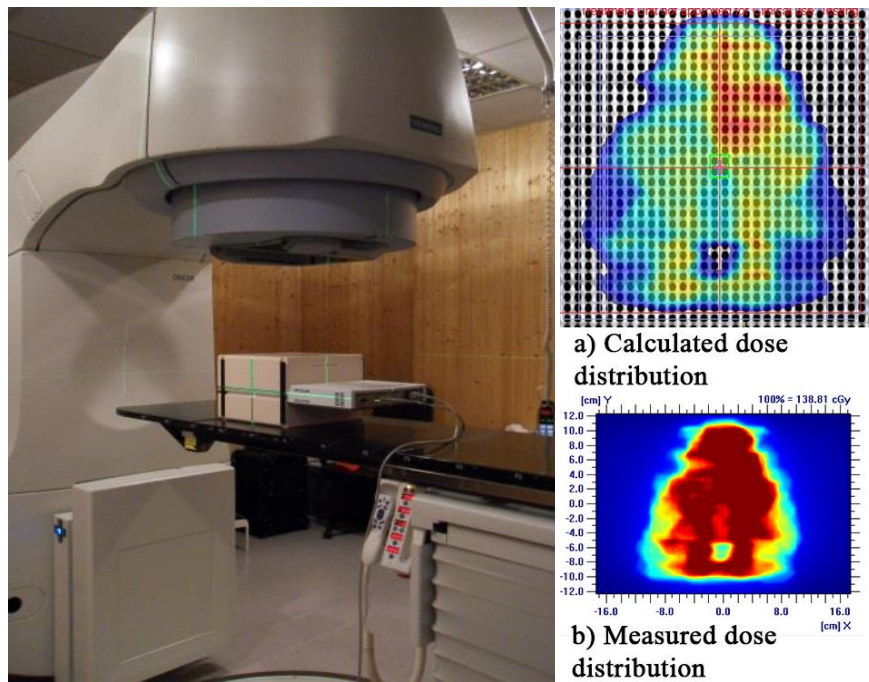


Figure 1. A 2D detector and homogenous phantom setup used for PSD (left), visual representation of calculated (a) and measured (b) dose distributions (right)

Dedicated software, IBA OmniProImRT, (IBA Dosimetry GmbH, Schwarzenbruck, Germany) was used for data acquisition. The same software was then used to compare measured and calculated dose distributions (Figure 1). Gamma method, which is a composite of two tests, was used to calculate the agreement between calculated and measured dose distributions. In the first of these tests, relevant in the low dose gradient regions, dose difference between calculated and measured dose is evaluated at the same point of interest. The second test is a distance-to-agreement test (DTA), applied in the steep dose gradient regions. It takes a point in the measured dose distribution and searches for the nearest point in the calculated dose distribution with the same dose (Figure 2) [4]. Gamma is evaluated by using the following equation [1]:

$$gamma = min \left(\sqrt{\left(\frac{\Delta r}{\Delta r_t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{\Delta D_t}\right)^2} \right) \quad (1)$$

where

Δr – displacement between two points bearing the same value of absorbed dose

ΔD – dose difference between measured and calculated dose at a point of interest

Δr_t – tolerance criterion for the absorbed dose difference,
 ΔD_t – tolerance criterion for the displacement.

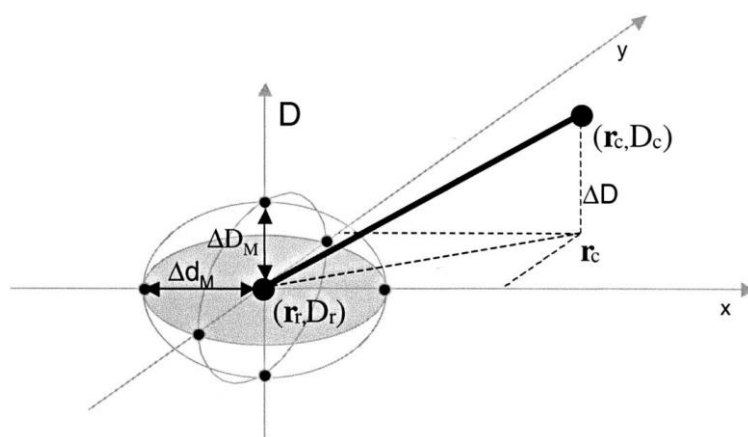


Figure 2. Graphic representation of gamma method, where (r_r, D_r) represents measured dose distribution and (r_c, D_c) represents evaluated dose distribution

Tolerance criteria used were 3 % dose difference and 3 mm DTA criteria. Tolerance limit was set so that 95 % of evaluated points should pass the gamma test [4]. More stringent criteria for dose difference and DTA, 2 % and 2 mm, respectively, were also applied for the purpose of additional research of gamma passing rates. Data were analyzed by using global gamma normalization method where the measured and evaluated dose distribution point pairs are normalized to a maximum dose point in order to compare absolute dose values of analyzed dose distributions [4]. Following parameters were also used: search distance of 4.5 cm, dose threshold of 10 % of the maximum dose and dose maximum to 100 % dose. Due to the detector resolution, defined by the distance of neighboring ion chambers (approximately 0.7 cm), the calculation grid was converted to 1mm. Measured dose distribution was taken as the reference dose distribution against which the calculated dose distribution was evaluated.

At UH Rijeka, patient-specific dosimetric evaluation began in 2015 for 3D CRT and in 2016 for IMRT plans. Up to December 2018, a total of 2015 dose distributions were evaluated (1885 and 220 3D CRT and IMRT dose distributions, respectively). First PSD measurements started in 2015 for 3D CRT. Initial measurements required analyzing radiotherapy treatment dose distributions field by field for all anatomies treated at the Radiotherapy Department of UH Rijeka. Gamma indices were evaluated using 3 %/3 mm criteria [1,4]. Gamma passing rates were shown to be within the criteria and the dosimetric evaluation of composite radiotherapy treatment plans started. By the time the IMRT was implemented into clinical practice, PSD methodology at the UH Rijeka was already well established.

RESULTS AND DISCUSSION

Results showcasing average gamma passing rates for 3D CRT evaluated radiotherapy treatment dose distributions for different anatomical sites are presented in Table 1.

These results show average gamma passing rates exceeding the 95% pass rate tolerance limit when 3 %/3 mm criteria is applied. Lowest average gamma passing rate was calculated for the rectum anatomical site (97.61%). Breast and head and neck (H&N) anatomical sites have more than 98% of points passing the gamma test (98.87 % and 98.84%, respectively). The highest average gamma passing rates were calculated for prostate, lung and central

nervous system (CNS) anatomical sites, where their value reaches almost 100 % (99.50 %, 99.35 % and 99.34 %, respectively).

Table 1. Average gamma passing rates for different anatomical sites for 3D CRT dose distributions

Anatomical site	No. of dose distributions	2%/2mm	3%/3mm
Breast	439	90.54%	98.87%
Rectum	264	88.70%	97.61%
Prostate	326	97.22%	99.50%
Lung	262	96.38%	99.35%
CNS	78	96.42%	99.34%
H&N	356	95.31%	98.84%

One can notice how average gamma passing rates using 2 %/2 mm criteria are lower, which is specifically observable for breast and rectum anatomical sites. These two anatomies are treated at a linear accelerator with MLC resolution of 10mm, while others were treated at the linear accelerator with MLC resolution of 5mm (Figure 3). So, the difference in the MLC resolution could be the main reason for lower gamma passing rates.

Considering IMRT dose distributions, results showing average gamma passing rates for different anatomical sites can be seen in Table 2.

Table 2. Gamma passing rates for different anatomical sites for IMRT dose distributions

Anatomical site	No. of dose distributions	2 %/2 mm	3 %/3 mm
CNS	20	94.80%	98.84%
Prostate	85	92.92%	97.60%
H&N	82	91.48%	97.24%

For 3 %/3 mm criteria, average gamma passing rates for prostate and H&N exceed the tolerance limit by over 2 % (97.60 % and 97.24 %, respectively). Highest average gamma passing rate was calculated for the CNS anatomical site (98.84 %).

When 2 %/2 mm criteria is used, average gamma passing rates deteriorate as the plan complexity increases. This is most noticeable for H&N anatomical site where average gamma passing rate falls from 98.84 % for 3 %/3 mm criteria to 91.48 % for 2 %/2 mm criteria.

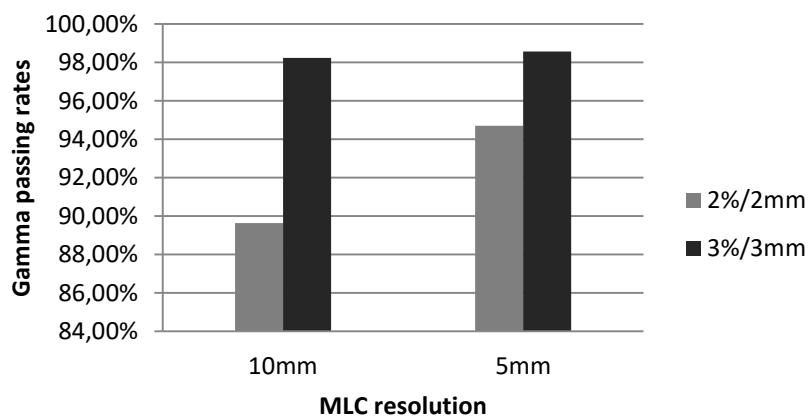


Figure 3. Graphic representation of gamma passing rates for two linear accelerators

Described PSD methodology is reliable and it is an appropriate method of verification of radiotherapy treatment dose distributions prior to patient treatment. Nonetheless, several downsides to this method exist. For instance, measurements are conducted using a homogenous phantom which doesn't represent the actual patient and QA plans are made on gantry angle 0°. To obtain more realistic results, dose distribution evaluation should be performed in a way that is possible to verify all gantry angles.

Additionally, dose distribution evaluation should be performed using a heterogeneous phantom rather than a homogenous one in order to get more realistic results. This calls for additional research for further development of the patient-specific QA program, some of which was already conducted by our group [5]. Furthermore, the accuracy is limited by the detector resolution. Namely ion chambers are separated approximately by 0.7 cm distance from each other and the correct dose between ion chambers cannot be known. For such areas, linear interpolation is used. However, linear interpolation can yield inaccurate results in the parts where the dose distribution gradient is steep.

CONCLUSION

Clinical implementation of advanced radiation therapy techniques further emphasizes the need for a comprehensive QA program. It is of great importance that the dose delivered to the patient is delivered accurately and therefore requires verifying these dose distributions prior to the treatment. PSD, as one of the important steps of the QA program, is primarily used for evaluation of the agreement between calculated and measured dose distributions.

Patient-Specific Dosimetry is a part of a quality assurance program for absorbed dose distributions verification, which in turn is a part of a comprehensive QA program conducted at UH Rijeka. By conducting a good comprehensive QA program, one can expect good results in patient-specific QA as well. This can be seen from the results presented in this work.

REFERENCES

- [1] Low DA, Moran JM, Dempsey JF. et al. Dosimetry tools and techniques for IMRT. *Med Phys* 2011; 38(3): 1313-38.
- [2] International Atomic Energy Agency (IAEA). Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water, IAEA – Technical Reports Series 398. Vienna: IAEA; (2000)
- [3] The Netherlands Commission of Radiation Dosimetry. Code of practice for the Quality Assurance and Control for Intensity Modulated Radiotherapy. Delft, Netherlands; (2013)
- [4] Miften M, Olch A, Mihailidis D, Moran J, Pawlicki T, Molineu A, et al. Tolerance Limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: Recommendations of AAPM Task Group No. 218. *Med Phys* 2018;45:e53-e83.
- [5] Smilović Radojčić Đ, Rajlić D, Casar B, Švabić Kolacio M, Obajdin N, et al. Evaluation of two-dimensional dose distributions for pre-treatment patient specific IMRT dosimetry. *Radiol Oncol* 2018;52(3): 346-352

EVALUATION OF RADIOTHERAPY TREATMENT DOSE DISTRIBUTIONS AT UNIVERSITY HOSPITAL RIJEKA – FOUR-YEAR EXPERIENCE

*Nevena Obajdin¹, Đeni Smilović Radojčić¹, Manda Švabić Kolacio¹, David Rajlić¹,
Slaven Jurković^{1,2}*

¹University Hospital Rijeka, Rijeka, Croatia

²Faculty of Medicine, University of Rijeka, Rijeka, Croatia

nobajdin@yahoo.com

INTRODUCTION

Accurately calculated absorbed dose is essential for the outcome of radiotherapy treatment. Uncertainties in the calculation of absorbed dose should be as high as 3%. This requires development of a comprehensive quality assurance (QA) program which includes 2D dosimetric verification of calculated dose distributions, also known as Patient-Specific Dosimetry (PSD). At UH Rijeka, implementation of PSD started in 2015 for 3D Conformal Radiation Therapy (3D CRT) treatment plans and in 2016 for Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT) treatment plans.

MATERIALS AND METHODS

PSD is used for assessing agreement between calculated and measured absorbed dose distributions. Devices which are in clinical use at Radiotherapy Department of UH Rijeka were used to perform the verification: linear accelerators Siemens Oncor Impression and Siemens Oncor Expression, and CT simulator Siemens Somatom Open. Dose distributions were calculated using treatment planning systems XiOv5.10. and Monaco v5.11. Data were obtained using 2D ion chamber array IBA MatriXX which was placed in an IBA MultiCube homogeneous phantom. Agreement between measured and calculated dose distributions was evaluated using the gamma method. Gamma test is a composite of two tests: one that is relevant in the low dose gradient regions (dose difference) and one that is relevant in the steep dose gradient regions (distance-to-agreement). Tolerance criteria used were 3 %/3 mm and the tolerance limit was set so that 95 % of analyzed points pass the gamma test. For the purpose of additional research, 2 %/2 mm criteria were also applied. Following international guidelines, all QA plans are verified before the start of the treatment process.

RESULTS AND DISCUSSION

Average gamma passing rates for 3D CRT and IMRT treatment plans exceeded the tolerance limit of 95 % when 3 %/3mm criteria was used. Looking at 3D CRT dose distributions, passing rates range from 97.61 % for rectum anatomical site to 99.50 % for the prostate anatomical site. Average gamma passing rates for IMRT dose distributions range from 97.24 % (H&N) to 98.84 % (CNS). When 2 %/2 mm criteria were used, it was observed for IMRT plans that gamma passing rates deteriorate as the plan complexity increases.

CONCLUSION

Results presented in this work show how developing and conducting a good comprehensive QA program implies good results when conducting patient-specific QA program.

EKVIVALENTNA DOZA ZA KOŽU I ŠAKE IZLOŽENIH RADNIKA U NUKLEARNOJ MEDICINI

Marija Surić Mihić¹, Jerko Šiško¹, Ana Pavić Grego²

¹Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb

²Klinički bolnički centar Sestre milosrdnice, Zagreb

msuric@imi.hr

UVOD

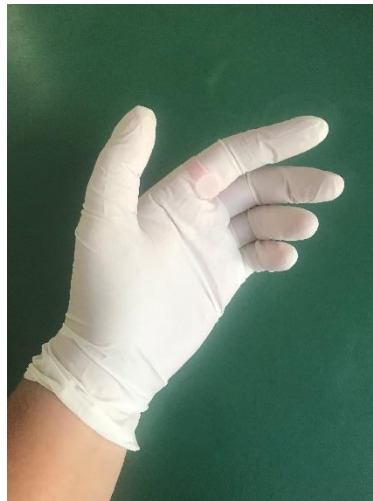
U dijagnostičkim i terapijskim postupcima u nuklearnoj medicini koriste se otvoreni radioaktivni izvori (npr. ^{99m}Tc, ¹³¹I, ²⁰¹Tl, ¹²³I, ⁵¹Cr, ⁶⁷Ga, ¹²⁵I) dok se zatvoreni radioaktivni izvori koriste u sklopu kontrole kvalitete i za umjeravanje mjernih instrumenata (¹³⁷Cs, ⁵⁷Co, ⁶⁸Ge). Osobe koje rukuju takvim radioaktivnim izvorima u svom radu, uz cijelo tijelo, redovito pojačano izlažu šake i kožu vanjskom ozračenju. Do svibnja 2018., kada je novi pravilnik o provedbi osobnog dozimetrijskog nadzora stupio na snagu [1], izloženi radnici u nuklearnoj medicini u Republici Hrvatskoj bili su na dozimetrijskom nadzoru vezano isključivo uz ozračenje cijelog tijela, tj. nosili su osobni dozimetar za mjerenje osobnog doznog ekvivalenta *Hp(10)* te procjenu efektivne doze. Uporaba dozimetara za mjerenje *Hp(0,07)* nije bila naglašena kao obvezna te se općenito nije niti provodila. S obzirom da je jedan od preduvjeta za optimizaciju ozračenja, kao temeljnog načela radiološke zaštite, posjedovanje pouzdanih podataka o efektivnoj dozi i ekvivalentnoj dozi za kožu i šake izloženog radnika, provedba osobnih dozimetrijskih mjerenja jedini je način za realnu procjenu izloženosti. Procijenjena ekvivalentna doza na temelju provedenih mjerenja treba se usporediti s doznom granicom, koja za šake i kožu iznosi 500 mSv godišnje [1], te preporučenim doznom ograničenjem za profesionalno ozračenje. Preporučeno dozno ograničenje, definirano u ICRP 103 [2] kao alat za provedbu optimizacije, vezano je za pojedini izvor ionizirajućeg zračenja, i cilj je da se u sklopu optimizacije postigne da individualne doze budu niske koliko je razumski moguće postići uzimajući u obzir ekonomske i društvene faktore (načelo ALARA), a niže od preporučenog doznog ograničenja.

Kao jedan od zaključaka i preporuka iskazanih u rezultatima projekta ORAMED [3] naglašeno je da je dozimetrijski nadzor izloženosti ekstremiteta (šaka) u nuklearnoj medicini neophodan te da je pri pravilnoj procjeni maksimalne ekvivalentne doze potrebno poznavati položaj nošenja dozimetra. Vođeni tim preporukama početkom 2017. godine pokrenuli smo pilot projekt dozimetrije šaka izloženih radnika u odjelu nuklearne medicine i laboratorijske dijagnostike Kliničkog bolničkog centra Sestre milosrdnice u cilju istraživanja raspona vrijednosti ekvivalentne doze za kožu i šake izloženih radnika te identificiranja potrebe za optimizacijom izloženosti te eventualno prepoznavanja loše prakse.

MATERIJALI I METODE

Za mjerenje osobnog doznog ekvivalenta *Hp(0,07)* korišteni su termoluminiscentni (TL) dozimetri tipa Panasonic UD-807ATN umetnuti u prsten nosač. TL element dozimetra je po kemijskom sastavu ⁶Li₂B₄O₇, osjetljiv na β i γ zračenje. Relativna kalibracija TL dozimetara provedena je ozračivanjem na iradijatoru TL dozimetara Panasonic UD-794D u polju ¹³⁷Cs nominalne aktivnosti 74 GBq i određivanjem korekcijskog faktora za svaki pojedini TL element prema metodi opisanoj u literaturi [4]. Za očitavanje TL elementa umetnutog u specijalni adapter korišten je poluautomatski čitač TL dozimetara tipa Panasonic UD-716 AGL 13-C. Kalibracijski faktor čitača za određivanje *Hp(0,07)* određen je ozračivanjem 5 referentnih dozimetara u polju ¹³⁷Cs u Sekundarnom standardnom Dozimetrijskom laboratoriju (SSDL) Instituta Jožef Štefan, Ljubljana, Slovenija, na štapnom

fantomu promjera 19 cm i visine 30 cm, od PMMA. Metoda za određivanje osobnog doznog ekvivalenta $Hp(0,07)$ validirana je u međunarodnoj laboratorijskoj interkomparaciji.



Slika 1. Način nošenja prsten dozimetra u nuklearnoj medicini (NM) za dešnjake, pri dnu prstenjaka nedominantne ruke, ispod zaštitne rukavice

Kako bi osigurali pravilnu procjenu ekvivalentne doze, izloženim radnicima koji rukuju radioaktivnim izvorima, uz dozimetre, dostavljena je i pojašnjena detaljna uputa o načinu i položaju nošenja prsten dozimetra. S obzirom na način rada, izloženim radnicima u nuklearnoj medicini je preporučeno da prsten dozimetar nose na dnu prstenjaka nedominantne ruke s TL elementom okrenutim prema dlanu (Slika 1), a u laboratorijskoj dijagnostici na dnu prstenjaka dominantne ruke s TL elementom okrenutim prema dlanu, ispod zaštitnih rukavica kako bi se izbjeglo moguće radioaktivno onečišćenje prsten dozimetra. Za procjenu ekvivalentne doze iz očitavanja $Hp(0,07)$ korišten je model preporučen u projektu ORAMED [3] na način da se maksimalna ekvivalentna doza dobiva množenjem vrijednosti $Hp(0,07)$ faktorom 6.

Mjerni period nošenja dozimetra bio je 1 mjesec, a u ovom radu prezentirani su rezultati dobiveni za 12 mjeseci 2017. godine.

Po struci, izloženi radnici koji su nosili prsten dozimetre bili su zdravstveni tehničari laboranti i biolozi (laboratorijska dijagnostika LD) te prvostupnici radiološke tehnologije, medicinske sestre i zdravstveni tehničari laboranti (nuklearna medicina NM). Prilikom obrade podataka svi osobni podaci (ime, prezime, OIB izloženog radnika) su bili anonimizirani uporabom šifre.

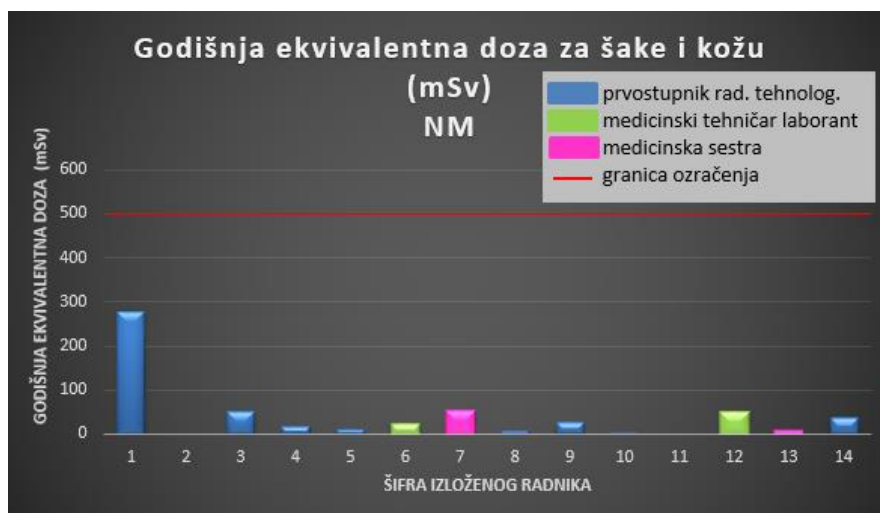
U NM prsten dozimetre je nosilo 14 izloženih radnika (10 prvostupnika radiološke tehnologije, 2 medicinska tehničara laboranta i 2 medicinske sestre), a u LD 18 izloženih radnika (16 medicinskih tehničara laboranata i 2 biologa). Ukupna maksimalna aktivnost radionuklida koji se koriste u NM i LD je 444 MBq ^{51}Cr , 900 GBq $^{99\text{m}}\text{Tc}$, 100 GBq ^{123}I , 42,3 MBq ^{125}I , 700 GBq ^{131}I , 27 GBq ^{201}Tl .

REZULTATI

Grafički prikaz dobivenih rezultata procjene ekvivalentne doze za šake i kožu u NM i LD u 2017. godini prikazani su na Slici 2 i Slici 3. Na grafovima su naznačene struke izloženih radnika te dozna granica ekvivalentne doze za ekstremitete i kožu od 500 mSv.



Slika 2. Prikaz godišnje vrijednosti ekvivalentne doze za šake i kožu izloženih radnika u odjelu laboratorijske dijagnostike, po strukama



Slika 3. Prikaz godišnje vrijednosti ekvivalentne doze za šake i kožu izloženih radnika u odjelu nuklearne medicine, po strukama

Uvidom u rezultate prikazane na Slici 2 može se uočiti da je jedan izloženi radnik u LD primio dozu koja je bila neznatno ispod granice ozračenja dok u odjelu NM nitko od izloženih radnika nije imao godišnju dozu u blizini granice ozračenja. Detaljna analiza mjesečnih podataka dozimetrijskog nadzora pokazala je da je velik broj izloženih radnika u više mjernih razdoblja imao ekvivalentne doze za šake i kožu niže od praga izvješćivanja (4,2 mSv) ili 0, dok je ostale mjesece imao znatno više vrijednosti što može ukazivati na nenošenje dozimetra. Značajniji broj izmjerenih vrijednosti 0 bio je u NM.

Prosječne vrijednosti ekvivalentne doze za šake i kožu u jednoj godini po strukama prikazane su u Tablici 1.

Tablica 1. Prosječne vrijednosti godišnje ekvivalentne doze za šake i kožu u DL i NM po strukama

	struka	prosječna godišnja ekvivalentna doza za šake i kožu (mSv)
LD	medicinski tehničar laborant	144,6
	biolog	108,3
NM	prvostupnik rad. tehn.	41,3
	medicinski tehničar laborant	36,2
	medicinska sestra	38,8

ZAKLJUČAK

Do provedbe ovih mjerenja nismo imali uvida u izloženost šaka izloženih radnika koji rukuju otvorenim radioaktivnim izvorima u nuklearnoj medicini u Republici Hrvatskoj. Rezultati pokazuju da postoji razlog za provedbu optimizacije izloženosti, ne samo kod onog radnika koji je primio ekvivalentnu dozu blisku doznoj granici već i za ostale radnike. Najveći razlog tomu je veliki broj procijenjenih vrijednosti ekvivalentne doze za šake i kožu iznosa ispod granice za izvješćivanje koje mogu predstavljati i realne vrijednosti, ali i posljedica nenošenja dozimetra. Uzimajući to u obzir za očekivati je da bi realne prosječne vrijednosti godišnje ekvivalentne doze za šake i kožu mogle biti više od izračunatih vrijednosti prikazanih u Tablici 1.

Na temelju provedenog istraživanja zaključili smo:

- radnici u LD su primili više ekvivalentne doze za šake i kožu od radnika u NM,
- s obzirom na veliku vjerojatnost nenošenja dozimetara moguće je da veći broj radnika prima doze koje su bliske granicama ozračenja,
- pravilna i redovita uporaba prsten dozimetra u nuklearnoj medicini je nužna.

Potrebno je osvijestiti izložene radnike o nužnosti uporabe prsten dozimetra u svakodnevnom radu kako bi se mogla provesti realna procjena bazirana na mjerenjima te na temelju te procjene optimizacija izloženosti.

LITERATURA

- [1] Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja. Narodne novine Republike Hrvatske broj 28/2018.
- [2] The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37 (2–4), 2007 <http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>. (pristup 6.3.2019.)
- [3] F. Vanhavere et al. ORAMED: Optimization of Radiation Protection of Medical Staff. EURADOS Report 2012-02. Braunschweig. 2012
- [4] Plato P, and Miklos J. Production of element correction factors for thermoluminescent dosimeters. Heal. Physics 1985;9:873-881

THE EQUIVALENT DOSE FOR THE SKIN AND HANDS OF EXPOSED WORKERS IN NUCLEAR MEDICINE

Marija Surić Mihić¹, Jerko Šiško¹, Ana Pavić Grego²

¹Institute for medical research and occupational health, Zagreb, Croatia

²University hospital “Sestre milosrdnice”, Zagreb, Croatia

msuric@imi.hr

Routine monitoring of doses to the hands and skin of the staff manipulating unsealed radioactive sources for diagnostic procedures in nuclear medicine (NM) and laboratory diagnostics (LD) was not mandatory in Croatia until June 2018. In order to estimate equivalent doses to skin and hands of exposed workers and to investigate potential exposures over the dose limits, from January 2017 we started a one-year pilot project of *Hp(0,07)* measurements using thermoluminescent ring dosimeters in one Croatian clinical hospital. The instructions for the exposed workers included wearing position of the dosimeter: on the base of the index finger of the non-dominant hand, palm side (NM) or on the base of the index finger of the hand closer to the radioactive source, palm side (LD). The individual monitoring was performed for one year with one month monitoring period. Total of 32 exposed workers were using TLD Panasonic ring dosimeters.

The results for exposed workers in LD showed that one worker received the annual equivalent dose to the hands and skin close to the annual dose limit and in NM there were no workers exceeding annual dose limit of 500 mSv. Average annual equivalent doses to the hands and skin were higher in LD compared to NM. A significant number of zero doses was measured, in both groups, for workers who in other measuring periods received doses higher than recording level (4.2 mSv), which indicates that in zero dose periods dosimeters may not have been used. Although some of those zero or below recording level are real, we assume that a large number zero doses are a consequence of not wearing the dosimeters during the work. That could lead to the conclusion that dose limits may have been exceeded in both groups although not recorded.

The results confirmed that exposed workers in NM and LD are to be classified as category A workers due to liability to receive significant exposure of hands while manipulating unsealed radioactive sources and due to the risk of internal or accidental exposure. The dose constraints for exposed workers in NM and LM need to be established to optimize radiation protection and lower the received doses. Staff in NM and LD should be motivated to wear a ring dosimeter so measured doses could be reliable and results of routine monitoring could identify potentially bad practices and take actions to eliminate it.

KALIBRACIJA INDIKATORA DOZE U DENTALNOJ MEDICINI

Branimir Zauner, Mihaela Justić, Marija Surić Mihić, Ivica Prlić
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
bzauner@imi.hr

UVOD

U dentalnoj medicini usluge rendgenske dijagnostike su sve raširenije i već veliki broj ordinacija pruža, osim pojedinačnog snimanja, panoramsko snimanje zubi te kompjuteriziranu tomografiju zubi i čeljusti (*Cone Beam Computed Tomography*, CBCT). Efektivne doze koje primi pacijent prilikom tipičnog snimanja su 1-8 μSv za radiografiju, 4-30 μSv za panoramsko snimanje te, ovisno o protokolu, od 50 do nekoliko stotina μSv za CBCT [1]. Unatoč relativno niskim dozama, izuzetno je bitno da se u pacijentovoj medicinskoj dokumentaciji bilježe ispravni podaci. To se postiže na način da se prilikom redovnog godišnjeg pregleda provjerava ispravnost mjernih instrumenata tvornički ugrađenih u rendgenske uređaje. Prema Pravilniku o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja [2] koji je napravljen u skladu s preporukama Europske federacije organizacija za medicinsku fiziku [3] i usklađen s Direktivom EU 2013/59/Euratom [4], predviđeno je da se kod panoramskih uređaja izvrši mjerenje umnoška kerme i površine (*Kerma area product*, KAP) za tipičnu kliničku ekspoziciju, dok je za CBCT uređaje predviđena kalibracija indikatora doze, KAP/DAP, pri čemu se umnožak doze i površine naziva DAP (*Dose area product*). Zbog katalogiziranja i praćenja kvalitete uređaja i proizvođača uređaja koji su u upotrebi u Republici Hrvatskoj, pokrenuli smo interni projekt u kojem su mjerenja KAP-a kod panoramskih i CBCT uređaja osnovni radni zadatak. U ovom radu su prikazani početni rezultati tog projekta.

MATERIJALI I METODE

Za mjerenje KAP-a kod panoramskih rendgenskih uređaja i kalibraciju indikatora doze kod CBCT uređaja, na raspolaganju nam je bio DAP metar „VacuDAP“ proizvođača VacuTec Messtechnik iz Njemačke (Slika 1).



Slika 1. Kompaktni uređaj VacuDAP. Uređaj može zabilježiti doze 1-100 μGy , uz brzinu doze od 0,5 do 1000 $\mu\text{Gy/s}$.

Sam postupak mjerenja KAP-a za panoramske uređaje je prilično jednostavan. Na izlaz iz rendgenske cijevi uređaja se ljepljivom trakom postavi uređaj VacuDAP te se pokrene tipični program snimanja. S obzirom na veličinu uređaja VacuDAP, nije bilo problema s njegovim pravilnim postavljanjem.

Kod panoramskih rendgenskih uređaja mjerenje KAP-a kod tipičnih kliničkih snimanja nije izazivalo poteškoća, no kalibracija KAP-a kod CBCT uređaja je vremenski zahtjevnija. Naime, u pravilniku je navedeno da se radi kalibracija, a ona bi se trebala raditi tako da se izmjeri KAP kod svih mogućih kombinacija parametara snimanja, što bi ponekad moglo drastično oduljiti postupak redovnog godišnjeg pregleda uređaja. To nailazi na nerazumijevanje kod korisnika, te izaziva njihovo nezadovoljstvo. Da bismo izbjegli neugodne situacije, predlažemo da se edukacija korisnika ažurira te se proširi punim opisom jednog redovnog godišnjeg pregleda koji uključuje i njegovo trajanje.

REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati mjerenja KAP-a kod panoramskih i CBCT uređaja se nalaze u Tablicama 1 i 2. KAP 1 je rezultat očitani sa rendgenskog uređaja, dok je KAP 2 izmjeren uređajem VacuDAP.

Tablica 1. Izmjereni KAP/DAP uređaja Instrumentarium OP 300

Napon cijevi /kV	Struja /mA	Trajanje ekspozicije /s	KAP 1 / μGycm^2	KAP 2 / μGycm^2	Razlika/ μGycm^2	Relativna razlika
73	7,5	12,4	46	35	11	24 %
70	7,5	12,4	28	20	8	29 %

Tablica 2. Izmjereni KAP/DAP uređaja ProMAX 3D (u CBCT modu rada)

Napon cijevi /kV	Struja /mA	Trajanje ekspozicije /s	KAP 1 / μGycm^2	KAP 2 / μGycm^2	Razlika/ μGycm^2	Relativna razlika
90	10	15	1356	1137	219	16 %
90	14	15	1885	1587	298	16 %
90	8	13	814	690	124	16 %
90	9	13	1220	1027	193	16 %

Kod panoramskih snimaka, propisani uvjet [2] za KAP je da je manji od $100 \mu\text{Gycm}^2$, dok je kod CBCT uređaja propisano da odstupanje očitani od izmjerenog KAP-a mora biti manje od 35 %. Bitno je uočiti da razlika između očitani i izmjerenog KAP-a ne mora imati isto odstupanje i ono općenito može ovisiti o parametrima snimanja.

S obzirom na maleni broj do sada obrađenih uređaja, rano je govoriti o kvaliteti uređaja koji su u upotrebi u Republici Hrvatskoj, no s obzirom da su CBCT uređaji relativno nova tehnologija, kod njih ne očekujemo probleme raspršenosti vrijednosti radnih parametara. Kod starijih panoramskih uređaja očekujemo odstupanja, no do sada ih nismo vidjeli.

ZAKLJUČAK

Prema Pravilniku o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja [2] obavezno je, na godišnjoj bazi, provjeriti KAP kod panoramskih rendgenskih uređaja za snimanje zubi, ali i kalibrirati KAP kod dentalnih CBCT uređaja. U svrhu katalogiziranja i praćenja kvalitete stomatoloških rendgenskih uređaja i proizvođača uređaja koji su u upotrebi u Republici Hrvatskoj, pokrenuli

smo interni projekt mjerenja KAP-a kod panoramskih i CBCT uređaja. U ovom radu su prikazani početni rezultati tog projekta. Prvi pregledani uređaji su bili u skladu s pravilnikom [2]. Uočili smo i da kalibracija indikatora doze (KAP/DAP) kod CBCT uređaja može zahtijevati značajno produljenje vremena potrebnog za redovni godišnji pregled uređaja, što dovodi do nezadovoljstva korisnika. Zbog toga predlažemo ažuriranje obavezne edukacije korisnika uz proširenje detaljnim opisima redovnih godišnjih pregleda uređaja. Jedan od rezultata internog projekta bit će i upute o tumačenju rezultata kontrole kvalitete.

LITERATURA

- [1] Radiation doses in dental radiology (FAQs for health professionals) <https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/dentistry/radiation-doses>
- [2] Narodne novine RH 53/2018
- [3] Hugo de las Heras Gala et al. Quality control in cone-beam computed tomography (CBCT) EFOMP-ESTRO-IAEA protocol. https://www.efomp.org/uploads/2017-06-02-CBCT_EFOMP-ESTRO-IAEA_protocol.pdf
- [4] Direktiva Vijeća 2013/59/Euratom od 5. prosinca 2013. o osnovnim sigurnosnim standardima za zaštitu od opasnosti koje potječu od izloženosti ionizirajućem zračenju, i o stavljanju izvan snage direktiva 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom

CALIBRATION OF DOSE INDICATORS (KAP/DAP METERS) IN DENTAL MEDICINE

Branimir Zauner, Mihaela Justić, Marija Surić Mihić, Ivica Prlić
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
bzauner@imi.hr

As of July 2018, obligatory parts of annual quality control for dental panoramic and CBCT radiographs are measurements of kerma-area product (KAP) for panoramic radiographs and calibration of KAP meters in dental CBCT. We have started a project to build a database of panoramic radiography and CBCT devices in use in the Republic of Croatia to compare models and manufacturers, and to monitor how their properties change with time and wear. In this paper, we present our first measurements and discuss problems arising from the implementation of EFOMP CBCT Protocol into our legislature, and consequently into annual quality control check-ups.

BIOLOŠKI UČINCI ZRAČENJA

BIOLOGICAL EFFECTS OF RADIATION

PROMJENE VIBRACIJSKIH SVOJSTAVA DEOKSIRIBONUKLEINSKE KISELINE POD UTJECAJEM IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Nikola Šegedin¹, Hrvoje Hršak², Kristina Serec¹, Sanja Dolanski Babić¹

¹Medicinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

²Klinički bolnički centar Zagreb, Zagreb

nikola.segedin@mef.hr

UVOD

Struktura, konformacija i interakcija deoksiribonukleinske kiseline (DNA) s okolišem igraju ključnu ulogu u određivanju fizioloških procesa. Kako smo stekli iskustvo u istraživanjima utjecaja dodane soli na strukturu DNA primjenom infracrvene spektroskopije s Fourierovom transformacijom (FTIR) činilo nam se zanimljivim istražiti utjecaj ionizirajućeg zračenja na DNA, za potrebe ove studije, snopa fotona energija 1,25 MeV i 100 keV.

MATERIJALI I METODE

Sušeni končići natrijeve soli genomske DNA izolirane iz lososovih testisa proizvođača Sigma-Aldrich (proizvodni broj D1626) otopljeni su u 10 mM NaCl vodenoj otopini te su tako dobivene otopine množinske koncentracije od 7,5 mM, odnosno masene koncentracije od 5 g/L DNA (u daljnjem tekstu DNA otopine). Natrijeva sol je prethodno otopljena u demineraliziranoj vodi Ultrapure MilliQ. Rezultati izvedene gel elektroforeze uzoraka DNA pokazali su da se većina fragmenata DNA nalazi u rasponu od 2000 - 20 000 parova baza, što odgovara prosječnoj duljini od 4 μm [1]. Također, UV spektrofotometrijom utvrđen je mali udio proteina, $A_{260}/A_{280} = 1,8 - 2,0$.

Spremnici s 400 μL uzorka ozračeni su fotonskim snopovima energije 1,25 MeV pomoću uređaja za radiokirurgiju mozga *Leksell Gamma knife* (Elekta Instrument AB, Stockholm, Švedska) (Slika 1a). Referentna brzina apsorbirane doze je 1,553 Gy/min. Dimenzije spremnika, koji je postavljen u središte sfernog fantoma izrađenog od tkivu ekvivalentne plastike (akrilonitril butadien stiren - ABS), odabrane su tako da je isporučena doza u cijelom volumenu uzorka uniformna [2]. Dodatni set uzoraka ozračen je pomoću rendgenskog uređaja *Gulmay D3150* (Gulmay Medical Ltd, Surrey, Velika Britanija) za površinsku radioterapiju primjenom fotonskog snopa energije 100 keV (Slika 1 b). Referentna brzina apsorbirane doze je 9,8 Gy/min. Atenuacija snopa rendgenskog zračenja na putu koji odgovara debljini sloja uzorka od 0,65 mm je zanemarena. Isporučene apsorbirane doze ionizirajućeg zračenja gore navedenih energija za definirane volumene DNA otopina su u širokom opsegu od 0,1 do 100 Gy.

Infracrvenom spektroskopijom mjerimo apsorbanciju uzorka u ovisnosti o valnim brojevima (valni broj je proporcionalan frekvenciji vibracije) [3]. Mjerenjem se dobiju spektri koji se dodatno obrađuju za analizu Fourierovom transformacijom. FTIR spektar DNA u području valnih brojeva od 4000 do 400 cm^{-1} ima 40-tak apsorpcijskih linija koje povezujemo sa strukturom DNA. Od posebnog interesa je područje od 1800 do 800 cm^{-1} jer sadrži najveći broj vibracija koje dijelimo na dvije osnovne grupe. Vibracije baza su u području od 1800 - 1300 cm^{-1} , a vibracije okosnice DNA su u području 1300 - 800 cm^{-1} . S obzirom da su dvostruke veze (npr. C=O ili C=N) uglavnom karakteristične za baze, a nalaze se na višim frekvencijama u odnosu na jednostruke veze, područje FTIR spektra koje je posljedica vibracijskih svojstava baza DNA je ograničeno na više valne brojeve pa ga je moguće analizirati odvojeno od spektra



a)



b)

Slika 1. Prikaz eksperimentalnog postava prilikom zračenja DNA otopina na a) gamma nožu Leksell energijama 1,25 MeV i b) rendgen uređaju Gulmay za površinsko zračenje energijama 100 keV.

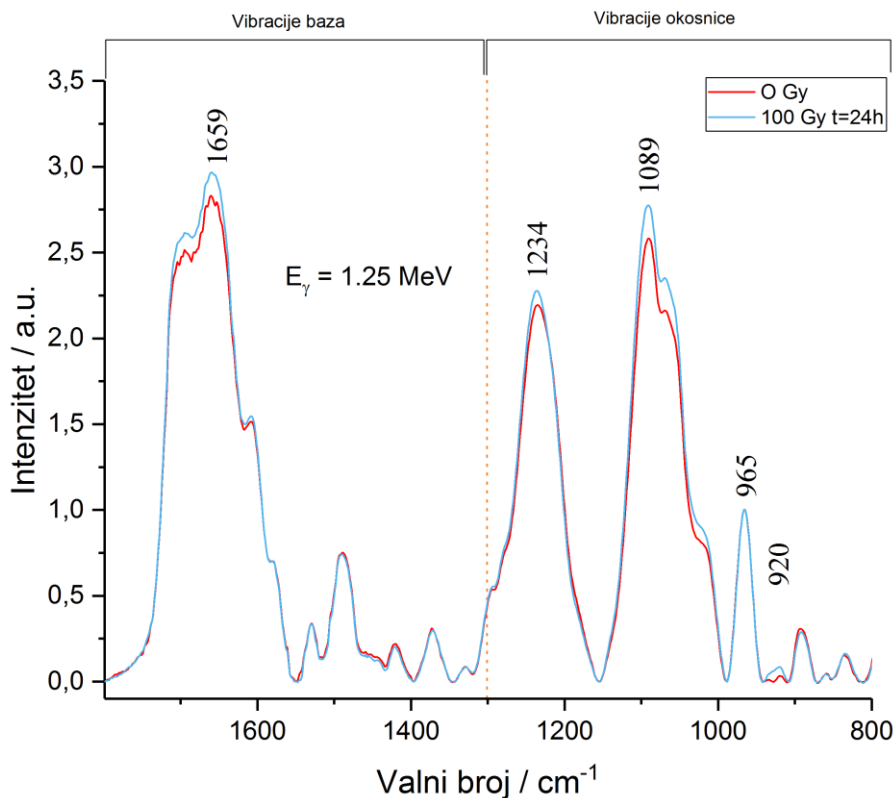
ostatka DNA molekule. Nažalost, vibracije pojedinačnih baza puno je teže razlučiti. Četiri najintenzivnije vibracije u području baza nalaze se na valnim brojevima 1705, 1661, 1609 i 1490 cm^{-1} . Vibracije baza su osjetljive na promjene u vertikalnom slaganju baza, promjene vodikovih veza te na interakcije DNA s ionima i molekulama. Područje FTIR spektra u području valnih brojeva od 1300 do 800 cm^{-1} je posljedica vibracija okosnice koju čine vibracije fosfatnih skupina, deoksiriboze te fosfodiester veze (860 i 830 cm^{-1}) koje su pak iznimno osjetljive na strukturne i konformacijske promjene DNA. Asimetrična i simetrična istežna vibracija fosfatne skupine (O-P-O) nalaze se na valnim brojevima 1234 i 1089 cm^{-1} te se ubrajaju u najintenzivnije vibracije u spektru DNA. Fosfatne skupine su negativno nabijene pa su ove vrpce vrlo osjetljive na prisutnost različitih kationa, promjene u vodikovim vezama kojima su fosfatne skupine vezane na otapalo, ali i na hidratacijske uvjete. Posebno je asimetrična vibracija (1234 cm^{-1}) osjetljiva pa promjene u intenzitetu i valnom broju upućuju na strukturne i konformacijske promjene u DNA. Asignaciju vrpce srednjih i slabih intenziteta vrlo je teško izvesti zbog nestalnosti u njihovom položaju, ali upravo zato ovaj dio spektra služi kao identifikacija autentičnih tvari i konformacijskih promjena [3, 4]. Kako bi se izbjegao utjecaj vibracija vode na vibracije DNA u području baza, razvijen je protokol pripreme tankih filmova iz otopina DNA na kojima su onda snimani FTIR spektri. 30 μL DNA otopine nanoseno je na silicijevu pločicu (koja ujedno služi i kao IR prozor) te sušeno pomoću vakuum pumpe u eksikatoru tijekom 10 minuta [5].

FTIR spektar tankog filma u transmisivskom modu dobiven je od 64 akumulirana skena u području od 650 - 4000 cm^{-1} s rezolucijom od 4 cm^{-1} i automatskom korekcijom otapala. Normiranje spektara na vrpce od 966 cm^{-1} i podešavanja *baselinea* je učinjeno pomoću programskog paketa Kinetics u sklopu Matlaba te u programu eFTIR. Sva mjerenja su izvedena na najmanje 5 uzoraka.

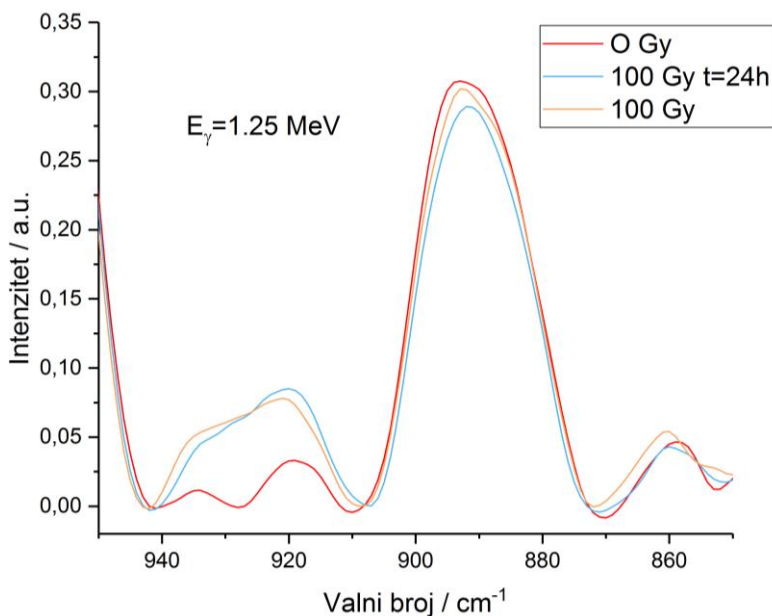
REZULTATI

Na Slici 2 prikazani su spektri tankih filmova DNA otopina u području valnih brojeva od 800 do 1800 cm^{-1} . Crvena linija prikazuje FTIR spektar neozračenog uzorka DNA, a plava linija uzorka ozračenog apsorbiranom dozom od 100 Gy ftonskim snopovima energije 1,25 MeV pomoću *Leksell Gamma knife*. Spektar tankog filma neozračenog DNA je u podudaranju s dobivenim spektrima detaljno analiziranim u našem laboratoriju [6]. Radi provjere rezultata mjerenja dobivenih iz ozračenih DNA otopina, mjerenja infracrvenom spektroskopijom tankih filmova izvedena su odmah nakon obavljenog zračenja i tankih filmova dobivenih nakon 24 sata iz ozračenih DNA otopina. Procijenjena relativna vlaga tankih filmova iznosi oko 85% iz čega možemo zaključiti da se radi o B formi DNA [4]. Intenziteti karakterističnih vrpca baza (1659) i fosfatnih skupina (1234 i 1089) kod ozračenih uzoraka DNA pokazuju blagi porast. Vrpca asignirana na 836 cm^{-1} je marker B forme DNA dok je vrpca asignirana na 860 cm^{-1} marker A forme. Promjene intenziteta ovih vrpca ukazuju na promjene forme DNA što analizom dobivenih spektara nije nađeno. Radi lakšeg praćenja, na slici 2 nije prikazan spektar tankog filma ozračenog DNA dobivenog odmah poslije zračenja. Značajnija razlika spektara potvrđena je tek u vrpca u području valnih brojeva od 830 do 950 cm^{-1} koje se uglavnom pripisuju vibracijama jednostrukih veza C-C i C-O deoksiriboze. Na slici 3 možemo pratiti porast intenziteta vrpce asignirane na 920 cm^{-1} te promjenu širine vrpce. Slično su pokazali Zelig i suradnici u okviru preliminarnih istraživanja rane detekcije karcinoma dojke [7]. Po nekim autorima ova vrpca je marker Z forme DNA [8]. U slučaju ozračenih uzoraka, također možemo primijetiti i porast intenziteta vrpce asignirane na valnom broju 935 cm^{-1} .

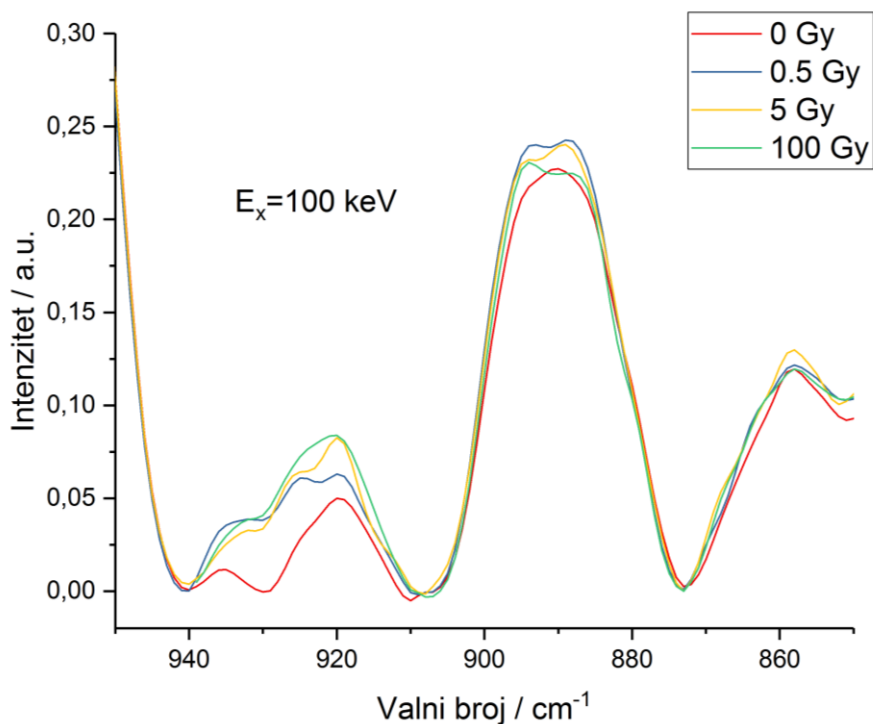
Drugi niz DNA otopina je ozračen pomoću rendgenskog uređaja za površinsku radioterapiju primjenom ftonskog snopa energije 100 keV. Isporučene apsorbirane doze ionizirajućeg zračenja gore navedenih energija za volumene DNA otopina od 250 μL su u širokom opsegu: 0,1, 0,5, 1, 5, 10 i 100 Gy. Svi spektri DNA otopina su dobiveni pripremom tankih filmova odmah nakon provedenog zračenja DNA uzoraka. Detaljnom analizom spektara svih gore navedenih uzoraka nismo primijetili značajnije promjene u intenzitetima niti valnim brojevima za karakteristične vrpce baza, fosfatnih skupina te A i B markera. Međutim, intenzitet vrpce asignirane na 920 cm^{-1} raste s apsorbiranom dozom, ali isto tako i vrpca asignirana na 935 cm^{-1} se pomiče po valnom broju te mijenja svoj oblik i intenzitet. Također, vrpca asignirana na valnom broju od oko 890 cm^{-1} pokazuje porast intenziteta s porastom doze, a i mijenja joj se širina. Ta vrpca se inače pripisuje isteznim vibracijama C-C i C-O šećera [8]. Na Slici 4 prikazani su spektri tankih filmova DNA otopina u području valnih brojeva od 830 do 950 cm^{-1} i to redom: za neozračenog otopine (crvena linija), ozračenog dozom od 0,5 Gy (plava linija), ozračenog dozom od 5 Gy (narančasta linija) i dozom od 100 Gy (zelena linija). Na Slici 5 prikazana je ovisnost intenziteta vrpce asignirane na 920 cm^{-1} o apsorbiranoj dozi za energije od 100 keV. Radi jednostavnosti u prikazu apsorbirane doze za neozračenog uzorke na log skali aproksimirali smo na 10^{-4} Gy.



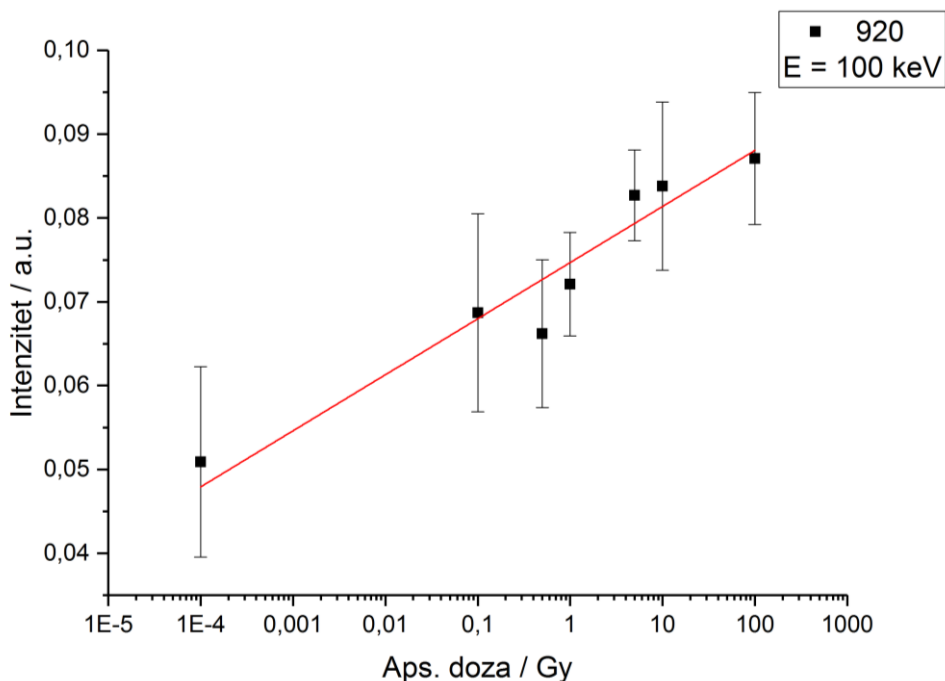
Slika 2. FTIR spektri tankih filmova 10 mM NaCl DNA neozračene (crvena linija) i ozračene otopine (plava linija) u području od 800 – 1800 cm^{-1} na približno 85% relativne vlažnosti. Brojevi označavaju vrpce asignirane vibracijama baza i DNA okosnice.



Slika 3. FTIR spektri tankih filmova: neozračene DNA otopine (crvena linija), ozračene otopine odmah nakon ozračivanja (narančasta linija) te nakon 24 sata (plava linija) u području od 830 – 950 cm^{-1} .



Slika 4. FTIR spektri tankih filmova: neozračene DNA otopine (crvena linija) i ozračenih otopina za apsorbirane doze od 0,5 Gy (plava linija), 5 Gy (narančasta) i 100 Gy (zelena) energija od 100 keV u području od 830 – 950 cm^{-1} .



Slika 5. Ovisnost intenziteta vrpce asignirane na 920 cm^{-1} o apsorbiranoj dozi. Apsorbirana doza od 10^{-4} Gy je uzeta proizvoljno i radi jednostavnosti za neozračene DNA otopine.

ZAKLJUČAK

Ovaj rad kao preliminarna studija istraživanja utjecaja ionizirajućeg zračenja energija fotona od 100 keV i 1,25 MeV na DNA primjenom infracrvene spektroskopije pokazao je da su promjene spektara male, ali neke vrpce povezane s konformacijom DNA, pokazuju promjene u intenzitetu s povećanjem apsorbirane doze i također promjene u svojoj širini. Dobiveni rezultati opravdavaju naša očekivanja pa je planirano proširenje istraživanja.

Zahvala

Rad je izrađen uz financijsku potporu Medicinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i na teret Sveučilišne potpore *Biosenzor za vibracijsku analizu tankih filmova DNA temeljen na SERS i SEIRA spektroskopiji*. Autori zahvaljuju radiološkom tehnologu Damiru Hršanu na pomoći prilikom provedbe eksperimentalnog dijela rada.

LITERATURA

- [1] Tomić S, Grgičin D, Ivek T, Vuletić T, Dolanski Babić S, Podgornik R. Dynamics and structure of biopolyelectrolytes in repulsion regime characterized by dielectric spectroscopy. *Physica B: Condensed Matter* 2012;407:1958-1963.
- [2] Hršak H. Dozimetrija uskih snopova u stereotaktičkoj neuroradiokirurgiji gama nožem, doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [3] Günzler H, Gremlich HU. Uvod u infracrvenu spektroskopiju, Školska knjiga, Zagreb, 2006. ISBN 978-953-0-30913-5.
- [4] Diem M. *Modern Vibrational Spectroscopy and Micro-Spectroscopy: Theory, Instrumentation and Biomedical Applications*. Wiley, USA, 2015.
- [5] Serec K. Vibracijska dinamika tankih filmova deoksiribonukleinske kiseline, doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2016.
- [6] Serec K, Dolanski Babić S, Podgornik R, Tomić S. Effect of magnesium ions on the structure of DNA thin films: an infrared spectroscopy study. *Nucl Acids Res* 2016;44 (17):8456-64.
- [7] Zelig U et al. Early detection of breast cancer using total biochemical analysis of peripheral blood components: a preliminary study. *BMC Cancer* 2015;15:408.
- [8] Movasaghi Z et al. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy of Biological Tissues, *Applied Spectroscopy Reviews* 2008;43:2,134-179.

CHANGES IN THE VIBRATIONAL PROPERTIES OF THE DEOXYRIBONUCLEIC ACID UNDER THE INFLUENCE OF IONIZING RADIATION

Nikola Šegedin¹, Hrvoje Hršak², Kristina Serec¹, Sanja Dolanski Babić¹

¹School of Medicine, University of Zagreb, Zagreb

²University Hospital Centre Zagreb, Zagreb

nikola.segedin@mef.hr

In this research, we were investigating changes in the vibrational properties of the deoxyribonucleic acid caused by ionizing radiation using infrared spectroscopy with Fourier transformation (FTIR).

Samples were prepared by dissolving commercial salmon DNA in 10 mM NaCl solution. The final solution had a concentration of 5 g/L of DNA. The DNA solution was stored in multiple containers from which each had a volume of 400 microL. These DNA containers were irradiated with 1.25 MeV photons energy on *Leksell Gamma Knife* (Elekta Instrument AB, Stockholm, Sweden) that is used at brain radiosurgery (referent dose absorption rate of 1.553 Gy/min). Dimensions and the material of the container were carefully considered so that we were able to produce a uniform dose delivery through the targeted volume. During irradiation, DNA container has been fixed in the middle of the spherical phantom made out of the tissue equivalent material (ABS plastics). An additional set of identical DNA solution was irradiated on *Gulmay D3150* (Gulmay Medical Ltd, Surrey, Great Britain) X-ray for skin radiotherapy using 100 keV photons energy (referent dose absorption rate of 9.8 Gy/min). Any beam attenuation was ignored since the irradiated layer of DNA was only 0.65 mm thick. In the latter case, DNA samples were irradiated so we had a wide range of absorbed dose for targeted volume: 0.1, 0.5, 1, 5, 10 and 100 Gy. Irradiated DNA was pipetted on a silicon plate as an optical window and then dried in the vacuum pump until a thin DNA film was formed. FTIR spectrum was obtained in transmission mode with 64 scan accumulations in the range from 650 - 4000 cm⁻¹ with the resolution of 4 cm⁻¹ and automatic solution corrections. Normalization and baseline correction was performed using program Kinetics as part of the MatLab software while the additional spectra processing was performed using eFTIR software.

Recorded FTIR spectra of irradiated DNA show neither any significant changes in the intensity nor the shift of the characteristic bands in the base region of the DNA. However, the intensity of the DNA has been slightly changed in the region of the backbone vibrations which is more prominent for higher absorbed doses.

CYTOGENETIC STATUS OF WORKERS EXPOSED TO LOW DOSES OF IONISING RADIATION WITH DOSIMETRY AND IMPORTANCE OF THE DISTRIBUTION OF DNA DAMAGE IN DIFFERENT BIO-DOSIMETRY METHODS IN THE RESULTS ESTIMATION

*Mirta Milić¹, Ružica Rozgaj¹, Vilena Kašuba¹, Nevenka Kopjar¹, Snježana Ramić²,
Anica Horvat Knežević³, Vesna Benković³*

¹Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia

²Department of Oncological Pathology, Sestre Milosrdnice University Hospital Center,
Zagreb, Croatia

³Division of Animal Physiology, Department of Biology, Faculty of Science,
University of Zagreb, Zagreb, Croatia

mmilic@imi.hr

INTRODUCTION

The increasing risk of acute accidental/professional radiological/nuclear population exposures underlines the necessity of improving simple and efficient biodosimetric tools that could be used for triage purposes [1-3]. The risk of exposure considers not just the effect of the high doses received, but also exposure to low-doses, where the real biological dose effect can be hidden. Risk assessment and DNA damage estimation in low doses ionizing radiation (IR) exposure has still many uncertainties, especially among chronically exposed personnel. Different biological assay can be used in bio-dosimetry, but usual strategy is demonstration of only ultimate outcome: damage number/frequency. Usually this kind of data interpretation does not give an input to the induction and persistence of DNA damage detected with different radiation exposure biomarkers and those are the data that can give a broader vision of the exact genomic instability and severity hidden by representing only one final DNA damage category.

Among other biodosimetric methods, chromosomal aberrations (CA) and citohalazin-B blocked micronucleus (CBMN) assay are usually used. Bleomycin radiomimetic sensitivity (BLM) assay can be also used to demonstrate the sensitivity to chromosomal and chromatid break, since this chemical is also radiomimetic drug. Although those assays represent the level of permanent DNA damage, it is also useful to check the primary levels of DNA damage using alkaline comet assay.

In CA assay, usually only the number of dicentric chromosomes is presented as the golden biodosimetric assay parameter, but not also other parameters that can be measured. For the CBMN, usually only the frequency of the micronucleus is demonstrated, without the distribution of micronucleus frequency, nuclear buds that can be also potential micronucleus, nucleoplasmic bridges and the influence of the proliferation and apoptotic and necrosis.

In this preliminary study we wanted to demonstrate that besides total number/frequency, damage distribution subcategories can give a better insight in the DNA damage severity as the result of the working life-time exposure in the occupationally exposed workers to low IR doses.

MATERIALS AND METHODS

We evaluated the DNA damage in 19 occupationally IR low-dose exposed medical workers and their controls (19) matched by age, gender and smoking status in fresh whole blood. All the volunteers were informed about the aim of the study, gave their written consent and filled the standardised questionnaire about their life style, habits, recent diagnostic

procedures, treatments and possible diseases. All volunteers not considered healthy after fulfilling the questionnaire were excluded from further participation in the study and their blood samples were not taken. The study had ethical approval of the Institute and the hospitals where those individuals were working. All the IR workers were wearing their dosimeters and the dose received yearly and for the entire life was calculated. The data for the doses were received from the former State Office for Radiological and Nuclear Safety of the Republic of Croatia, together with the written approval from each worker that we can use their dose results for scientific purposes.

From each individual, at least 10 ml of heparinised whole blood was taken and the cell cultures were made for the CA, BLM and CBMN assay. For alkaline comet assay, only 8 μ l of whole blood was taken for each slide and for each person, all slides were done in duplicates. The assay was performed according to Singh et al. with some minor modifications [4], and the parameters used were TL-tail length, TI-tail intensity. CBMN was done in triplicate, using 1.5 ml of whole blood and the assay was performed respecting our standard procedure [5,6]. Parameters used were beside the MN frequency also nuclear buds, nucleoplasmic bridges, proliferation index, apoptosis and necrosis. For CA assay we used 1 ml of blood, in duplicate cell cultures and the assay was performed also by our standard procedure [6]. We used parameters such as chromatid/chromosomal breaks and acentric/bicentric frequency. For BLM performed also by our standard procedure assay [7], we used parameters such as breaks frequency and number of metaphases with damage. Statistical analysis was performed using descriptive statistics and non-parametric tests for dependent samples.

RESULTS

Some group results can be seen in Figures 1 and 2. Other results are expressed as mean \pm SD (range). Medical workers had 0.58 ± 1.38 mSv (0 - 5.96 mSv) of occupational effective dose, with 13.95 ± 8.95 years of exposure (1 - 28 years). Among them there were 6 smokers who were smoking 18.83 ± 6.18 years (8 - 27 years) with average number of 12.50 ± 7.15 (2 - 20) cigarettes per month. They were 41.74 ± 10.20 (25 - 59 years) years old, while control group was 42.63 ± 10.61 (24 - 60 years) years old, with 6 smokers who smoked for 18.33 ± 9.83 years (10 - 30 years) and on average 16.67 ± 8.76 (5 - 30) cigarettes per month. Both groups did not differ in the diseases or medical treatments, and most of them considered themselves to be healthy. Considering the DNA damage detected, medical workers demonstrated higher DNA damage levels for all assays except BLM average frequency per metaphase (here the values were higher for the control group: 0.43 ± 0.23 (0.15 - 0.89) vs. 0.76 ± 0.40 (0.20 - 1.63)). Both groups did not differ in general in alkaline comet assay parameters, TL and TI, but we demonstrated in another study that values between control and exposed group in alkaline comet assay can differ in the velocity of DNA damage repair and the amount of repaired DNA after the challenging doses from 2 and 4 Gy in the time of 30 minutes, 1 hour and 24 hours [8]. In this study we demonstrated positive correlation between DNA damage detected with comet assay and the received total dose per individual ($R = 0,543$). Dose received-DNA damage correlation was seen mostly for the DNA damage assays sub-categories and not for the total DNA damage number/frequency. Total number of acentric fragments demonstrated correlation with the dose received ($p = 0.002741$) and similar was demonstrated for the metaphases where 1 acentric was found ($p = 0.004586$), but not for the metaphases with 2 or more acentric, or for the total number of bicentric category. Correlation was also found for the number of breaks in BLM assay with the dose received, although the control values in general had higher values ($p = 0,023977$). There was strong correlation with total number of chromatid breaks ($R = 0,638863$) and in the average number of metaphases with only one chromatid break with the dose ($R = 0,689156$).

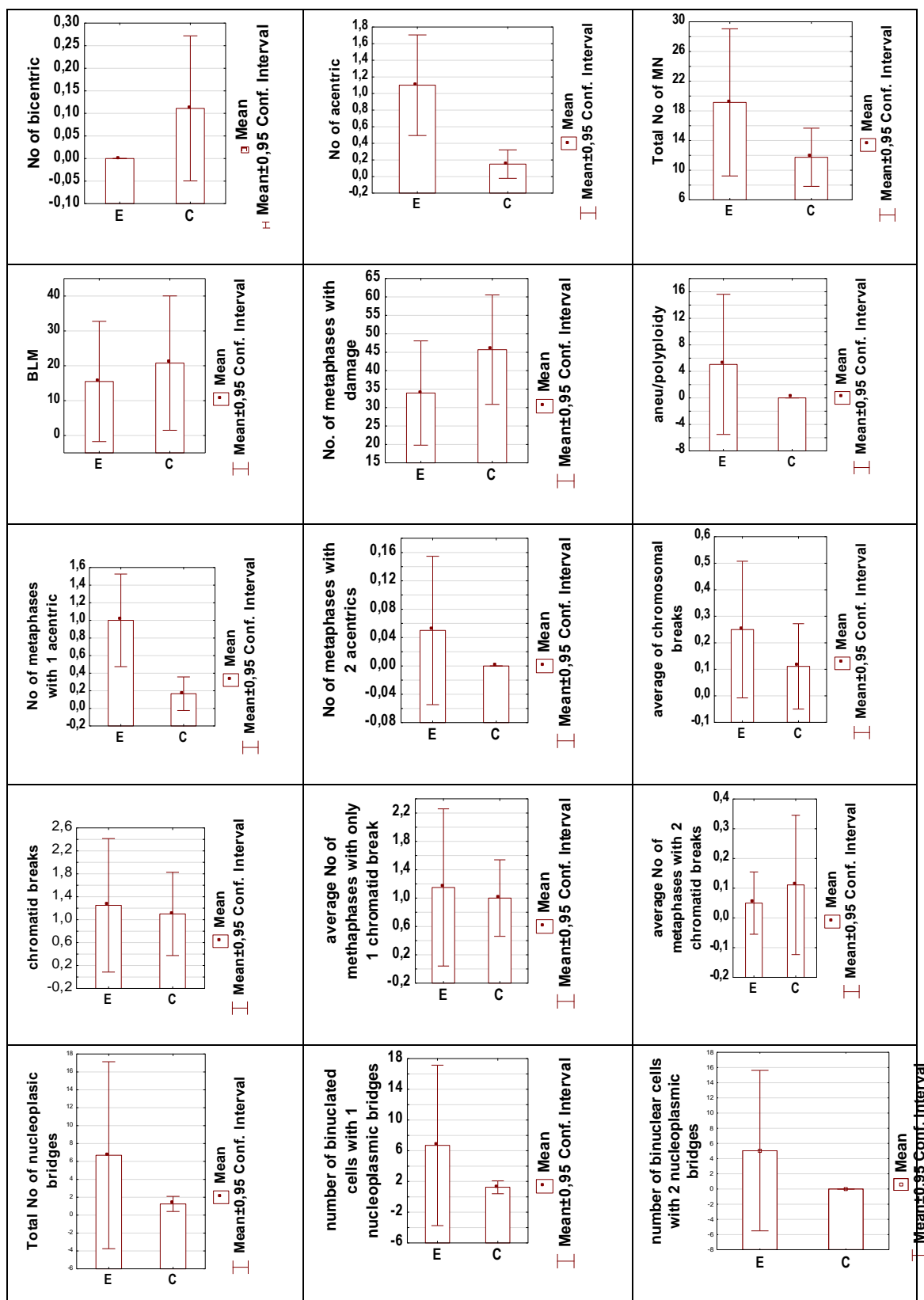


Figure 1. Some results of CA, CBMN and BLM assay between control (C) and exposed (E) group.

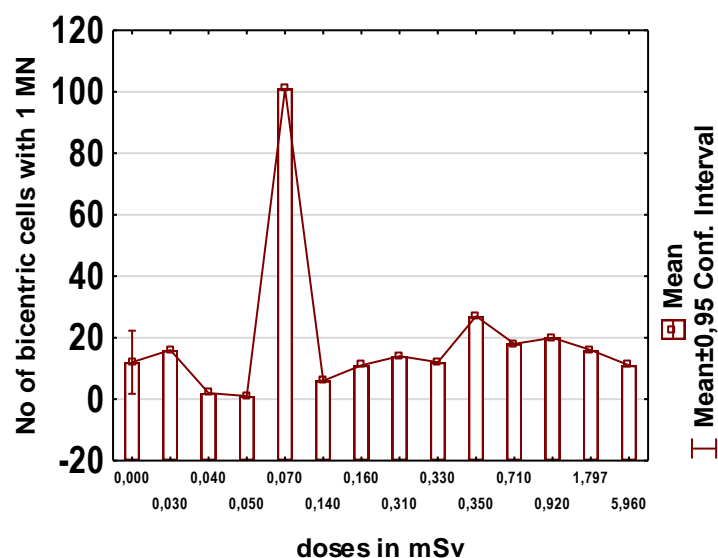


Figure 2. Demonstration of correlation of micronucleus frequency with the doses received.

In general, the total number of micronucleus, buds and nucleoplasmic bridges did not demonstrate correlation with the dose, but subcategories did (Figure 2). It was demonstrated that exposed workers had higher frequency not only in total number, but also for the dicentrics with 1 or 2 MN found, while controls did not demonstrate this kind of effect. Differences in the frequency of aneu/polyploidy were also obvious, while control group had 0 values, exposed group had on average 5.32 ± 23.17 (0 - 101) in 200 metaphases. Two groups differed also in the frequency of apoptotic cells, with higher number in the exposed group (0.11 ± 0.32 , 0 - 1 vs. 0.26 ± 0.65 , 0 - 2).

CONCLUSION

With 0.58 ± 1.38 mSv (mean \pm standard deviation) occupational effective dose, 13.95 ± 8.95 years of exposure, medical workers demonstrated higher DNA damage levels for all assays except BLM. Dose received-DNA damage correlation was seen only in the DNA damage assays sub-categories and not for the total DNA damage number/frequency. These facts suggest that lifetime accumulated DNA damage is not only the result of the IR exposure, and that the truly influence of the dose received during working period of medical workers can be seen by analysing in detail the DNA damage distribution through the categories.

Acknowledgments

This study was financially supported by the Institute for Medical Research and Occupational Health and Cost action CA 15132.

REFERENCES

- [1] Blakely WF, Salter CA, Prasanna PGS. Early-response biological dosimetry-recommended countermeasure enhancements for mass-casualty radiological incidents and terrorism. *Health Phys* 2005;89:494-504. PMID: 16217193
- [2] Chaudhry MA. Biomarkers for human radiation exposure. *J Biomed Sc.* 2008;15: 557-563. <https://doi.org/10.1007/s11373-008-9253-z> PMID: 18454354
- [3] Rothkamm K, Beinke C, Romm H, Badie C, Balagurunathan Y, Barnard S, et al. Comparison of established and emerging biodosimetry assays. *Radiat Res* 2013;180: 111-119. <https://doi.org/10.1667/RR3231.1> PMID: 23862692

- [4] Milić M, Ožvald I, Vrček IV, Lovrenčić MV, Oreščanin V, Bonassi S, Castillo ERD. Alkaline comet assay results on fresh and one-year frozen whole blood in small volume without cryo-protection in a group of people with different health status. *Mutat Res/ Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 2019, in press <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2019.03.009>
- [5] Milić M, Rozgaj R, Kašuba V, Jazbec AM, Starčević B, Lyzbicki B, Ravegnini G, Zenesini C, Musti M, Hrelia P, Angelini S. Polymorphisms in DNA repair genes: link with biomarkers of the CBMN cytome assay in hospital workers chronically exposed to low doses of ionising radiation. *Arh Hig Rada Toksikol* 2015;66(2):109-20. doi: 10.1515/aiht-2015-66-2655.
- [6] Milić M, Kasuba V, Orescanin V, Zeljezić D, Kopjar N, Rozgaj R. Chromosome damage in workers in cigarette manufacturing industry. *J Appl Toxicol* 2008;28(3):399-404. doi: 10.1002/jat.1327.
- [7] Milić M. Genomska nestabilnost i test osjetljivosti na bleomycin. [Genome instability and bleomycin sensitivity test] *Arh Hig Rada Toksikol* 2010;61(2):257-66. doi: 10.2478/10004-1254-61-2010-2003. Review. In Croatian.
- [8] Milić M, Rozgaj R, Kašuba V, Jazbec AM, Hrelia P, Angelini S. 2011. The Influence of Individual Genome Sensitivity in DNA Damage Repair Assessment in Chronic Professional Exposure to Low Doses of Ionizing Radiation, In: *Selected Topics in DNA Repair*, Clark C. Chen, IntechOpen, DOI: 10.5772/20814. Available from: <https://www.intechopen.com/books/selected-topics-in-dna-repair/the-influence-of-individual-genome-sensitivity-in-dna-damage-repair-assessment-in-chronic-profession>

CYTOGENETIC STATUS OF WORKERS EXPOSED TO LOW DOSES OF IONISING RADIATION WITH DOSIMETRY AND IMPORTANCE OF THE DISTRIBUTION OF DNA DAMAGE IN DIFFERENT BIO-DOSIMETRY METHODS IN THE RESULTS ESTIMATION

*Mirta Milić¹, Ružica Rozgaj¹, Vilena Kašuba¹, Nevenka Kopjar¹, Snježana Ramić²,
Anica Horvat Knežević³, Vesna Benković³*

¹Institute for Medical Research and Occupational Health, 10000 Zagreb, Croatia

²Department of Oncological Pathology, Sestre Milosrdnice University Hospital Center, Zagreb, Croatia

³Division of Animal Physiology, Department of Biology, Faculty of Science, University of Zagreb, Zagreb, Croatia

mmilic@imi.hr

Risk assessment and DNA damage estimation in low doses ionizing radiation (IR) exposure has still many uncertainties, especially among chronically exposed personnel. Different biological assay can be used in bio-dosimetry, but usual strategy is demonstration of only ultimate outcome: damage number/frequency. We demonstrated that besides total number/frequency, damage distribution subcategories can give a better insight in the DNA damage severity as the result of the working life-time exposure. We evaluated DNA damage in 19 occupationally IR low dose exposed medical workers and their controls (19) matched by age, gender and smoking status in fresh whole blood using alkaline comet (TL-tail length, TI-tail intensity), micronucleus cytome (MN, nuclear buds, nucleoplasmic bridges, proliferation index, apoptosis, necrosis), chromosomal aberrations (chromatid/chromosomal breaks, acentric/bicentric frequency) and bleomycin radiomimetic challenging assay (BLM) (breaks frequency, number of metaphases with damage). With 0.58 ± 1.38 mSv (mean \pm standard deviation) occupational effective dose, 13.95 ± 8.95 years of exposure, medical workers demonstrated higher DNA damage levels for all assays except BLM. Dose received-DNA damage correlation was seen only in the DNA damage assays sub-categories and not for the total DNA damage number/frequency. These facts suggest that lifetime accumulated DNA damage is not only the result of the IR exposure, and that the truly influence of the dose received during working period of medical workers can be seen by analysing in detail the DNA damage distribution through the categories.

BUCCAL MICRONUCLEUS ASSAY: AN INTRODUCTORY STUDY ON X-RAY EXPOSED CHILD POPULATION

Mirta Milić¹, Đurđica Milković², Marko Gerić¹, Marijana Nodilo³, Mária Ranogajec-Komor³, Goran Gajski¹

¹Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia

²Srebrnjak Children's Hospital, Zagreb, Croatia

³Ruder Bošković Institute, Zagreb, Croatia

durdica.milkovic@gmail.com

INTRODUCTION

Ionizing radiation (IR) is a powerful physical agent capable of inducing both mutations and chromosomal aberrations. Non-lethal doses of IR may induce genomic instability favouring carcinogenesis. In spite of the above mentioned, this kind of radiation is an important tool for diagnosis of certain diseases and is widely used in various medical diagnostic procedures. Carcinogenesis is considered to be the most important consequence of low doses of IR, and is thus of most concern in radiology. Children are more sensitive to the carcinogenic effects of IR than adults, and this risk arise due to their anatomical features and their longer life expectancy. Risks of radiation-related cancer are greatest for those exposed early in their life, and these risks seem to persist throughout life [1-4].

It has been postulated that the number of micronuclei and increased frequency of other nuclear abnormalities, including karyorrhexis, condensed chromatin and pyknosis, are related to the increasing effects of carcinogens. Although many approaches and methods have been developed for the monitoring of human populations exposed to various mutagens and carcinogens, the micronucleus assay has become a standard method for the assessment of chromosomal damage in human population. The cytokinesis-block micronucleus cytome assay has become one of the best-validated methods for measuring chromosome damage in human blood lymphocytes; however, the buccal micronucleus cytome assay is gaining more attention in recent years, especially as it is minimally invasive, hence more appropriate for children biomonitoring [5-8].

To provide the best care for young patients, the effects of IR should be minimized. Therefore, diagnostic X-ray procedures must be performed by the highest standards to ensure that the young patient has the lowest risk possible. In that manner, the ALARA (As Low As Reasonably Achievable) principle is the basis used in radiation protection, in determination of absorbed dose, as a prerequisite for risk estimation of genome damage, especially for paediatricians and in their work with children who should be exposed to IR, whether in the treatment or in the diagnostic purposes. As children are the most sensitive to radiation, there is a need for constant follow-up of the young populations who are receiving these X-ray diagnostic examinations [9,10].

Therefore, presented preliminary study aims to investigate effects of diagnostic sinus X-ray exposure on buccal epithelia cells using the buccal micronucleus cytome assay. Additionally, physical dosimetry was employed to evaluate the degree of radiological exposure using the Dose Ace radiophotoluminescent (RPL) glass dosimetry systems (GD-352M detector) developed for medical applications.

MATERIALS AND METHODS

The study comprised a random sample of 12 children all with medical conditions, which warranted their radiographic examination. They were between the ages of 6 and 15 years (12.1 ± 2.9) with the body mass index (BMI) of 17.8 ± 2.8 kg/m². This study was approved by

Ethical committees, and was performed in accordance with the ethical standards laid down in the Declaration of Helsinki and as suggested by Merlo et al. [11]. All volunteers were informed about the aim and the experimental details of the study. The parents or legal guardians of the children all gave their informed consent and volunteered to donate buccal epithelia samples to be used for scientific purposes. They were asked to fill in a standardized questionnaire, designed to obtain relevant details about children's lifestyle and health status, including the recent diagnostic exposures and treatments. No private details on subjects involved in study are, or will be highlighted in public.

During routine X-ray examination of sinuses, the dosimeters were positioned on the occiput (primary beam) and below the tongue (Figure 1). The parameters of the irradiations were: the voltage of the X-ray 75 kV, the quantity of charge was 28 mAs and the time of irradiation was 22 ms. A protective lead apron on the neck was used to protect the thyroid gland. The dosimeters (AGC Techno Glass Co., Ltd., Japan) were initially and finally read at Dose Ace system instrument, FGD-1000SE (AGC Techno Glass Co., Ltd.) (Figure 1).



Figure 1. Picture of radiophotoluminescent (RPL) glass dosimeters GD-352M with and without shielding in relation to 5 lipa coin (A) and their position on the head, above the left eye and below the tongue (B)

Buccal micronucleus cytome assay was done according to Thomas et al. [8] with minor modifications described previously by Milić et al. [12]. Buccal samples were taken immediately before and two weeks after the X-ray examination under the same conditions. Briefly, subjects rinsed their mouth with water and buccal cells samples were collected from both cheeks using a toothbrush. Samples were immediately placed into 50 ml conical vertical plastic centrifugation tubes pre-filled with 30 ml of cold buccal cell buffer. As such, samples were coded and stored at 4°C until final processing the same day. Afterwards, slides were kept at -20°C and stained immediately prior to scoring. Scoring of the slides was performed blindly using transmitted light microscopy under far-red fluorescence at 1000× (BX-51, Olympus, Japan). A minimum of 1000 cells were counted to determine the frequency of each cell type in the sample. Nuclear changes were classified according to HUMNxl criteria as: normal basal cells, normal differentiated cells, binucleated cells, cells with condensed chromatin, pyknotic cells, cells with karyorrhectic chromatin, and karyolytic cells. DNA damage biomarkers (cells with micronuclei and nuclear buds, including the so-called "broken eggs") were scored in a minimum of 2000 differentiated cells [6]. Statistical analysis was performed using descriptive statistics and non-parametric test for dependent samples.

RESULTS

Doses measured using RPL dosimetry systems were in the range of 379-1106 μ Gy and 3-42 μ Gy in the primary beam and below the tongue, respectively (Figure 2).

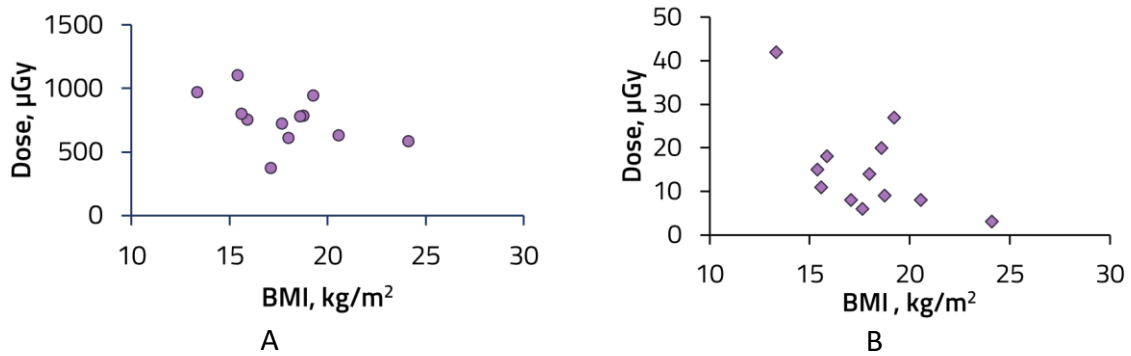


Figure 2. Upon sinus X-ray in the child population, the doses ranged 379 – 1109 μGy in the primary beam (A) and 3 – 42 μGy under the tongue (B)

The results obtained after diagnostic X-rays did not reveal significant difference in any of the buccal micronucleus cytome assay parameters tested, compared to values obtained prior to the diagnostic procedure. Results also revealed that inter-individual differences existed for each monitored child (Figure 3).

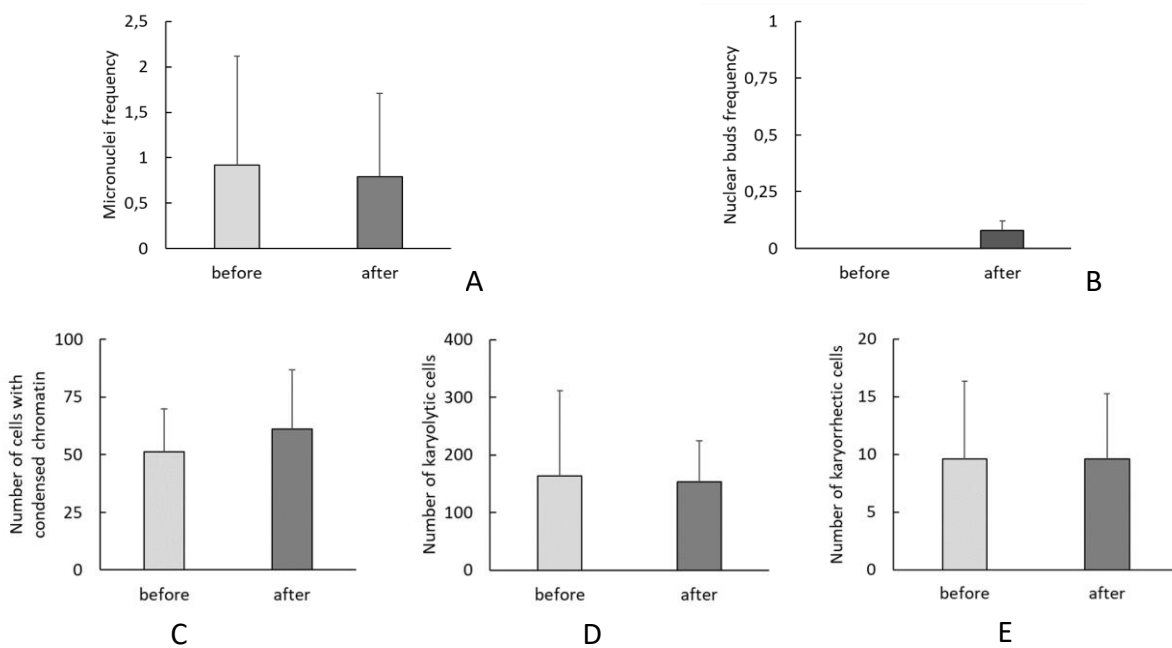


Figure 3. Micronuclei (A) and nuclear buds (B) frequency in buccal epithelial cells before sinus X-ray and 14 days after the diagnostic exposure used as biomarkers of genotoxicity. Frequency of cells with condensed chromatin (C), karyolytic cells (D), and karyorrhetic cells (E) as biomarkers of cytotoxicity.

CONCLUSION

Although we did not observe any significant changes in parameters tested, some of the assessed parameters showed small increases in their values after the radiological examination indicating that further studies with larger samples are warranted. Based on the obtained results, methods such as the buccal micronucleus cytome assay could be very useful in acute events where children are exposed to genotoxic agents especially from physical sources. Furthermore, this particular method could be used for monitoring genetic damage in children who are often exposed to diagnostics or therapeutic procedures, as it is a minimally invasive

method of sample collection. In line with that, future research on biomonitoring and finding optimal biomarkers for low-dose IR exposure are required, especially in paediatric diagnostics to minimize the potential damage and maintain the optimal benefit for young patients. For now, we have to keep the annual absorbed dose as low as possible, especially at early ages, and conduct more research of the radio-sensitivity time window.

Acknowledgments

This study was financially supported by the Institute for Medical Research and Occupational Health, Ruđer Bošković Institute, Srebrnjak Children's Hospital, and Chiyoda Technol Corporation. Authors would also like to thank Ms. Miroslava Družić for selfless help during the experiments as well as to Željka Knežević, PhD and Vera Garaj-Vrhovac, PhD for support during the work.

REFERENCES

- [1] Gilbert ES. Ionising radiation and cancer risks: what have we learned from epidemiology? *Int J Radiat Biol* 2009;85:467-482.
- [2] Hall EJ. Radiation biology for pediatric radiologists. *Pediatr Radiol* 2009;39:57-64.
- [3] Linet MS, Kim KP, Rajaraman P. Children's exposure to diagnostic medical radiation and cancer risk: epidemiologic and dosimetric considerations. *Pediatr Radiol* 2009;39:4-26.
- [4] Gajski G, Milković D, Ranogajec-Komor M, Miljanić S, Garaj-Vrhovac V. Application of dosimetry systems and cytogenetic status of the child population exposed to diagnostic X-rays by use of the cytokinesis-block micronucleus cytome assay. *J Appl Toxicol* 2011;31:608-617.
- [5] Gajski G, Gerić M, Oreščanin V, Garaj-Vrhovac V. Cytokinesis-block micronucleus cytome assay parameters in peripheral blood lymphocytes of the general population: Contribution of age, sex, seasonal variations and lifestyle factors. *Ecotoxicol Environ Saf* 2018;148:561-570.
- [6] Bolognesi C, Knasmueller S, Nersesyan A, Thomas P, Fenech M. The HUMNxl scoring criteria for different cell types and nuclear anomalies in the buccal micronucleus cytome assay - an update and expanded photogallery. *Mutat Res* 2013;753:100-113.
- [7] Bolognesi C, Bonassi S, Knasmueller S, Fenech M, Bruzzone M, Lando C, Ceppi M. Clinical application of micronucleus test in exfoliated buccal cells: A systematic review and meta-analysis. *Mutat Res* 2015;766:20-31.
- [8] Thomas P, Holland N, Bolognesi C, Kirsch-Volders M, Bonassi S, Zeiger E, Knasmueller S, Fenech M. Buccal micronucleus cytome assay. *Nat Protoc* 2009;4:825-837.
- [9] Strauss KJ, Kaste SC. The ALARA (as low as reasonably achievable) concept in pediatric interventional and fluoroscopic imaging: striving to keep radiation doses as low as possible during fluoroscopy of pediatric patients – a white paper executive summary. *Pediatr Radiol* 2006;36:110-112.
- [10] Voss SD, Reaman GH, Kaste SC, Slovis TL. The ALARA concept in pediatric oncology. *Pediatr Radiol* 2009;39:1142-1146.
- [11] Merlo DF, Knudsen LE, Matusiewicz K, Niebrój L, Vähäkangas KH. Ethics in studies on children and environmental health. *J Med Ethics* 2007;33:408-413.
- [12] Milić M, Neri M, Ceppi M, Bruzzone M, Munni A, Ugolini D, Cristaudo A, Bonotti A, Peluso ME, Bonassi S. DNA damage and genomic instability among workers formerly and currently exposed to asbestos. *Scand J Work Environ Health*. 2018;44:423-431.

BUCCAL MICRONUCLEUS ASSAY: AN INTRODUCTORY STUDY ON X-RAY EXPOSED CHILD POPULATION

Mirta Milić¹, Đurđica Milković², Marko Gerić¹, Marijana Nodilo³, Mária Ranogajec-Komor³, Goran Gajski¹

¹Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia

²Srebrnjak Children's Hospital, Zagreb, Croatia

³Ruder Bošković Institute, Zagreb, Croatia

durdica.milkovic@gmail.com

Children are more sensitive towards the effects of ionizing radiation (IR) than adults and this risk is given by their anatomical features and their longer life expectancy in which that risk can be expressed. Hence, in this preliminary study we explored the effects of diagnostic sinus X-ray exposure on buccal epithelia cells using the buccal micronucleus cytome assay. This particular assay is minimally invasive method of sample collection and therefore more appropriate in children's biomonitoring compared to more commonly used blood sampling. Micronuclei as well as other biomarkers of DNA damage (nuclear buds and the so-called "broken eggs") and genomic instability, cytokinetic failure or cell death (normal basal cells, normal differentiated cells, binucleated cells, cells with condensed chromatin, pyknotic cells, cells with karyorrhectic chromatin and karyolytic cells) were scored in a minimum of 2000/1000 cells per child, respectively. Twelve children, all with medical conditions which warranted their radiographic examination, between the ages of 6 and 15 years (12.1 ± 2.9) and body mass index (BMI) of 17.8 ± 2.8 kg/m² were evaluated. In addition to skin dose measurements in the primary beam on the head, doses were measured in the oral cavity below the tongue. Doses measured using radiophotoluminescent (RPL) dosimetry systems were in the range 379-1106 µGy and 3-42 µGy in the primary beam and below the tongue, respectively. Based on the obtained results, no significant changes in tested parameters of the buccal micronucleus cytome assay were observed prior to, or after the radiological examination. However, some of the assessed parameters revealed minor increases in their values after the diagnostic procedure. Moreover, results revealed that inter-individual differences existed for each monitored child. In line with these findings, future biomonitoring and finding optimal biomarkers for low-dose IR exposure are warranted especially for the youngest population. Meanwhile, we have to minimize the annual absorbed dose as low as possible and conduct further research of the radio-sensitivity time window.

CITO/GENOPROTEKTIVNI I ANTIOKSIDACIJSKI UČINCI MEDA OBIČNE PLANIKE NA OŠTEĆENJA LJUDSKIH LIMFOCITA IZAZVANA UVB ZRAČENJEM U UVJETIMA *IN VITRO*

Andreja Jurič, Irena Brčić Karačonji, Suzana Žunec, Anja Mikolić, Nevenka Kopjar

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb, Hrvatska

nkopjar@imi.hr

UVOD

Ultraljubičasto B (UVB) zračenje valnih duljina 290-320 nm izaziva niz štetnih učinaka u stanicama: izravna oštećenja DNA, oksidacijski stres, upalni odgovor, poremećaje signalnih putova te fotokancerogenezu [1,2]. Na te su učinke osobito osjetljive stanice kože. Rak kože ubraja se među najčešće zloćudne bolesti, čija je pojavnost u stalnom porastu. Usporedo s istraživanjima biološke podloge zloćudne preobrazbe stanica, veliki naponi ulažu se i u istraživanja različitih prirodnih i sintetskih spojeva koji mogu pružiti zaštitu od štetnih učinaka UV zračenja. Prirodni spojevi imaju niz prednosti jer većinom pokazuju nisku toksičnost i dobru učinkovitost [2]. Osim što se u organizam mogu unositi putem hrane, oni su također sastavnice različitih kozmetičkih proizvoda koji se nanose izravno na kožu radi zaštite od štetnih utjecaja sunčeva zračenja.

Med obične planike (*Arbutus unedo* L.) karakterističan je za područje Sredozemlja. Bogat je polifenolima s dobrim antioksidacijskim i antiradikalnim svojstvima [3]. Okus mu daje homogentizinska kiselina (2,5-dihidroksifenilacetat), koje u sastavu ukupnih polifenola ima 50-60 %, dok su od ostalih fenola u medu planike zastupljeni (\pm)-2-*cis*,4-*trans*-apcizinska kiselina (*c,t*-ABA), (\pm)-2-*trans*,4-*trans*-apcizinska kiselina (*t,t*-ABA) i unedon [4]. Iz meda sa Sardinije i Kanarskih otoka također su izolirani aromatični spojevi α - i β -izoforon te 4-oksoizoforon [5,6]. Višednevna konzumacija meda obične planike ima pozitivne učinke na zdravlje ljudi, poput porasta razine serumskog željeza, smanjenja aktivnosti nekih jetrenih enzima te porasta broja leukocita i trombocita [7]. Također su dokazani i zaštitni učinci ovog meda na razinu primarnih oštećenja DNA u limfocitima periferne krvi zdravih ispitanika koji su ga konzumirali tijekom 14 dana [8].

Dosadašnja zapažanja o djelotvornosti meda obične planike i homogentizinske kiseline (HK) potaknula su nas na istraživanje njihovih mogućih cito/genoprotektivnih i antioksidacijskih učinaka na oštećenja izazvana UVB zračenjem na modelu ljudskih limfocita periferne krvi. S obzirom da je UVB zračenje dokazano genotoksičan agens, polazišna je hipoteza istraživanja da bi ozračivanje limfocita u kombinaciji s medom obične planike i HK moglo povećati stopu njihova preživljenja, te sniziti razinu primarnih oštećenja DNA i razinu oksidacijskog stresa.

MATERIJALI I METODE

Materijali: u pokusu su korištene kemikalije i reagensi proizvođača Sigma-Aldrich (SAD), Gibco – Life Technologies (UK) te Kemika (Hrvatska). Med obične planike korišten u pokusu potječe iz Vrgorca (Hrvatska). Botaničko podrijetlo meda potvrđeno je senzorskom i peludnom analizom te određivanjem udjela HK u uzorku. Usporedo je ispitan i umjetni med, u skladu s preporukama iz literature [9].

Pokus je proveden na limfocitima i plazmi iz periferne krvi zdrave ženske osobe (31 godina, nepušač), koja je bila upoznata sa svim detaljima istraživanja i dala informirani pristanak za dobrovoljno sudjelovanje. Unatrag godinu dana davateljica krvi nije bila izložena ionizirajućem ili neionizirajućem zračenju, niti kemijskim mutagenima. Za potrebe pokusa u heparinizirane spremnike (BD vacutainer, Becton Dickinson, SAD) izvađeno je ukupno

60 mL venske krvi; 40 mL je odmah korišteno za izolaciju limfocita pomoću reagensa Histopaque®-1077, sukladno uputama proizvođača [10]. Preostalih 20 mL pune krvi korišteno je za mjerenja razine lipidne peroksidacije u plazmi.

Ispitana su dva različita modela izlaganja stanica i pune krvi: (I) pred-tretman ispitivanim agensima u trajanju od 2 h, nakon kojega je slijedilo ozračivanje UVB zračenjem i dodatnih 1 h inkubacije stanica/krvu na 37 °C te (II) tretman, koji je uključivao ozračivanje UVB zračenjem i zatim inkubaciju stanica/krvu s ispitivanim agensima u trajanju od 2 h na 37 °C. Ispitani su učinci dviju koncentracija meda: (I) odgovara dozi dnevno prihvatljivog unosa meda prehranom i (II) deseterostruko viša koncentracija meda od njegova dnevno prihvatljivog konzumiranja. Nadalje, ispitani su učinci HK u odgovarajućim preračunatim koncentracijama kakve se nalaze u dvjema koncentracijama meda izabranim za testiranje.

Izvor UV zračenja bio je uređaj Uvitec Crosslinker CL-E508M (Cambridge, UK). Ispitivana doza zračenja od 2 kJ/m² odgovara srednjoj eritemalnoj dozi [11-13]. Prije izlaganja zračenju, uzorci suspenzija izoliranih limfocita u hranjivom mediju RPMI 1640, odnosno uzorci krvi, mikropipetom su odmjereni u sterilne plastične pločice sa 6 jažica u koje su dodani odgovarajući volumeni svježe pripremljenih otopina s testiranim agensima.

Po završetku pokusa, citotoksični učinci su istraženi primjenom testa preživljenja s kombinacijom fluorescencijskih boja etidij-bromida i akridin narančaste boje, prema metodi koju su opisali Duke i Cohen [14]. Nakon bojenja, žive stanice fluoresciraju zeleno jer ne propuštaju ulazak etidij-bromida u citoplazmu. Mrtve stanice fluoresciraju crveno zbog obojenja DNA s etidij-bromidom. Stanice u ranoj apoptozi sadrže veći broj fragmenata jezgre koji fluoresciraju zeleno, dok u kasnijim fazama apoptoze fragmenti jezgre poprimaju narančasto-crvenu boju. Analiza preparata provedena je na fluorescencijskom mikroskopu (Olympus BX 40, Japan) brojenjem ukupno 3×100 stanica.

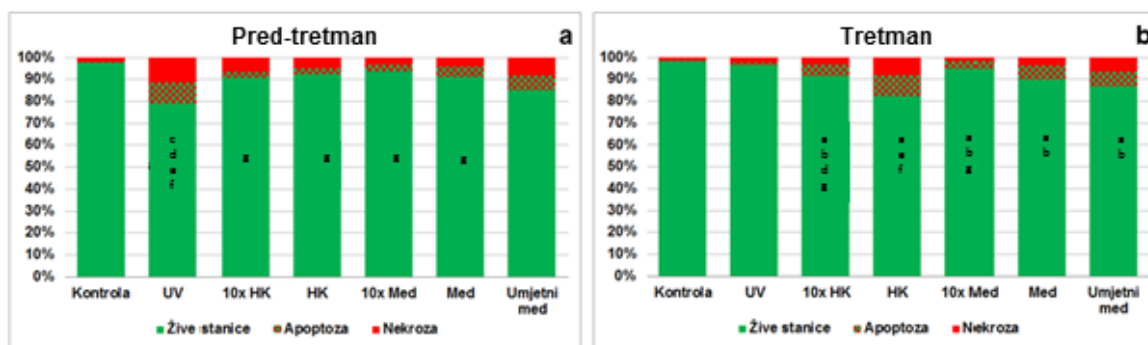
Razina primarnih oštećenja limfocitne DNA procijenjena je s pomoću komet-testa u alkalnim uvjetima, sukladno standardnom protokolu [15]. Analiza preparata provedena je pomoću epifluorescencijskog mikroskopa (Olympus BX 40, Japan). Mikroskop je preko kamere visoke rezolucije povezan s računalom. Mjerenja su provedena pomoću programa za analizu slike (Comet Assay IV, Instem-Perceptive Instruments Ltd., UK). U svakom uzorku mjereno je 3×50 kometa. Stupanj oštećenja DNA procijenjen je pomoću parametra intenzitet repa, koji upućuje na % DNA u repu kometa.

Pomoću testa za dokazivanje reaktivnih spojeva tiobarbiturne kiseline (engl. *tiobarbituric acid reactive substances*, TBARS) u uzorcima plazme je izmjerena razina lipidne peroksidacije, primjenom standardnog protokola uz manje prilagodbe [16]. Spektrofotometrijska mjerenja provedena su na uređaju UV Probe Spectrophotometer (Shimadzu, Japan).

Statistička obrada podataka provedena je primjenom programskog paketa Dell™ Statistica™ 13.2 software (Dell Inc., SAD). χ^2 -test proveden je pomoću on-line servisa dostupnog na poveznici [17]. Za prag statističke značajnosti određen je $P < 0,05$.

REZULTATI

Rezultati fluorescencijskog testa bojenja limfocita s etidijevim bromidom i akridin narančastom bojom prikazani su na Slici 1 a i b. Nakon pred-tretmana, najveću citotoksičnost izazvalo je UV zračenje. I med i HK primijenjeni u pred-tretmanu pokazali su citoprotektivni učinak, a najveće preživljenje utvrđeno je pri koncentraciji meda koja odgovara dozi 10x većoj od dnevno prihvatljivog unosa. Nakon tretmana, ista je koncentracija meda također pokazala najjači zaštitni učinak. Najslabiji citoprotektivni učinak u tretmanu je dala niža ispitana koncentracija HK. Detaljniji rezultati statističke obrade podataka o citotoksičnosti prikazani su u Tablici 1. Rezultati komet testa i njihove statističke značajnosti prikazani su u Tablici 2.



Slika 1. Preživljenje ljudskih limfocita periferne krvi nakon izlaganja UVB zračenju u kombinaciji s pred-tretmanom ili tretmanom s HK, medom obične planike i umjetnim medom. Statistički značajne razlike ($P < 0,05$, χ^2 -test): a vs. UV; b vs. 10x HK; c vs. HK; d vs. 10x Med; e vs. Med; f vs. Umjetni med

Tablica 1. Rezultati o statističkoj značajnosti razlika između pokusnih skupina koje se odnose na učestalost apoptoza i nekroza. (n. z. – nije statistički značajno)

Skupine	Učestalost apoptoza						
	Kontrola	UV	10x HK	HK	10x Med	Med	Umjetni med
Učestalost nekroza	Kontrola		P<0,05	P<0,05	P<0,05	P<0,05	P<0,05
	UV	P<0,05		P<0,05	P<0,05	P<0,05	n. z.
	10x HK	P<0,05	P<0,05		n. z.	n. z.	P<0,05
	HK	n. z.	P<0,05	n. z.		n. z.	P<0,05
	10x Med	n. z.	P<0,05	n. z.	n. z.		n. z.
	Med	n. z.	P<0,05	n. z.	n. z.	n. z.	
	Umjetni med	P<0,05	n. z.	n. z.	n. z.	P<0,05	P<0,05

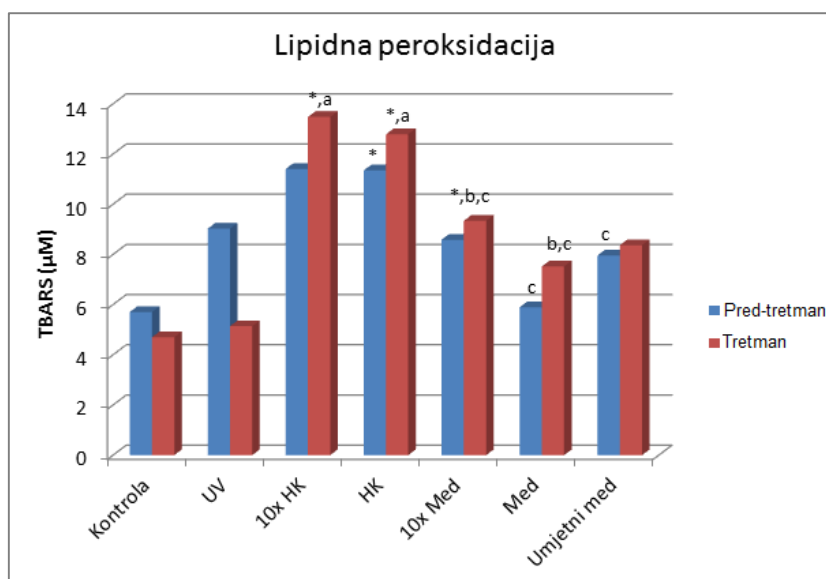
Tablica 2. Rezultati komet testa na ljudskim limfocitima periferne krvi.

Skupina	% DNA u repu kometa Sr.vr. ± SE (medijan) min.-maks.	
	Pred-tretman	Tretman
	Negativna kontrola	0,61±0,13* (0,01) 0-8,26
UV	20,26±1,55 ^{b,c,f} (18,92) 0-49,75	16,93±1,02 ^d (14,10) 0,04-44,97
10x HK	8,53±0,72 (6,16) 0-43,16	18,02±1,10 ^d (17,31) 0-46,71
HK	11,22±0,94 (5,65) 0-39,83	14,69±1,00 (14,21) 0-42,60
10x Med	13,02±0,90 ^b (9,69) 0-36,55	10,11±0,73 (8,54) 0-43,34
Med	13,85±1,07 ^c (10,09) 0-48,93	19,15±1,03 ^{c,d} (18,43) 0-45,31
Umjetni med	13,61±1,07 (8,41) 0-48,41	19,16±1,21 ^d (17,49) 0,03-49,23
Pozitivna kontrola [#]	18,08±1,79 ^{b,c} (12,99) 0-48,82	27,95±1,70* (28,53) 2,85-49,39

100 μ M H₂O₂, 10 min na ledu; Statistički značajne razlike ($P < 0,05$, analiza varijance uz *post-hoc* Tukey HSD test): * vs. sve skupine; b vs. 10x HK; c vs. HK; d vs. 10x Med; e vs. Med; f vs. Umjetni med

Nakon pred-tretmana, najveću genotoksičnost izazvalo je UV zračenje. Najbolji genoprotektivni učinak imala je HK. Nakon tretmana, najjači zaštitni učinak pokazala je koncentracija meda koja odgovara dozi 10x većoj od dnevno prihvatljivog unosa. Međutim, niža ispitana koncentracija meda pokazala se najslabije genoprotektivnom uz UV zračenje, u odnosu na sve ostale ispitane kombinacije agensa.

Rezultati testa za dokazivanje tiobarbiturnih reaktivnih spojeva u uzorcima plazme prikazani su na Slici 2. UVB zračenje u pred-tretmanu je izazvalo veći porast razine lipidne peroksidacije nego u tretmanu. Med obične planike primijenjen u pred-tretmanu pokazao je bolje zaštitne učinke od HK.



Slika 2. Promjena koncentracije tiobarbiturnih reaktivnih spojeva (TBARS) u plazmi. Statistički značajne razlike (t-test; $P < 0,05$) su: * vs. kontrolna skupina; a vs. UV; b vs. 10x HK; c vs. HK.

ZAKLJUČAK

Dobiveni rezultati potvrdili su polazišnu hipotezu da med obične planike i HK štite stanice od štetnih učinaka UVB zračenja. Pred-tretman ispitanim kombinacijama meda obične planike i HK s UVB zračenjem, pri koncentracijama koje odgovaraju dnevno prihvatljivom unosu, povoljniji je u smislu općenitih zaštitnih učinaka od tretmana. Med primijenjen u tretmanu pri koncentraciji koja odgovara dnevno prihvatljivom unosu pokazuje bolje citoprotektivne učinke prema oštećenjima izazvanim s UVB zračenjem od HK, vjerojatno zbog svojeg složenijeg fitokemijskog profila. Međutim, isto ne vrijedi u smislu genotoksičnosti, gdje se HK pokazala nadmoćnijom od meda. Izmjerene razine oštećenja DNA mogu se dovesti u vezu s indukcijom oksidacijskog stresa, što je potvrđeno rezultatima mjerenja razine lipidne peroksidacije. Pretpostavljamo da su uočeni cito-/genoprotektivni učinci meda i HK rezultat međudjelovanja više mehanizama, od kojih su najvažniji „hvatanje“ slobodnih radikala, te utjecaj na aktivnosti antioksidacijskih enzima i razinu glutaciona, što se mora dalje istražiti na drugim modelima u uvjetima *in vitro* i *in vivo*.

LITERATURA

- [1] Cadet J, Douki T, Ravanat JL. Oxidatively generated damage to cellular DNA by UVB and UVA radiation. *Photochem Photobiol* 2015;91:140-155.
- [2] Sharma P, Montes de Oca MK, Alkeswani AR, McClees SF, Das T, Elmetts CA, Afaq F. Tea polyphenols for the prevention of UVB-induced skin cancer. *Photodermatol Photoimmunol Photomed* 2018;34:50-59.

- [3] Tuberoso CIG, Boban M, Bifulco E, Budimir D, Pirisi FM. Antioxidant capacity and vasodilatory properties of Mediterranean food: the case of Cannonau wine, myrtle berries liqueur and strawberry-tree honey. *Food Chem* 2013;140:686-691.
- [4] Tuberoso CIG, Bifulco E, Caboni P, Cottiglia F, Cabras P, Floris I. Floral markers of strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) honey. *J Agric Food Chem* 2010;58:384-389.
- [5] Bianchi F, Careri M, Musci M. Volatile norisoprenoids as markers of botanical origin of Sardinian strawberry-tree (*Arbutus unedo* L.) honey: Characterisation of aroma compounds by dynamic headspace extraction and gas chromatography–mass spectrometry. *Food Chem* 2005;89:527-532.
- [6] De la Fuente E, Sanz ML, Martínez-Castro I, Sanz J, Ruiz-Matute AI. Volatile and carbohydrate composition of rare unifloral honeys from Spain. *Food Chem* 2007;105:84-93.
- [7] Brčić Karačonji I, Tariba B, Živković T, Brajenović N, Jurica K, Pezer M, Turkalj M, Vihnanek Lazarus M, Lušić D, Pizent A. Beneficial effects of strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) honey supplementation in men. U: Brčić Karačonji I, Lušić D, ur. *Book of Abstracts of the International Symposium on Bee Products 3rd Edition-Annual Meeting of the International Honey Commission (IHC)*; Opatija, Croatia. Rijeka: Faculty of Medicine, University of Rijeka; 2014. str. 110.
- [8] Jurič A, Mladinić M, Želježić D, Pezer M, Turkalj M, Jurica K, Kopjar N, Brčić Karačonji I. Human intervention trial with strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) honey: Impact on DNA stability and haematological parameters. U: Matović, V, ur. *Book of Abstracts; 10th Congress of Toxicology in Developing Countries (CTDC10) & 12th Congress of the Serbian Society of Toxicology (12th SCT)*; Belgrade, Serbia. Belgrade: Society of Toxicology, 2018. str. 112.
- [9] Tariba Lovaković B, Lazarus M, Brčić Karačonji I, Jurica K, Živković Semren T, Lušić D, Brajenović N, Pelaić Z, Pizent A. Multi-elemental composition and antioxidant properties of strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) honey from the coastal region of Croatia: Risk-benefit analysis. *J Trace Elem Med Biol* 2018;45:85-92.
- [10] Product information Histopaque-1077[®]. Available on-line at https://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/docs/Sigma/Product_Information_Sheet/1/10771pis.pdf
- [11] Kuchel JM, Barnetson RS, Halliday GM. Ultraviolet A augments solar-simulated ultraviolet radiation-induced local suppression of recall responses in humans. *J Invest Dermatol* 2002;118:1032-1037.
- [12] Huynh TT, Chan KS, Piva TJ. Effect of ultraviolet radiation on the expression of pp38MAPK and furin in human keratinocyte-derived cell lines. *Photodermatol Photoimmunol Photomed* 2009;25:20-29.
- [13] Milić M, Pavičić I, Vinković Vrček I, Selmani A, Domazet Jurašin D, Matijević Glavan T, Zapletal E. The influence of titanium dioxide nanomaterials on human keratinocyte HaCaT cells after UVB radiation with one medial erythemal dose. U: Radolić V, Poje Sovilj M, Krajcar Bronić I, ur. *Zbornik radova Jedanaestog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja; 5.-7. travnja 2017; Osijek, Hrvatska*. Zagreb: HDZZ; 2017. str. 149-154.
- [14] Duke RC, Cohen JJ. Morphological and biochemical assays of apoptosis. U: Coligan JE, Kruisbeal AM, Margulies DH, Shevach EM, Strober W, ur. *Current protocols in immunology*. Willey, New York, 1992. str. 3.17.1-3.17.16.
- [15] Singh NP, McCoy MT, Tice RR, Schneider EL. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells. *Exp Cell Res* 1988;175:184-191.
- [16] Drury JA, Nycyk JA, Cooke RWI. Comparison of urinary and plasma malodialdehyde in preterm infants *Clin Chim Acta* 1997;263:177-185.
- [17] Chi-Square, Cramer's V, and Lambda. Available on-line at <http://vassarstats.net/newcs.html>

ASSESSMENT OF CYTO/GENOPROTECTIVE AND ANTIOXIDATIVE PROPERTIES OF STRAWBERRY TREE HONEY AGAINST UVB RADIATION *IN VITRO*

Andreja Jurič, Irena Brčić Karačonji, Suzana Žunec, Anja Mikolić, Nevenka Kopjar
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
nkopjar@imi.hr

Present *in vitro* study investigated protective role of strong antioxidant strawberry tree honey and its main bioactive constituent homogentisic acid (HGA) against the cyto/genotoxic effects induced by UVB radiation in human peripheral blood lymphocytes. Tested concentrations corresponded to the daily intake of honey with its matched content of HGA, as well as ten-fold higher concentrations of both agents. Delivered UVB dose was 2 kJ/m² and corresponded to medial erythema dose. We evaluated differences between two experimental approaches: one set of lymphocyte cultures/blood was pre-treated for two hours before the UVB exposure started, while the other set was treated for two hours after UVB exposure. Lymphocyte viability was checked using the apoptosis/necrosis assay. Genotoxicity was studied by the alkaline comet assay. Lipid peroxidation in plasma samples was measured using thiobarbituric acid reactive substance (TBARS) assay. We found differences in viability between lymphocyte cultures pre-treated with tested compounds prior to UVB exposure and those that were treated. After treatment, honey offered better cytoprotection than HGA, possibly due to its complex phytochemical profile. However, HGA showed better genoprotective properties. The levels of primary DNA damage also differed between the tested cultures. They could be associated with the induction of oxidative stress, as documented by levels of TBARS measured in plasma. Our results suggest that both tested agents effectively ameliorated detrimental effects of UVB radiation. Cyto/genoprotective properties of strawberry tree honey and HGA possible were mediated via mutual interactions of various mechanisms. Among them, most important are scavenging of free radicals and influence on the cellular enzymes involved in the antioxidative defence, as well on the glutathione levels, but this has to be further studied on other *in vitro* and *in vivo* model systems.

PRIMARY DNA DAMAGE IN PERIPHERAL BLOOD AND KIDNEY CELLS OF SWISS ALBINO MICE AFTER ISOFLURANE ANESTHESION AND WHOLE BODY γ -RADIATION EXPOSURE

Vesna Benković¹, Željka Modrić¹, Anica Horvat Knežević¹, Nives Marčina¹,
Nikola Borojević¹, Nada Oršolić¹, Nevenka Kopjar², Mirta Milić²

¹Department of Biology, Faculty of Science, University of Zagreb, Zagreb, Croatia

²Mutagenesis Unit, Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia

vesna@biol.pmf.hr

INTRODUCTION

Isoflurane (ISO) is most commonly used halogenated volatile anaesthetic in clinical practice. The mechanism of action of volatile anaesthetics is complex, likely involving numerous membrane proteins and ion channels; it is clear that producing their ultimate effect depends on the attainment of the therapeutic tissue concentration in the central nervous system [1,2]. Although volatile anaesthetics are delivered and primarily eliminated via lungs, the metabolism of certain inhaled halogenated anaesthetics can produce inorganic fluoride that may be directly nephrotoxic [3]. The genotoxicity and mutagenicity of ISO have been evaluated *in vitro* and in clinical studies showing conflicting results [3,4]. With increase in the number of different interventional and diagnostic radiology procedures that require relative patient immobility for optimal results, anaesthetics and ionizing radiation are often used together. It is known that ionizing radiation (IR) induces oxidative stress accompanied with damage to critical biomolecules like lipids, proteins, and DNA through radiolysis of cellular water. Many studies have indicated that after radiation exposure occurring DNA lesions trigger the apoptotic cell death pathways in radiosensitive organs of the hematopoietic and gastrointestinal systems [5]. The aim of the current study was to determine synergistic effect of volatile anaesthetic ISO (2.4 %, 50:50) and whole body γ -radiation (⁶⁰Co) exposure (2 Gy) on primary DNA damage (alkaline comet assay) in peripheral blood and kidney cells of Swiss albino mice. Primary DNA damage was evaluated immediately, and 2, 6 and 24 h after the combined treatment for estimation of DNA repair.

MATERIALS AND METHODS

Swiss albino male mice (n = 45) three months old, with body weight approximately 20-25 grams, were obtained from the breeding unit of the Department of Biology, Faculty of Science, University of Zagreb, Croatia. The animals were housed at 22 ± 1°C and 50-70 % humidity with a 12/12 hours light/dark cycle photoperiod, and received standard laboratory diet (4 RF 21, Mucedola, Italy) with water *ad libitum*. The animal study was designed in accordance with the relevant Croatian animal protection act guideline and approved by the Ethical Committee of the Faculty of Science, University of Zagreb, Croatia. Animals were divided into three experimental groups (each group consisted of five mice): non-treated controls, group exposed to IR and group with combined exposure to anaesthesia and IR. Anaesthesia was maintained with ISO (1.7 vol %) in a continuous flow of a 50:50 mixture of oxygen and air (3 L min⁻¹) in a specially designed induction chamber connected to an anaesthetic machine (Sulla 800; Dräger) using a compatible evaporator. The depth of surgical anaesthesia was considered satisfactory when mice were sleeping calmly and breathing spontaneously, without signs of corneal and tail reflex. After two hours of anaesthesia, mice were irradiated with γ -radiation (⁶⁰Co-Theratron Phoenix teletherapy unit, Atomic Energy Ltd.), with a speed dose of 1.88 Gy/min. Blood samples were collected from the tail vein following termination of exposure: immediately, 2, 6 and 24 hours after irradiation. Mice

were sacrificed after blood collection by cervical dislocation and their kidneys were collected, dissected, minced, and passed through a stainless steel mash. Single-kidney cell suspensions were made in the homogenisation buffer solution (+4 °C; 0.075 M NaCl and 0.024 M Na₂ EDTA; pH 7.5) at the ratio 1 g tissue per 1 mL buffer. The alkaline comet assay was carried out as described by Singh et al. [6]. Two slides per sample and in total 4 slides per animal were prepared. Images of 100 randomly selected cells (50 counts on each of the duplicate slides) were analysed for each sample. The slides were stained with ethidium bromide (20 µg mL⁻¹) and examined under magnification 200×, using an epifluorescence microscope (Olympus BX51, Japan) and computer-based image analysis system (Comet Assay IV software, Perspective Instruments Ltd., Instem group, Suffolk, UK). The statistical significance of the results obtained in the comet assay was studied by the statistical program STATISTICA 9.0 (StatSoft, Dell, Tulsa, USA) using analysis of variance with *post-hoc* Scheffé test modification.

RESULTS

IR with ISO and IR alone caused significant levels of DNA damage in both cell types for all the time periods when compared to the control values. Those values did not lower to the control values even after 24 hours from the exposure. Blood and kidney samples demonstrated different mechanisms in response to IR and IR+ISO treatment in both measured parameters. Tail length parameter usually demonstrates in what extent the DNA loops have extended in the comet tail, while tail %DNA demonstrate the amount of the DNA that can be found in the tail, telling us the real situation of severity of DNA damage.

In leukocytes, IR alone demonstrated highest levels of DNA damage immediately (Mean ± SE) (tail% DNA: 5.53±0.53, TL: 19.74 ± 0.30), 2h after (higher damage, tail% DNA: 6.03 ± 0.63, TL: 20.93 ± 0.33) and 6 hours after (tail % DNA: 6.61 ± 3.88, TL: 16.87 ± 0.41), with the lowest DNA damage seen 24 hours after (tail% DNA: 3.76 ± 0.28, TL: 14.58 ± 0.18), but still higher than in the control samples. Although ISO treatment lowered the damage immediately and 2 hours after when compared to IR (the highest DNA damage value for this treatment, tail %DNA: 6.33 ± 8.4, TL: 17.06 ± 0.26), in the time period of 6 h (tail% DNA: 4.76 ± 0.40 , TL: 17.16 ± 0.25) from the exposure the levels of both treatment (IR and IR+ISO) reached similar levels, and 24 hours after ISO+IR treatment demonstrated even higher damage level than the IR alone (tail% DNA: 4.45 ± 0.41, TL: 17.05 ± 0.37 vs. tail% DNA: 3.76 ± 0.28, TL: 14.58 ± 0.18) (Figure 1A, Figure 2A, Table 1 leukocytes, Table 2 leukocytes).

In kidney cells the effect was similar as in leukocytes, but 24 h period demonstrated some differences in DNA damage repair dynamics. IR alone showed high levels of DNA damage immediately (tail% DNA: 6.14±0.48, TL: 16.72±0.40), 2 h (tail% DNA: 7.83±0.66, TL: 18.31 ± 0.39), 6 h (the highest damage, tail % DNA: 8.97±0.64, TL: 16.07±0.36), and 24h after (tail% DNA: 7.61 ± 0.54, TL: 16.06±0.42) the treatment. Twenty-four hours after there was lower DNA damage than after 6 h, but values were still higher than in the control. Although ISO+IR demonstrated lower damage immediately (tail% DNA: 5.57 ± 0.56, TL: 19.94 ± 0.29) and 2 h after (tail% DNA: 3.50 ± 0.31, TL: 17.80 ± 0.22), the highest damage was seen 6 and 24 h after the treatment (tail% DNA: 10.75 ± 0.70, TL: 16.64 ± 0.34), (tail% DNA: 12.52 ± 0.78, TL: 16.44 ± 0.37) with higher values than for IR treatment alone.

Interestingly, IR treatment in leukocytes demonstrated the DNA damage repair tendency, while 6 h and 24 h after the IR+ISO treatment DNA damage levels were still high. In the case of kidney cells, IR and IR+ISO demonstrated similar damage levels for the period of up to 2 h, but the anaesthetic treatment later (6 and 24 h) started to show even higher levels than IR treatment alone, with the highest effect 24 h after (IR- 6 h- tail % DNA: 8.97 ± 0.64, TL: 16.07 ± 0.36; IR- 24 h- tail% DNA: 7.61 ± 0.54, TL: 16.06 ± 0.42 vs. IR+ISO- 6 h- tail%

DNA: 10.75 ± 0.70 , TL: 16.64 ± 0.34 , IR+ISO- 24 h: tail% DNA: 12.52 ± 0.78 , TL: 16.44 ± 0.37) (Figure 1B, Figure 2B, Table 1 kidney cells, Table 2 kidney cells).

CONCLUSION

With the delay of 6 hours, combined exposure to ISO and 2 Gy of IR demonstrated increasing synergistic effect in damaging of mice leukocytes and kidney cells. Twenty-four hours after, the damage was higher in kidney cells than in the blood cells, probably due to metabolization and elimination processes of the drug in the organism and therefore longer exposure of irradiation damaged kidney cells to the compound. The study demonstrated that combined IR and anaesthetics effects during medical procedures should be taken into consideration. Considering possible enhancement of DNA damage, mutual interactions of these two agents should be further examined in details, and a continuation of research in that regard is needed.

REFERENCES

- [1] Butterworth JF, Mackey DC, Wasnick JD. Inhalation anesthetics. In: Butterworth JF, Mackey DC, Wasnick JD, editors. *Morgan & Mikhail's clinical anesthesiology*. 5th ed. New York: McGraw-Hill Medical; 2013. pp. 153-174.
- [2] Martin Jr JL, Njoku DB. Metabolism and toxicity of modern inhaled anesthetics. In: *Miller's anesthesia*. 6th ed. Philadelphia: Elsevier; 2005. pp. 231-272.
- [3] Rocha Thalita LA, Carlos A, Dias-Junior J S, Possomato-Vieira VH, Gonçalves-Rizzi FR, Nogueira KM, de Souza, LG. Braz. Sevoflurane Induces DNA Damage Whereas Isoflurane Leads to Higher Antioxidative Status in Anesthetized Rats. *BioMed Research International* 2015; Article ID 264971
- [4] Brozović G, Oršolić N, Rozgaj R, Knežević F, Horvat Knežević A, Maričić M, Krsnik D, Benković V. Sevoflurane and isoflurane genotoxicity in kidney cells of mice. *Arh Hig Rada Toksikol* 2017;68:228-235.
- [5] Zakaria KM. Effect of Gamma Ray on Reactive Oxygen Species at Experimental Animals. *OMICS J Radiol* 2017;6(6):1000283.
- [6] Singh NP, McCoy MT, Tice RR, Schneider LL. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells. *Exp Cell Res* 1988;75:184-191.

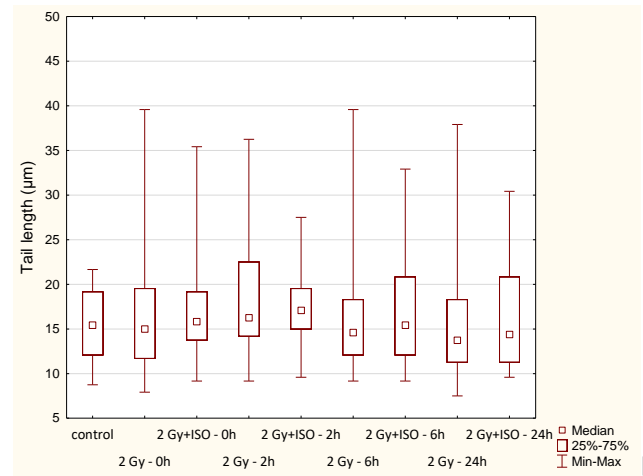
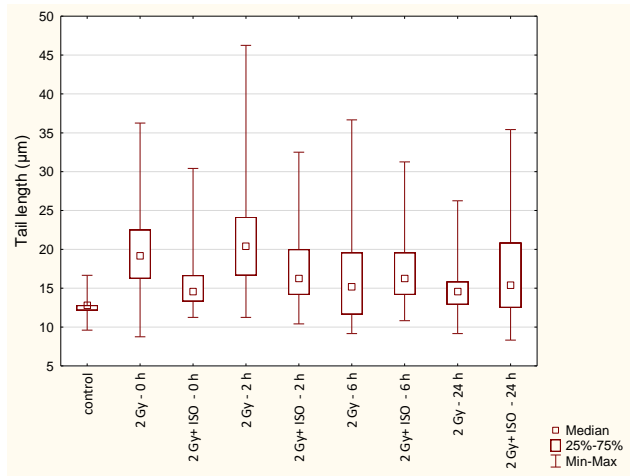


Figure 1. Primary DNA damage in leukocytes (A) and kidney cells (B) of mice irradiated with 2 Gy and anesthetised with isoflurane. Damage was evaluated with the alkaline comet assay and reported as tail length values (μm).

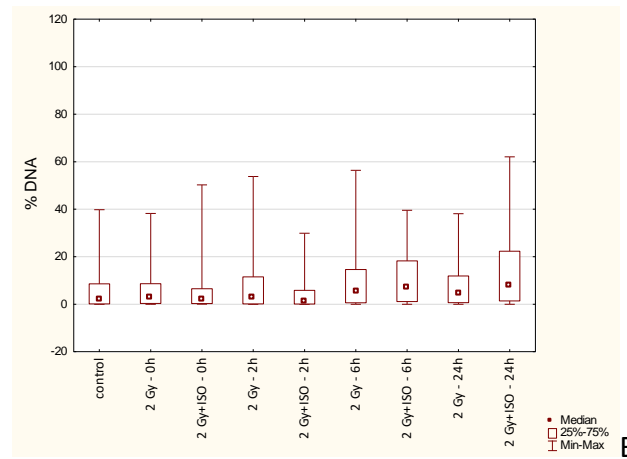
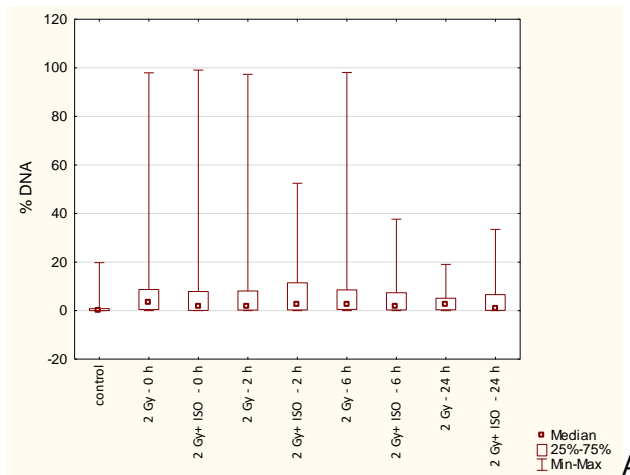


Figure 2. Primary DNA damage in leukocytes (A) and kidney cells (B) of mice irradiated with 2 Gy and anesthetised with isoflurane. Damage was evaluated with the alkaline comet assay and reported as tail % DNA.

Table 1. Statistical differences (at p<0.05) between tail length values in leukocytes and kidney cells of mice irradiated with 2 Gy and anesthetised with isoflurane (ISO). Samples were not compared between different cell type samples

		Leukocytes	control	2 Gy						
				0 h	ISO - 0 h	2 h	ISO - 2 h	6 h	ISO - 6 h	24 h
Kidney cells										
control				0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2Gy	0 h	0.769631		0.000000	0.523960	0.000000	0.000000	0.000002	0.000000	0.000000
	ISO - 0 h	0.082726	0.968878		0.000000	0.008630	0.677769	0.002480	0.741135	0.208020
	2 h	0.000030	0.091615	0.788829		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	ISO - 2 h	0.000020	0.074633	0.748450	1.000000		0.800858	0.999999	0.000000	0.992372
	6 h	0.998740	0.991409	0.459476	0.001958	0.001403		0.622284	0.005574	0.999124
	ISO - 6 h	0.648534	1.000000	0.989512	0.153214	0.127955	0.973373		0.000000	0.960929
	24 h	0.999999	0.904658	0.179711	0.000165	0.000111	0.999963	0.823254		0.000148
	ISO - 24 h	0.951714	0.999975	0.820193	0.020287	0.015581	0.999892	0.999648	0.989913	

Table 2. Statistical differences (at p<0.05) between values of tail % DNA in leukocytes and kidney cells of mice irradiated with 2 Gy and anesthetised with isoflurane (ISO). Samples were not compared between different cell type samples

		Leukocytes	control	2Gy						
				0 h	ISO - 0 h	2 h	ISO - 2 h	6 h	ISO - 6 h	24 h
Kidney cells										
control				0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2Gy	0 h	0.820697		0.950575	0.997183	1.000000	1.000000	0.939443	0.800638	0.341496
	ISO - 0 h	0.999991	0.959898		0.999970	0.965093	0.943611	1.000000	0.999992	0.985704
	2 h	0.592425	0.999996	0.839731		0.998528	0.996408	0.999938	0.997080	0.879411
	ISO - 2 h	0.902831	0.049280	0.697920	0.013277		1.000000	0.956377	0.838575	0.389404
	6 h	0.003776	0.519345	0.019945	0.763679	0.000001		0.931425	0.784083	0.322895
	ISO - 6 h	0.000003	0.019609	0.000037	0.067961	0.000000	0.959031		0.999997	0.989320
	24 h	0.038352	0.875864	0.130244	0.973219	0.000033	0.999828	0.711146		0.999411
	ISO - 24 h	0.000000	0.000007	0.000000	0.000063	0.000000	0.131731	0.879471	0.020268	

PRIMARY DNA DAMAGE IN PERIPHERAL BLOOD AND KIDNEY CELLS OF SWISS ALBINO MICE AFTER ISOFLURANE ANESTHESION AND WHOLE BODY γ -RADIATION EXPOSURE

Vesna Benković¹, Željka Modrić¹, Anica Horvat Knežević¹, Nives Marčina¹, Nikola Borojević¹, Nada Oršolić¹, Nevenka Kopjar², Mirta Milić²

¹Department of Biology, Faculty of Science, University of Zagreb, Zagreb, Croatia

²Mutagenesis Unit, Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia

vesna@biol.pmf.hr

Synergistic effect of anaesthesia and ionizing irradiation (IR) during different medical procedures is still unexplained. It is well documented that IR is genotoxic by direct or indirect way of action. The halogenated volatile anaesthetics isoflurane (ISO) is the most commonly used anaesthetics for surgical procedures. Although volatile anaesthetics are delivered and primarily eliminated via lungs, the metabolism of certain inhaled halogenated anaesthetics can produce inorganic fluoride that may be directly nephrotoxic. The aim of this study was to determine synergistic effect of whole body γ -radiation (⁶⁰Co) exposure (2 Gy) and exposure to volatile anaesthetic ISO (2.4 %, 50:50) on primary DNA damage (alkaline comet assay) in peripheral blood and kidney cells of Swiss albino mice in three groups: non-treated controls, group exposed to IR and group with combined anaesthesia and IR exposure. Primary DNA damage was evaluated immediately after, 2, 6, and 24 h after the treatment. In both groups exposure caused significantly higher DNA damage than in the control group, and that damage did not reach control values still after 24 hours from the treatment. In peripheral blood, combined treatment demonstrated lower DNA damage values immediately after and 2 h from the exposure when compared to IR. After 6 and 24 hours, combined treatment showed constant amount of DNA damage, which was not seen in IR demonstrating that primary DNA damage was not repaired. Similar effect with higher amount of DNA damage for 6 and 24 h was seen in combined treatment in kidney cells, probably due to metabolization and elimination processes of the drug in the organism and longer exposure of kidney irradiated cells. The study demonstrated that combined IR and anaesthetics effects during medical procedures should be taken into consideration. Considering possible enhancement of DNA damage, mutual interactions of these two agents should be further examined in details, and a continuation of research in that regard is needed.

BROJ ERITROCITA, LEUKOCITA TE ODNOS HETEROFILA I LIMFOCITA U KRVI PILIĆA IZLEŽENIH IZ JAJA OZRAČENIH MALOM DOZOM GAMA-ZRAČENJA

Jadranka Pejaković Hlede¹, Silvijo Vince¹, Ivona Žura Žaja¹, Marija Majer², Marinko Vilić¹

¹Veterinarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

²Institut Ruđer Bošković, Zagreb

jadranka.pejakovic@vef.hr

UVOD

Biološki učinci malih doza ionizirajućeg zračenja ovise o filogenetskom i ontogenetskom razvoju ozračene jedinice [1-4]. Razlike u radioosjetljivosti uočene su među različitim vrstama, pasminama i populacijama, a pojedini životni ciklusi, primjerice embrionalni i fetalni razvoj, smatraju se radio-osjetljivim. Učinak ionizirajućeg zračenja na hematološke pokazatelje važan je i zbog moguće kvantifikacije i korelacije učinka s apsorbiranom dozom [5-6]. No kako su dosadašnji rezultati o učincima malih doza u peradi skromni i nekonzistentni, ovo je istraživanje za cilj imalo utvrditi učinak doze od 0,3 Gy gama-zračenja kod domaće kokoši (*Gallus gallus domesticus*) ozračene *in ovo* prije inkubacije. U krvi pilića izvaljenih iz ozračenih jaja, istraživali smo učinak zračenja na broj eritrocita i leukocita te na odnos heterofilnih granulocita i limfocita (H/L) tijekom prvih 6 tjedana života.

MATERIJAL I METODE

Uzorci krvi uzeti su od ukupno 700 pilića tovne pasmine Ross 308, oba spola, nasumično podijeljenih u pokusnu (N=360) i kontrolnu skupinu (N=340). Pokusna skupina ozračena je 1 sat prije inkubacije dozom 0,30 Gy gama-zračenja iz radioaktivnog izvora kobalt-60 (⁶⁰Co) panoramskog tipa, smještenom u Laboratoriju za radijacijsku kemiju i dozimetriju Instituta "Ruđer Bošković". Udaljenost izvora iznosila je 291 cm, a visina 72 cm. Aktivnost izvora iznosila je oko 3PBq pri brzini doze od 23,84 mGy/s. Kontrolna i pokusna skupina držane su u istim uvjetima tijekom cijelog trajanja pokusa, osim što kontrolna skupina nije bila izložena zračenju. Nakon ozračivanja, jaja su premještena u inkubatorsku stanicu "Valipile d.o.o.", Sesevski Kraljevac. Nakon valjenja i sušenja perja, pilići su transportirani u pokusne prostore Zavoda za bolesti peradi na Veterinarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu gdje su boravili 42 dana. Hrana i voda bila im je ponuđena *ad libitum*. Krv se uzimala u plastične epruvete s heparinom od po 10 životinja iz obje skupine 1., 3., 5., 7., 10., 20., 30. i 42. dana. Određen je ukupni broj i vrsta leukocita te broj eritrocita. Za brojenje eritrocita i leukocita u Neubauerovom hemocitometru korištena je metoda po Nattu i Herricku [7], a diferenciranje leukocita provedeno je mikroskopiranjem krvnih razmaza obojanih May-Grünwald- Giemsa bojama. Statistička analiza podataka načinjena je pomoću programskog paketa SAS 9.4 (Statistical Analysis Software 2002-2012 by SAS Institute Inc., Cary, SAD). Statistički značajna razlika između kontrolne i pokusne skupine smatrana je ako je $P < 0,05$.

REZULTATI

U Tablici 1 prikazan je ukupan broj eritrocita ($\times 10^{12}/L$), ukupan broj leukocita ($\times 10^9/L$), udio limfocita i heterofila (%) te njihov odnos (H/L). Broj eritrocita u pokusnoj skupini bio je značajno manji 5. i 7. dana života pilića u odnosu na kontrolnu skupinu. Ukupan broj leukocita bio je značajno manji u ozračenoj skupini životinja, i to 1., 3. i 42.

dana života. Postotni udjel limfocita i heterofila varira ovisno o danu mjerenja, no signifikantne razlike utvrđene su samo u jednodnevnih pilića kada je pokusna skupina imala značajno manji udio heterofila te značajno veći udio limfocita u ukupnom broju leukocita.

Tablica 1. Ukupan broj eritrocita ($\times 10^{12}/L$), ukupan broj leukocita ($\times 10^9/L$), udio limfocita i heterofila (%) te njihov odnos (H/L) u krvi pilića izleženih iz jaja ozračenih prije inkubacije dozom od 0,3 Gy gama zračenja (pokusna skupina) i u krvi pilića izleženih iz neozračenih jaja (kontrolna skupina)

		SREDNJA VRIJEDNOST (95%-tni interval pouzdanosti)							
		DOB ŽIVOTINJA (dani)							
		1	3	5	7	10	20	30	42
Eritrociti ($\times 10^{12}/L$)	K	1,07 (0,98-1,16)	0,92 (0,83-1,01)	0,95 (0,86-1,04)	0,99 (0,90-1,08)	1,01 (0,92-1,10)	1,25 (1,17-1,34)	1,29 (1,20-1,38)	1,40 (1,31-1,49)
	P	0,98 (0,89-1,07)	0,83 (0,74-0,92)	0,82 (0,73-0,91)	0,82 (0,74-0,91)	0,89 (0,80-0,98)	1,29 (1,20-1,38)	1,37 (1,28-1,46)	1,38 (1,30-1,47)
Leukociti ($\times 10^9/L$)	K	6,44 (5,70-7,17)	5,29 (4,55-6,02)	5,33 (4,59-6,06)	6,22 (5,48-6,95)	6,74 (6,00-7,47)	4,85 (4,11-5,58)	5,40 (4,66-6,13)	7,65 (6,91-8,38)
	P	5,19 (4,45-5,92)	3,98 (3,24-4,71)	5,11 (4,37-5,84)	5,55 (4,81-6,28)	6,27 (5,53-7,00)	4,84 (4,10-5,57)	5,45 (4,71-6,18)	6,13 (5,39-6,86)
Limfociti (%)	K	29,70 (22,28-37,11)	33,10 (25,68-40,51)	56,90 (49,48-64,31)	84,00 (76,58-91,41)	77,20 (69,78-84,61)	52,70 (45,28-60,11)	72,50 (65,08-79,91)	61,70 (54,28-69,11)
	P	40,30 (32,88-47,71)	33,50 (26,08-40,91)	58,00 (50,58-65,41)	77,30 (69,88-84,71)	77,50 (70,08-84,91)	55,20 (47,78-62,61)	71,60 (64,18-79,01)	64,10 (56,68-71,51)
Heterofili (%)	K	70,30 (63,08-77,90)	66,00 (58,80-73,61)	42,60 (35,51-50,32)	15,50 (8,97-23,79)	22,30 (15,50-30,32)	46,90 (39,78-54,59)	27,00 (20,10-34,91)	38,20 (31,15-45,96)
	P	59,70 (52,52-67,33)	65,60 (58,40-73,21)	40,60 (33,53-48,34)	22,60 (15,80-30,61)	21,80 (15,02-29,83)	44,50 (37,40-52,21)	27,90 (20,98-35,79)	35,50 (28,47-43,29)
Odnos heterofila i limfocita H/L	K	3,45 (2,81-4,24)	2,39 (1,77-3,22)	0,89 (0,40-1,98)	0,18 (0,004-8,41)	0,46 (0,10-2,15)	0,97 (0,47-2,02)	0,37 (0,05-2,49)	0,63 (0,20-2,49)
	P	1,78 (1,19-2,66)	2,59 (1,96-3,41)	0,77 (0,30-1,94)	0,30 (0,02-3,16)	0,30 (0,02-3,23)	1,05 (0,53-2,07)	0,41 (0,07-2,31)	0,56 (0,15-2,00)

Srednje vrijednosti označene podebljanim (*bold*) brojevima statistički se značajno razlikuju ($P < 0,05$) između skupina na isti dan pokusa. K-kontrolna skupina, P-pokusna skupina, H/L-odnos heterofila i limfocita

DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

U ovom istraživanju *in ovo* ozračivanje netom prije inkubacije malom dozom gama-zračenja manifestira se smanjenim ukupnim brojem eritrocita i leukocita u krvi ozračenih pilića u odnosu na kontrolnu skupinu. Smanjen broj eritrocita u pokusnoj skupini 5. i 7. dana života moguće je posljedica jače aktivacije imunskih mehanizama koji mogu rezultirati sporijom eritropoezom i smanjenom migracijom zrelih eritrocita u krvotok. U prilog tome idu rezultati istraživanjima učinka doze od 0,3 Gy na imunski sustav [8] i oksidacijski stres [9] gdje je u pilića izleženih iz jaja ozračenih prije inkubacije i 19. dana inkubacije detektirana povećana humoralna imunost i neki antioksidativni pokazatelji. Lucas i Denington [10]

istraživali su kako zračenje od 0,5 i 3 Gy utječe na hematokrit, koncentraciju hemoglobina, broj eritrocita, ukupan broj leukocita te diferencijalnu krvnu sliku u nesilica starih 6 i 12 tjedana te spolno zrelih jedinki. Rezultati su pokazali da takve doze utječu na hematokrit samo u najmlađoj skupini pilića, dok se koncentracija hemoglobina kao i eritrocita nije značajnije mijenjala u ozračenim skupinama. Iz navedenog i naših rezultata možemo zaključiti da su eritrociti relativno otporni na radijacijska oštećenja, odnosno da su mehanizmi oporavka eritrocita učinkovitiji u odnosu na leukocite, ali i da su rezultati ovisni o dobi pilića. Naime, isti autori utvrdili su značajniji pad ukupnog broja leukocita dan nakon ozračivanja, odnosno trećeg i osmog dana nakon ozračivanja, ovisno o dobi pilića. Ukupan broj leukocita u 6 tjedana starih pilića vratio se gotovo na referentnu vrijednost do kraja pokusa, dok je kod starije skupine životinja oporavak ukupnog broja leukocita bio nepotpun. Iako smo prethodno utvrdili stimulirajući učinak doze 0,5 Gy na broj leukocita u krvi pilića prvih 72h nakon ozračivanja [11], rezultati ovog istraživanja pokazali su smanjen broj leukocita u pokusnoj skupini u odnosu na kontrolnu 1., 3. i 42. dana pokusa. Možemo pretpostaviti kako su pojedina razdoblja tijekom embrionalnog razvoja karakterizirana različitom radio-osjetljivošću te učinci variraju ovisno o životnom stadiju tijekom koje se aplicira doza. U prilog toj hipotezi idu i rezultati naših prijašnjih istraživanja gdje su jaja ozračena dozom od 0,15 Gy gama zračenja prije inkubacije te 7. i 19. dana inkubacije, gdje smo utvrdili heterogene učinke na valivost, prirast, metabolizam kalcija i fosfora, koncentraciju glukoze, kolesterola, ukupnih proteina i bjelančevinastih frakcija te aktivnost transferaza i fosfataza u plazmi ozračenih pilića [12-16]. Leukocitni odgovor kod ptica, osobito odnos heterofila i limfocita (H/L) mogu biti pokazatelj stresnog odgovora [17-18]. Istraživao se učinak stresne nokse (sputavanje, transport, amputacija, temperaturni ekstremi) na broj i odnos leukocita, pa tako Gross i Siegel [19] u nizu pokusa na pticama i kokošima uočavaju korelaciju odnosa H/L sa “dozom” stresa. Maxwell [20] zaključuje kako je odgovor na stres najbolje vidljiv upravo kroz odnos H/L, ali ukazuje i na specifični odgovor na pojedine stresore. Primjerice, fiziološki stresori (gladovanje, buka, transport) pokazali su različite promjene leukocitnog profila i varijacije u manifestaciji stresa i oporavka. Zaključuje tako da je H/L odnos manje varijabilan pokazatelj od ukupnog broja pojedinih stanica, a pouzdaniji pokazatelj stresnog odgovora od primjerice hormonalnog statusa kad su u istraživanju korišteni blagi stresori. Iz našeg istraživanja je vidljivo kako promjene ukupnog broja leukocita ne moraju nužno korelirati s promjenama leukocitnog profila. Naime iako je broj leukocita bio značajno smanjen u skupini ozračenih životinja u dobi od 1, 3 i 42 dana, odnos H/L bio je promijenjen samo u jednodnevnih pilića. Zaključno smatramo kako se *in ovo* ozračivanje pilića gama zračenjem u dozi od 0,3 Gy može okarakterizirati kao blagi stres, no različite manifestacije staničnih reakcija, osobito leukocitni odgovor, mogao bi biti specifičan za pojedine doze i životne faze u kojim se aplicira doza. Potrebno je istražiti vrijednost H/L kao dijagnostičkog pokazatelja u slučaju malih doza ionizirajućeg zračenja.

LITERATURA

- [1] Williams JP, Brown SL, Georges GE, Hauer-Jensen M, Hill RP, Huser AK, Kirsch DG, Macvittie TJ, Mason KA, Medhora MM, Moulder JE, Okunieff P, Otterson MF, Robbins ME, Smathers JB, Mcbridem WH. Animal Models for Medical Countermeasures to Radiation Exposure. *Radiat Res* 2010;173(4):557-578.
- [2] Moller AP, Mousseau TA. Determinants of interspecific variation in population declines of birds from exposure to radiation at Chernobyl. *J Appl Ecol* 2007;44:909-919.
- [3] Oakberg EF, Clark E. Species comparisons of radiation response of the gonads. In: Carlson WD, Gassner FX (Eds.), *Effects of radiation on the reproductive system*, Pergamon Press, Oxford, 1964; pp. 11-24.

- [4] Cronkite EP, Bond VP. Effect of radiation on mammals. *Ann Rev Physiol* 1956; 18:483-526.
- [5] Smirnova OA. Radiation Effects on the Blood-Forming System. In: *Environmental Radiation Effects on Mammals: A Dynamical Modeling Approach*. Springer, New York, 2011; 7-91.
- [6] Dainiak N, Waselenko JK, Armitage JO, Macvittie TJ, Farese AM. The Hematologist and Radiation Casualties. *Hematology Am. Soc. Hematol. Educ. Program*, 2003; str. 473-496.
- [7] Natt MP, Herrick CA. A new blood diluent for counting the erythrocytes and leucocytes of the chicken. *Poultry Science* 1952;31:735-738.
- [8] Vilić M, Gottstein Ž, Ciglar Grozdanić I, Matanović K, Miljanić S, Mazija H, Kraljević P. Effect of low dose gamma- radiation upon Newcastle disease virus antibody level in chicken. *Iran J Radiat Res* 2009;7/1: 27-31.
- [9] Vilić M, Aladrović J, Beer Ljubić B, Miljanić S, Kraljević P. Effect of low dose gamma-radiation upon antioxidant enzymes in chick embryo liver. *Arch Geflugelk* 2010;74: 274-278.
- [10] Lucas AM, Denington EM. Effect of Total Body X-Ray Irradiation on the Blood of Female single comb White Leghorn Chickens. *Poultry Science* 1957;36(6):1290-1310.
- [11] Vilić M, Pejaković Hlede J, Žužul S, Majer M. Effects of low dose gamma-radiation on white blood cells in chicken. In: *Book of Abstracts of the 6th International Congress "Veterinary Science and Profession"*. Horvatek Tomić D, Severin K, Slavica A (ur.). Zagreb: Faculty of Veterinary Medicine, University of Zagreb, 2015. str. 103-103.
- [12] Kraljević P, Šimpraga M, Miljanić S, Vilić M. Effect of low dose gamma radiation upon some biochemical indicators in blood plasma of chickens. *Proceedings of IRPA Regional Congress on Radiation Protection in Central Europe - Radiation Protection and Health, 20-25 svibnja 2001, Dubrovnik, Hrvatska, 2002*; str. 3p-12.
- [13] Kraljević P, Šimpraga M, Vilić M. Effect of low dose gamma radiation upon gamma-glutamyl-transpeptidase activity in blood plasma of chickens. *Book of abstracts and Final Programme. Associazione Italiana di Radioprotezione, Florence, Italy, 2002*; pp. 59.
- [14] Kraljević P, Vilić M, Miljanić S, Šimpraga M. Učinak male doze gama-zračenja na koncentraciju kalcija i anorganskog fosfora u krvnoj plazmi tovnih pilića. *Zbornik radova V. simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja. Hrvatsko društvo za zaštitu od zračenja, 9-11. travnja 2003., Stubičke Toplice, Hrvatska, 2003*; str. 168-173.
- [15] Kraljević P, Vilić M, Miljanić S, Šimpraga M. Body weight and enzymes activities in blood plasma of chickens hatched from eggs irradiated with low-level gamma rays before incubation. *Acta veterinaria* 2009;59 (5-6):503-511.
- [16] Vilić M, Kraljević P, Žura Žaja I, Pejaković Hlede J, Miljanić S, Šimpraga M. Concentration of proteins and protein fractions in blood plasma of chickens hatched from eggs irradiated with low dose gamma radiation. *Vet. arhiv* 2014;84:401-409.
- [17] Gross WB. Effect of exposure to a short-duration sound on the stress response of chickens. *Avian Dis* 1990;34:759-761.
- [18] Shini S, Kaiser P, Shini A, Bryden WL. Biological response of chickens (*Gallus gallus domesticus*) induced to corticosterone and a bacterial endotoxin. *Comp Biochem Physiol Part B: Biochem Molecular Biol* 2008;149:324-333.
- [19] Gross WB, Siegel HS. Evaluation of the heterophil/lymphocyte ratio as a measure of stress in chickens. *Avian Dis* 1983;27:972-979.
- [20] Maxwell MH. Avian Blood Leucocyte Responses to Stress. *World's Poultry Science Journal* 1993;49(1):34-43.

NUMBER OF ERYTHROCYTES, LEUKOCYTES AND HETEROPHIL/LYMPHOCYTE RATIO IN BLOOD OF CHICKENS HATCHED FROM EGGS IRRADIATED WITH LOW DOSE GAMMA RADIATION

Jadranka Pejaković Hlede¹, Silvijo Vince¹, Ivona Žura Žaja¹, Marija Majer², Marinko Vilić¹

¹Veterinary Faculty University of Zagreb, Zagreb, Croatia

²Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

jadranka.pejakovic@vef.hr

This study has been aimed to investigate the effects of 0.3 Gy dose of gamma irradiation on erythrocyte and leukocyte count and on the heterophil/lymphocyte ratio in blood of chickens hatched from irradiated eggs. The trial was performed using heavy breed chickens Ross, divided into experimental (N = 360) and control (N = 340) group. The control group was irradiated one hour before incubation with a cobalt-60 (⁶⁰Co) panoramic irradiator. Blood samples for RBC and WBC count and WBC differential were taken on the 1st, 3rd, 5th, 7th, 10th, 20th, 30th and 42nd day of life. Blood cell counting was performed using the Natt-Herrick method and WBC were differentiated using microscopic examination of stained blood smears. Statistical analysis results are shown as mean values and 95% confidence intervals, using $p < 0.05$ as the statistical significance level. In a blood of experimental and control groups significant results were obtained on the 5th and 7th day of chickens life for RBC, and on the 1st, 3rd and 42nd day when the values were significantly decreased in the experimental group. Moreover, elevated ratio of heterophils to lymphocytes were determined in one-day-old chickens due to decreased heterophil and increased lymphocyte values.

IZLOŽENOST STANOVNIŠTVA ZRAČENJU

RADIATION PROTECTION OF THE PUBLIC

AMBIENT DOSE EQUIVALENT RATE IN THE AREA OF TUZLA CITY

Amira Kasumović, Amela Kasić, Feriz Adrović

Faculty of Natural Sciences and Mathematics, University of Tuzla, Tuzla, Bosnia and Herzegovina

amira.kasumovic@untz.ba

INTRODUCTION

Human population is continuously exposed to ionizing radiation from natural sources. For most individuals, this exposure represents the most significant fraction of their total exposure to ionizing radiation [1,2]. Humans can be protected from ionizing radiation by performing systematic monitoring of radiation levels in the environment and with continuously measurements of the gamma radiation dose rate in air [3]. Measurement of the ambient dose equivalent rate is the primary indicator of the enhanced radioactivity in some area as well as the first step when search for radioisotopes [4]. Therefore, it is important and desirable to measure the gamma absorbed dose rate or ambient dose equivalent rate everywhere in human environment, where it is possible [5]. According to the Regulation on the monitoring of radioactivity in the environment in Bosnia and Herzegovina the measurements of the ambient dose equivalent rate are conducted continuously in several cities [6]. In this study the measurements of the indoor ambient dose equivalent rate were conducted in dwellings and workplaces in the area of Tuzla City.

MATERIALS AND METHODS

The ambient dose equivalent rates (ADER) were measured at 44 locations in the area of Tuzla City. The measurement was performed by MiniTRACE gamma dose rate meter (Genitron Instruments, Germany). This dose rate meter is used for radiation control in different areas such as nuclear power plants or reprocessing plants, research centres, hospitals etc. It can also be used to determine the gamma background during radon measurement. This device displays values from 10 nSv/h to 10 mSv/h, with a sensitivity of 5500 counts per μSv , and has a fast response time (1 second) [7].

The survey was conducted in houses and workplaces that are situated in the western part of the city mostly in suburban areas, near the industrial area of the city. At every location measurement was carried out for 15 minutes and mostly at ground floor level, in rooms where people spend most of their daytime. Measurements at all locations were conducted in the same week, so it can be assumed that all measurements were performed under same or similar meteorological conditions.

According to obtained values of measurement the range of values, average value and standard deviation were determined. Results of measurements were analysed depending on a basic properties of objects where measurements were conducted (type of object, basement space, heating method). The ADER values were analysed depending on the annual effective dose received by the population due to inhalation of radon, where radon activity concentration at the same locations was determined using the nuclear track detector method [8].

RESULTS AND DISCUSSION

The results of the ambient dose equivalent rate measurements in the area of Tuzla City are presented in Table 1. It is evident that the ADER values ranged from 110 nSv/h to 190 nSv/h, with a mean value of 135.9 nSv/h and standard deviation of 22.0 nSv/h. The lowest value of 110 nSv/h was measured at five locations (C2, M3, H7, H10 and SB5, Table 1), that

is 11.4 % of all locations. These locations are situated in different parts of Tuzla City. The highest value of 190 nSv/h was measured in object located in urban area Irac (I3, Table 1). The value of 180 nSv/h was obtained at five locations, where four of them are located in suburban area Bukinje and one is in urban area Irac (B4-B7, I4, Table 1).

Table 1. The ambient dose equivalent rate (ADER) in nSv/h and the annual effective dose (AED) in mSv

No.	Location	ADER (nSv/h)	AED [8] (mSv)	No.	Location	ADER (nSv/h)	AED [8] (mSv)
1	C1	130	0.67	23	M6	120	0.38
2	C2	110	0.61	24	H1	130	0.24
3	S1	120	0.11	25	H2	140	0.45
4	I1	140	0.46	26	H3	120	0.16
5	I2	150	0.44	27	H4	150	0.50
6	I3	190	0.22	28	H5	130	0.76
7	I4	180	0.36	29	H6	130	0.41
8	B1	130	0.23	30	H7	110	0.63
9	B2	120	0.64	31	H8	130	3.01
10	B3	140	0.31	32	H9	150	0.66
11	B4	180	0.47	33	H10	110	0.36
12	B5	180	0.30	34	SB1	170	0.32
13	B6	180	0.23	35	SB2	140	0.36
14	B7	180	0.38	36	SB3	130	1.00
15	B8	130	0.87	37	SB4	130	0.77
16	B9	140	0.41	38	SB5	110	0.14
17	B10	120	0.53	39	SB6	120	0.33
18	M1	130	0.58	40	SB7	130	0.80
19	M2	120	1.07	41	SB8	130	4.84
20	M3	110	0.61	42	SB9	130	1.47
21	M4	120	1.12	43	ML1	120	0.33
22	M5	130	0.67	44	ML2	120	0.73
ADER minimum (nSv/h)		110	ADER median (nSv/h)		130		
ADER maximum (nSv/h)		190	ADER mode (nSv/h)		130		
ADER average (nSv/h)		135.9	ADER SD (nSv/h)		22.0		

Legend for locations (city areas): C-Centar, S-Slatina, I-Irac, B-Bukinje, M-Moluhe, H-Husino, SB-Šićki Brod, ML-Miladije

If consider measurement results for different suburban areas of Tuzla City are considered, it can be noticed that ADER value was in the range from 120 nSv/h to 180 nSv/h, with a mean value of 150 nSv/h in Bukinje, from 110 nSv/h to 170 nSv/h, with a mean value of 132.2 nSv/h in Šićki Brod, and from 110 nSv/h to 150 nSv/h, with a mean value of 130 nSv/h in Husino. At the locations that are situated in the western urban part of the Tuzla ADER value was in the range from 110 nSv/h to 130 nSv/h, with a mean value of 121.3 nSv/h in Miladije and Moluhe, together, and from 140 nSv/h to 190 nSv/h, with a mean value of 165 nSv/h in Irac. According to these results it can be noted that the highest values are registered in suburban area Bukinje and in urban area Irac.

The measurements were mostly conducted inside the houses, 35 of total 44 locations (79.5 %). Seven measurement locations are offices and workplaces, and only two locations are apartments in buildings. If consider the results for different types of objects it can be

noticed that ADER values varied in the range from 110 nSv/h to 180 nSv/h with a mean value of 133.1 nSv/h in houses, while in offices and work places values they ranged from 110 nSv/h to 190 nSv/h with a mean value of 152.9 nSv/h. In offices that are situated in area Irac (I3 i I4, Table 1) higher ADER values in relation to other workplaces are registered although it was expected that values would be higher at locations I1 and I2, where laboratory for coal quality analyses is located.

When analysed the obtained results depending on that whether house has basement space or not, it can be concluded that there was no significant difference in ADER values between houses with basement and houses without basement ($t(42) = 0.74$, $p > 0.05$).

All measurement locations (objects) can be classified in three groups concerning the heating method used in them. The first group included five objects where electric heaters and air conditioner units were used for heating the rooms. The second group included three objects that are connected to the network of district heating system. In 36 objects (the third group) heating was carried out by using different types of stoves, with a central heating boiler located inside or outside the house. For the first group ADER values ranged from 110 nSv/h to 170 nSv/h, with a mean value of 140 nSv/h. The measured values for second group were from 120 nSv/h to 190 nSv/h, with a mean value of 163.3 nSv/h. For the third group of objects ADER values were from 110 nSv/h to 180 nSv/h, with a mean value of 133.1 nSv/h. It was expected that values for third group would be higher comparing to others when considering the fact that in houses of third group were used burning stoves with coal and wood as fuel.

The results of the ambient dose equivalent rate measurements in houses with individual heating systems were analysed depending on that whether heating is carried out using coal or wood stoves that are located in every room in house or there are installed radiators in rooms with one central boiler. In first case a mean value was 139.5 nSv/h, with a range from 110 nSv/h to 180 nSv/h, while in case of heating with installed radiators in every room was determined lower mean value of 125 nSv/h, with a range from 110 nSv/h to 140 nSv/h. For houses with own heating system the measurement results were analysed depending on that where stove or central boiler is located, inside the living space or outside the house. The mean ADER value was 137.6 nSv/h for houses with burning stove located inside the living space and 122.7 nSv/h for houses with central boiler located outside. According to statistical test there is statistical significant difference in ADER values between houses with heating stove inside the living space and houses with central heating boiler located outside ($t(34) = 2.22$, $p < 0.05$). It can be concluded that central heating boiler located outside the living space with installed radiators in rooms contributes to the lower values of the dose equivalent rate. The comparison of ADER values in houses depending on that where the burning stove/central boiler is located is shown in Figure 1.

Although for every object the information such as year of construction and used building materials were noted the analysis of the measurement results concerning that information was not conducted because of additional renovation of objects and using different building materials for every object.

The ADER values for every location were analysed depending on the annual effective dose (AED) received by the population due to inhalation of radon. The AED values were estimated based on the results of indoor radon activity concentration that were determined using the nuclear track detector method [8]. The ADER value as a function of the AED received by the population due to inhalation of radon is shown at Figure 2. According to Figure 2 and based on the correlation analysis it can be concluded that the ambient dose equivalent rate and the annual effective dose have a very weak correlation ($r = -0.15$). If we exclude the locations with significant high radon concentration and with AED values of 3.01 mSv and 4.84 mSv (H8 and SB8, Table 1) then a weak correlation between dose equivalent rate and annual effective dose is obtained ($r = -0.27$).

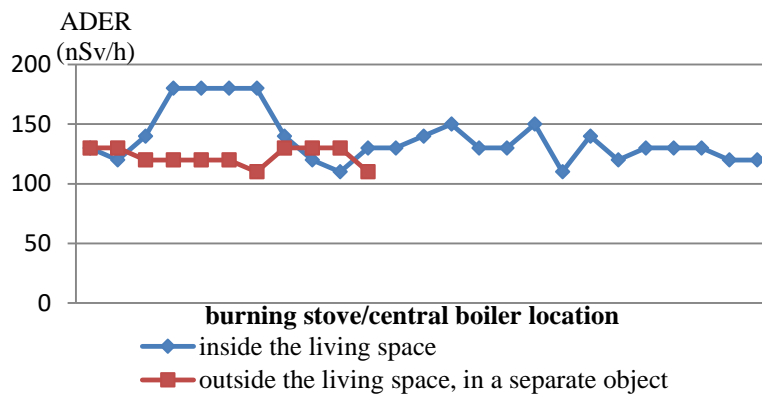


Figure 1. Comparison of measured values of the ambient dose equivalent rate (ADER) in houses depending on that where the burning stove/central boiler is located

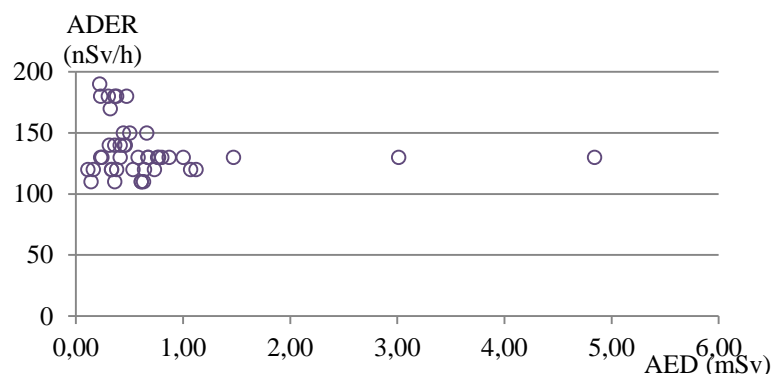


Figure 2. The ambient dose equivalent rate (ADER) as a function of the annual effective dose received by the population due to inhalation of radon (AED)

There are no available data on the indoor measurement of the ambient dose equivalent rate for the area of Tuzla City or nearby. Institute for Public Health of the Federation of Bosnia and Herzegovina continuously measure the ambient dose equivalent rate in air with the aim of early notification about eventual presence of the radioactive contamination in air, according to the Regulation on the monitoring of radioactivity in the environment in BiH [6,9,10]. Measurements are performed using multifunctional monitors installed at several locations in Federation of BiH. For the measuring site that is situated in the area of Tuzla City a mean value of the ambient dose equivalent rate by months was in the range from 116 nSv/h to 119 nSv/h for the year 2012 and from 112 nSv/h to 124 nSv/h for 2013 [9,10].

The results of indoor ambient dose equivalent rate measurements for neighbouring countries are available for Berane town, Montenegro [5], where the values of dose rate in buildings is ranged from 90 nSv/h to 167 nSv/h, with a mean value of 128.1 nSv/h. These values indicate that the dose rates for Tuzla City are higher in comparison to Berane town, but not significant higher. The results of the present study show that the indoor ambient dose equivalent rate values for Tuzla City are higher than those values for different indoor environments in three municipalities in Republic of Macedonia [2], where values were in the range from 38 nSv/h to 184 nSv/h, with a mean value of 102 nSv/h.

The annual average effective dose for the population of Tuzla City can be estimated using that 80 % of time is spent indoors (the indoor occupancy factor is 0.8). According to the measurement results in this study the annual effective dose is calculated to be 0.95 mSv. In fact, annual effective dose will be lower than 0.95 mSv because the ambient dose equivalent rate is a conservative estimate for effective dose for the decay gamma rays. In the idealized

case it can be taken that effective dose is about 60 % of ambient dose equivalent rate [5,11]. This means that the annual effective dose for indoor exposure in the area of Tuzla City is 0.57 mSv that is similar to the value for Berane town [5] and slightly higher than the worldwide average of 0.41 mSv but fits within the average values range for most countries (0.3 - 0.6 mSv) [1].

CONCLUSION

In this paper, the results of the ambient dose equivalent rate measurement in dwellings and workplaces in the area of Tuzla City are presented. Based on the analyses of the measurement results it can be noticed that there is a statistical significant difference in the values of indoor ambient dose equivalent rate between houses with burning stove located inside the living space and houses with central heating boiler located outside.

The obtained values are slightly above the values of indoor measurements for cities in neighbouring countries. The estimated annual average effective dose for indoor exposure fits within the average values range for most countries, according to UNSCEAR data.

REFERENCES

- [1] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (Vol. I), New York; 2008.
- [2] Stojanovska Z, Boev B, Zunic ZS. et al. Variation of indoor radon concentration and ambient dose equivalent rate in different outdoor and indoor environments, *Radiat Environ Biophys* 2016; 55:171-183.
- [3] International Atomic Energy Agency (IAEA). Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection. Safety Guide No. RS-G-1.8. Vienna: IAEA; 2005.
- [4] Petrinc B, Meštrović T, Šošarić M, Problematika terenskih mjerenja radioaktivnosti. U: Radolić V, Poje Sovilj M, Krajcar Bronić I, ur. Zbornik radova 11. Simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja; 5-7 travnja 2017.; Osijek, Hrvatska. Zagreb: HDZZ – CRPA; 2017. pp. 194-198.
- [5] Gulan Lj, Spasović L. Outdoor and indoor ambient dose equivalent rates in Berane town, Montenegro, RAD Conference Proceedings, June 12-16, 2017; Budva, Montenegro. Niš, Serbia: RAD Association; 2017. pp. 137–140.
- [6] State Regulatory Agency for Radiation and Nuclear Safety of Bosnia and Herzegovina. Regulation on the monitoring of radioactivity in the environment. Official Gazette B&H. No. 54/14, Sarajevo; 2014.
- [7] Gama dose rate meter. MiniTRACE γ . User manual. Genitron Instruments.
- [8] Kasumović A, Adrović F, Kasić A, Hankić E. Indoor radon activity concentration measurement and assessment of annual effective dose in houses of Tuzla City, Bosnia and Herzegovina, In: Goran R, ed. Proceedings of the Second East European Radon Symposium (SEERAS), May 27-30, 2014.; Niš, Serbia. Niš: University of Niš, Faculty of Electronic Engineering; 2014. pp. 1-4.
- [9] Zavod za javno zdravstvo Federacije BiH (ZZJZFBiH). Radioaktivnost u životnoj sredini Federacije Bosne i Hercegovine za godinu 2012. Sarajevo: ZZJZFBiH; 2013.
- [10] Zavod za javno zdravstvo Federacije BiH (ZZJZFBiH). Radioaktivnost u životnoj sredini Federacije Bosne i Hercegovine za 2013. godinu, Sarajevo: ZZJZFBiH; 2014.
- [11] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. ICRP; 1996.

AMBIENT DOSE EQUIVALENT RATE IN THE AREA OF TUZLA CITY

Amira Kasumović, Amela Kasić, Feriz Adrović

Faculty of Natural Sciences and Mathematics, University of Tuzla, Tuzla, Bosnia and Herzegovina

amira.kasumovic@untz.ba

Measurement of the ambient dose equivalent rate is the primary indicator of the enhanced radioactivity in some area. In this paper, the results of ambient dose equivalent rate measurements in the area of Tuzla City, Bosnia and Herzegovina, are presented. The survey was conducted in dwellings and workplaces that are situated in the western part of the city mostly in suburban areas, near the industrial area of the city. The measurement was performed by MiniTRACE gamma dose rate meter (Genitron Instruments, Germany).

The measured values of ambient dose equivalent rate ranged from 110 nSv/h to 190 nSv/h with an average value of 135.9 nSv/h and standard deviation of 22.0 nSv/h. Results of measurement were analysed depending on a basic properties of objects where measurements were conducted. If consider the results for different types of objects it can be noticed that values were in the range from 110 nSv/h to 180 nSv/h with a mean value of 133.1 nSv/h in houses, while in offices and workplaces values ranged from 110 nSv/h to 190 nSv/h with a mean value of 152.9 nSv/h. According to statistical test there is a statistical significant difference in the values of indoor ambient dose equivalent rate between houses with burning stove located inside the living space and houses with central heating boiler located outside. The mean value was 137.6 nSv/h for houses with burning stove located inside the living space and 122.7 nSv/h for houses with central boiler located outside.

Based on the correlation analysis it can be concluded that the indoor ambient dose equivalent rate and the annual effective dose received by the population due to inhalation of radon have a very weak correlation.

The obtained values of the ambient dose equivalent rate in this study are slightly above the values of indoor measurements for cities in neighbouring countries.

PROCJENA OČEKIVANE EFEKTIVNE DOZE UDISANJEM ^{106}Ru POČETKOM LISTOPADA 2017. GODINE

Marija Surić Mihić, Branko Petrinec, Gordana Marović, Jasminka Senčar
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
jsencar@imi.hr

UVOD

Zahvaljujući internetu (svemreži) i globalnoj službenoj i onoj neslužbenoj povezanosti stručnjaka, kao i interesu zainteresirane javnosti diljem svijeta, brzo i sveprisutno raspravlja se o najrazličitijim zagađenjima. Fotografije, video uradci, rezultati najrazličitijih mjerenja ukazuju i prokazuju na djelatnosti ljudi koje, bilo da su izmakle kontroli, bilo da su po svojoj prirodi loše, te narušavaju zdravlje okoliša. Tako se početkom listopada 2017. godine nad Europom nadvio oblak rutenija. U zraku diljem Europe izmjerene su niske koncentracije aktivnosti ^{106}Ru (u koncentracijama aktivnosti od nekoliko μBqm^{-3} do nekoliko mBqm^{-3}) [1-3]. Rutenij, izotop ^{106}Ru (u paru s izotopom ^{103}Ru), jedan je od fisijskih produkata i ne očekuje se njegova pojavnost u atmosferi tijekom rutinskog monitoringa. Kad je detektiran, začudno je bilo nedetektiranje drugih fisijskih produkata u povećanim koncentracijama, kao npr. ^{106}Ru parnjaka ^{103}Ru , izotopa cezija, osobito ^{137}Cs , da se ne spominju izotopi joda, osobito ^{131}I .

Međunarodna agencija za atomsku energiju (*International Atomic Energy Agency*, IAEA) pratila je pojavnost i izmjerene koncentracije i zaključila da se nije radilo o akcidentu u nuklearnoj elektrani u kojem bi došlo do ispuštanja rutenija. Vrijednosti izmjerenih koncentracija aktivnosti ^{106}Ru bile su mnogo niže od vrijednosti koje bi zahtijevale pokretanje mehanizama za slučaj akcidenta i pokretanje zaštitnih mjera za stanovništvo. Kako, osim kao fisijski produkt, ^{106}Ru može biti generiran u akceleratorima i ciklotronima za potrebe u medicini i industriji, npr. u tretmanu karcinoma oka, ili u satelitskoj opremi kao termoelektrični generator s rutenijem, pretpostavilo se da je negdje došlo do događaja koji je rezultirao ispuštanjem rutenija u atmosferu [3,4].

Na sreću, izmjerene koncentracije aktivnosti bile su niske i ubrzo postajale još niže, pa ih više nije ni bilo moguće detektirati. No, sama mogućnost da u zraku postoji nešto čega ne bi trebalo biti, a postoje koncentracije koje mogu izazvati ozbiljnu štetu u ljudskom organizmu [5-7] stvara potrebu za procjenom doprinosa očekivanoj efektivnoj dozi udisanjem ^{106}Ru za prosječnog stanovnika Hrvatske.

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada iz Zagreba (IMI) ovlaštena je ustanova za obavljanje stručnih poslova zaštite od ionizirajućeg zračenja (DZRNS 2015). Jedinica za zaštitu od zračenja IMI svojom djelatnošću kroz različite analitičke metode sustavno određuje aktivnost bilo kojeg radionuklida u bilo kojem uzorku kao i dozu ionizirajućeg zračenja u bilo kojoj točki prostora. Sustavno praćenje stanja radioaktivnosti u okolišu Republike Hrvatske između brojnih aktivnosti uključuje i određivanje ambijentalnog doznog ekvivalenta, $H^*(10)$, na lokaciji IMI, te uzorkovanje zraka kroz različite filtre i određivanje koncentracija aktivnosti u zraku prisutnih radionuklida.

^{106}Ru određen je u velikom volumenu zraka propumpanog kroz filter od 29. rujna do 9. listopada 2017. godine. Temeljem izmjerenih vrijednosti koncentracija aktivnosti, modela za izračun doze, te životnih navika odraslog stanovnika Hrvatske, procijenjen je doprinos očekivanoj efektivnoj dozi koju primi odrasli stanovnik Hrvatske udisanjem ^{106}Ru u vrijeme zamijećene pojavnosti.

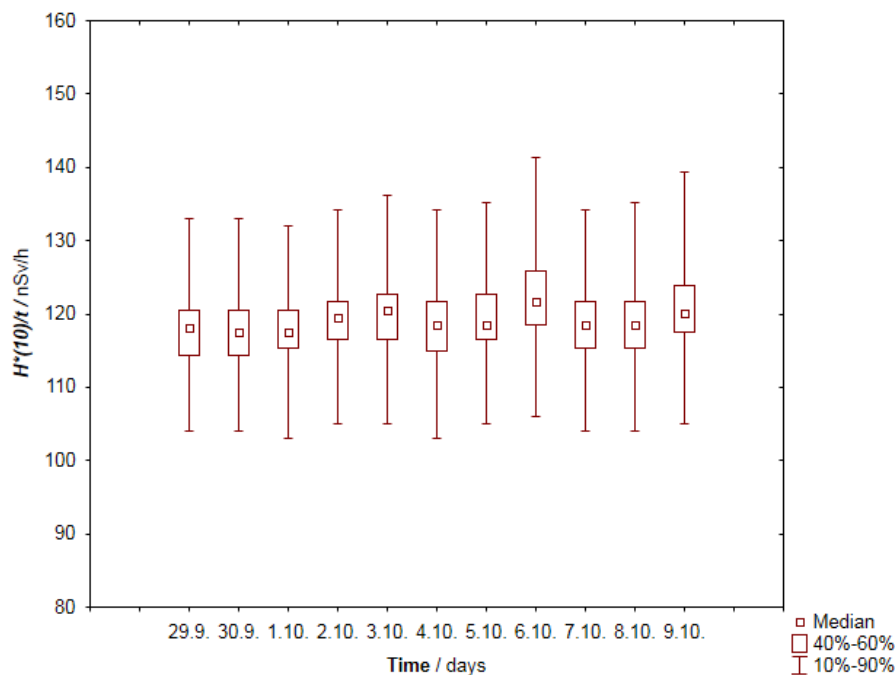
MATERIJALI I METODE

U Jedinici za zaštitu od zračenje IMI svakodnevno se očitavaju podaci neprekidnog mjerenja brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta, $H^*(10)/t$. Iz neprekidno skupljenih podataka u minutnim intervalima određuje se ambijentalni dozni ekvivalent, $H^*(10)$, odnosno brzina ambijentalnog doznog ekvivalenta, $H^*(10)/t$, u nSv h^{-1} . Izračunavaju se vrijednosti dnevnog prosjeka $H^*(10)/t$.

Veliki volumen zraka neprekidno je pomoću stanice ASS-500 HVS (*High volume sampler*) propumpavan preko Petrianov filtra (FPP-15-1.5) postavljenog na visini 1,5 m iznad tla. Uzorkovanje zraka provođeno je od 29. rujna 2017. godine od 9:57 sati do 9. listopada 2017. godine u 10:36 sati. Filtar s propumpanim velikim volumenom zraka ($V = 140434 \text{ m}^3$) spremljen je u kutijicu volumena $V = 50 \text{ ml}$ i obrađen je gamaspektrometrijom, metodom akreditiranom prema zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025. Gamaspektrometrijska analiza provedena je na detektoru, kristalu germanija visoke čistoće, proizvođača ORTEC: GMX detektor, rezolucije 2,24 keV na 1.33 MeV ^{60}Co i relativne efikasnosti od 74,3 % na 1,33 MeV ^{60}Co . Detektor se nalazi u olovnom kontejneru kako bi se osigurala zaštita uzorka i nisko osnovno zračenje, a povezan je na računalo s programskim paketima za skupljanje podataka - spektara, kao i obradu skupljenih gamaspektara [9]. Kalibracija efikasnosti provedena je standardima Češkog metrološkog instituta, dok se osiguranje kvalitete određivanja radionuklida provodi sustavnim sudjelovanjima u usporednim mjerenjima u organizaciji Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) i Svjetske zdravstvene organizacije (WHO) kao i Zajedničkog istraživačkog centra Europske unije (JRC EU).

REZULTATI

Dnevna očitavanja brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta početkom listopada 2017. godine nisu ukazivala na moguću akcidentalnu situaciju. Vrijednosti dnevnih prosjeka kao i varijacije, ne odstupaju od onih prije i poslije u 2017. godini. Na Slici 1 prikazani su usporedno medijani dnevnih vrijednosti $H^*(10)/t$ od 29. rujna do 9. listopada 2017. godine.

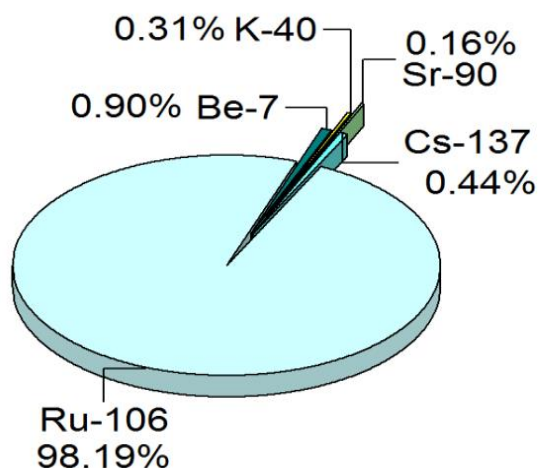


Slika 1. Medijani i raspon od 10. do 90. percentila dnevnih vrijednosti $H^*(10)/t$ u danima potencijalnog akcidenta s ispuštanjem ^{106}Ru u prvom danima listopada 2017. godine

Gamaspektrometrijska analiza velikog volumena zraka ($V = 140434 \text{ m}^3$) uzorkovanog od 29. rujna do 9. listopada 2017. godine u obradi je rezultirala koncentracijama aktivnosti uobičajeno u zraku prisutnih radionuklida, ^7Be , ^{137}Cs , ^{40}K ... No, na energijama 621,80 keV i 1050,10 keV pojavili su se fotovrhovi kojih u dotadašnjim obradama tijekom 2017. godine, a ni prije, nije bilo. Analizom je ustanovljeno da se radi o najpojavnijim gama „zrakama“ ^{106}Ru koji nastaje stopostotnim beta raspadom ^{106}Ru . Utvrđena je koncentracija aktivnosti ^{106}Ru u vrijednosti od $13,29 \pm 0,03 \text{ mBqm}^{-3}$. Nakon 9. listopada uzorkovani su i analizirani dnevni uzorci zraka ($V \approx 15000 \text{ m}^3$) no, sve su vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{106}Ru bile ispod granice detekcije ($< 30 \mu\text{Bqm}^{-3}$). Takav razvoj situacije potvrdio je opravdanost zaključaka stručnjaka IAEA da se radi o malom incidentu.

Zrak nad Zagrebom, nad Hrvatskom, nad Europom bio je onečišćen rutenijem, izotopom ^{106}Ru , nekoliko dana početkom listopada 2017. godine, najviše deset dana za koje možemo reći, sukladno rezultatima mjerenja, da je tijekom tih deset dana prosječna koncentracija aktivnosti ^{106}Ru iznosila $13,3 \text{ mBqm}^{-3}$.

Provede li se za tih deset dana, na koje se odnosi izračun koncentracije aktivnosti ^{106}Ru u zraku, izračun procjene očekivane efektivne doze udisanjem ^{106}Ru , E_{inh} , a za prosječnog odraslog stanovnika Hrvatske, starijeg od sedamnaest godina, dobiva se iznenađujuće visoka vrijednost od 196 nSv. Vrijednost očekivane efektivne doze udisanjem ^{106}Ru za vrijeme desetodnevne izloženosti uvelike premašuje procjenu godišnje očekivane efektivne doze udisanjem ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^7Be i ^{40}K [8]. Na Slici 2 prikazani su udjeli pojedinih radionuklida (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^7Be i ^{40}K) u procijenjenoj godišnjoj očekivanoj efektivnoj dozi udisanjem za odraslog prosječnog pripadnika opće populacije Republike Hrvatske. Njima je pridodana procjena očekivane efektivne doze desetodnevnim udisanjem ^{106}Ru .



Slika 2. Godišnja procijenjena očekivana efektivna doza primljena udisanjem ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^7Be i ^{40}K uz desetodnevno udisanje ^{106}Ru za prosječnog odraslog stanovnika Republike Hrvatske

Procijenjena očekivana efektivna doza uslijed desetodnevnog udisanja ^{106}Ru gotovo je pedeset puta veća od procijenjene očekivane efektivne doze udisanjem ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^7Be i ^{40}K tijekom cijele godine. Takvo, iako iznosom malo (radi se o nSv), dodatno dozno opterećenje potrebno je zabilježiti i voditi o njemu računa u slučaju bilo kakvih neželjenih posljedica na zdravlje ljudi.

ZAKLJUČAK

Redovito sustavno praćenje stanja radioaktivnosti u okolišu Republike Hrvatske moralo bi biti neupitno u svoj širini predviđenoj Pravilnikom o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu [10]. Dapače, zbog sve nižih vrijednosti koncentracija aktivnosti nekih kontaminanata u okolišu (^{137}Cs , ^{90}Sr) potrebno je proširiti i metodološki osnažiti ispitivanja kako bi se gdje god je moguće mogao ukinuti pristup zadovoljavajuće je ako je manje od neke granične vrijednosti. Takav pristup je nužan u cilju točnog utvrđivanja i najmanjeg rizika za zdravlje ljudi i njihov okoliš. Potrebno bi bilo detektirati i kvantificirati svako potencijalno zagađenje, neželjenu pojavnost, kako bi se identificiranjem opasnosti i pravodobnom reakcijom posljedice svele na minimum.

LITERATURA

- [1] https://www.bfs.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/BfS/EN/2017/1003-ruthenium-106.html;jsessionid=DC839C47007205AA8052CEBD5D4EE959.2_cid382
- [2] http://www.irsn.fr/EN/newsroom/News/Pages/20171009_Detection-of-ruthenium-106-in-the-air-in-the-east-and-southeast-of-Europe.aspx
- [3] IRSN: Information Report - Ruthenium-106 in Europe at 20171109.pdf (<http://www.irsn.fr/EN/newsroom/News/Pages/20171109>)
- [4] Kovalets I. Detection of ruthenium-106 in 2017: meteorological analysis of the potential sources. <https://www.researchgate.net/publication/321062427>
- [5] ICRP 31: Biological Effects of Inhaled Radionuclides. ICRP Publication 31. Ann. ICRP 4 (1/2) ICRP, 1980.
- [6] Leggett RW. The biokinetics of ruthenium in the human body. Radiation Protection Dosimetry 2012;148(4):389-402.
- [7] ICRP 137: Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4). ICRP, 2017.
- [8] Marović G, Avdić M, Babić D, Bituh T, Branica G, Franić Z, Franulović I, Kolar M, Petrincec B, Petroci Lj, Senčar J, Šošarić M. Praćenje stanja radioaktivnosti životne sredine u Republici Hrvatskoj za 2017. godinu. Izvještaj IMI-CRZ-98, Zagreb 2018.
- [9] GammaVision®-32 for Windows Model A66-B32 Version 5.31.(computer program). Oak Ridge: ORTEC®; 2001.
- [10] Pravilnik o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu. Narodne novine Republike Hrvatske 40/2018.

AN ESTIMATE OF THE COMMITTED EFFECTIVE DOSE DUE TO INHALATION OF ^{106}Ru AT THE BEGINNING OF OCTOBER 2017

Marija Surić Mihić, Branko Petrinec, Gordana Marović, Jasminka Senčar
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
jsencar@imi.hr

At the beginning of October 2017, low concentrations of ^{106}Ru in high-volume air samples were detected in some European countries. The measured concentrations did not contain any other notable radionuclides (other fission products such as ^{137}Cs).

^{106}Ru is a common fission product and it would not be expected to be routinely monitored in the atmosphere. The absence of any other fission products in air samples implied that ^{106}Ru was not released from a nuclear power plant. It can also be generated through other means including accelerators and cyclotrons for use in medicine and industry; for example, ^{106}Ru is used in eye cancer treatment. The origin of ^{106}Ru was therefore to be found either in nuclear fuel cycle facilities or in radioactive source production.

The measured concentrations were at levels far below those requiring public protective actions.

The Radiation Protection Unit of the Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb has been conducting a radioactivity measurement programme in the environment of the Republic of Croatia since 1959. Systematic monitoring of environmental radioactivity in Croatia, among other activities, includes measurements of the ambient dose equivalent at the location of the Institute for Medical Research and Occupational Health, air sampling using various filters and a determination of radioactivity concentrations in air due to airborne radionuclides.

Daily readings of the ambient equivalent dose rate in the first days of October 2017 did not indicate an accidental situation. Daily averages as well as corresponding variations did not deviate from prior and later readings made in 2017.

Gammasspectrometric analysis of high-volume air samples ($V = 140434 \text{ m}^3$) taken from September 29 to October 9 2017 revealed ^{106}Ru activity concentrations of $13.29 \pm 0.03 \text{ mBq m}^{-3}$.

The committed effective dose from inhalation of ^{106}Ru during 10 days of exposure for an adult was estimated to be 196 nSv. The estimated value of the committed effective dose from inhalation of ^{106}Ru during these 10 days of exposure significantly exceeded the estimated annual committed effective dose from inhalation of ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^7Be and ^{40}K .

The authors suggest that the detection and quantisation of any potential radiological pollution is necessary in order to identify potential hazards and take action to minimize risks and corresponding consequences.

PROCJENA EFEKTIVNE DOZE ZA SERVISERA HELIKOPTERA

Jerko Šiško, Marija Surić Mihić, Mihaela Justić
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
jsisko@imi.hr

UVOD

Jedna od komponenti sustava zaštite vezana uz siguran rad helikoptera je i signalizator zaleđivanja koji može sadržavati zatvoreni radioaktivni izvor ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$). Takav signalizator nalazi se na krovu, pri bazi nosača elise helikoptera. Tijekom provedbe servisa helikoptera provode se poslovi koji uključuju rad u neposrednoj blizini takvog signalizatora, njegovo testiranje, demontažu i montažu. Zatvoreni radioaktivni izvor $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ugrađen u signalizator zaleđivanja je beta emiter, s glavnim doprinosima beta zračenja na energijama 546 keV i 2,284 MeV, s vremenom poluraspada $T_{1/2} = 28,2$ godine [1]. Dozimetrijska mjerenja izloženosti servisera do sada se nisu provodila tako da je jedina mogućnost procjene izloženosti bazirana na radiološkom nadzoru mjesta rada. No takva procjena, bazirana samo na mjerenjima brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta $H^*(10)$ od zakodne komponente zračenja nije ispravna procjena izloženosti izvoru koji je nije zaštićen kućištem uređaja. Za pravilnu procjenu nužno je poznavati trenutnu aktivnost zatvorenog radioaktivnog izvora prema certifikatu izvora, udaljenost od izvora i vrijeme izloženosti kako bi se uporabom modela za procjenu [1] mogla izračunati ukupna izloženost beta i zakodnom zračenju.

Serviseri koji provode servis helikoptera mogu se u smislu radiološke zaštite svrstati u dvije skupine. Prva skupina su serviseri koji se zadržavaju na tlu oko helikoptera i za vrijeme servisa ne rukuju izvorom zračenja, a druga skupina su serviseri koji tijekom servisa borave u neposrednoj blizini signalizatora zaleđivanja elise te provode njegov servis (borave na radnoj platformi u razini elise). Tijekom provedbe servisa signalizatora zaleđivanja skida se štit signalizatora u svrhu testiranja efikasnosti rada te je tijekom tog vremena serviser izložen beta i zakodnoj komponenti zračenja.

MATERIJALI I METODE

Mjerenje brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta $H^*(10)$ na različitim položajima oko helikoptera provedeno je mjernim uređajem Thermo FH 40G-L10. Mjerenja su provedena u podnožju helikoptera te na platformi iznad krova helikoptera koja omogućava pristup elisi. Korištena je akreditirana metoda Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada „ME-608-002 Određivanje brzine prostornog (ambijentalnog) ekvivalenta doze; $H^*(10)/t^*$ “ [2]. Signalizator zaleđivanja elise sadržavao je zatvoreni radioaktivni izvor $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ nepoznate aktivnosti, nedostupnog certifikata izvora. Brzina $H^*(10)$ prirodnog pozadinskog zračenja na lokaciji gdje se provodi servis bilo je u rasponu 50-150 nSv/h.

Na temelju certifikata radioaktivnog izvora drugog, jednakog modela signalizatora zaleđivanja elise utvrdili smo da se u taj model ugrađuju zatvoreni radioaktivni izvori $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ maksimalne aktivnosti 930 MBq na dan proizvodnje. Za procjenu najgore moguće izloženosti tijekom rada servisera sa skinutim štitom signalizatora pretpostavili smo da je izvor novi.

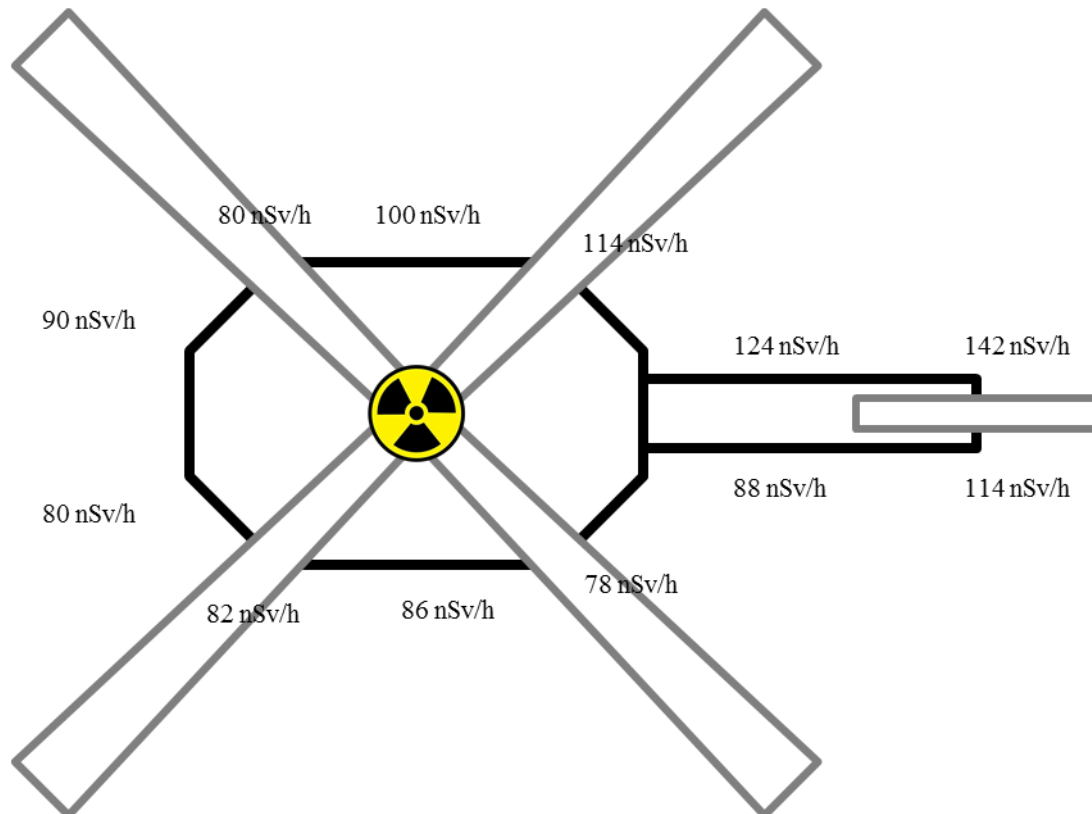
Radioaktivni izvor $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ nalazi se ispod elise helikoptera (označen znakom opasnosti od ionizirajućeg zračenja, Slika 1), u spremniku koji djeluje kao štit koji zaustavlja beta zračenje od izvora tako da je tijekom vremena kada je radioaktivni izvor zaštićen štitom jedina komponenta koja je mjerljiva zakodno zračenje.

Servis helikoptera na kojem se nalazi radioaktivni izvor u prosjeku traje oko 4 tjedna (vrijeme trajanja rada u blizini izvora ionizirajućeg zračenja u prosjeku je 160 sati po helikopteru kad je izvor zaštićen štitom, trajanje rada kada se testira sustav za provjeru

zaleđivanja kad izvor nema zaštitni štit je u prosjeku 1 sat, a u slučaju kvara signalizatora do 3 sata). Kapacitet hangara u kojem se vrši servis je 3 helikoptera istovremeno, ali jedan čovjek može istovremeno raditi na jednom helikopteru.

REZULTATI

Rezultati mjerenja brzine $H^*(10)$ u okolini podnožja helikoptera u situaciji kada je radioaktivni izvor zaštićen štitom prikazani su na Slici 1. Dobivene vrijednosti su u razini lokalnog pozadinskog zračenja što je i očekivano budući da štit zaustavlja beta zrake. Udaljenost od izvora prilikom zadržavanja u neposrednoj blizini helikoptera na tlu je oko tri metra.



Slika 1. Izmjerene vrijednosti ambijentalne brzine doze oko podnožja helikoptera, na kojem se nalazi zaštićeni radioaktivni izvor ionizirajućeg zračenja $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

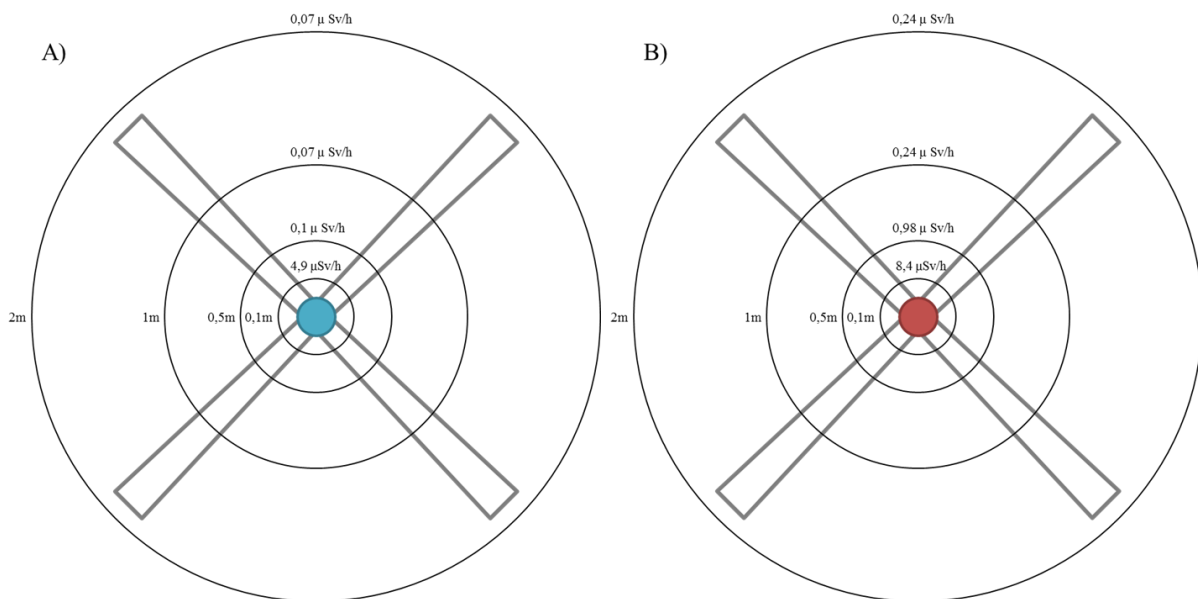
Rezultati mjerenja prikazani na Slici 2A) i 2B) pokazuju vrijednost brzine $H^*(10)$ na prikazanim udaljenostima od signalizatora zaleđivanja elise, na platformi iznad krova helikoptera. Na Slici 2A) prikazana je izmjerena vrijednost brzine $H^*(10)$ kad se na izvoru nalazi štit koji zaustavlja beta zračenje. Na Slici 2B) prikazana je izmjerena vrijednost brzine $H^*(10)$ na istim položajima kada se štit makne.

U slučaju rada na platformi na udaljenosti većoj od 0,5 metara od zaštićenog radioaktivnog izvora ne očekuju se doprinosi od profesionalnog ozračenja.

Prema mjerenjima obavljenima prilikom ispitivanja nezaštićenog radioaktivnog izvora, brzina $H^*(10)$ od zakročnog zračenja na udaljenosti 10 cm od izvora je do $6 \mu\text{Sv/h}$. Pod pretpostavkom da je maksimalno vrijeme rada s izvorom na ovoj udaljenosti do 3 sata po jednom servisu, ukupna primljena doza u ovom slučaju bila bi $18 \mu\text{Sv}$. Na godišnjoj razini efektivna doza djelatnika koji radi u okolini nezaštićenog radioaktivnog izvora $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ nepoznate aktivnosti bila bi najmanje $216 \mu\text{Sv}$, no kako nije poznata starost izvora ovaj

podatak je nepouzdan jer za novi izvor može biti i 2 puta viša (npr. ako je izvor na kojem su provedena mjerenja star 28 godina).

Izloženost beta zračenju na udaljenosti 30 cm od novog izvora aktivnosti 930 MBq od pretpostavkom da je radioaktivni izvor novi, da serviser radi maksimalno 3 sata s izvorom ionizirajućeg zračenja bez štita, ukupna maksimalna ekvivalentna doza za kožu ili šake koju može primiti u najgorem slučaju je 558 mSv. Kad je na izvoru štit, beta zračenje je apsorbirano i mjerljivo je zaključno zračenje prouzrokovano beta zračenjem i koje je u ovom slučaju sigurno više od onog izmjenjenog u prethodnom pasusu jer izvor maksimalne aktivnosti proizvodi zaključno zračenje većeg intenziteta. S obzirom da je procijenjena vrijednost viša od godišnje zakonske granice od 500 mSv za ekvivalentnu dozu za šake i kožu potrebno je provesti mjerenja prsten dozimetrima kako bi se mogla načiniti realističnija procjena na godišnjoj razini i provesti optimizacija izloženosti.



Slika 2. Izmjerene vrijednosti ambijentalne brzine doze oko izvora $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ na četiri razne udaljenosti (0,1 m, 0,5 m, 1 m, 2 m) sa zaštitnim štitom oko izvora (A) te bez štita (B)

ZAKLJUČAK

Radnici koji se zadržavaju na radnoj platformi na udaljenostima većim od 0,5 m od radioaktivnog signalizatora zaleđivanja, ne smatraju se izloženim radnicima jer su mjerenja pokazala da su u takvoj situacije brzina $H^*(10)$ usporedive s lokalnim pozadinskim zračenjem.

Radnici koji rukuju s radioaktivnim signalizatorom zaleđivanja u načelu ne trebaju osobni dozimetar za mjerenje $Hp(10)$, ali se preporuča obvezna uporaba prsten dozimetra zbog očekivanog ozračenja šaka. Nakon provedenih mjerenja $Hp(0,07)$ potrebno je napraviti procjenu ekvivalentne doze za šake i kožu te godišnju izloženost.

Procijenjene vrijednosti ekvivalentne doze za šake i kožu servisera su vrlo visoke i iznad godišnjih granica ozračenja [3].

U slučaju da serviseri rade s izvorima koji nisu novi ekvivalentna doza bila bi veća od godišnje dozvoljene granice [3].

Zaključak je da bi serviseri koji rukuju radioaktivnim signalizatorom zaleđivanja u kojem je ugrađen zatvoreni radioaktivni izvor $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ trebali obvezno koristiti prsten dozimetre za mjerenje $Hp(0,07)$.

LITERATURA

- [1] Radionuclide and radiation protection data handbook 2002. Radiat Prot Dosimetry 98(1) 2002
- [2] Metoda ME-608-002 “Određivanje brzine prostornog (ambijentalnog) ekvivalenta doze; $H^*(10)/t$ ”, Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada,
- [3] Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja, Narodne novine Republike Hrvatske broj 38/18

EFFECTIVE DOSE ESTIMATION FOR HELICOPTER REPAIR WORKERS

Jerko Šiško, Marija Surić Mihić, Mihaela Justić

Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia

jsisko@imi.hr

Measurements were performed on a helicopter in a vicinity of a radioactive icing indicator containing a sealed radioactive source of $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. The $H^*(10)$ rate of bremsstrahlung component was measured, while exposure to beta radiation should be measured in the future using ring dosimeters.

Workers who spend larger amounts of time near the radioactive source but do not work with it are not exposed workers, whereas the service and repair workers that do manipulate the radioactive source are exposed workers and perform an average of 12 repairs annually, handling the $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ for approx. 3 hours per repair.

The worst-case scenario (new source, maximum exposure) leads to estimation of the equivalent dose for the skin and hands of 558 mSv per repair, which exceeds annual dose limits for the equivalent dose for the skin and extremities.

It is recommended that the workers handling the radioactive icing indicator should wear ring dosimeters so their equivalent dose could be properly estimated and if necessary optimisation measures taken.

MJERENJE TJELESNE RADIOAKTIVNOSTI U SLUČAJU NUKLEARNE NESREĆE VELIKIH RAZMJERA

Nikola Marković, Martin Hjellström, Mats Isaksson

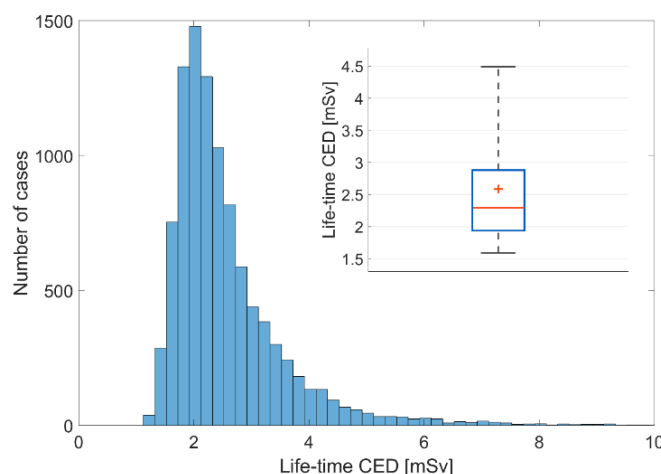
Department of Radiation Physics at Institute of Clinical Sciences, Sahlgrenska Academy,
University of Gothenburg, Sweden

nikola.markovic@gu.se

UVOD

Sanacija kontaminiranog područja nakon nuklearne nesreće interdisciplinarni je projekt pokrenut od strane Švedske agencije za izvanredne situacije (*Myndigheten för samhällsskydd och beredskap*, MSB) s ciljem analize i revizije smjernica namijenjenih donositeljima odluka u slučaju nuklearne nesreće. U projektu sudjeluje više švedskih sveučilišta, a pristup problemu je multidisciplinarnan i uključuje znanstvenike iz područja nacionalne ekonomije, komunikacijskih znanosti te naravno fizike zračenja. Fokus projekta je na kasnijoj fazi nakon nuklearne nesreće. Odabir evakuacijske zone, metode i strategije dekontaminacije tla i hrane u svrhu smanjenja negativnih zdravstvenih utjecaja na stanovništvo promatraju se kao kombinacija tehničkih i financijskih čimbenika kroz analizu koristi i troškova uzevši u obzir komunikaciju s lokalnim stanovništvom. Odjel radijacijske fizike Sveučilišta u Göteborgu sudjeluje u projektu kroz istraživanje novih i razvoj postojećih metoda za mjerenje tjelesne radioaktivnosti.

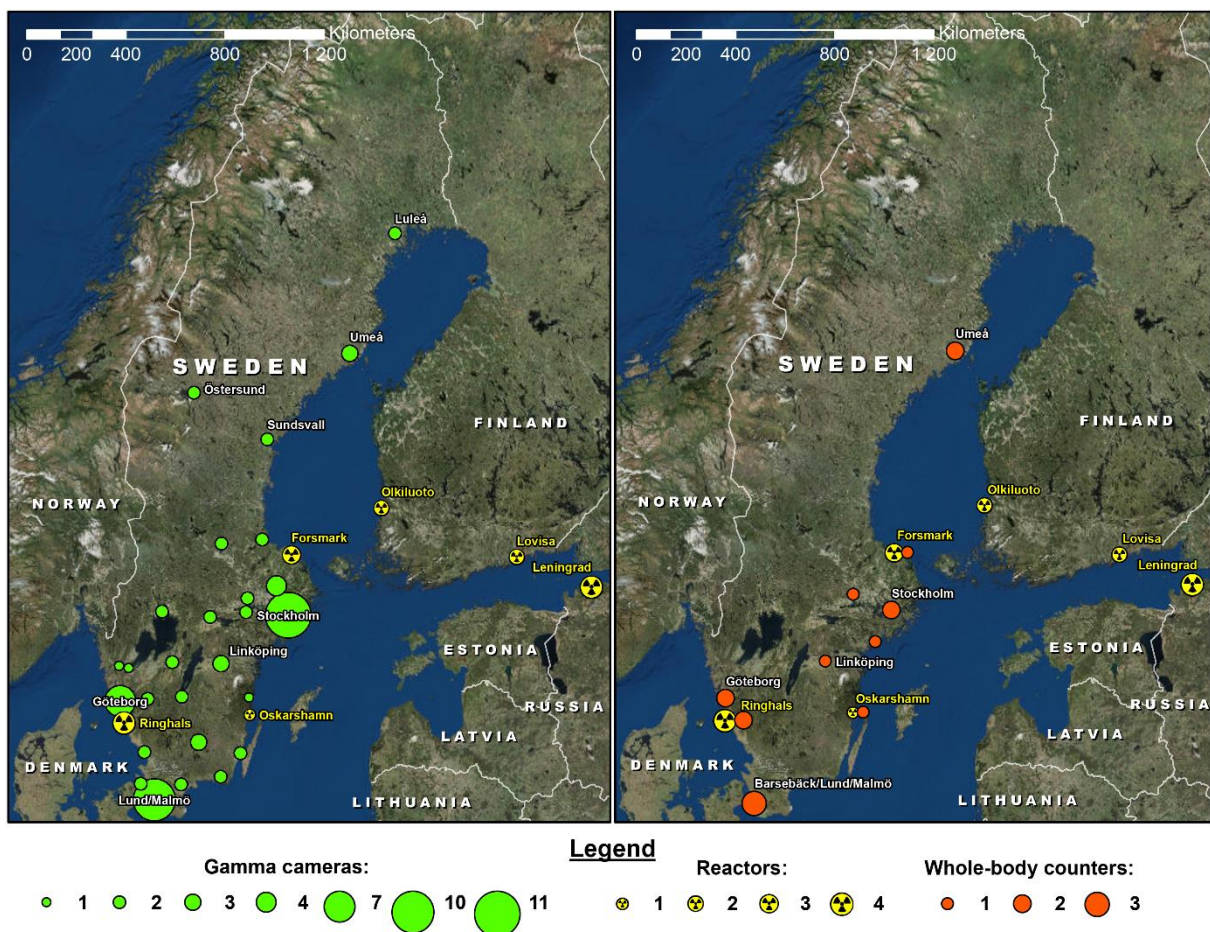
Iskustvo Japana nakon nuklearne nesreće u Fukushima pokazuje potrebu za velikim brojem mjerenja tjelesne radioaktivnosti u zahvaćenoj populaciji, s više od 150 000 mjerenih osoba [1]. Tjelesna radioaktivnost i odgovarajuća doza mogu biti procijenjeni koristeći se *in-situ* gama spektrometrijskim mjerenjima i mjerenjima aktivnosti u hrani (uz korištenje raznih populacijskih parametara, faktora transfera, doznih koeficijenata te iskustva mjerenja aktivnosti cijelog tijela iz dosadašnjih nuklearnih nesreća) [2] ali individualni rezultati variraju unutar populacije ovisno o raznim lokalnim parametrima (životne i prehrambene navike i dr.), Slika 1. Iako je prosjek populacije ispod ograničenja doze, ako je zahvaćena populacija dovoljno velika, pojaviti će se određeni broj pojedinaca s dozama iznad dozvoljenog ograničenja. Postavlja se pitanje ima li svaki pojedinac pravo znati svoju unutarnju radioaktivnu kontaminaciju i pripadajuću dozu. Ako je odgovor pozitivan, javlja se potreba za velikim brojem mjerenja tjelesne radioaktivnosti.



Slika 1. Distribucija kumulativnih efektivnih doza tijekom 50 godina za odrasle muškarce za standardni scenarij prema [2].

U radiološkim i nuklearnim izvanrednim situacijama nivoi aktivnosti koji odgovaraju limitima doza (za npr. ^{137}Cs i ^{131}I) prilično su visoki tako da odlučujući faktor pri odabiru metode mjerenja nije osjetljivost instrumenta nego dostupnost i maksimalni protok. U tom slučaju nisu potrebni brojači aktivnosti cijeloga tijela velike osjetljivosti koji mogu detektirati vrlo niske aktivnosti već se mogu koristiti i medicinske gama kamere [3-4].

Pristup brojačima cijeloga tijela u Švedskoj je limitiran, aktivno je ~15 uređaja od kojih 8 pripada nuklearnim postrojenjima ili vojsci što dodatno otežava pristup civilnoj populaciji (Slika 2). Broj gama kamera u švedskim bolnicama veći je od 70, koriste se na dnevnoj bazi tako da je dostupno i trenirano osoblje. Korištenje gama kamera u trijaži nakon nuklearne nesreće osigurava dobru geografsku pokrivenost i veliki protok kandidata za mjerenje. Preciznost mjerenja u slučaju nesreće također nije ključan parametar, rezultati s relativnom nepouzdanosti do 50% sasvim su prihvatljivi. Mali broj pojedinaca s aktivnostima koje su blizu ili iznad ograničenja, kao i oni odabrani za daljnje studije (u svrhu npr. identifikacije neočekivanih puteva unosa radioaktivnosti i posebno osjetljivih skupina), nastavljaju se pratiti preciznijim i osjetljivijim metodama (brojači cijeloga tijela ili analize bioloških uzoraka).



Slika 2. Mapa pokazuje broj i lokacije gama kamera u švedskim bolnicama (lijevo) te brojača cijeloga tijela (desno). Također su prikazane lokacije nuklearnih elektrana zajedno s brojem aktivnih reaktora.

ZAKLJUČAK

Napravljen je popis gama kamera u švedskim bolnicama i lista kontakata njihovih operatera. Identificirani su najčešći modeli te se radi na njihovoj adaptaciji za korištenje pri mjerenju tjelesne radioaktivnosti. Istražuje se pristup pri kojem je potrebno najmanje preinaka kako bi se postigle zadovoljavajuće performanse, a kako bi se izbjeglo dodatno opterećivanje bolničkog osoblja i smanjila ili potpuno izbjegla potreba za dodatnim edukacijama ili treninzima. Razviti će se kompjuterski modeli za najčešće korištene gama kamere, nastavljajući dosadašnja istraživanja u razvoju kompjuterskih Monte Carlo modela za brojače cijeloga tijela [5] na Sveučilištu u Göteborgu. Potrebno je odrediti parametre mjerenja (trajanje akvizicije, micanje kolimatora, i dr.) za svaki pojedini tip uređaja kako bi se postigla željena osjetljivost [6-7]. Validacija će se provesti mjerenjem na radioaktivnim fantomima i usporedbom s brojačima cijeloga tijela. Sveučilišna bolnica Sahlgrenska u Göteborgu raspolaže s dva brojača aktivnosti cijeloga tijela koja mogu mjeriti niske razine aktivnosti. Sistemi su smješteni u podzemnom laboratoriju u čeličnoj komori niske aktivnosti, jedan sistem se sastoji od dva NaI(Tl) detektora ($5'' \times 4''$), dok drugi sadrži dva velika plastična scintilacijska detektora ($91,5 \times 76,0 \times 25,4 \text{ cm}^3$ svaki).

Krajnji cilj projekta je donošenja smjernica za korištenje gama kamera kao trijažnih instrumenata.

Zahvala

Projekt se izvodi uz financijsku potporu Švedske agencije za nuklearnu sigurnost (SSM) i Švedske agencije za izvanredne situacije (MSB).

LITERATURA

- [1] Miyazaki M, Ohtsuru A, Ishikawa T. An overview of internal dose estimation using whole-body counters in Fukushima Prefecture. *Fukushima J Med Sci* 2013;60/1:95-100.
- [2] Isaksson M, Tondel M, Wälinder R, Rääf C. Modelling the effective dose to a population from fallout after a nuclear power plant accident – a scenario based study. In preparation, 2019.
- [3] Wallström E, Alpsten M, Mattsson S. A gamma camera for measurements of internal contamination after a radiological accident. *J Radiol Prot* 1999;19/2:143-154.
- [4] Medvedec M, Dodig D. Use of uncollimated gamma camera for emergency whole-body counting. In 4th International Conference in Countries with Small and Medium Electricity Grids, 2002, pp. 1–3.
- [5] Nilsson J, Cuplov V, Isaksson M. Identifying key surface parameters for optical photon transport in GEANT4/GATE simulations. *Appl Radiat Isotop* 2015;103:15-24.
- [6] Dantas BM *et al.* A protocol for the calibration of gamma cameras to estimate internal contamination in emergency situations. *Radiat Prot Dosim* 2007;127/1-4:253-257.
- [7] Scuffham JW, Yip-Braidley M, Shutt AL, Hinton PJ, Nisbet A, Bradley DA. Adapting clinical gamma cameras for body monitoring in the event of a large-scale radiological incident. *J Radiol Prot* 2016;36/2:363-381.

LARGE-SCALE MEASUREMENTS OF INTERNAL CONTAMINATION IN CASE OF A NUCLEAR ACCIDENT

Nikola Marković, Martin Hjellström, Mats Isaksson

Department of Radiation Physics at Institute of Clinical Sciences, Sahlgrenska Academy,
University of Gothenburg, Sweden

nikola.markovic@gu.se

Restoration of contaminated areas after a radiological and nuclear accident is an interdisciplinary research project launched with the goal of providing recommendations for decision making in Sweden following a radiological or nuclear (RN) accident. The project is a collaboration between several universities in Sweden, organized by Swedish Civil Contingencies Agency (MSB), aiming to provide a tool for readily comparing the costs and outcomes of different remediation actions. University of Gothenburg takes part in investigation of instruments and measurement methods suitable for estimating internal radioactive contamination.

The experience from Japan after the Fukushima accident shows a need for extensive whole body measurements of the affected population. In the early stage after the accident threshold activities that correspond to action dose levels are quite high and should be easily measured by medical gamma cameras. The main motive for the use of medical gamma cameras as screening devices is their availability, while multiple studies have shown the feasibility of using gamma cameras as an alternative to whole body counters (WBC). Access to whole body counters in Sweden is limited (around 15 units), thus the use of medical gamma cameras (more than 70 units in Sweden) provides better geographical spread and higher throughput. As gamma cameras are used on a daily basis by medical staff there is already trained personnel ready in the case of accident. Measurements of lower activity levels at intermediate and late stages following the accident (e.g. to identify unexpected pathways or sensitive groups) require the use of low-level whole body counters. Sahlgrenska university hospital has two WBC systems housed in a twin low-activity steel chamber. One system consists of two NaI(Tl) detectors in scanning bed geometry and the other of four large plastic scintillation detectors.

Project continues the previous work carried out at the University of Gothenburg on development of computer models of WBC systems. Aim of the project is to develop guidelines for the use of gamma cameras as screening instruments. The most common gamma camera types in Swedish hospitals are identified and adaptation of a specific gamma camera system for whole body measurements is studied. This includes setting up acquisition parameters and development of computer models for the calculation of efficiency curves. Generic models of the most common gamma camera types in Swedish hospitals will be developed and validated by experimental measurements using calibration phantoms and through the comparisons with low-level whole body counters at Sahlgrenska hospital.

ZAŠTITA OD ZRAČENJA U MEDICINI

RADIATION PROTECTION IN MEDICINE

CT KOLONOGRAFIJA – KOLIKO SE ZRAČIMO KOD METODE PROBIRA?

Jelena Popić^{1,2}, Nikola Ivan Leder², Vinko Vidjak^{1,2}

¹Medicinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

²Klinička bolnica Merkur, Zagreb

popic.je@gmail.com

UVOD

Maligne bolesti danas prema svim epidemiološkim pokazateljima predstavljaju značajan javnozdravstveni problem, a istovremeno i medicinski izazov za liječnike svih struka i specijalnosti. Već se niz desetljeća prati kontinuirani porast broja oboljelih i umrlih od malignih bolesti. Stoga su preventivni programi ranog otkrivanja jedan od najvažnijih koraka u unaprijeđenju zdravlja, uspjehu liječenja i smanjenju stope mortaliteta. U Republici Hrvatskoj (RH) se provodi nekoliko nacionalnih programa ranog otkrivanja nekih od najučestalijih malignih bolesti koji su osmišljeni i sastavljeni u skladu s odrednicama Nacionalne strategije prevencije i ranog otkrivanja raka. Navedeni programi dio su sveobuhvatne strategije razvoja zdravstva u razdoblju od 2006. do 2011. godine i danas predstavljaju okosnicu sekundarnih mjera prevencije [1]. Učinkovitost provedbe preventivnih mjera ovisi o stopi odaziva pacijenata preventivnim pregledima, a edukativna i poticajna uloga liječnika, ali i društva u cjelini u tome je iznimno važna. Prema posljednjim objavljenim podacima iz Registra za rak Hrvatskog zavoda za javno zdravstvo iz 2015. godine ukupan broj novooboljelih osoba od malignih bolesti iznosio je 22503. Evidentirano je 11969 muškaraca i 10534 žena, koji čine omjer muškaraca naspram žena 53 %:47 %. Broj umrlih od malignih bolesti iznosio je 14012, od čega je 8030 muškaraca i 5982 žene (m:ž 57:43) [1]. Najčešća sijela kod muškaraca čine pluća (18%), prostata (18%), kolon, rektum, sigma i anus (16 %) te mokraćni mjehur (6 %) [1]. Karcinom dojke najčešći je karcinom u žena (26 %), slijede kolon, rektum, sigma i anus (13 %), pluća (8 %), tijelo maternice (6 %) i štitnjača (6 %) [1].

Značajno mjesto u ranom otkrivanju velikog broja malignih bolesti, osobito karcinoma dojke, pluća i debelog crijeva, zauzimaju upravo radiološke metode pregleda. Stoga su te metode u većini zemalja izabrane za metode probira odnosno tzv. eng “*screening*” metode. U RH radiološka “*screening*” metoda izabrana je za pronalaženje karcinoma dojke. Ciljna skupina u ranom otkrivanju raka dojke su žene u dobi od 50 do 75 godina [2,4]. Metoda izbora za probir je digitalna mamografija. Interval za probir je 2 godine, počevši od 50-te godine života za žene s prosječnim rizikom za razvoj raka dojke [3]. To podrazumijeva žene koje nemaju ranijih bolesti dojke u osobnoj niti u obiteljskoj anamnezi kao niti druge faktore za povećani rizik za oboljenje.

Za rano otkrivanje malignih bolesti debelog crijeva u RH izabran je jednostavni, neinvazivni test na okultno krvarenje. Probir počinje s navršениh 50 godina života u pacijenata s prosječnim rizikom za razvoj maligne bolesti. Interval probira je 2 godine [3]. Nakon pozitivnog testa preporučena daljnja metoda je kolonoskopija zbog svojih dijagnostičko-terapijskih mogućnosti. U nekim razvijenijim zemljama kao metoda probira za ovaj tumor predlaže se relativno novija i prema svim literaturnim podacima osjetljivija [4] metoda probira MSCT odnosno CT kolonografija (virtualna kolonoskopija).

METODA

MSCT kolonografija (virtualna kolonoskopija) je radiološka ionizirajuća pretraga koja je od 2016. uvrštena kao jednako vrijedna metoda za probir neoplazni debelog crijeva [4,5] s

visokom osjetljivošću u detekciji promjena na crijevnoj sluznici [6]. Pretraga se izvodi nakon primjerene pripreme crijeva, identične pripremi za klasičnu kolonoskopiju. Pacijentu se potom insuflira CO₂ u debelo crijevo, a snimanje se učini ležeći na leđima i potrbuške. Cijelo snimanje traje prosječno 10 minuta [4].

Korištenjem naprednih računalnih programa moguća je rekonstrukcija endoluminalnog dijela crijeva i detaljna analiza unutrašnjosti crijeva. Istraživanja su pokazala da je osjetljivost i specifičnost MSCT kolonografije za polipoidne neoplazme promjera većeg od 10 mm usporediva s kolonoskopijom (0,86:0,89), dok je za detekciju promjena promjera iznad 6 mm osjetljivost kolonografije tek neznatno manja u odnosu na kolonoskopiju [7]. Osjetljivost obje metode za detekciju nepolipoidnih promjena je manja od one za detekciju polipoidnih promjena, no metode su međusobno usporedive [7].

Najveća zabrinutost koja je još uvijek razlogom neprihvatanja ove metode odnosi se na mogućnost njenih potencijalno štetnih učinaka. Potencijalno štetni učinci su moguće perforacije crijeva i učinci ionizirajućeg zračenja. Kako bi se procijenila štetnost metode potrebno je ove učinke usporediti s rizikom za iste od alternativnih metoda.

Prema svim radovima učestalost perforacije je pri probirnoj CT kolonografiji 0,005 % - 0,03 % što je značajno manje nego pri kolonoskopiji 0,06-0,19 % [8-10].

Prosječna efektivna doza zračenja pri kolonografiji iznosi do 3 mSv što je ekvivalent godišnjem pozadinskom zračenju i više nego dvostruko je smanjena u usporedbi s dozama za isti pregled prije 10 godina. Danas se u kliničku praksu stoga uvode takozvane “*low dose*” i “*ultra-low-dose*” metode snimanja kod kojih se doza smanjuje na ispod 1 mSv, što je manje nego pri snimanju rtg snimke pluća u jednoj projekciji. U razdoblju od 2015. do danas u KB Merkur smo uveli nove niskodozne protokole snimanja CT kolonografije kako bismo smanjili doze zračenja koje pacijenti primaju prilikom ovih pregleda.

REZULTATI

Od početka uvođenja metode CT kolonografije u kliničku praksu KB Merkur došlo je do značajnog poboljšanja protokola snimanja.

Inicijalno smo koristili protokol za snimanje trbušnih organa na leđima i na trbuhu i prosječne izračunate efektivne doze bile su 31 ± 17 mSv u rasponu od 13–73 mSv, ovisno o antropometrijskim karakteristikama pacijenata. Doze su izračunate na temelju dobijenih vrijednosti ukupnog DLP-a („*dose length product*“) za obje snimane serije u suradnji s medicinskim fizičarom. Potvrđene su naknadno korištenjem Monte Carlo simulacije. Utvrdivši relativno visoke doze, tim je odlučio promijeniti protokol prema dostupnim literaturnim podacima. Tablica 1 prikazuje usporedbu doza zračenja pri pojedinim radiološkim pretragama.

Tablica 1. Usporedba doza kod radioloških pretraga

pretraga	Doza mSv
Rtg pluća	0,1
Rtg abdomena nativno	1
Pasaža crijeva barijem	9
CT abdomena i zdjelice nativno	10
CTC (2 serije)	20
CTC ultra-niskodozni protokol	2
CTC naše inicijalne doze	31 ± 13 mSv (13 - 73)

* Data courtesy of www.radiologyinfo.org (RSNA)

Postoji nekoliko strategija smanjenja doze pri CT snimanjima. Oni se odnose na promjenu električnih parametara snimanja: promjena jakosti struje, napona, zatim promjenu debljine snimanog sloja i konačno promjenu dozvoljene količine šuma na slici uz održanje zadovoljavajuće dijagnostičke kvalitete snimki.

Na 64-slojnom CT uređaju promjena debljine sloja sa 0,5 mm na 1 mm doprinosi smanjenju doze od 20-30 % [6].

Smanjenje jakosti struje također doprinosi smanjenju ukupne doze. Prema radovima Pickardta i dr [10-12] preporuka je za smanjenje 50-75 mA ovisno o građi pacijenta, odnosno 30-300 mA s indeksom šuma 50 za uređaje s modulacijom struje. Za naš uređaj Toshiba Aquilion 64 preporuke navode 10-300 mA sa standardnom devijacijom (SD) 30-50. SD se kod uređaja tvrtke Toshiba odnosi na indeks šuma.

Stoga prvu seriju snimanja na leđima radimo modificiranim niskodoznim protokolom sa SD 30, a drugu seriju snimanja na truhu ultra-niskodoznim protokolom koristeći SD 50. Prema izračunima temeljenim na vrijenostima DLP-a pregleda, ovisno o antropometrijskim parametrima pacijenta srednja vrijednost efektivne doze je za niskodozni protokol $3,5 \pm 1,5$ mSv, odnosno za prosječnog pacijenta (170 cm i 70 kg) 1-7,3 mSv. Za ultraniskodozni protokol srednja vrijednost doze je $1,8 \pm 0,92$ mSv, odnosno za prosječnog pacijenta 0,5-3,5 mSv.

ZAKLJUČAK

MSCT kolonografija je metoda za otkrivanje i za praćenje oboljelih od kolorektalnog karcinoma koja ima bolju osjetljivost u detekciji rekurentnih i metakronih karcinoma u usporedbi s kolonoskopijom [13].

Prednosti MSCT kolonografije su: neinvazivnost, bolja podnošljivost i kraće trajanje u usporedbi s kolonoskopijom, mogućnost višekratne analize snimanog crijeva. Najveća prednost je mogućnost analize dijela crijeva proksimalno od stenozirajuće promjene [7,10]. Osobita je prednost ove metode mogućnost istovremene analize svih ostalih organa abdomena, odnosno "staging" bolesti koji nije moguće učiniti pri kolonoskopiji. Stoga se pacijentu štedi dodatno zračenje koje bi dobio prilikom CT abdomena, a koji je uvjet za daljnje kirurško i/ili onkološko liječenje.

Nedostaci su izloženost ionizirajućem zračenju, nemogućnost uzimanja uzoraka za patohistološku analizu kao i slabija osjetljivost u detekciji nepedikularnih promjena na crijevnoj sluznici, uspoređujući je s kolonoskopijom.

Uvođenjem niskodoznih i ultra-niskodoznih protokola problem doze se značajno smanjuje i pretraga zaista nosi jednak rizik kao i snimanje pluća. Stoga se preporučeni petogodišnji probiri ovom metodom smatraju razumnim izlaganjem ionizirajućem zračenju. Drugim riječima, korist od detekcije maligniteta u ranom stadiju znatno je veća od rizika izlaganju ionizirajućem zračenju [10].

Zato prema našim iskustvima smatramo vrijednim razmisliti o uvođenju ove i osjetljivije i specifičnije metode za detekciju karcinoma kolona kao metode probira s brojnim prednostima u usporedbi sa sada korištenim testom na okultno krvarenje. Predloženi interval probira za CT kolonografiju je 5 godina, dok je za klasičnu kolonoskopiju 10 godina [14,15].

LITERATURA

- [1] Hrvatski zavod za javno zdravstvo, Registar za rak Republike Hrvatske. Incidencija raka u Hrvatskoj 2015., Bilten 40, Zagreb, 2018.
- [2] <https://www.hzjz.hr/sluzba-epidemiologija-prevenција-nezaraznih-bolesti/preventivni-program-za-zdravlje-danas/>

- [3] Antoljak N, Jelavić M, Šupe Parun A. Nacionalni program ranog otkrivanja raka u Hrvatskoj. *Medix* 2013;104/105:86-88.
- [4] <https://radiochirurgiazagreb.com/ct-uredaj-siemens-somatom-definition-edge-virtualna-kolonoskopija/>
- [5] Atkin W, Dadswell E, Wooldrage K et al. Computed tomographic colonography versus colonoscopy for investigation of patients with symptoms suggestive of colorectal cancer (SIGGAR): A multicentre randomized trial. *Lancet* 2013; 381(9873):1194-1202.
- [6] Pickhardt PJ, Choi JR, Hwang I et al. Computed tomographic virtual colonoscopy to screen for colorectal neoplasia in asymptomatic adults. *N Engl J Med* 2003;349:2191-200.
- [7] Nagata K, Endo S, Yoshida H. Accuracy of CT colonography for detection of polypoid and nonpolypoid neoplasia by gastroenterologists and radiologists: A nationwide multicenter study in Japan. *Am J Gastroenterol* 2017;(112):163-171.
- [8] Burling D, Halligan S, Slater A, et al. Potentially adverse events at CT Colonography in symptomatic patients: national survey of the United Kingdom. *Radiology* 2006;464-471.
- [9] Sosna J, Blachar A, Amitai M, et al. Colonic perforation at CT Colonography: assessment of risk in a multicenter large cohort. *Radiology* 2006;239:457-463.
- [10] Pickhardt PJ. Incidence of colonic perforation at CT Colonography: review of existing data and implications for screening of asymptomatic adults. *Radiology* 2006;239:313-316.
- [11] Levine MS, Yee J. History, Evolution, and Current Status of Radiologic Imaging Tests for Colorectal Cancer Screening. *Radiology* 2014;273:160-180.
- [12] Porte F, Uppara M, Malietzis G, Faiz O, Halligan S, Athanasiou T, Burling D. CT colonography for surveillance of patients with colorectal cancer. Systematic review and meta-analysis of diagnostic efficacy. *Eur Radiol* 2017;27:51-60.
- [13] Singh K, Narula AK, Thukral CL, et al. Role of ct colonography in colonic lesions and its correlation with conventional colonoscopic findings. *J Clin Diagn Res* 2015;9:TC14-18.
- [14] Gareen IF, Siewert B, Vanness DJ, Herman B, Johnson CD, Gatsonis C. Patient willingness for repeat screening and preference dot CT colonography and optical colonoscopy in ACRIN6664: the national CT colonography trial. *Patient Prefer Adherence* 2015;9:1043-1051.

CT COLONOGRAPHY- RADIATION EXSPOSURE DUE TO SCREENING METHOD?

Jelena Popić^{1,2}, Nikola Ivan Leder², Vinko Vidjak^{1,2}

¹School of medicine University of Zagreb, Zagreb, Croatia

²University hospital Merkur, Zagreb, Croatia

popic.je@gmail.com

CT colonography (virtual colonography) is a diagnostic imaging (ionizing) method for colon cancer detection. Due to its high sensitivity this method has been chosen in 2016 as equal to colonoscopy for colon cancer detection. The method is performed after proper bowel preparation identical as for classic colonoscopy. For optimal image quality, the colon should be clean and completely distended. Distension can be achieved via a pressure-regulated device with carbon dioxide (preferred) or room air. CT scanning is ideally performed on a multi-detector computed tomography (MDCT) scanner in both supine and prone positions. Image review with the use of two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) displays is strongly advised for optimal evaluation. The whole exam lasts only 10 minutes. Virtual colonoscopy has several advantages over conventional colonoscopy: minimally-invasive procedure, therefore complication rate are lower, takes less time, can visualize colon beyond the obstruction or narrowing, detects extracolonic pathology, so that patient does not need further ionising evaluation for staging. Effective dose is about 3 mSv which is equivalent to annual ambience dose. The dose is 10 times lower than during the same exam 10 years before. Nowadays we use “low dose” and ultra-low-dose” protocols with doses less than 1 mSv. Therefore screening with this method is highly recommended in risk patients and patient radiation dose due to this method is considered reasonable.

KONTROLA KVALITETE ZAŠTITNIH OLOVNIH PREGAČA U KBC-U ZAGREB

Ana Buinac, Katarina Ružić, Vedran Manestar

Klinički bolnički centar Zagreb, Zagreb

ana.buinac@kbc-zagreb.org, kruzic@kbc-zagreb.org, vedran.manestar@kbc-zagreb.org

UVOD

Olovne pregače imaju značajnu ulogu u dijagnostičkoj i intervencijskoj radiologiji. Upotrebljavamo ih kao zaštitno sredstvo kako bi doza zračenja na radnike koji rade s izvorima ionizirajućeg zračenja bila što manja moguća i u skladu s ALARA principom. Intenzivnom upotrebom i nepravilnim rukovanjem može doći do oštećenja zbog kojih one više ne ispunjavaju svoju svrhu te je, ukoliko ne postoji rutinska provjera, moguće da s vremenom znatno doprinesu primljenoj dozi zračenja radnika.

MATERIJALI I METODE

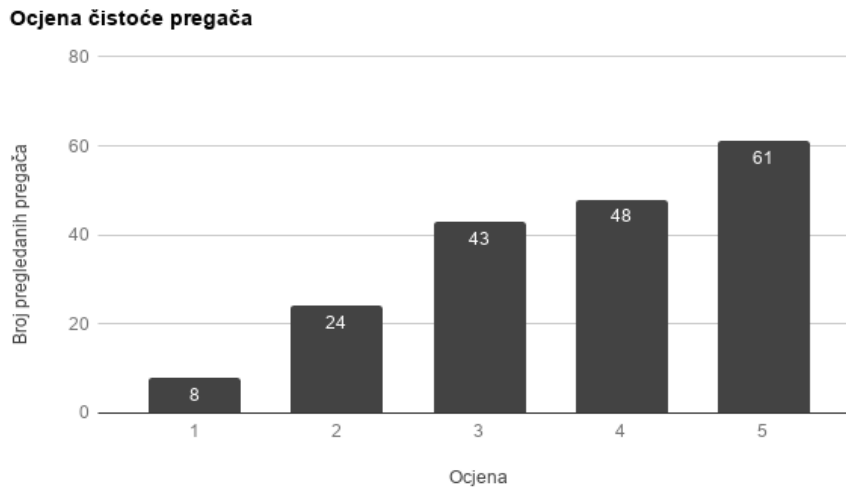
Pregledano je ukupno 184 pregače sa različitih zavoda i odjela. Sve su pregače identificirane prema mjestu kojem pripadaju, namjeni, ekvivalentnoj debljini olova te fotografirane. Svaka je pregledana prvo vizualno radi ocjenjivanja čistoće i kvalitete šava te zatim i taktilno, opipavanjem kompletne površine pregače. Kvantitativna procjena učinjena je na fiksnom rendgenskom uređaju za snimanje GU60A-65, proizvođača SAMSUNG, i pomoću multimetra RTI Piranha 657 kojim smo mjerili vrijednosti transmisije, a zatim i oslikavanjem kako bi se identificirala oštećenja i pukotine unutar pregače koje nisu bile vidljive izvana. Električni uvjeti pod kojima je vršena ekspozicija su držani konstantnima kako bi se rezultati mogli jednostavnije uspoređivati. Ekspozicije su rađene na naponu od 100 kVp, umnošku struje i vremena od 20 mAs uz udaljenost od izvora do detektora 100 cm. Pregledani su svi dijelovi pregače što znači da je svaka pojedina slikana i po nekoliko puta obzirom da je maksimalno otvoreno polje manje od njezine veličine. Procjena oštećenja je napravljena pregledom slika na monitoru uređaja. Kriterij odbacivanja na temelju veličine pukotine koja nosi dodatan rizik temeljen je na procjeni dodatne efektivne doze koju bi primio radnik u godinu dana nošenja oštećene pregače. Uzeta je godišnja donja granica doze od 2 mSv kao 10 % zakonski ograničene vrijednosti od 20 mSv te je pomnožena sa faktorom 1/3 zbog prihvatljivosti veličine pukotine [1], te dodatnim faktorom od 1/3 prema preporuci ICRP1982b [4]. To nam daje konačnu dodatnu dozu od 0.22 mSv. Maksimalne dozvoljene veličine pukotina prema mjestu nastanka dane su u Tablici 1 [1].

Tablica 1. Maksimalne dozvoljene veličine pukotina

Tip pregače	Područje	Ekvivalent olova (mmPb)		
		0,25	0,35	0,5
		AC = 0.22 mSv		
Kriterij odbacivanja		Maksimalna duljina pukotine (cm)		
Dvostruka pregača AP	Cijelo tijelo	13,5	17,5	27
	Gonade	4,4	5,6	8,7
Jednostruka pregača	Cijelo tijelo	5,9	5,6	5,4
	Gonade	1,9	1,8	1,7
	Štitnjača	1,9	1,8	1,8
Dvostruka pregača	PA (10 %)			17
	lat (30 %)			9,8
	LAT (75 %)			6,2

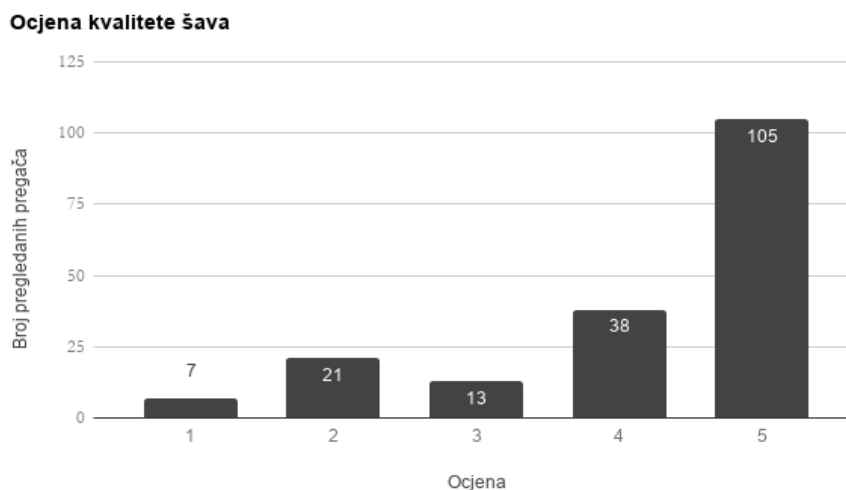
REZULTATI

Rezultati ocjenjivanja čistoće, šava i osjeta pregača pod prstima dani su na ljestvici od 1 do 5 gdje 1 označava izuzetno lošu pregaču, a 5 izvrsno stanje. Prema tom kriteriju, od 184 pregledane pregače, 33,23 % je procijenjeno kao čiste (ocjena 5), dok ih je svega 4,3 % (8 pregača) vrlo prljavo (ocjena 1) (Slika 1).



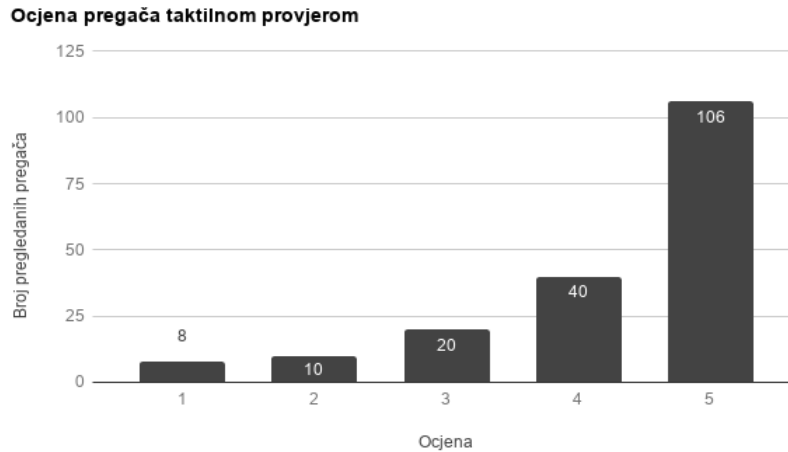
Slika 1. Ocjena čistoće pregača

Šavovi su u 57,1 % pregača jako dobri i čvrsti (ocjena 5) te u 3,8 % potpuno rašiveni i slabi (ocjena 1). Ostatak raspodjele vidi se na Slici 2.



Slika 2. Ocjena kvalitete šava

Na dodir 57,6 % pregača ima ocjenu 5 što znači da su glatke i bez nabora. 4,3 % ih je jako naborano, pregače su otvrdnule od starosti ili im nedostaje olovo (Slika 3) te imaju ocjenu 1. Pregače kojima nedostaje olovo su stavljene van upotrebe.



Slika 3. Ocjena pregača taktilnom provjerom

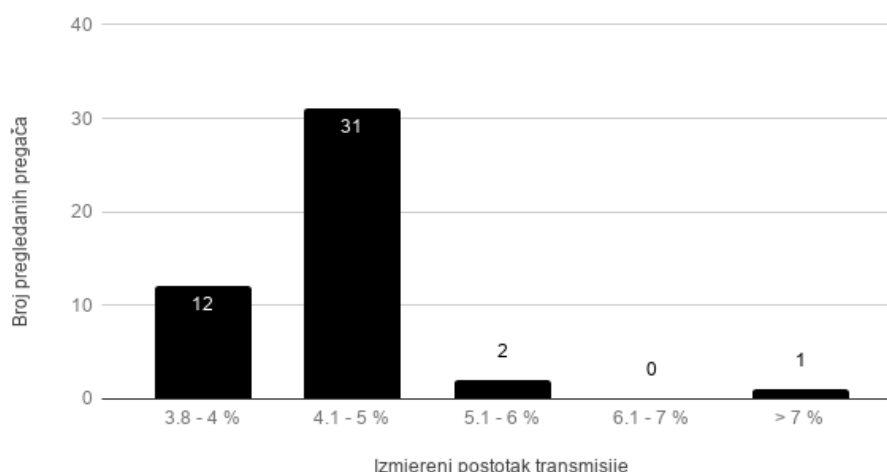
Transmisija je provjeravana upotrebom uređaja za konvencionalnu radiografiju. Pomoću multimetra Piranha 657 izmjerena je kerma u zraku ispod i iznad pregače te izračunat postotak transmisije iz omjera tih dviju vrijednosti. Očekivani postoci transmisije za različite ekvivalentne debljine olova dane su u Tablici 2 [1].

Tablica 2. Očekivani postotak transmisije za različite ekvivalentne debljine olova

d (mmPb)	Transmisija (%)
0,25	19
0,35	10
0,5	3,8

Kod 73,4 % pregača transmisija je unutar propisanih tolerancija. Za preostalih 26,6 % pregača koje imaju transmisiju veću od dozvoljene, odstupanja su jako varirala, od najmanjih 1,8 % do jedne pregače koja je pokazala odstupanje iznad 7 %. Ta konkretna pregača nije na sebi imala nikakvih oznaka pa nije bilo moguće ustvrditi ekvivalent olova. Obzirom da je bila i u vidljivo lošem stanju s nizom oštećenja detektiranih prilikom provjere oslikavanjem, pregača je odbačena i stavljena van upotrebe. Od pregača koje nisu zadovoljile očekivanu vrijednost transmisije, jedna pregača je ekvivalent olova 0,35 mm, jedna ekvivalent 0,25 mm, a 46 ih je ekvivalent olova 0,5 mm. Pregače ekvivalenta olova 0,25 mm i 0,35 mm su odbačene vodeći se ostalim kriterijima (šav, osjet, čistoća i provjera oslikavanja). Te su pregače i inače bile u vrlo lošem stanju te je povećana transmisija bila samo odraz toga. Na Slici 4 dana je raspodjela izmjerenih postotaka transmisije za pregače ekvivalentne debljine olova 0,5 mm. Obzirom da su očekivane vrijednosti transmisije samo smjernice, smatramo da je za pregače u dobrom stanju (ocjene za šav, čistoću i osjet 4 ili 5, bez oštećenja detektiranih oslikavanjem) u redu prihvatiti i vrijednost transmisije do 5 % pogotovo zato što se, u našem slučaju, radi o pregačama koje služe za zaštitu pacijenata (ukupno 33 pregače od 46). Kako je dozvoljena veličina pukotina računata za radnike koji rade s uređajima koji emitiraju ionizirajuće zračenje svaki dan, ova neznatno povišena transmisija ne igra ulogu u povećanom riziku za pacijente pa su te pregače i dalje u upotrebi. Detaljnijom analizom preostalih 13 pregača, ustanovili smo da njih 12 imaju znatnija oštećenja ili pokazuju trošenje olova. Za preostalu pregaču, ustanovljeno je da je njezina ekvivalentna debljina olova 0,5 mm dana pod drugačijim električnim uvjetima (napon od 80 kVp), te je dodatnom provjerom utvrđeno da ima zadovoljavajući postotak transmisije.

Izmjereni postotak transmisije za pregače ekv. debljine 0.5mm



Slika 4. Raspodjela broja pregača ekvivalenta olova 0,5 mm koje pokazuju veću transmisiju u odnosu na očekivanu vrijednost transmisije

Oslikavanjem pregača oštećenja su detektirana u 30,4 % pregača od tzv. vampirskih ugriza (oštećenja polukružnog oblika najčešće uzrokovanih nošenjem zakvačene kemijske olovke na ovratniku), pukotina po šavu pa sve do ozbiljnih pukotina na središnjem dijelu pregače. Samo na osnovu veličine pukotina, odbačeno je 8,7 % pregača (ukupno 16 komada).

ZAKLJUČAK

Prema Pravilniku o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja, zaštitna sredstva se moraju provjeravati najmanje jednom godišnje. Tijekom ovog rada, uspostavljen je protokol prema kojem će se vršiti sve provjere te je napravljena osnova za uvođenje sustava prihvatnog ispitivanja novih pregača. Prvi nam rezultati pokazuju da zatečeno stanje nije bilo loše, a neprikladne pregače su maknute iz upotrebe. Uvođenjem ove redovne provjere napravljen je još jedan korak naprijed u osnaživanju cjelokupnog sustava kontrole kvalitete u KBC-u Zagreb.

LITERATURA

- [1] Stam W, Pillay M. Inspection of lead aprons: a practical rejection model. *Health Physics* 1995;2008/suppl 2:S133- S136.
- [2] Oyar O, Kışlalioğlu A. How protective are the lead aprons we use against ionizing radiation?. *Diagnostic and interventional radiology (Ankara, Turkey)* 2012;18:147-52. 10.4261/1305-3825.DIR.4526-11.1.
- [3] International Commission on Radiological Protection. Protection from ionising radiation from external sources used in medicine. Oxford: Pergamon Press; ICRP Publication 33; Ann ICRP 9(1); 1982a.
- [4] International Commission on Radiological Protection. General principles of monitoring for radiation protection of workers. Oxford: Pergamon Press; ICRP Publication 35; Ann ICRP 9(4); 1982b.
- [5] International Commission on Radiological Protection. Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q), and radiation weighting factor (wR). Oxford: Pergamon Press; ICRP Publication 92; Ann ICRP 33(4); 2003.
- [6] Lambert K, McKeon T. Inspection of lead aprons: criteria of rejection. *Health Phys* 2001;80(Suppl 2):S67–S69.

QUALITY CONTROL OF THE PROTECTIVE LEAD APRONS IN UHC ZAGREB

Ana Buinac, Katarina Ružić, Vedran Manestar
University Hospital Centre Zagreb, Zagreb, Croatia
ana.buinac@kbc-zagreb.org, kruzic@kbc-zagreb.org, vedran.manestar@kbc-zagreb.org

INTRODUCTION

Lead aprons have a significant and valuable role in diagnostic and interventional radiology. They are used to keep occupational exposure of hospital personnel working with ionising radiation as low as reasonably achievable (ALARA). Intensive use and inappropriate handling can lead to defects which make aprons unsuitable for use. Without routine control this could contribute to occupational dose to staff.

AIM

The aim of this study is to establish lead aprons base and to evaluate condition of all lead aprons at UHC Zagreb in order to identify and reject damaged ones and to establish protocol for regular quality control.

METHODS AND MATERIALS

184 aprons from several clinics and departments were examined. All of them were photo-documented and identified regarding their purpose, lead equivalences and clinic they belong. Inspection was done first visually in order to evaluate cleanliness and seam quality, then tactile. Quantitative evaluation included tear length and transmission measurements which were done under the x ray machine using multimeter. Exposure conditions were kept constant.

RESULTS

Out of 184 evaluated aprons, 33.23 % was considered to be clean and only 4.3 % very dirty. Seams are in 57.1 % very good and strong and in 3.8% weak and barely holding. Tactile evaluation showed that 57.6 % aprons meets the required criteria and in 4.3 % we found significant flaws (folds and apron hardening) or that they had been missing lead. Measured transmission through the apron was found to be within prescribed tolerances. For the rest of the aprons, 24.2 %, transmission was found to be higher than expected and the deviation varied from 1.8 % to 7 %. Damages were detected in 30.4% aprons from so-called vampire bites, cracks in the seams, and even serious cracks in the center of the apron. 8.7 % of the aprons were rejected and they are no longer in use.

CONCLUSION

According to Croatian legislative, we are obliged to do quality control of the protective lead garments once a year. During this work, we established a QC protocol for checking protective equipment, but also laid ground for future acceptance testing of every new apron that is bought. First results showed that the current condition of aprons wasn't bad and all that were unsatisfactory were rejected. By implementing this regular checkup, we made another step in empowering the whole quality control system in the University Hospital Centre Zagreb.

IMPLEMENTATION OF PATIENT RADIATION DOSE ASSESSMENT SYSTEM FOR NUCLEAR MEDICINE DIAGNOSTIC PROCEDURES AT THE UNIVERSITY HOSPITAL RIJEKA

Dea Dundara Debeljuh^{1,2}, Svjetlana Grbac-Ivanković^{1,2}, Ivan Pribanić^{1,2}, Neva Giroto^{1,2}, Slaven Jurković^{1,2}

¹University Hospital Rijeka, Rijeka

²Faculty of Medicine, University of Rijeka, Rijeka

dea.dundara.debeljuh@kbc-rijeka.hr

INTRODUCTION

In nuclear medicine radioactive substances are administered to patients to perform either diagnostic or therapeutic procedure. While dose assessment for therapeutic procedures is important for the outcome of the treatment, in nuclear medicine diagnostic procedures dose assessment is necessary for patient radiation risk estimation, decision of an alternative technique instead of nuclear medicine investigation, protocol optimization and comparison of local practice with national and international guidelines.

The dose assessment from radiopharmaceuticals begins with the evaluation of absorbed dose to target organs and tissues that are typically the sum of contributions from various sources including target organ or tissue itself [1]:

$$D_T = \frac{k \sum_s \bar{A}_s \sum_i y_i E_i \phi_i(T \leftarrow S)}{m_T}$$

where k is a proportionality constant, \bar{A}_s is the cumulated activity within the source region, y_i is the number of radiations with energy E_i emitted per nuclear transition, E_i is the energy per radiation for the i_{th} radiation, $\phi_i(T \leftarrow S)$ the fraction of energy emitted in a source region that is absorbed in a target region and m_T the mass of the target region. The absorbed fractions are calculated through the use of anthropomorphic phantoms, mathematical models of the human body for a series of individuals of different size and age (newborn, 1 year, 5 years, 10 years, and 15 years, female and male adults) and the absorbed dose calculation is simplified as:

$$D_T = \sum_s \bar{A}_s S(T \leftarrow S)$$

where the value $S(T \leftarrow S)$ is called S-values and depends on the radiation type, the energy emitted per nuclear transition, the mass of the target organ, and the geometry of the mathematical phantoms representing the adult and children of various ages [2].

Effective dose is a single parameter meant to reflect the relative risk from exposure to ionizing radiation. It reflects the risk of detrimental biologic effects from a nonuniform, partial-body exposure in terms of a whole-body exposure [3]. It combines organ dose with the biological effect of the radioactive emissions and the radiobiological sensitivity of the organ and sums over all organs:

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

where w_T is the relative radiobiological sensitivity of organ or tissue T and w_R is the radiation weighting factor.

In International Commission on Radiological Protection (ICRP) publications the source organ is assumed to be the total body and an approximation is used to calculate S values on the basis of “total body” source. The calculation of absorbed doses is simplified by given radionuclide specific absorbed doses per unit activity administered (mGy/MBq). For radionuclides used in diagnostic nuclear medicine, the effective dose is numerically equal to that of the mean absorbed dose as the radiation weighting factor w_R is taken as unity for these radionuclides.

By Croatian national legislation, following the Directive 2013/59/EURATOM, an information related to patient exposure as a part of specialist medical report is required, in order to achieve better patient radiation protection. Regarding this, Department for medical physics and radiation protection of the University Hospital Rijeka (UH Rijeka) has designed a patient radiation dose assessment system for diagnostic nuclear medicine procedures. By knowing the activity administered and a set of relevant patient specific information given by technologists and nuclear medicine specialists, dose assessment for diagnostic nuclear medicine procedures is carried out based on ICRP publications 53, 80 and 128 [2,4,5].

If hybrid SPECT/CT technique is used, in addition to nuclear medicine dose calculations, computed tomography effective dose estimates are calculated by using computed tomography dose-length product (DLP) values [6].

The uncertainty in the estimate of the mean absorbed dose from nuclear medicine procedure for an organ or tissue in a reference person reflects uncertainties in the cumulated activity and the S value [2]. In order to minimize uncertainties in the activity administered measurement and to achieve accuracy of all physical parameters a comprehensive Quality Control (QC) program is needed. Uncertainty in S depends on differences between the patient and the mathematical model of the human body, so variations in mass of the target organ and variations in the distance between the source and target organs are the mayor contributors of uncertainties.

MATERIALS AND METHODS

At the department of nuclear medicine of UH Rijeka an assorted set of nuclear medicine diagnostic procedures using different radionuclides such as ^{99m}Tc , ^{123}I and ^{131}I is offered to patients, and hybrid imaging SPECT/CT technique is also available. For every patient a form with relevant procedure parameters and patient-specific informations is completed by technologists and nuclear medicine specialists. Required parameters include patient personal data, type of procedure and target organ, applied radiopharmaceutical and administered activity, CT dosimetric values and scanned region if computed tomography is used, and a set of patient-specific informations that are relevant for the choice of the dosimetric model.

Medical physicists at UH Rijeka involved in the field of nuclear medicine have implemented a patient radiation dose estimate system based on above mentioned formalism, in form of worksheets that facilitate the absorbed dose and effective dose estimates on the basis of collected patient and procedure specific data and radionuclide-specific absorbed doses per unit activity administered, given by ICRP publications [2,4,5]. Additionally a set of different worksheets is prepared for peadiatric patients using dose models for different ages (newborn, 1-year, 5-year, 10-year, and 15-year-olds). For computed tomography effective dose estimate system utilizes a generic method based on DLP and conversion coefficient k that depends only on the anatomic region examined [6], so

$$E = DLP \times k.$$

Conversion coefficient for head, neck, chest, abdomen, pelvis and lower extremities are taken from literature [6, 7].

In order to reduce uncertainties in administered activity measurement, periodical quality controls are performed by medical physicists and technologists. QC includes both quality controls of radiopharmaceuticals [8] and periodic quality controls of activity meters at frequencies recommended by national legislation [9]. Parameters of major importance regarding QC of activity meters are, among others, accuracy, linearity and reproducibility [10]. Concerning the accuracy and reproducibility, calibration sealed sources of ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs are used on daily basis, while linearity test is performed on a monthly basis using high activities of the most used radionuclide, which is, in this case, $^{99\text{m}}\text{Tc}$. A comprehensive quality assurance programme for computed tomography is also needed in order to optimize CT procedures and assure accuracy of indicated dose parameters for selected CT scan [10]. CT dose measurements are performed at least once a year using computed tomography dose index (CTDI) measurement set composed of a calibrated solid state detector Black Piranha (RTI Electronics, Sweden) with ionization chamber and CTDI phantoms for head and body.

RESULTS

At the UH Rijeka, patient radiation dose assessment system in nuclear medicine was introduced in February 2018. From February 2018 until January 2019 absorbed and effective dose was estimated for 4143 nuclear medicine diagnostic examinations (Figure 1). At the Department of nuclear medicine of UH Rijeka in one year of experience, 22 different diagnostic procedures were performed, so 22 different calculation worksheets were prepared and introduced into clinical practice. In almost 12 % of nuclear medicine examinations computed tomography imaging was performed as well. Also, 5 % of the total number of patients were paediatric patients, but in this group no computed tomography imaging was performed. Data for nuclear medicine diagnostic examinations for paediatric patients and for combined SPECT and CT examinations in adults are shown in Figure 2. The number of diagnostic nuclear medicine examinations at the Department of nuclear medicine of UH Rijeka per month is presented in Table 1; values shown represent total number of examinations, number of CT scans in hybrid SPECT/CT imaging for adult patients and number of examinations for paediatric patients between February 2018 and January 2019.

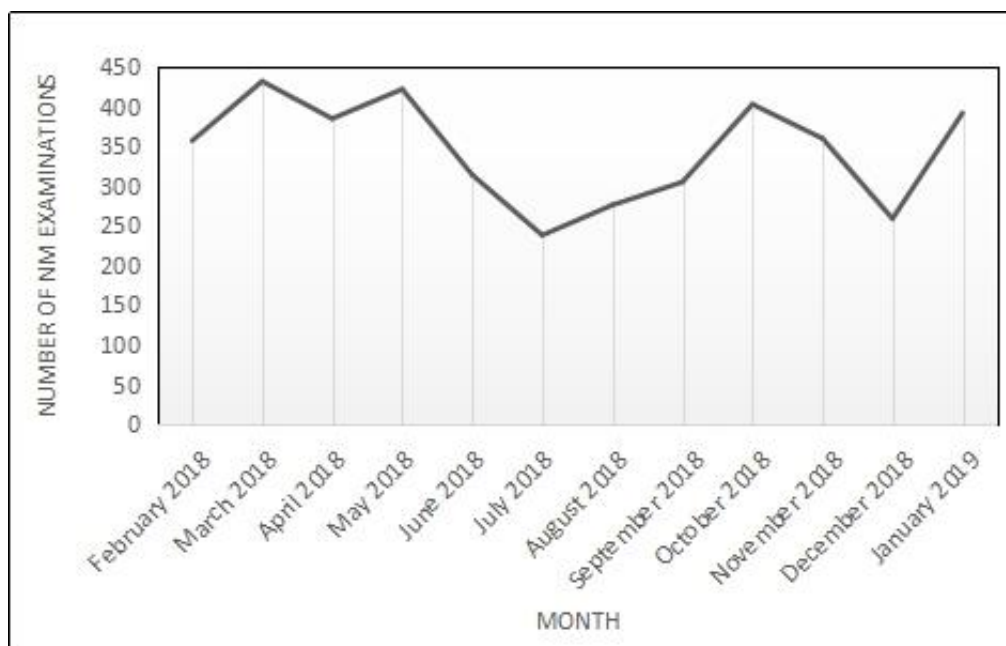


Figure 1. Number of nuclear medicine examinations at UH Rijeka per month, from February 2018 until January 2019.

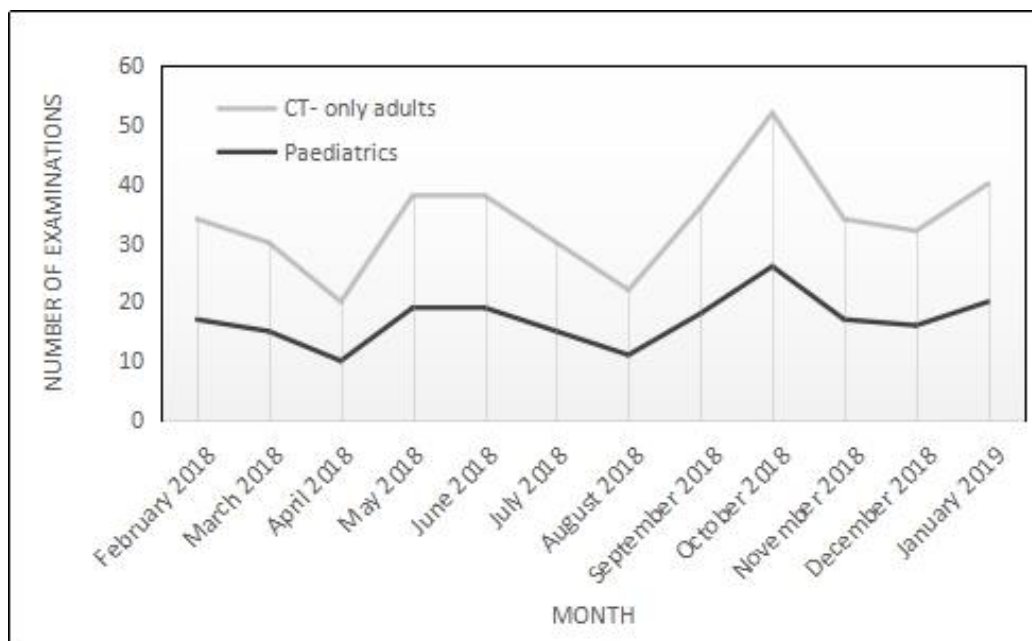


Figure 2. Number of nuclear medicine examinations where CT scan was performed as a part of hybrid SPECT/CT imaging in adult patients and number of nuclear medicine diagnostic examinations for paediatric patients (without CT) at UH Rijeka per month, from February 2018 until January 2019.

As a result of implemented patient radiation dose system, information on estimated absorbed dose to target organs and organs of interest and effective dose calculation became a part of patient medical documentation. A set of relevant parameters for dose assessment calculation are also reported so they can be used for future alternative assessment methods.

Table 1. One year of experience: number of nuclear medicine diagnostic examinations at UH Rijeka from February 2018 until January 2019 for which dose information is available in patient medical documentation.

	Feb 2018	Mar 2018	Apr 2018	May 2018	June 2018	July 2018	Aug 2018	Sept 2018	Oct 2018	Nov 2018	Dec 2018	TOT
Number of NM examinations	357	432	385	422	314	238	276	305	403	360	259	4143
Number of paediatrics examinations	17	15	10	19	19	15	11	18	26	17	16	203
Number of CT scans (adults)	45	61	48	38	37	34	36	31	45	44	10	483

CONCLUSION

In diagnostic nuclear medicine awareness of the radiological risk related to the use of radiopharmaceuticals is of extreme importance, which is the reason that both national and international legislation require that relevant information about parameters related to the patient exposure to ionizing radiation shall be a part of the medical documentation in order to achieve better patient protection. For that reason, the Department for medical physics and radiation protection of the UH Rijeka has developed and implemented a patient radiation dose

assessment system, that allows absorbed dose to target organs and organs of interest and effective dose information to be available for every patient that underwent nuclear medicine diagnostic procedures. A set of relevant parameters for dose assessment calculation is also reported so they can be used for future alternative assessment methods.

Our one-year experience shows improvement in understanding radiation risks and quality of services provided, standardization of activity measurement and finally a good collaboration between different professionals involved in nuclear medicine diagnostics that is of extreme importance for the successful outcome of nuclear medicine procedures.

Introduction of patient radiation dose assessment system at UH Rijeka was also an input for setting local dose reference levels (DRL) for nuclear medicine diagnostic procedures and starting a project of national DRL review that will be in the scope of our future research.

REFERENCES

- [1] Stabin MG, Bertrand Brill A. State of the art in nuclear medicine dose assessment. *Semin Nucl Med* 2008;38: 308-320.
- [2] International Commission on Radiological Protection. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances. ICRP Publication 128; 2014.
- [3] Jacobi W. The concept of effective dose: a proposal for the combination of organ doses. *Radiat Environ Biophys* 1975;12:101–109 2.
- [4] International Commission on Radiological Protection. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. ICRP Publication 53; *Annals of the ICRP*; Volume 18 No. 1-4; 1987.
- [5] International Commission on Radiological Protection. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. Addendum to ICRP 53. ICRP Publication 80; *Annals of the ICRP*; Volume 28 No. 3; 1998.
- [6] Christner JA, Kofler JM, McCollough CH. Estimating Effective Dose for CT Using Dose–Length Product Compared With Using Organ Doses: Consequences of Adopting International Commission on Radiological Protection Publication 103 or Dual-Energy Scanning. *American Journal of Roentgenology* 2010; 194:881-889.
- [7] Saltybaeva N, Jafari ME, Hupfer M, Kalender WA. Estimates of Effective Dose for CT Scans of the Lower Extremities. *Radiology* 2014; Volume 273: Number 1.
- [8] International Atomic Energy Agency (IAEA). Quality Assurance for Radioactivity Measurement in Nuclear Medicine. Technical Reports Series No. 454. Vienna: IAEA; 2006.
- [9] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja. NN 53/2018.
- [10] European Commission. Radiation Protection No. 162: Criteria for Acceptability of Medical Radiological Equipment used in Diagnostic Radiology, Nuclear Medicine and Radiotherapy. Luxembourg: EC; 2012.

IMPLEMENTATION OF PATIENT RADIATION DOSE ASSESSMENT SYSTEM FOR NUCLEAR MEDICINE DIAGNOSTIC PROCEDURES AT THE UNIVERSITY HOSPITAL RIJEKA

*Dea Dundara Debeljuh^{1,2}, Svjetlana Grbac-Ivanković^{1,2}, Ivan Pribanić^{1,2}, Neva Giroto^{1,2}
Slaven Jurković^{1,2}*

¹University Hospital Rijeka, Rijeka, Croatia

²Faculty of Medicine, University of Rijeka, Rijeka, Croatia

dea.dundara.debeljuh@kbc-rijeka.hr

In nuclear medicine radioactive substances are administered to patients to perform either diagnostic or therapeutic procedure. While dose assessment for therapeutic procedures is important for the outcome of the treatment, in nuclear medicine diagnostic procedures dose assessment is necessary for patient radiation risk estimation, decision of an alternative technique instead of nuclear medicine investigation, protocol optimization and comparison of local practice with national and international guidelines. By Croatian national legislation, following the Directive 2013/59/EURATOM, an information related to patient exposure as a part of specialist medical report is required, in order to achieve better patient radiation protection. Regarding this, the Department for medical physics and radiation protection of the University Hospital Rijeka (UH Rijeka) has designed a patient radiation dose assessment system for diagnostic nuclear medicine procedures based on International Commission on Radiological Protection (ICRP) publications 53, 80 and 128 that was introduced in February 2018. If hybrid SPECT/CT technique is used, in addition to nuclear medicine dose calculations, computed tomography effective dose estimates are calculated by using computed tomography dose-length product (DLP) values.

For every patient a form with relevant procedure parameters and patient-specific information is completed by technologists and nuclear medicine specialists. Required parameters include patient personal data, type of procedure and target organ, applied radiopharmaceutical and administered activity, CT dosimetric values and scanned region if computed tomography is used, and a set of patient-specific information that are relevant for the choice of the dosimetric model proposed in ICRP publications. Collected patient and procedure specific data are used by medical physicist to estimate absorbed dose to organs and effective dose.

In order to minimize uncertainties in the activity administered measurement and to achieve accuracy of all physical parameters a comprehensive Quality Control (QC) program is needed.

As a result of implemented patient radiation dose estimates system, information on absorbed dose to target organs and organs of interest from applied radionuclide and effective dose calculation are available in patient medical documentation. A set of relevant parameters for dose assessment calculation is also reported so they can be used for future alternative assessment methods.

Our one-year experience shows improvement in understanding radiation risks and quality of services provided, standardization of activity measurement and finally a good collaboration between different professionals involved in nuclear medicine diagnostics that is of extreme importance for the successful outcome of nuclear medicine procedures.

UVJETI OČITAVANJA RADIOLOŠKIH SNIMKI U ČETIRI ZDRAVSTVENE USTANOVE

Ivana Kralik¹, Hrvoje Vavro¹, Jelena Popić^{2,3}, Katarina Ružić⁴, Ana Buinac⁴, Renata Vrtarić⁵, Ivana Bjelobrk⁵, Damir Štimac⁵, Dario Posedel⁶, Dario Faj^{7,8}

¹Klinička bolnica Dubrava, Zagreb

²Klinička bolnica Merkur, Zagreb

³Medicinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

⁴Klinički bolnički centar Zagreb, Zagreb

⁵Klinički bolnički centar Osijek, Osijek

⁶QA MED, Osijek

⁷Medicinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek

⁸Fakultet za dentalnu medicinu i zdravstvo Osijek, Osijek

ikralik@kdb.hr

UVOD

Monitori koji se koriste u svrhu očitavanja radioloških snimki, kao i ambijentalno osvjetljenje u prostorijama u kojima se koriste ti monitori moraju udovoljavati minimalnim propisanim zahtjevima [1]. Nadalje, preporučene karakteristike dijagnostičkih monitora mogu se naći u međunarodnim preporukama danim od strane različitih društava i institucija [2–5].

Kao i izvore ionizirajućeg zračenja, korisnici monitora koji se koriste u svrhu očitavanja radioloških snimki moraju osigurati redovitu provjeru kvalitete tih monitora. Nadalje, zbog činjenice da monitori tijekom vremena degradiraju, odnosno mijenjaju svoja svojstva, potrebno ih je redovito kalibrirati.

Cilj ovoga rada je prikazati rezultate ispitivanja uvjeta očitavanja radioloških snimki provedenog u četiri zdravstvene ustanove.

MATERIJALI I METODE

U cilju utvrđivanja stanja vezano uz uvjete očitavanja radioloških snimki u četiri zdravstvene ustanove u Republici Hrvatskoj (dalje u tekstu: Ustanove), tijekom rujna i listopada 2018. godine provedeno je ispitivanje 114 monitora (što čini oko 90 % svih monitora koji se u Ustanovama koriste u svrhu očitavanja radioloških snimki) koji se koriste uz 67 radnih stanica. Parametri koji su ispitivani dani su u Tablici 1. U svrhu ispitivanja udovoljavanja navedenih parametara propisanim uvjetima te preporukama, korišteni su fotometar i lux-metar proizvođača Unfors te AAPM TG-18 uzorci [6].

Tablica 1. Ispitivani parametri

Parametar	Kriterij	Izvor
Veličina monitora	Minimalno $\approx 17''$ Preporučeno $\approx 20''$	RCR [4]
Matrica piksela	Minimalno $\geq 1280 \times 1024$ Preporučeno $\geq 1500 \times 2000$	RCR [4]
	$\geq 2048 \times 2560$	ACR-AAPM-SIIM [2]
Udaljenost središta piksela	$< 0,21\text{mm}$	ACR-AAPM-SIIM [2]
Najveća osvjetljenost monitora	Minimalno $\geq 170 \text{ cd/m}^2$ Preporučeno $\geq 500 \text{ cd/m}^2$	RCR [4]
	$\geq 350 \text{ cd/m}^2$	ACR-AAPM-SIIM [2]
	$\geq 450 \text{ cd/m}^2$	ACR-AAPM-SIIM MAMMO [3]

Parametar	Kriterij	Izvor
Omjer najveće i najmanje osvijetljenosti monitora	Minimalno $\geq 250:1$	RCR [4]
	Preporučeno $\geq 500:1$ $\geq 250:1$	ACR-AAPM-SIIM [2]
Jednoličnost osvijetljenosti monitora	Odstupanje $< 30\%$	Pravilnik 53/18 [1]
Razlika osvijetljenosti uparenih monitora	Odstupanje $< 5\%$ (za očitavanje mamografskih snimki)	IAEA [5]
Opća provjera koristeći u zorak TG18-QC	Nema artefakata. Nijanse sivila razlučive. Stupci vizualno kontinuiranog prijelaza od tamne prema svijetloj. Linije ravne, a uzorak centriran na monitoru. Vidljiva slova (QUALITY CONT). 5 % kontrast vidljiv na tamnom (0-5 %) polju. 5 % kontrast vidljiv na svijetlom (95-100 %) polju. Vidljivi i razlučivi vertikalni i horizontalni kontrastni uzorci (Nyquist) u sva četiri kuta monitora i centru. Mjera 50 mm i slike na uparenim monitorima vizualno identične. Jednoličnost osvijetljenosti monitora	Pravilnik 53/18 [1]
Provjera kalibracijske krivulje	$\pm 10\%$ GSDF (<i>Grayscale Standard Display Function</i>)	Pravilnik 53/18 [1] RCR [4] ACR-AAPM-SIIM [2] ACR-AAPM-SIIM MAMMO [3] IAEA [5]
Ambijentalno osvijetljenje	CR/DR radne stanice za očitavanje 2 - 10 lx Mamografske radne stanice za očitavanje < 15 lx CT/MR/NM radne stanice za očitavanje 15 - 60 lx Hitna medicina 150 - 300 lx Kliničke stanice za gledanje 200 - 250 lx	Pravilnik 53/18 [1]

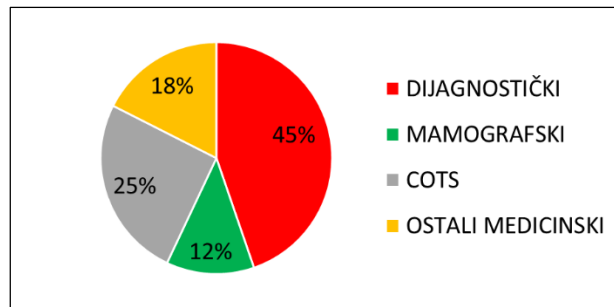
Za potrebe ovog rada, monitori koji se u Ustanovama koriste za očitavanja radioloških snimki podijeljeni su u četiri skupine:

1. Dijagnostički monitori - monitori proizvedeni s namjerom uporabe u svrhu očitavanja snimki,
2. Mamografski monitori - dijagnostički monitori namijenjeni očitavanju mamografskih snimki,
3. COTS (od engl. *commercial off-the-shelf*) monitori namijenjeni uporabi u različite svrhe pa tako i u kućanstvu, a dostupni su svima u trgovačkim centrima te
4. Ostali medicinski monitori - monitori koji su zaostali nakon rashoda CT ili MR uređaja uz koje su bili primarno korišteni kao akvizicijski monitori, tj. kao monitori koje radiološki tehnolozi koriste samo u svrhu utvrđivanja prihvatljivosti snimke po provedenom snimanju pacijenta.

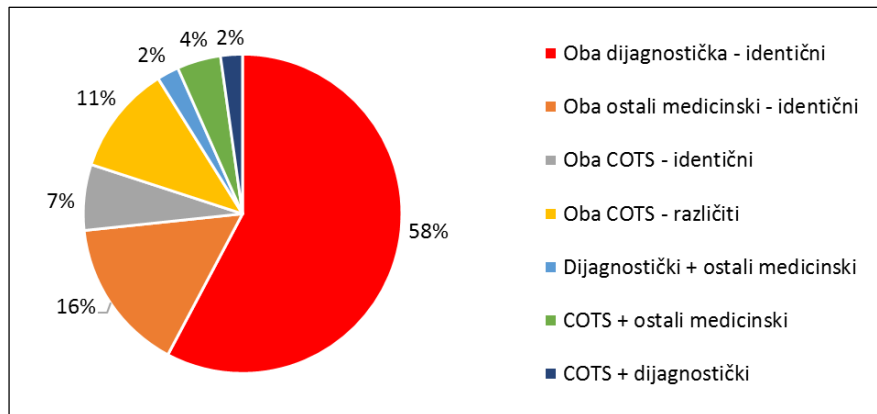
REZULTATI

Zastupljenost pojedine vrste monitora u Ustanovama, a koji se koriste u svrhu očitavanja radioloških snimki prikazana je na Slici 1 iz koje je vidljivo da više od trećine monitora koji su radiolozima te specijalizantima radiologije na raspolaganju čine COTS i ostali medicinski monitori.

Zbog nedostatka odgovarajućih monitora, u Ustanovama se u paru koriste monitori različitih vrsta što je prikazano na Slici 2. Ukupno se u Ustanovama koristi 90 uparenih monitora (45 parova).

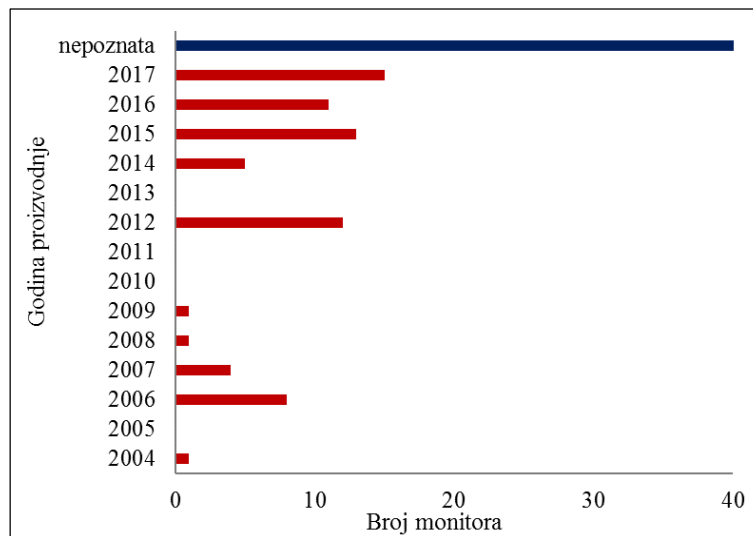


Slika 1. Zastupljenost pojedine vrste monitora



Slika 2. Zastupljenost pojedinog načina uparivanja monitora

Oko 39 % monitora koji se u Ustanovama koriste za očitavanje radioloških snimki mlađi su od 5 godina (Slika 3) dok je oko 24 % monitora starije od 5 godina. Najstariji monitori proizvedeni su 2004. godine (14 godina starosti u trenutku ispitivanja). Godinu proizvodnje nije bilo moguće utvrditi za oko 37 % monitora.



Slika 3. Broj monitora ovisno o godini proizvodnje

U Ustanovama se koriste monitori čije veličine se kreću od 18,1" do 32". Minimalnim RCR zahtjevima vezano uz veličinu monitora udovoljavaju svi ispitani monitori, dok preporučenim RCR zahtjevima udovoljava njih 92 %. ACR-AAPM-SIIM preporukama udovoljava 91 % monitora. Broj i udio pojedine vrste monitora koji udovoljavaju navedenim preporukama dan je u Tablici 3.

Tablica 3. Broj i udio monitora koji udovoljavaju preporučenim kriterijima za veličinu monitora

Vrsta	RCR-MIN 17"		RCR- PREPORUČENO 20"		ACR-AAPM- SIIM 21"	
	Broj	%	Broj	%	Broj	%
DIJAGNOSTIČKI	51	100	51	100	51	100
MAMOGRAFSKI	14	100	13	93	13	93
COTS	29	100	28	97	27	93
OSTALI MEDICINSKI	20	100	13	65	13	65
ukupno:	114	100	105	92	104	91

Utvrđene udaljenosti središta piksela (tzv. *pixel pitch*) za monitore koji se u Ustanovama koriste za očitavanje radioloških snimki kreću se od 0,165 do 0,282 mm. Od svih ispitanih monitora samo je u slučaju 23 monitora (20 %) utvrđeno da udovoljavaju ACR-AAPM-SIIM preporuci (Tablica 4). Za 10 monitora (9 %) nije bilo moguće utvrditi udaljenost središta piksela.

Tablica 4. Broj i udio pojedine vrste monitora koji udovoljavaju preporučenom kriteriju za udaljenost središta piksela

Vrsta	ACR-AAPM-SIIM < 0,21 mm	
	Broj	%
DIJAGNOSTIČKI	10	20
MAMOGRAFSKI	10	71
COTS	3	10
OSTALI MEDICINSKI	0	0
ukupno:	23	20

Najveća osvjetljenost ispitanih monitora kreće se od 63 cd/m² do 744 cd/m². Minimalnim zahtjevima danim u RCR preporukama udovoljava 62 % ispitanih monitora, a preporučenim svega 14 %, dok ACR-AAPM-SIIM preporukama udovoljava 40 % ispitanih monitora. ACR-AAPM-SIIM MAMMO preporukama udovoljava 64 % monitora koji se koriste za očitavanje mamografskih snimki, odnosno 9 % svih ispitanih monitora. Za 1 monitor (1 %) nije bilo moguće utvrditi najveću osvjetljenost monitora (u vremenu u kojem je provedeno ispitivanje monitor je bio u kvaru). Broj i udio pojedine vrste monitora koji udovoljavaju navedenim preporukama dan je u Tablici 5.

Tablica 5. Broj i udio monitora koji udovoljavaju pojedinim preporukama vezanim uz najveću osvjetljenost monitora

Vrsta	RCR-MIN ≥ 170 cd/m ²		RCR- PREPORUČENO ≥ 500 cd/m ²		ACR-AAPM- SIIM ≥ 350 cd/m ²		ACR-AAPM- SIIM MAMMO ≥ 450 cd/m ²	
	Broj	%	Broj	%	Broj	%	Broj	%
DIJAGNOSTIČKI	35	69	3	6	25	49	2	4
MAMOGRAFSKI	14	100	6	43	13	93	9	64
COTS	14	48	0	0	1	3	0	0
OSTALI MEDICINSKI	8	40	7	35	7	35	6	30
ukupno:	71	62	16	14	46	40	17	15

Omjer najveće i najmanje osvijetljenosti monitora kreće se od 120:1 do 2457:1. Minimalnim RCR i ACR-AAPM-SIIM kriterijima za omjer najveće i najmanje osvijetljenosti udovoljava 92 % monitora, dok RCR preporučenim kriterijima udovoljava njih 73 %. Za 1 monitor (1 %) nije bilo moguće utvrditi omjer najveće i najmanje osvijetljenosti monitora (u vremenu u kojem je provedeno ispitivanje monitor je bio u kvaru). Broj i udio pojedine vrste monitora koji udovoljavaju navedenim preporukama dan je u Tablici 6.

Tablica 6. Broj i udio pojedine vrste monitora koji udovoljavaju preporučenim kriterijima za omjer najveće i najmanje osvijetljenosti

Vrsta	RCR-MIN ≥ 250:1		RCR- PREPORUČENO ≥ 500:1		ACR-AAPM-SIIM ≥ 250:1	
	Broj	%	Broj	%	Broj	%
DIJAGNOSTIČKI	50	98	35	69	50	98
MAMOGRAFSKI	14	100	14	100	14	100
COTS	23	79	21	72	28	97
OSTALI MEDICINSKI	18	90	13	65	18	90
ukupno:	105	92	83	73	105	92

Odstupanje osvijetljenosti rubnih dijelova od središnjeg dijela ispitanih monitora kreće se od 2 % do 92,5 %. Propisanom i preporučenom zahtjevu vezanom uz jednoličnost osvijetljenosti monitora udovoljava 94 % ispitanih monitora. Za 1 monitor (1 %) nije bilo moguće ispitati jednoličnost osvijetljenosti monitora (u vremenu u kojem je provedeno ispitivanje monitor je bio u kvaru). Broj i udio pojedine vrste monitora koji udovoljavaju navedenom propisanom i preporučenom zahtjevu dan je u tablici 8.

Tablica 7. Broj i udio monitora koji udovoljavaju propisanom i preporučenom zahtjevu za jednoličnost osvijetljenosti monitora koja mora biti manja od 30 % [1]

Vrsta	Broj	%
DIJAGNOSTIČKI	50	98
MAMOGRAFSKI	14	100
COTS	25	86
OSTALI MEDICINSKI	18	90
ukupno:	107	94

Razlike osvijetljenosti uparenih monitora koji se koriste u Ustanovama kreću se od 4 % do 116 %. Samo 43 % parova monitora koji koriste za očitavanje mamografskih snimki udovoljava zahtjevu da u slučaju mamografskih dijagnostičkih monitora razlika osvijetljenosti uparenih monitora ne smije biti veća od 5 % [5] (Tablica 8).

Tablica 8. Broj i udio parova monitora koji udovoljavaju preporučenom zahtjevu za razliku osvijetljenosti uparenih monitora koji se koriste za očitavanje mamografskih snimki, a koja ne smije biti veća od 5 % [5]

Vrsta	Broj parova	%
DIJAGNOSTIČKI	12	24
MAMOGRAFSKI	6	43
COTS	2	7
OSTALI MEDICINSKI	2	10
ukupno:	22	19

Opću provjeru koristeći TG18-QC uzorak prolazi ukupno 70 % monitora koji se u Ustanovama koriste za očitavanje snimki. Za 1 monitor (1%) nije bilo moguće provesti ovu provjeru (u vremenu u kojem je provedeno ispitivanje monitor je bio u kvaru). Broj i udio pojedine vrste monitora koji prolaze ovu provjeru dan je u Tablici 9.

Tablica 9. Broj i udio pojedine vrste monitora koji prolaze opću provjeru koristeći TG18-QC uzorak

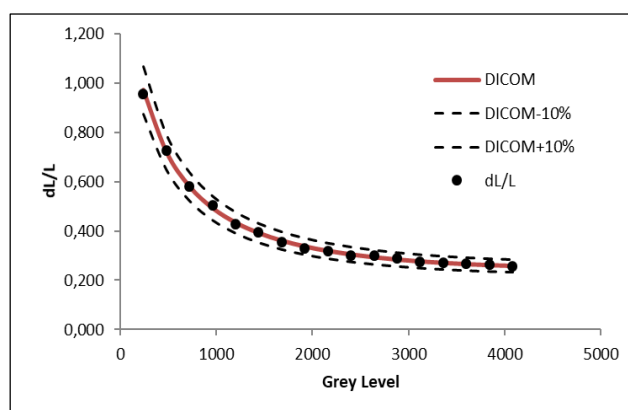
Vrsta	Broj	%
DIJAGNOSTIČKI	45	88
MAMOGRAFSKI	12	86
COTS	8	28
OSTALI MEDICINSKI	15	75
ukupno:	80	70

Svega 54 % ispitanih monitora udovoljava propisanom kriteriju vezanom uz kalibracijsku krivulju (najveće dozvoljeno odstupanje od $\pm 10\%$ od GSDF krivulje) (Tablica 10.). Za 1 monitor (1 %) nije bilo moguće ispitati udovoljavanje ovom kriteriju (u vremenu u kojem je provedeno ispitivanje monitor je bio u kvaru).

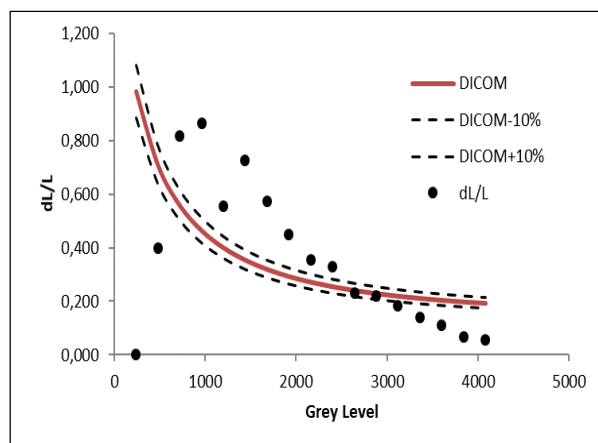
Tablica 10. Broj i udio pojedine vrste monitora koji udovoljavaju propisanom i preporučenom kriteriju za kalibracijsku krivulju [1-5]

Vrsta	Broj	%
DIJAGNOSTIČKI	41	80
MAMOGRAFSKI	10	71
COTS	0	0
OSTALI MEDICINSKI	7	35
ukupno:	58	51

Važno je napomenuti da niti jedan monitor koji pripada grupi COTS monitora (a koji čine 25 % svih monitora) ne udovoljava navedenom zahtjevu. Primjer dobro kalibriranog monitora dan je na Slici 4 dok je na Slici 5 dan primjer loše kalibriranog monitora. Oba monitora se u Ustanovama koriste za očitavanje radioloških snimki. Procjenjuje se da je rekalibrirati moguće 32 % ispitanih monitora, a u slučaju 12 % monitora nije bilo moguće utvrditi podržavaju li DICOM rekalibraciju. Važno je napomenuti da niti jedan monitor koji pripada grupi COTS monitora nije moguće rekalibrirati.



Slika 4. Primjer dobro kalibriranog monitora. Izmjerene vrijednosti (kružići) nalaze se duž GSDF krivulje (neprekinuta crvena linija), odnosno unutar isprekidanih linija kojima je označeno područje dozvoljenog odstupanja od $\pm 10\%$ od GSDF krivulje.



Slika 5. Primjer loše kalibriranog monitora. Izmjerene vrijednosti (kružići) izlaze iz područja omeđenog isprekidanim linijama kojima je označeno područje dozvoljenog odstupanja od $\pm 10\%$ od GSDF krivulje (neprekinuta crvena linija).

Ukupno odabranim minimalnim kriterijima danim u RCR preporukama udovoljava 46 % ispitanih monitora, preporučenim RCR kriterijima udovoljava svega 9 %, a ACR-AAPM-SIIM preporukama njih 14 %. ACR-AAPM-SIIM MAMMO preporukama udovoljava 5 %, a uz dodatni IAEA kriterij vezano uz razliku osvjetljenosti uparenih monitora koji se koriste za očitavanje mamografskih snimki udovoljava 4 % ispitanih monitora. Odabranim propisanim minimalnim kriterijima udovoljava 51 % ispitanih monitora. Broj i udio pojedine vrste monitora koji udovoljavaju svim odabranim propisanim i preporučenim kriterijima dan je u Tablici 11.

Tablica 11. Broj i udio pojedine vrste monitora koji udovoljavaju svim odabranim propisanim i preporučenim kriterijima

Vrsta	RCR-MIN		RCR-PREPORUČENO		ACR-AAPM-SIIM		ACR-AAPM-SIIM MAMMO		ACR-AAPM-SIIM MAMMO + IAEA		PRAVILNI K 53/18	
	Broj	%	Broj	%	Broj	%	Broj	%	Broj	%	Broj	%
DIJAGNOSTIČKI	38	75	0	0	9	18	0	0	0	0	41	80
MAMOGRAFSKI	8	57	4	29	7	50	6	43	4	29	10	71
COTS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OSTALI MEDICINSKI	7	35	6	30	0	0	0	0	0	0	7	35
ukupno:	53	46	10	9	16	14	6	5	4	4	58	51

Ambijentalno osvjetljenje u prostorijama u kojima se u Ustanovama koriste monitori za očitavanje snimki kreće se od nekoliko luxa (lx) do nekoliko stotina luxa, ovisno o vrsti izvora svjetlosti. U prostorijama s prozorima ambijentalno osvjetljenje uvelike ovisi o godišnjem dobu, vremenskim prilikama i dobu dana obzirom da postojeća zaštita na prozorima nije adekvatna u smislu osiguravanja odgovarajućih uvjeta za očitavanje radioloških snimki. U prostorijama bez prozora ambijentalno osvjetljenje ovisi o broju upaljenih svjetala koja su nerijetko izvedena ili linijski ili točkasto. Dodatno, na ambijentalno osvjetljenje u tim prostorijama dodatno utječe i svjetlo iz hodnika.

ZAKLJUČAK

Uvjetima očitavanja radioloških snimki potrebno je posvetiti više pažnje počevši od projektiranja prostorija u kojima će se radiološke snimke očitavati i nabavke dijagnostičkih monitora, kao i odgovarajućih programskih rješenja za prikaz radioloških snimki. Zdravstvene ustanove trebale bi programom osiguranja obuhvatiti i monitore koji se koriste za očitavanje radioloških snimki te bi ih trebalo redovito recalibrirati obzirom da tijekom vremena degradiraju, odnosno mijenjaju svoja svojstva. U navedene postupke trebao bi biti uključen i medicinski fizičar.

Nove preporuke prepoznaju postojanje COTS monitora u dijagnostičkoj radiologiji kao stvarnost [7]. Razlika u cijeni, ali i razvoj COTS monitora to dopušta. Međutim, i dalje COTS monitori moraju udovoljavati propisanim i preporučenim kriterijima te je pri nabavci ovakvih monitora potrebno savjetovati se sa stručnjakom jer je mogućnost pogrešne kupovine monitora koji nisu prikladni za primarnu dijagnostiku velika [7]. Ovo istraživanje je to i potvrdilo pokazavši da niti jedan COTS monitor ne udovoljava propisanim i međunarodnim kriterijima.

Zahvala

Rad je izrađen uz financijsku potporu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku putem projekta ZUP-2018-15.

LITERATURA

- [1] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja. Narodne novine broj 53/2018. URL: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_06_53_1062.html (09. 03. 2019.)
- [2] American College of Radiology. ACR-AAPM-SIIM Technical standard for electronic practice of medical imaging (rev 2017). 2017. Available from: <https://www.acr.org/-/media/ACR/Files/Practice-Parameters/Elec-Practice-MedImag.pdf> (09. 03. 2019.)
- [3] American College of Radiology. ACR-AAPM-SIIM Practice parameter for determinants of image quality in digital mammography (rev 2017). 2017. URL: <https://www.acr.org/-/media/ACR/Files/Practice-Parameters/Dig-Mamo.pdf> (09. 03. 2019.)
- [4] Royal College of Radiologists. Picture archiving and communication systems (PACS) and guidelines on diagnostic display devices (Second edition). 2012. URL: <https://docplayer.net/7151154-Picture-archiving-and-communication-systems-pacs-and-guidelines-on-diagnostic-display-devices.html> (09. 03. 2019.)
- [5] International Atomic Energy. IAEA Human Health Series No. 17: Quality Assurance Programme for Digital Mammography. Vienna: International Atomic Energy Agency. 2011. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1482_web.pdf (09. 03. 2019.)
- [6] Samei E, Badano A, Chakraborty D, Compton K, Cornelius C, Corrigan K, et al. Assessment of display performance for medical imaging systems: executive summary of AAPM TG18 report. Medical physics. 2005;32(4):1205–25. (09. 03. 2019.)
- [7] Royal College of Radiologists. Picture archiving and communication systems (PACS) and guidelines on diagnostic display devices Third edition. 2019. URL: https://www.rcr.ac.uk/system/files/publication/field_publication_files/bfcr192_pacs-diagnostic-display.pdf (09. 03. 2019.)

DIAGNOSTIC IMAGES VIEWING CONDITIONS IN FOUR HEALTHCARE INSTITUTIONS

Ivana Kralik¹, Hrvoje Vavro¹, Jelena Popić^{2,3}, Katarina Ružić⁴, Ana Buinac⁴, Renata Vrtarić⁵, Ivana Bjelobrk⁵, Damir Štimac⁵, Dario Posedel⁶, Dario Faj^{7,8}

¹University hospital Dubrava, Zagreb, Croatia

²University hospital Merkur, Zagreb, Croatia

³Faculty of Medicine, University of Zagreb, Zagreb, Croatia

⁴University hospital centre Zagreb, Zagreb, Croatia

⁵ University hospital centre Osijek, Osijek

⁶QA MED, Osijek, Croatia

⁷Faculty of Medicine, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Osijek, Croatia

⁸Faculty of Dental Medicine and Health, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Osijek, Croatia

ikralik@kbd.hr

Diagnostic monitors as well as ambient illumination in the reading rooms must meet the minimum prescribed requirements. Recommendations regarding diagnostic monitors as well as ambient illumination can be found in several international recommendations. The aim of this study is to show the results of the investigation carried out in four healthcare institutions in Republic of Croatia in which 114 monitors of twenty different manufacturers are used for readings of radiographic images. 45 % of those monitors were diagnostic monitors, 12% diagnostic monitors dedicated to mammography while 25 % of them were COTS (*commercial off-the-shelf*) monitors and 18 % were medical monitors which were originally used as reviewing monitors. Six recommended and four prescribed parameters were tested and it was found that 51 % of tested monitors met the prescribed requirements for selected parameters and only 46 % for the minimum recommended requirements. Only 29 % of diagnostic monitors dedicated to mammography met recommendations given for this type of monitors. None of COTS monitors met all selected prescribed and recommended requirements. The ambient illumination in reading rooms ranged from several lux to several hundred lux, depending on the type of light source and often depends on the time of day and the weather conditions. Results of this study indicate the need for paying more attention to the selection of monitors which will be used as diagnostic monitors and to their regular testing and calibration as well as to the reading rooms where these monitors will be used.

SEKUNDARNO ZRAČENJE U FOTONSKOJ RADIOTERAPIJI – PREGLED DOZIMETRIJSKIH ISTRAŽIVANJA UNUTAR EURADOS- OVE RADNE GRUPE 9

Marija Majer, Željka Knežević, Saveta Miljanić
u ime EURADOS-ove radne grupe 9
Institut Ruđer Bošković, Zagreb
mmajer@irb.hr

UVOD

Zbog međudjelovanja primarnog radioterapijskog snopa s materijom, nastanak sekundarnog zračenja te ozračivanje tkiva izvan ciljnog volumena je neizbježno. Iako se radi o malim dozama, nekoliko redova veličine manjim nego u ciljnom volumenu, one mogu povećati vjerojatnost za nastanak sekundarnih karcinoma. Da bi se moglo procijeniti rizik te usporediti različite radioterapijske tehnike, potrebni su pouzdani dozimetrijski podaci.

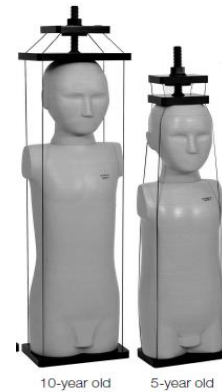
U okviru EURADOS-ove (*European Radiation Dosimetry Group*, <http://www.eurados.org/>) radne grupe 9 (*Radiation dosimetry in radiotherapy*) napravljen je niz eksperimenata, počevši od jednostavnih laboratorijskih uvjeta i vodenih fantoma do stvarnih kliničkih simulacija tretmana antropomorfnih fantoma s ciljem:

1. ispitivanja postojećih dozimetrijskih sustava za dozimetriju sekundarnog zračenja u fotonskoj radioterapiji,
2. usporedbe izmjerenih apsorbiranih doza s vrijednostima koje predviđaju sustavi za planiranje i analitički modeli
3. usporedbe raspodjela doza različitih radioterapijskih tehnika koje se mogu primijeniti za isti klinički slučaj.

U radu je prikazan pregled dozimetrijskih istraživanja i glavnih rezultata radne grupe 9 vezanih za fotonско sekundarno zračenje u fotonskoj radioterapiji.

MATERIJALI I METODE

U sklopu radne grupe 9 napravljene su tri skupine eksperimenata koristeći termoluminescentne (TL), radiofotoluminescentne (RPL) i optički-stimulirane luminescentne (OSL) dozimetrijske sustave. Slijedom razvoja eksperimenata korišten je najprije najjednostavniji vodeni fantom u obliku kvadra, slijedi tzv. BOMAB (engl. *The Bottle Mannikin Absorber phantom*) vodeni fantom konstruiran prema BOMAB-fantomu razvijenom 1949. godine [1] te na kraju antropomorfnih fantomi (Slika 1). U prvom koraku ispitan je odziv različitih dozimetara u radioterapijskim fotonским poljima (primarnom i sekundarnom). Za tu svrhu korišten je jednostavni vodeni fantom dimenzija $30 \times 30 \times 60 \text{ cm}^3$ (Slika 1). Pogodnost takvog fantoma je jednostavna geometrija u koju je lako precizno postaviti dozimetre kao i referentni dozimetrijski sustav, kao što je ionizacijska komora, za usporedbu rezultata. Nedostatak je što se ne mogu simulirati i ispitivati stvarni klinički tretmani. Stoga je idući korak bila izrada vodenog fantoma koji je predstavljao pojednostavljenog čovjeka – za trup je korišten elipsoid, a za glavu, ruke i noge cilindri napravljeni od materijala PMMA (poli-metil-metakrilat) i dobiven je tzv. BOMAB-fantom koji se mogao koristiti u simulacijama stvarnih kliničkih tretmana. Dozimetri u fantomu postavljani su u držače koji su omogućavali precizno mjerenje raspodjela doza tijekom različitih tretmana karcinoma prostate. U trećem koraku doze su mjerene u tkivu ekvivalentnim antropomorfnim fantomima, a simulirane su različite radioterapijske tehnike za tretman karcinoma u mozgu.



Slika 1. Korišteni fantomi: vodeni fantom (lijeva slika), BOMAB-u slični fantom (srednja slika) i antropomorfnu dječji fantomi (CIRS, Inc., Norfolk, VA, USA) koji prikazuju desetogodišnje i petogodišnje dijete (desna slika)

1. Eksperimenti u jednostavnom vodenom fantomu napravljeni su u Commissariat a l' Energie Atomique (CEA), Paris 2010. [2,3,4]
Ispitivanje dozimetara za fotonsku radioterapijsku dozimetriju napravljeno je ozračivanjem dozimetara postavljenih u matricu mjernih točaka unutar vodenog fantoma. Ozračivanja su napravljena u referentnom kliničkom snopu linearnog akceleratora (LINAC) za tri kvalitete X-zračenja: 6, 12 i 20 MV. Referentna dozimetrija, potrebna za usporedbu s vrijednostima koje pokazuju ispitivani dozimetri, određena je ionizacijskom komorom i mjerenjima na položajima dozimetara u vodenom fantomu. Ispitivani dozimetri prikazani su u Tablici 1, a više informacija o njima može se naći u radu [5].
2. Eksperimenti u BOMAB-fantomu napravljeni su u Sveučilišnoj bolnici Svete Klare, Pisa 2011. i Centru za onkologiju, Krakow 2011. [6]
Simulacija terapije karcinoma prostate u fantomu izvedena je pomoću X-zračenja dobivenog LINAC-ima i uspoređeno je nekoliko radioterapijskih tehnika i energija: VMAT (6 MV), tomoterapija (6 MV), IMRT (6,18 MV), 3D-CRT s tri polja (15 MV), 3D-CRT s četiri polja (6, 18 MV). Unutar elipsoida koji je predstavljao trup čovjeka, mogle su se umetati cijevi u koje su postavljeni različiti TL, RPL i OSL dozimetri. Pored usporedbe različitih dozimetrijskih sustava prikazanih u Tablici 1, uspoređene su i raspodjele doza u području izvan ciljnog volumena za različite tehnike tretmana karcinoma prostate.
3. Eksperimenti u antropomorfnim dječjim fantomima – različiti tretmani dječjeg karcinoma u mozgu [7,8,9]
Zbog pretpostavke da će djeca doživjeti dob kada se mogu javiti sekundarni karcinomi uzrokovani zračenjem primarnog karcinoma, kao i veće osjetljivosti na zračenje u odnosu na odrasle, dozimetrijska mjerenja i mogućnost procjene rizika za djecu su iznimno važna. Karcinom u mozgu odabran je zbog velike učestalosti (u usporedbi s drugim karcinomima kod djece) te velikog postotka izlječenja. Ispitano je nekoliko radioterapijskih tehnika za zračenje karcinoma (kugla promjera 6 cm) smještenog na lijevoj prednoj strani mozga u fantomima koji su predstavljali petogodišnje i desetogodišnje dijete (Slika 1). Korišteni dozimetrijski sustavi su u Tablici 1. Korištene radioterapijske tehnike:
 - 3D konformalna radioterapija (3D-CRT), 6 MV, Centar za onkologiju, Krakow 2013.
 - Radioterapija snopovima modulirane jakosti (IMRT), 6 MV, Centar za onkologiju, Krakow 2013.
 - Radioneurokirurgija gama nožem (GK), izvori gama zračenja ^{60}Co (1.25 MeV); Klinički bolnički centar Rebro, Zagreb 2015.

Da bi se zaokružila cjelina, za oba dječja fantoma osmišljena su i napravljena dozimetrijska mjerenja za tretman posebnog slučaja karcinoma u mozgu (tzv. meduloblastoma) koji zahtijeva zračenje cijelog mozga i spinalnog kanala (kraniospinalno zračenje). Obrada tih rezultata je u tijeku.

Tablica 1. Dozimetrijski sustavi i sudionici u svakom nizu eksperimenata

Fantom	Dozimetrijski sustav	Vrsta(proizvođač) i materijal	Institucija sudionika
Vodeni fantom	RPL	GD-352M i GD-302M (Asahi Techno Glass Corp.) Srebrom aktivirano fosfatno staklo	IRB, Zagreb
	OSL	NanoDot (Landauer): Al ₂ O ₃ :C	CEA, Paris
	TL	TLD-100 (Harshaw): ^{nat} LiF:Mg,Ti TLD-700 (Harshaw): ⁷ LiF:Mg,Ti MTS-7 (IFJ, Krakow): ⁷ LiF:Mg,Ti	IRB, Zagreb IRB, Zagreb IFJ, Krakow
BOMAB-fantom	RPL	GD-352M (Asahi Techno Glass Corp.) Srebrom aktivirano fosfatno staklo	IRB, Zagreb
	OSL	NanoDot (Landauer): Al ₂ O ₃ :C	CEA, Paris
	TL	TLD-700 (Harshaw): ⁷ LiF:Mg,Ti MTS-7 (IFJ, Krakow): ⁷ LiF:Mg,Ti	IRB, Zagreb IFJ, Krakow
Antropomorfni fantomi, 5y i 10y	RPL	GD-352M	IRB, Zagreb
	OSL	Luxel (Landauer Inc.): Al ₂ O ₃ :C	SCK-CEN, Mol
	TL	MCP-n (IFJ, Krakow): ^{nat} LiF:Mg,Cu, P MTS-7 (IFJ, Krakow): ⁷ LiF:Mg,Ti	SCK-CEN, Mol IFJ, Krakow

REZULTATI

Spomenut ćemo samo najvažnije rezultate, a u citiranim radovima se mogu naći svi do sada objavljeni rezultati.

1. Eksperimenti u jednostavnom vodenom fantomu

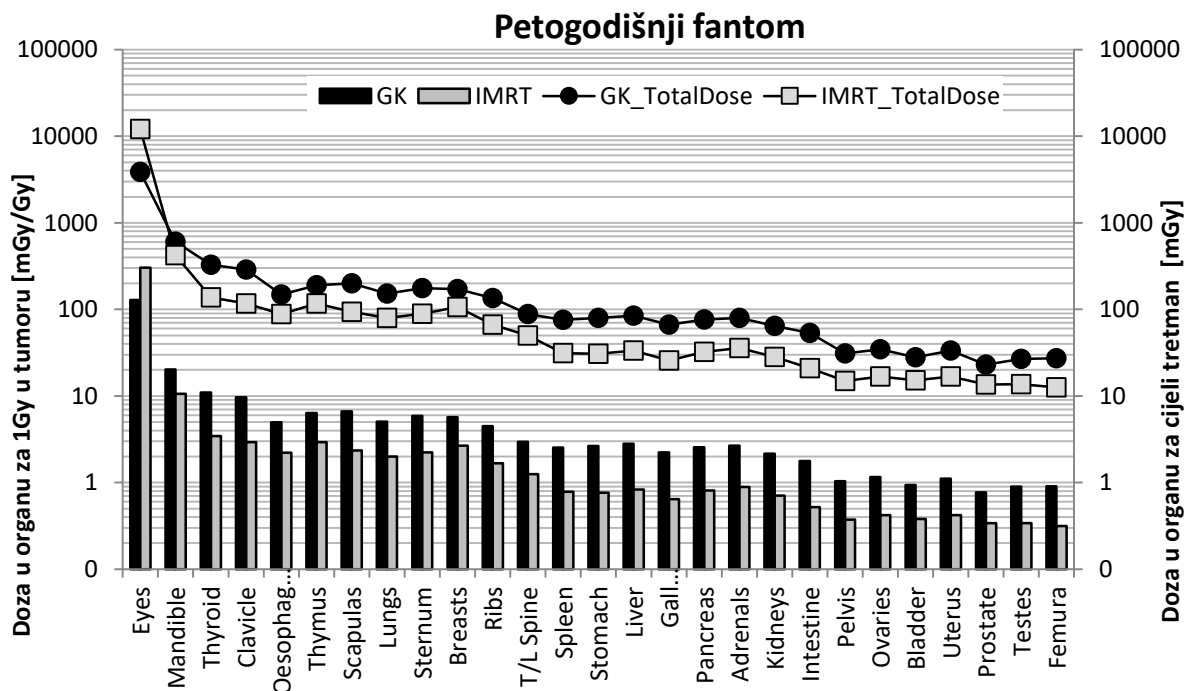
Mjerenja u laboratorijskim uvjetima i analiza rezultata su pokazali da svi korišteni dozimetrijski sustavi imaju dobra svojstva za dozimetriju područja izvan ciljnog volumena (tzv. periferne ili engl. out-of-field doze) [2-5]. Eksperimentalni dozimetrijski rezultati za područje izvan ciljnog volumena, poput dobivenih, iznimno su važni za provjere analitičkih modela koji se razvijaju. U tu svrhu, rezultati dobiveni u sklopu radne grupe 9 iskorišteni su za provjeru analitičkog modela apsorbirane doze za različite radioterapijske tehnike u području 6-25 MV [10].

2. Eksperimenti u BOMAB-fantomu

Unutar ciljnog volumena dobiveno je izvrsno slaganje izmjerenih vrijednosti doza i vrijednosti predviđenih sustavom za planiranje radioterapije (TPS). U području izvan ciljnog volumena izmjerene doze su veće od onih predviđenih TPS-om i udaljavanjem od ciljnog volumena, odstupanje se povećava [6]. Primarni cilj TPS-a je točan izračun doza za ciljni volumen i blisko okolno područje. Za veće udaljenosti (nakon što doze padnu ispod određene granice) doze se ne računaju i zbog toga je važnost mjerenja još veća. Potvrđeno je slaganje korištenih pasivnih luminescentnih dozimetara.

3. Eksperimenti u antropomorfnim fantomima [7-9]

Potvrđeno je dobro slaganje korištenih dozimetrijskih sustava i u stvarnim kliničkim uvjetima. Kao i u prethodnom slučaju, u području izvan ciljnog volumena izmjerene doze bile su veće od vrijednosti predviđenih TPS-om i odstupanja su se povećavala udaljavanjem od ciljnog volumena. Rezultati za tri ispitivane tehnike zračenja pokazali su da se za slučaj odabranog karcinoma najmanje periferne doze postižu tehnikom IMRT, dok je za područje uz granicu tumora najpogodnija za strmi pad doze tehnika GK. Primjer usporedbe srednjih doza u organima za 1 Gy u tumoru i za ukupni tretman (različite tehnike zračenja uključuju različiti broj frakcija i različitu ukupnu dozu) za klinički slučaj tretmana velikih arteriovenskih malformacija u mozgu fantoma koji predstavlja petogodišnje dijete prikazan je na Slici 2 [8].



Slika 2. Usporedba srednjih doza u organima za 1 Gy u tumoru [mGy/Gy] (histogram) i za ukupni tretman [mGy] (simboli) u petogodišnjem fantomu za dvije tehnike zračenja: IMRT i GK. Ukupni tretman za GK uključivao je 30 Gy u 5 frakcija i 37.6 Gy u 8 frakcija za IMRT.

ZAKLJUČAK

Nizom eksperimenata u sklopu EURADOS-ove radne grupe 9 zaokruženo je ispitivanje pasivnih luminescentnih dozimetara za mjerenje fotonskih doza izvan ciljnog volumena u modernim radioterapijskim tehnikama te su uspoređene različite tehnike i sustavi za planiranje. Iako nisu predmet ovog rada, spomenut ćemo da su tijekom eksperimenata napravljena i mjerenja doza sekundarnog neutronskog zračenja koje ima značajni doprinos za primarna fotonska polja veća od 6 MV. Kao nastavak projekta organizirani su eksperimenti vezani za dozimetriju sekundarnog (fotonskog i neutronskog) zračenja pri radioterapiji protonskim snopovima.

LITERATURA

- [1] Bush F. The integral dose received from a uniformly distributed radioactive isotope. Br. J. Radiol. 1949;22:96-102.
- [2] Bordy J-M, Bessieres I, s'Agostino E, Domingo C, d'Errico F, Di Fulvio A, Knežević Ž, Miljanić S, Olko P, Ostrowski A, Poumarede B, Sorel S, Stplarczyk L, Vermesse D. Radiotherapy out-of-field dosimetry: Experimental and computational results for photons in water tank. Radiat.Meas. 2013;57:29-34.
- [3] Miljanić S, Bordy J-M, d'Errico F, Harrison R, Olko P. Out-of-field dose measurements in radiotherapy – An overview of activity of EURADOS Working Group 9: Radiation protection in medicine. Radiat. Meas. 2014;71:270-275.
- [4] Miljanić S, Bessieres I, Bordy J-M, D'Agostino E, d'Errico F, Di Fulvio A, Domingo C, Knežević Ž, Olko P, Silari M, Stolarczyk L, Harrison R. Interkomparacija dozimetara za mjerenje perifernih doza u radioterapiji – aktivnost radne grupe 9 EURADOS-a. Krajcar Bronić I, Kopjar N, Milić M, Branica G, ur. Zbornik radova Osmog simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja, 13.-15. travnja 2011; Krk, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2011. str. 303-308.
- [5] Knežević Ž, Stolarczyk L, Bessieres I, Bordy J-M, Miljanić S, Olko P, Harrison R. Optically stimulated luminescence (OSL), thermoluminescence (TL) and radiophotoluminescence (RPL) dosimetry. Radiat. Meas. 2013;57:9-18.
- [6] Miljanić S, Bessieres I, Bordy J-M, d'Errico F, Di Fulvio A, Kabat D, Knežević Ž, Olko P, Stplarczyk L, Tana L, Harrison R. Radiat. Meas. Clinical simulations of prostate radiotherapy using BOMAM-like phantoms: Results for photons 2013;57:35-47.
- [7] Majer M, Stolarczyk L, De Saint-Hubert M, Kabat D, Knežević Ž, Miljanić S, Mojzeszek N, Harrison R. Out-of-field dose measurements for 3D conformal and intensity modulated radiotherapy of a paediatric brain tumour. Radiat. Prot. Dosim. 2017;176:331-340.
- [8] De Saint-Hubert M, Majer M, Hršak H, Heinrich Z, Knežević Ž, Miljanić S, Porwol P, Stolarczyk L, Vanhavere F, Harrison R. Out-of-field doses in children treated for large arteriovenous malformations using hypofractionated gamma knife radiosurgery and intensity-modulated radiation therapy. Radiat. Prot. Dosim. 2018;181:100-110.
- [9] Majer M, Knežević Ž, Miljanić S. Periferne doze pri radioterapijskim tretmanima karcinoma mozga kod djece. Petrinc B, Bituh T, Milić M, Kopjar N, ur. Zbornik radova Desetog simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja, 15.-17. travnja 2015; Šibenik, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2015. str. 213-218.
- [10] Schneider CW, Newhauser WD, Wilson LJ, Schneider U, Kaderka R, Miljanić S, Knežević Ž, Stolarczyk L, Durante M, Harrison RM. A descriptive and broadly applicable model of therapeutic and stray absorbed dose from 6 to 25 MV photon beams. Med. Phys. 2017;44:3805-3814.

DOSIMETRY OF STRAY RADIATION IN PHOTON RADIOTHERAPY – RESULTS OF EURADOS WORKING GROUP 9

Marija Majer, Željka Knežević, Saveta Miljanić
Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
on behalf of EURADOS Working Group 9
mmajer@irb.hr

Radiation doses to normal tissues caused by stray radiation in radiotherapy are substantially lower than target doses, but they are inevitable and as such may be associated with side-effects of radiotherapy such as an increased risk of secondary cancers. When primary treatment goals such as target volume coverage and sparing of critical organs have been achieved, the reduction of unwanted side-effects becomes a legitimate objective and phantom dosimetry studies, using reliable dosimetry, are important for their investigation. Using organ dose assessment and appropriate risk model, cancer risk for associated cancers can be estimated and protection of patients can be improved.

Within EURADOS (*European Radiation Dosimetry Group*, <http://www.eurados.org/>) Working Group 9 (WG9, *Radiation Dosimetry in Radiotherapy*) several measuring campaigns, starting from laboratory conditions with watertank to more realistic clinical conditions with anthropomorphic phantoms, were designed and carried out with the aims: to gain information on the performance of different dosimetry systems used in photon radiotherapy, to compare measured doses with values given by the treatment planning system (TPS) and to evaluate and compare the out-of-field doses for the treatment of the same clinical case using different radiotherapy techniques.

In this overview the main results regarding dosimetry of stray radiation in photon radiotherapy and phantom studies carried out within EURADOS WG9 are shown.

UTJECAJ PARAMETARA SNIMANJA DENTALNIM CBCT UREĐAJEM NA DOZE ORGANA I EFEKTIVNU DOZU PACIJENTA

Ivana Kralik¹, Tomislav Lauc^{2,3,4,5,6}, Hrvoje Brkić^{3,7}, Dario Posedel⁸, Hrvoje Vavro¹,
Jelena Popić^{9,10}, Ivana Rupičić⁵, Dario Faj^{3,7}

¹Klinička bolnica Dubrava, Zagreb

²Filozofski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

³Fakultet dentalne medicine i zdravstva, Sveučilište u Osijeku, Osijek

⁴Stomatološki fakultet, Sveučilište u Sarajevu, Sarajevo, Bosna i Hercegovina

⁵Stomatološka poliklinika Apolonija, Zagreb

⁶Zubni rendgen dr. Lauc, Varaždin

⁷Medicinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek

⁸QA MED, Osijek

⁹Klinička bolnica Merkur, Zagreb

¹⁰Medicinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

ikralik@kbd.hr

UVOD

U slučaju dentalnog rendgenskog uređaja za kompjutoriziranu tomografiju stožastim rendgenskim snopom (dalje u tekstu: CBCT, od engl. *cone-beam computed tomography*), raspodjela doze u pacijentu može biti vrlo složena, ovisno o vrsti uređaja i načinu snimanja.

Korisnicima su na raspolaganju rendgenski uređaji izvedeni tako da pacijent tijekom snimanja leži, sjedi ili stoji. Rendgenska cijev, ovisno o proizvođaču, tijekom snimanja može rotirati 360° ili 180°. Veličine polja snimanja (dalje u tekstu: FOV, od engl. *field of view*) kod većine dostupnih uređaja nepromijenjivih su veličina, kao i naponi na rendgenskoj cijevi. U pravilu, korisnik uređaja može birati više načina rada poput standardnog ili visokorazlučivog, ovisno o željenoj veličini voksela rekonstruirane snimke, odnosno o potrebnoj kvaliteti snimke.

Cilj ovoga rada je utvrditi i prikazati kako na doze organa koje doprinose efektivnoj dozi, dozu očne leće i efektivnu dozu pacijenta utječu pojedini parametri snimanja dentalnim CBCT uređajem (kut rotacije rendgenske cijevi, veličina i položaj FOV-a te umnožak struje i vremena ozračivanja).

MATERIJALI I METODE

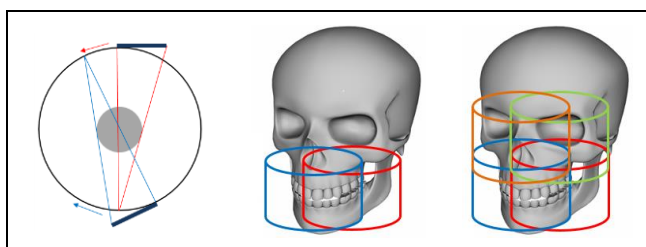
U svrhu provedbe istraživanja korišten je dentalni CBCT uređaj proizvođača Soredex, model Cranex 3Dx koji je izveden tako da pacijent tijekom snimanja stoji. Anoda je stacionarnog tipa izrađena od volframa sa žarištem veličine 0,5 mm, a napon na rendgenskoj cijevi je nepromijenjiv i iznosi 90 kV. Veličine FOV-a su također nepromijenjive i pobrojane su u Tablici 1 u kojoj su dani i ostali proizvođačem definirani parametri snimanja. Za svaki FOV moguće je odabrati više umnožaka struje i vremena ozračivanja, ovisno o željenoj razlučivosti, odnosno veličini rekonstruiranog voksela koja se kreće od 85 μm za najmanji FOV do 420 μm za najveći FOV (Tablica 1).

Proizvođačem deklariran kut rotacije rendgenske cijevi je 180° (stvarni kutovi rotacije dani su Tablici 1) i nepromjenjiv je, a tijekom snimanja cijev rotira pacijentu iza glave.

S obzirom na to da su dimenzije detektora manje od dimenzija glave pacijenta, u slučaju FOV-a širine veće od širine detektora, uređaj snimanje provodi tzv. *offset* načinom rada koji podrazumijeva promjenu položaja rendgenske cijevi i detektora tijekom rotacije te se rekonstrukcijom spajaju horizontalno snimljeni dijelovi pacijenta (Slika 1). U slučaju FOV-a visine veće od visine detektora, snimanje se također provodi *offset* načinom rada i vertikalnim spajanjem snimljenih dijelova pacijenta, kako je to prikazano na Slici 1 i opisano u literaturi [1,2].

Tablica 1. Proizvođačem definirani parametri snimanja za korišteni dentalni CBCT uređaj

FOV, vxš (mm ²)	Oznaka razlučivosti	Voksel (μm)	Vrijeme ekspozicije (s)	Vrijeme snimanja (s)	Struja (mA)	Umnožak struje i vremena (mAs)	Kut rotacije (°)
50 × 50	Minidose	280	1,17	10,96	3,2	3,7	195
	Std Res	200	2,34	10,96	8	18,7	195
	High Res	125	6,09	17,4	6,3	38,4	195
	Endo	85	8,7	17,4	5	43,5	195
61 × 78	Minidose	320	1,17	10,96	3,2	3,7	195
	Std Res	300	2,34	10,96	8	18,7	195
	High Res	200	6,09	17,4	6,3	38,4	195
	Minidose	320	1,17	10,96	3,2	3,7	195
78 × 78	Std Res	300	2,34	10,96	8	18,7	195
	High Res	200	6,09	17,4	6,3	38,4	195
	Minidose	400	2,25	19,5	3,2	7,2	203
	Std Res	350	4,5	19,5	6,3	28,4	204
78 × 150	High Res	250	8,5	24,28	5	42,5	204
	Minidose	420	4,5	39	3,2	14,4	204
	Std Res	380	9,0	39	4	36,0	204
130 × 150	High Res	320	9,0	39	6,3	56,7	204



Slika 1. Prikaz *offset* načina rada (lijevo), horizontalnog spajanja snimljenih dijelova pacijenta (sredina) i vertikalnog spajanja snimljenih dijelova pacijenta (desno).

Za provedbu istraživanja korištena je Monte Carlo simulacija koristeći MCNP® 6.1.1beta [3] verziju programskog paketa MCNP (*Monte Carlo N-Particle Transport Code*), proizveden u Los Alamos National Laboratory-u, New Mexico, SAD. Simulacija i vrednovanje dentalnog CBCT uređaja provedena je na način kako je to opisano u prethodno provedenoj studiji [4].



Slika 2. Prikaz računalnog antropomorfno fantoma korištenog u ovom radu ("Zubal") u transverzalnoj ravnini (lijevo), koronalnoj ravnini (sredina) i sagitalnoj ravnini (desno).

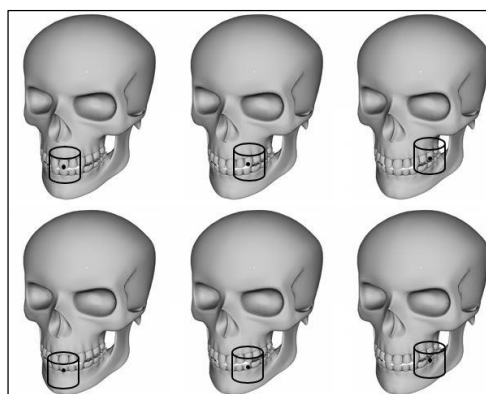
Za izračun doze organa i procjenu efektivne doze pacijenta korišten je računalni antropomorfni Zubal fantom ljudske glave i vrata [5,6] koji je postavljen u model CBCT uređaja. U tom fantomu ljudska glava je modelirana pomoću voksela veličine $2,2 \times 2,2 \times 1,4 \text{ mm}^3$ (Slika 2) u kojima se može razlikovati 40 različitih struktura. Vokselizirani dio fantoma seže od donje ravnine gornje mandibule do vrha glave, a ostatak tkiva u fantomu (vrat trup, kralježnica i drugo) modeliran je koristeći makrotijela dostupna u

MCNP kodu. S obzirom na to da neke vrlo važne strukture (kao što su submandibularne i sublingvalne žlijezde te farinks) nisu uključene u navedeni fantom, dodane su ručno. Doze u svakom organu izračunate su koristeći *F4 tally* detektor, modificiranim faktorima koji fotonski tok pretvaraju u apsorbiranu dozu za svaki odgovarajući organ [7].

Simulacije su provedene za one protokole koji su određeni kao najčešći klinički protokoli (Tablica 2), a koji se provode uz napon na rendgenskoj cijevi od 90 kV, kut rotacije rendgenske cijevi od 180° i umnožak struje i vremena ozračivanja koji odgovara oznaci Std Res (Tablica 1).

Tablica 2. Najčešći klinički protokoli

FOV, v×š (mm ²)	Položaj FOV-a
50 × 50	Maksimalni lijevi prednji zub (sjekutić) Maksimalni zubni luk
61 × 78	Mandibularni zubni luk Maksimalni zubni luk
78 × 78	Okluzijska ravnina (obje čeljusti) Mandibularni zubni luk Maksila
78 × 150	Okluzijska ravnina (obje čeljusti) Mandibula
130 × 150	Viscerokranij



Slika 3. FOV veličine 50 × 50 mm² čije je središte postavljeno na sjekutić, očnjak i kutnjak na maksili (gore) te na mandibuli (dolje). Crnom točkom označeno je središte FOV-a.

Za potrebe ispitivanja utjecaja kuta rotacije rendgenske cijevi na doze organa i efektivnu dozu pacijenta protokoli su simulirani i za kut rotacije od 360°. U cilju ispitivanja utjecaja pomaka FOV-a simulirani su dodatni protokoli za FOV veličine 50 × 50 mm² čije se središte postavljalo na očnjak i na kutnjak na obje čeljusti (Slika 3) te za FOV-ove veličine 78 × 150 mm² i 130 × 150 mm² čija su se središta pomicala duž z-osi (os okomita na transversalnu ravninu) od 22,5 mm do -22,5 mm u odnosu na okluzijsku ravninu. U svrhu ispitivanja utjecaja umnoška struje i vremena ozračivanja, svi protokoli simulirani su i za druge moguće umnoške dane u tablici 1. Kriteriji za prihvaćanje rezultata u MC simuliranim kliničkim protokolima su bili udovoljavanje svim 10 statističkih provjera i relativna greška manja od 0,002 (0.2 %).

Efektivna doza računala se prema preporukama Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja [8]:

$$E = \sum_T w_T \left[\frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right], \quad (1)$$

gdje su:

w_T - težinski faktor za tkivo ili organ vrste T,

H_T^M - ekvivalentna doza u tkivu ili organu vrste T muškarca te

H_T^F - ekvivalentna doza u tkivu ili organu vrste T žene.

Težinski faktori w_T koje preporučuje Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja [8] predstavljaju doprinose pojedinih organa i tkiva ukupnoj mogućoj šteti koju izlaganje ionizirajućem zračenju može uzrokovati u smislu stohastičkih učinaka i usrednjeni su za oba spola i sva godišta. S obzirom na to da u slučaju provedbe postupaka dentalnim CBCT uređajem nisu ionizirajućem zračenju izloženi svi organi niti su neki izloženi u cijelosti te da se u ovom radu koristio muški računalni antropomorfní fantom, izračunati su novi težinski faktori kako je to opisano u prethodno objavljenoj studiji [4].

Ekvivalentna doza pojedinog tkiva izračunata je korištenjem sljedeće jednadžbe [8]:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (2)$$

gdje su:

w_R - težinski faktor zračenja vrste R [8] te

$D_{T,R}$ - prosječna apsorbirana doza u volumenu pojedinog tkiva ili organa vrste T kao posljedica ozračenja zračenjem vrste R.

Crvena koštana srž nije bila označena u korištenom fantomu pa $D_{T,R}$ za crvenu koštanu srž nije bilo moguće izmjeriti kako je to bilo moguće za ostala tkiva ili organe te je za izračun iste primijenjen pristup prethodno objavljenih studija [9–12].

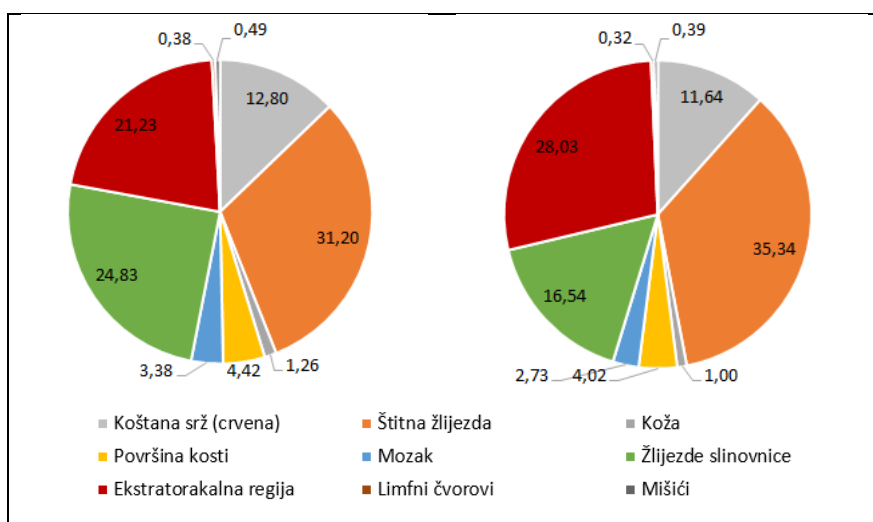
REZULTATI

Doze organa izračunate MC simulacijom za najčešće kliničke protokole uz napon na rendgenskoj cijevi od 90 kV te kutove rotacije rendgenske cijevi od 180° i 360° i umnoškom struje i vremena ozračivanja koji odgovara standardnoj razlučivosti (Std Res) dane su u Tablici 3. Iznosi umnožaka struje i vremena ozračivanja za pojedinu razlučivost za pojedini protokol dani su u Tablici 1. Za oba kuta rotacije rendgenske cijevi najmanju dozu primi mozak (55 μ Gy za 180° i 49 μ Gy za 360°), a najveću površina kosti (4119 μ Gy za 180° i 4006 μ Gy za 360°), ovisno o kliničkom protokolu. Doza očne leće kreće se od 63 μ Gy do 929 μ Gy u slučaju kuta rotacije rendgenske cijevi od 180°, a u slučaju kuta od 360°, od 68 μ Gy do 1057 μ Gy. Kao i slučaju doza organa, efektivna doza također ovisi o kliničkom protokolu što je vidljivo iz Tablice 3, a kreću se od 31 μ Sv do 170 μ Sv za slučaj kuta rotacije rendgenske cijevi od 180° te od 36 μ Sv do 214 μ Sv za kut od 360°. Iz podataka danih u Tablici 3 vidljivo je da povećanje veličine FOV-a rezultira povećanjem doza organa i efektivne doze. Prosječni doprinosi organa za oba kuta rotacije rendgenske cijevi prikazani su na Slici 4.

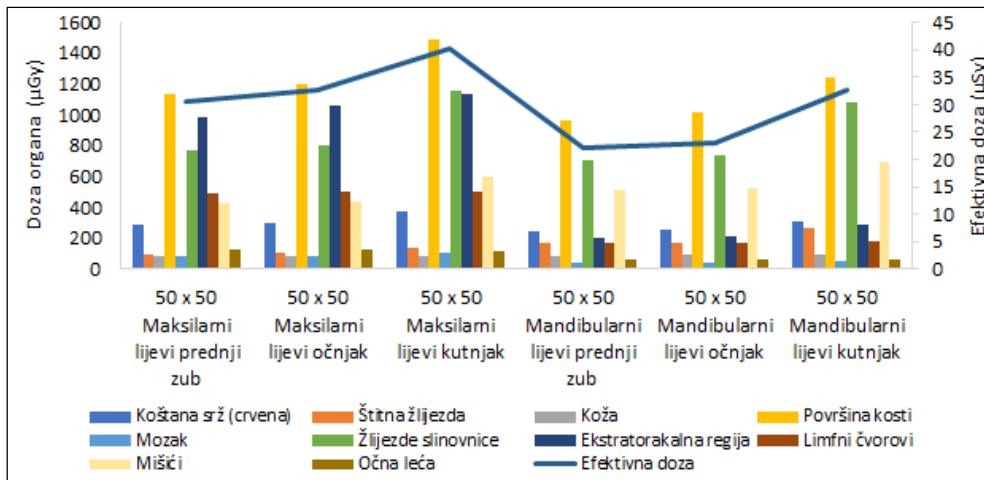
Na doze organa i efektivnu dozu pacijenta osim veličine FOV-a utječe i položaj FOV-a što je na Slikama 5 i 6 prikazano za slučaj FOV-a veličine 50 \times 50 mm² za kut rotacije rendgenske cijevi od 180° i 360°. Posebno su istraženi utjecaji pomaka središta FOV-a veličine 78 \times 150 mm² te 130 \times 150 mm² po z-osi u oba smjera u odnosu na okluzijsku ravninu s korakom od po 4,5 mm i prikazani su na Slikama 7 - 10.

Tablica 3. Doze organa (μGy) i efektivna doza (μSv) za najčešće kliničke protokole za kut rotacije rendgenske cijevi od 180° i 360° (90 kV, Std Res)

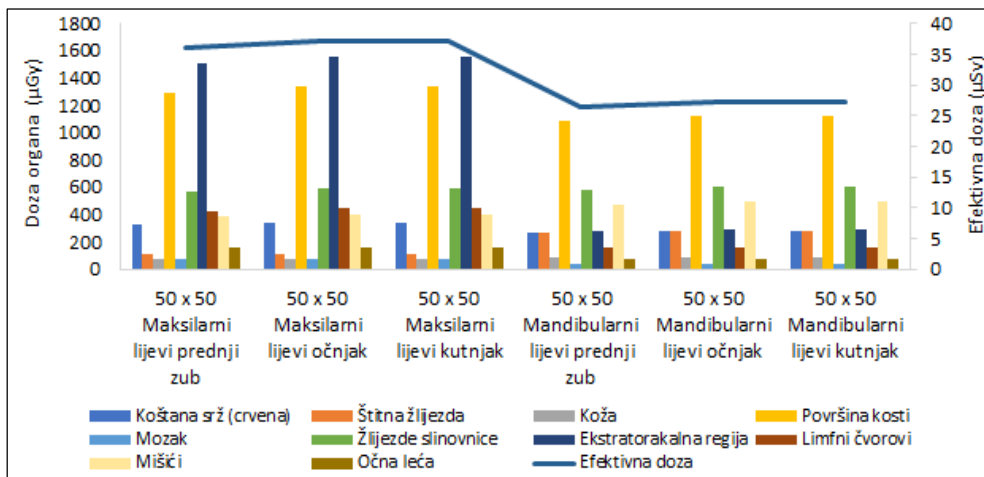
Organ	Kut rotacije ($^\circ$)	50 x 50 Maksil. lijevi pred. zub	61 x 78 Maksil. zubni luk	61 x 78 Mandib. zubni luk	78 x 78 Maksil. zubni luk	78 x 78 Objje čeljusti	78 x 78 Mandib. zubni luk	78 x 150 Maksila	78 x 150 Objje čeljusti	78 x 150 Mandibula	130 x 150 Viscerokranij
		Koštana srž (crvena)	180	286	587	370	692	578	439	906	749
	360	322	597	400	719	621	480	916	785	607	1005
Štitna žlijezda	180	94	156	1252	199	535	1812	261	711	2465	2370
	360	104	159	1995	209	798	3053	266	943	3533	3384
Koža	180	84	114	125	128	147	138	179	198	180	277
	360	72	96	121	110	136	135	159	185	178	256
Površina kosti	180	1139	2341	1474	2759	2305	1749	3610	2986	2248	4119
	360	1285	2379	1596	2865	2476	1914	3649	3130	2418	4006
Mozak	180	80	276	55	343	155	69	522	227	96	625
	360	76	266	49	342	153	63	489	210	87	523
Žlijezde slinovnice	180	768	1458	1278	1528	2045	1557	2136	2928	2275	2847
	360	562	1037	1161	1166	1559	1338	1815	2427	2035	2371
Ekstratorakalna regija	180	986	1583	296	1588	1477	460	1591	1483	536	1534
	360	1506	2574	361	2584	2386	588	2457	2264	642	2233
Limfa	180	490	981	112	1064	641	206	1376	846	273	1279
	360	426	914	109	994	616	202	1348	839	285	1247
Mišići	180	425	775	1210	906	1247	1366	1197	1760	2024	2279
	360	387	737	1119	852	1161	1298	1143	1614	1855	2123
Očna leća	180	127	277	63	676	169	84	673	185	98	929
	360	161	390	68	948	232	100	1045	260	115	1507
Efektivna doza	180	31	56	75	61	74	104	76	95	142	170
	360	36	64	105	70	92	154	83	109	184	214



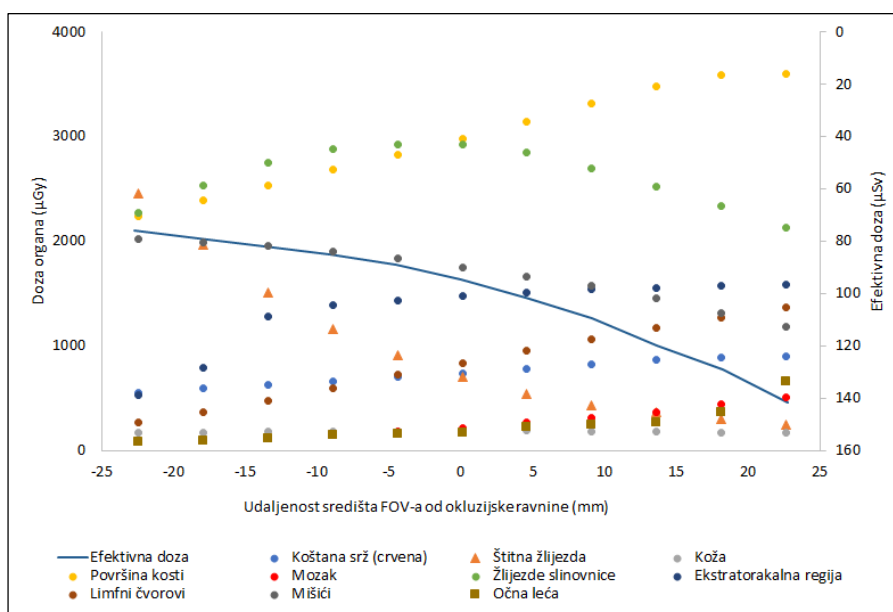
Slika 4. Prosječni doprinosi (%) pojedinog organa efektivnoj dozi za kutove rotacije rendgenske cijevi od 180° (lijevo) i 360° (desno) (90 kV, Std Res)



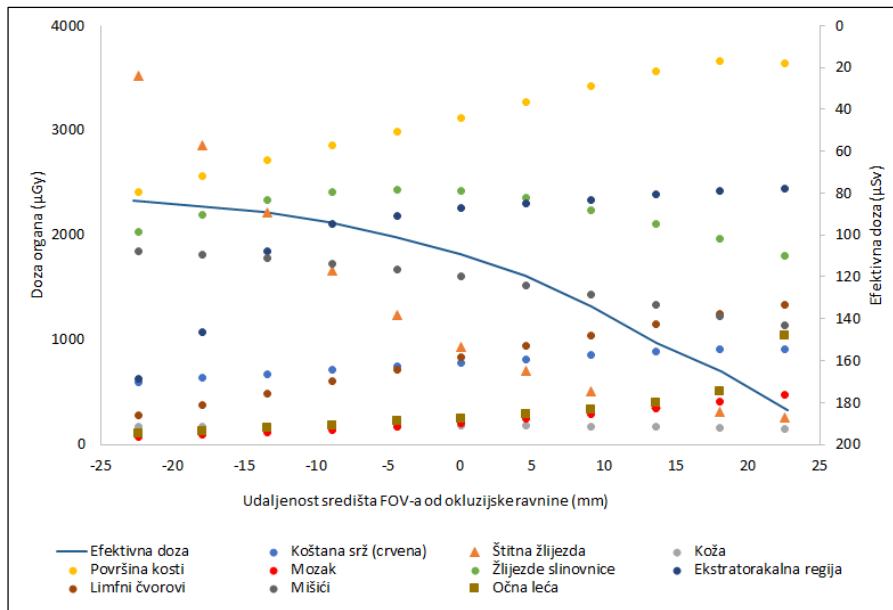
Slika 5. Doze organa i efektivna doza za različite položaje FOV-a veličine $50 \times 50 \text{ mm}^2$ na svakoj čeljusti za kut rotacije rendgenske cijevi od 180° (90 kV, Std Res).



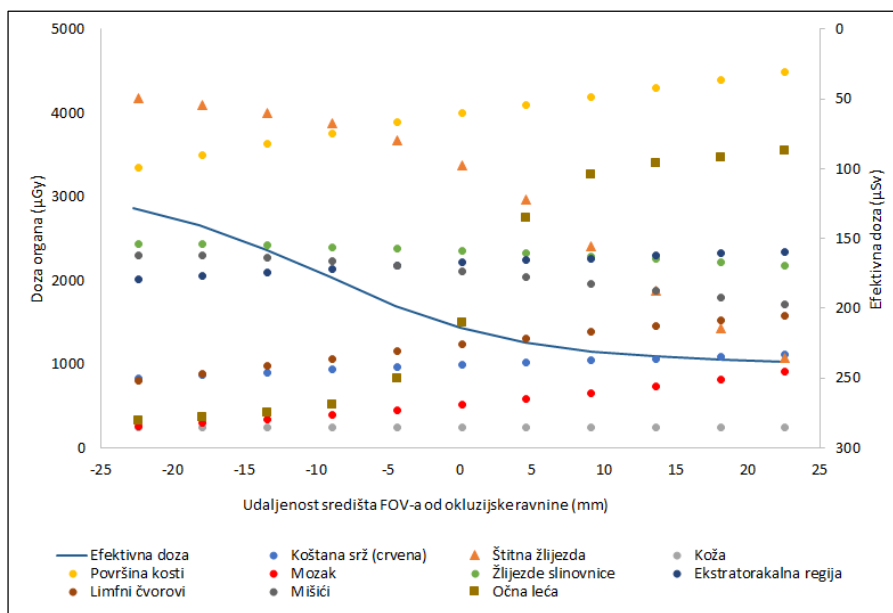
Slika 6. Doze organa i efektivna doza za različite položaje FOV-a veličine $50 \times 50 \text{ mm}^2$ na svakoj čeljusti za kut rotacije rendgenske cijevi od 360° (90 kV, Std Res).



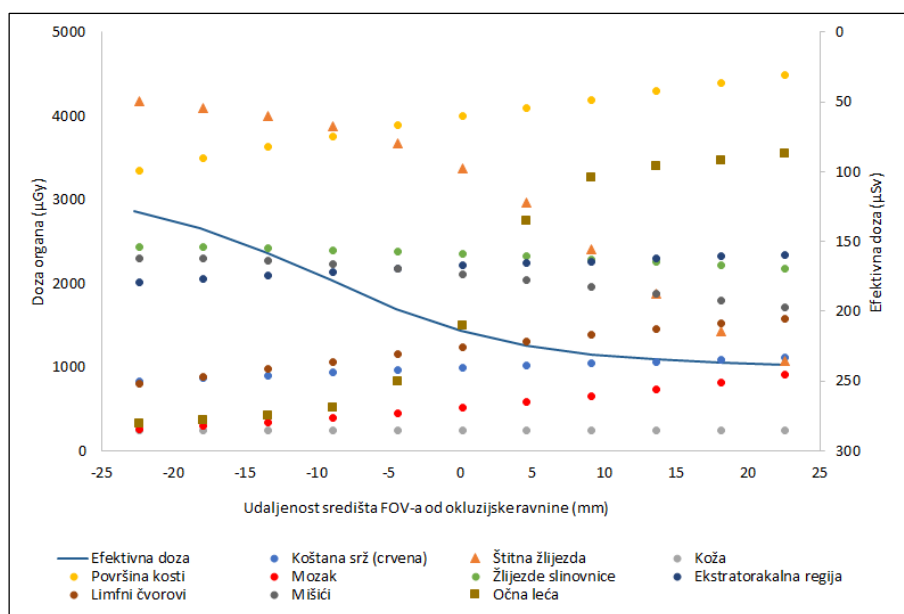
Slika 7. Doze organa i efektivna doze za različite udaljenosti FOV-a veličine $78 \times 150 \text{ mm}^2$ od okluzijske ravnine (90 kV, Std Res, kut rotacije od 180°)



Slika 8. Doze organa i efektivna doze za različite udaljenosti FOV-a veličine $78 \times 150 \text{ mm}^2$ od okluzijske ravnine (90 kV, Std Res, kut rotacije od 360°)



Slika 9. Doze organa i efektivna doze za različite udaljenosti FOV-a veličine $130 \times 150 \text{ mm}^2$ od okluzijske ravnine (90 kV, Std Res, kut rotacije od 180°)



Slika 10. Doze organa i efektivna doze za različite udaljenosti FOV-a veličine $130 \times 150 \text{ mm}^2$ od okluzijske ravnine (90 kV, Std Res, kut rotacije od 360°)

Doze organa i efektivna doza linearno prate promjenu umnoška struje i vremena ozračivanja što je prikazano u Tablici 4 za kut rotacije rendgenske cijevi od 180° te u Tablici 5 za kut rotacije od 360° .

Tablica 4. Doze organa (μGy) i efektivna doza (μSv) za različite umnoške struje i vremena ozračivanja za kut rotacije rendgenske cijevi od 180° (90 kV)

Organ	Oznaka razlučivosti	50 x 50	61 x 78	61 x 78	78 x 78	78 x 78	78 x 78	78 x 150	78 x 150	78 x 150	130 x 150
		Maksil. lijevi pred. zub	Maksil. zubni luk	Mandib. zubni luk	Maksil. zubni luk	Obje čeljusti	Mandib. zubni luk	Maksila	Obje čeljusti	Mandibula	Viscerokranij
Koštana srž (crvena)	Minidose	61	126	79	147	123	93	237	196	147	378
	Std Res	286	587	370	692	578	439	906	749	564	1034
	High Res	590	1148	723	1430	1195	906	1299	1074	809	1607
	Endo	842	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Štitna žlijezda	Minidose	20	33	268	42	114	386	68	186	644	866
	Std Res	94	156	1252	199	535	1812	261	711	2465	2370
	High Res	194	304	2446	410	1106	3741	374	1019	3534	3686
	Endo	277	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koža	Minidose	18	24	27	27	31	29	47	52	47	101
	Std Res	84	114	125	128	147	138	179	198	180	277
	High Res	174	222	245	264	304	285	256	284	258	430
	Endo	248	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Površina kosti	Minidose	244	502	316	588	491	373	943	780	587	1506
	Std Res	1139	2341	1474	2759	2305	1749	3610	2986	2248	4119
	High Res	2352	4574	2879	5698	4761	3612	5176	4281	3222	6405
	Endo	3356	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mozak	Minidose	17	59	12	73	33	15	137	59	25	202
	Std Res	80	276	55	343	155	69	522	227	96	552
	High Res	165	540	108	709	321	142	749	325	138	858
	Endo	235	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Žlijezde slinovnice	Minidose	164	312	274	325	436	332	558	765	595	1041
	Std Res	768	1458	1278	1528	2045	1557	2136	2928	2275	2847
	High Res	1585	2848	2497	3155	4222	3216	3063	4198	3262	4426
	Endo	2262	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ekstratorakalna regija	Minidose	211	339	63	338	315	98	416	388	140	553
	Std Res	986	1583	296	1588	1477	460	1591	1483	536	1512
	High Res	2037	3093	578	3280	3050	950	2281	2127	769	2350
	Endo	2906	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Limfni čvorovi	Minidose	105	210	24	227	136	44	360	221	71	468
	Std Res	490	981	112	1064	641	206	1376	846	273	1279
	High Res	1012	1917	220	2198	1323	426	1972	1212	392	1989

Organ	Oznaka razlučivosti	50 x 50 Maksil. lijevi pred. zub	61 x 78 Maksil. zubni luk	61 x 78 Mandib. zubni luk	78 x 78 Maksil. zubni luk	78 x 78 Obje čeljusti	78 x 78 Mandib. zubni luk	78 x 150 Maksila	78 x 150 Obje čeljusti	78 x 150 Mandibula	130 x 150 Viscerokranij
Mišići	Endo	1443	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Minidose	91	166	259	193	266	291	313	460	529	833
	Std Res	425	775	1210	906	1247	1366	1197	1760	2024	2279
	High Res	878	1513	2365	1871	2576	2821	1716	2524	2902	3544
Očna leća	Endo	1252	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Minidose	27	59	13	144	36	18	176	48	25	340
	Std Res	127	277	63	676	169	84	673	185	98	929
	High Res	262	540	122	1397	349	173	965	265	140	1444
Efektivna doza	Endo	374	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Minidose	7	12	16	13	16	22	20	25	37	62
	Std Res	31	56	75	61	74	104	76	95	142	170
	High Res	63	109	147	126	153	215	109	136	203	265
	Endo	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tablica 5. Doze organa (μGy) i efektivna doza (μSv) za različite umnoške struje i vremena ozračivanja za kut rotacije rendgenske cijevi od 360° (90 kV)

Organ	Oznaka razlučivosti	50 x 50 Maksil. lijevi pred. zub	61 x 78 Maksil. zubni luk	61 x 78 Mandib. zubni luk	78 x 78 Maksil. zubni luk	78 x 78 Obje čeljusti	78 x 78 Mandib. zubni luk	78 x 150 Maksila	78 x 150 Obje čeljusti	78 x 150 Mandibula	130 x 150 Viscerokranij
Koštana srž (crvena)	Minidose	69	128	86	153	132	102	239	205	159	367
	Std Res	322	597	400	719	621	480	916	785	607	1005
	High Res	666	1166	782	1484	1283	992	1313	1126	870	1563
	Endo	950	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Štitna žlijezda	Minidose	22	34	427	44	170	650	70	247	923	1237
	Std Res	104	159	1995	209	798	3053	266	943	3533	3384
	High Res	214	310	3897	431	1648	6305	382	1352	5066	5262
	Endo	306	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koža	Minidose	15	21	26	23	29	29	42	48	46	93
	Std Res	72	96	121	110	136	135	159	185	178	256
	High Res	149	187	236	226	280	279	228	266	255	397
	Endo	213	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Površina kosti	Minidose	275	510	342	610	527	408	954	818	632	1464
	Std Res	1285	2379	1596	2865	2476	1914	3649	3130	2418	4006
	High Res	2654	4647	3117	5916	5113	3953	5232	4488	3467	6229
	Endo	3786	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mozak	Minidose	16	57	11	73	33	14	128	55	23	191
	Std Res	76	266	49	342	153	63	489	210	87	523
	High Res	156	520	96	706	315	131	702	302	125	813
	Endo	223	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Žlijezde slinovnice	Minidose	120	222	249	248	332	285	474	634	532	867
	Std Res	562	1037	1161	1166	1559	1338	1815	2427	2035	2371
	High Res	1160	2025	2268	2408	3218	2762	2602	3479	2918	3687
	Endo	1655	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ekstratorakal na regija	Minidose	323	552	77	550	508	125	642	592	168	816
	Std Res	1506	2574	361	2584	2386	588	2457	2264	642	2233
	High Res	3110	5029	706	5337	4927	1214	3522	3247	920	3472
	Endo	4436	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Limfni čvorovi	Minidose	91	196	23	212	131	43	352	219	74	456
	Std Res	426	914	109	994	616	202	1348	839	285	1247
	High Res	879	1785	212	2054	1272	418	1933	1204	409	1939
	Endo	1254	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mišići	Minidose	83	158	240	181	247	276	299	422	485	776
	Std Res	387	737	1119	852	1161	1298	1143	1614	1855	2123
	High Res	800	1440	2187	1759	2397	2680	1639	2314	2660	3301
	Endo	1142	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Očna leća	Minidose	35	84	14	202	49	21	273	68	30	551
	Std Res	161	390	68	948	232	100	1045	260	115	1507
	High Res	333	761	132	1959	480	206	1498	372	164	2343
	Endo	475	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Efektivna doza	Minidose	8	14	23	15	20	33	22	29	48	78
	Std Res	36	64	105	70	92	154	83	109	184	214
	High Res	74	125	205	145	190	318	120	156	264	333
	Endo	106	-	-	-	-	-	-	-	-	-

DISKUSIJA

Doze organa koji doprinose efektivnoj dozi dobivene u okviru ovog istraživanja unutar su raspona doza organa dobivenih u prethodno objavljenim studijama koje su provedene eksperimentalnim mjerenjima različitim dozimetrima i fantomima te Monte Carlo simulacijama [13-15]. U slučaju najčešćih kliničkih protokola koji uključuju kut rotacije rendgenske cijevi od 180° , najmanju dozu primi mozak ($55 \mu\text{Gy}$), a najveću površina kosti ($4119 \mu\text{Gy}$) (Tablica 3). Iako primi najveću dozu, površina kosti ne doprinosi bitno efektivnoj dozi s obzirom na malu radiosenzitivnost (prosječno sa 4 %). Doprinosi pojedinih organa efektivnoj dozi ovise o kliničkom protokolu, a prosječno u slučaju najčešćih kliničkih protokola najviše doprinose štitna žlijezda (31 %), žlijezde slinovnice (25 %) i ekstratorakalna regija (21 %) (Slika 4.). Efektivne doze kreću se od $31 \mu\text{Sv}$ do $170 \mu\text{Sv}$.

Promjenom kuta rotacije rendgenske cijevi sa 180° na 360° uz zadržavanje iste kvalitete snimke, mijenjaju se i doze organa i efektivna doza (Tablica 3). Najveće povećanje vidljivo je u slučaju štitne žlijezde za FOV veličine $78 \times 78 \text{ mm}^2$ sa središtem pozicioniranim na mandibuli koje iznosi 69 % dok je najveće smanjenje u slučaju žlijezde slinovnice za FOV veličine $61 \times 78 \text{ mm}^2$ sa središtem pozicioniranim na maksili i iznosi 29 %. U slučaju efektivne doze, promjena kuta rotacije uzrokovala je samo njezino povećanje. Najmanje povećanje efektivne doze uočeno je u slučaju FOV-a veličine $61 \times 78 \text{ mm}^2$ sa središtem pozicioniranim na maksili (14 %), a najveće u slučaju FOV-a veličine $78 \times 78 \text{ mm}^2$ sa središtem pozicioniranim na mandibuli (48 %). Ovakva promjena efektivne doze posljedica je činjenice da tijekom rotacije s kutom od 360° rendgenska cijev rotira i anteriorno za razliku od 180° kada najveći dio vremena rotira posteriorno te da se spuštanjem FOV-a od maksile prema mandibuli povećava ozračenje štitne žlijezde i žlijezda slinovnica. Uz navedeno, kut rotacije rendgenske cijevi od 180° samo je proizvođačem deklarirani kut od 180° ; stvarni kut rotacije razlikuje se od protokola do protokola i kreće se od 195° do 204° (Tablica 1). Ukoliko bi kut bio manji, i razlike u dozi bi bile veće kako je pokazano u drugoj studiji u kojoj se istraživao utjecaj kuta rotacije rendgenske cijevi na efektivnu dozu pacijenta [13]. Promjenom kuta rotacije sa 180° na 360° mijenja se i doprinos pojedinih organa efektivnoj dozi (Slika 4) kao posljedica toga da tada cijev rotira i ispred pacijenta te se u prosjeku povećavaju doprinosi štitne žlijezde (35 %) i ekstratorakalne regije (28 %), dok se doprinos žlijezda slinovnica smanjuje (17 %) (Slika 4).

Promjene veličine FOV-a bitno utječu na doze organa i efektivnu dozu, kao i na doprinos organa efektivnoj dozi (Tablica 3) jer se povećanjem FOV-a povećava udio organa koji je u primarnom snopu ili primarnim snopom bivaju obuhvaćeni i drugi organi, a povećava se i količina raspršenog zračenja. Primjerice, u slučaju provedbe CBCT postupka FOV-ovom veličine $61 \times 78 \text{ mm}^2$ čije se središte nalazi na mandibuli umjesto FOV-om $78 \times 150 \text{ mm}^2$, doza štitne žlijezde se u slučaju kuta rotacije rendgenske cijevi od 180° smanjuje za 49 %, žlijezda slinovnica za 44 %, a efektivna doza smanjuje se za 47 % te je stoga posebno važno veličinu FOV-a prilagoditi kliničkom pitanju. Rezultati ovog istraživanja ukazuju na potrebu mogućnosti promjene veličine FOV-a od strane korisnika koja bi se prilagodila antropometrijskim značajkama pacijenta.

Na doze organa i na efektivnu dozu veliki utjecaj ima i položaj središta FOV-a (Tablica 3 i slike 5 - 10.). Čak se i u slučaju najmanjeg FOV-a ($50 \times 50 \text{ mm}^2$) za kut rotacije rendgenske cijevi od 180° pri promjeni položaja središta FOV-a s prednjeg zuba na kutnjak maksile primjećuje povećanje doze štitne žlijezde, žlijezda slinovnica, ekstratorakalne regije i efektivne doze od 47 %, 50 %, 15 % i 31 %, respektivno. U slučaju premještanja središta istog FOV-a smještenog na mandibuli s prednjeg zuba na kutnjak, promjene su još izraženije te se navedene doze povećavaju za 62 %, 53 %, 39 % i 47 % (Slika 5). Za kut rotacije rendgenske cijevi od 360° promjene su manje izražene; navedene doze se povećavaju za 0,3 %, 6 %, 3 % i 3 % s premještanjem položaja središta FOV-a s prednjeg zuba na maksili,

odnosno za 4 %, 4 %, 2 % i 4 % na mandibuli što je također posljedica činjenice da tijekom rotacije od 360° cijev rotira i ispred pacijenta (Slika 6). Rezultati pomicanja središta FOV-a veličine 75 × 150 mm² i 130 × 150 mm² po z-osi (Slike 7 - 10.) dodatno ukazuju na važnost pravilnog pozicioniranja s obzirom na to da se doza štitne žlijezde i efektivna doza bitno povećavaju njegovim spuštanjem prema mandibuli te one u slučaju položaja na mandibuli mogu biti veće i do 3,7 puta (štitnjača), odnosno za 70 % (efektivna doza). Ove promjene će u kliničkoj praksi ovisiti o antropometrijskim značajkama pojedinog pacijenta. Dodatno, zbog male udaljenosti cijevi rendgenskog uređaja od pacijenta, valja naglasiti da prilikom odabira položaja FOV-a, osim doze pojedinih organa i efektivne doze u vidu treba imati i činjenicu da je zbog divergencije rendgenskog snopa kvaliteta snimke lošija što je snimano područje dalje od središnje osi snopa.

I doze organa i efektivna doza linearno se povećavaju povećanjem umnoška struje i vremena ozračivanja (Tablice 4 i 5).

Iako ne doprinosi efektivnoj dozi, u okviru ovog istraživanja ispitani su i utjecaji pojedinih parametara snimanja i na dozu očne leće s obzirom na to da se uz dozu očne leće vežu deterministički efekti [8] (Tablice 3 - 5 te Slike 5 - 10). Doze očne leće također ovise o parametrima snimanja i za najčešće kliničke protokole kreću se od 13 μGy do 1444 μGy u slučaju kuta rotacije rendgenske cijevi od 180°, od 14 μGy do 2343 μGy u slučaju kuta rotacije rendgenske cijevi od 360°. Dobiveni rezultati potvrđuju da se ni u slučaju ponovljenih CBCT postupaka ne može dosegnuti prag za determinističke efekte, a kako je to navedeno u prethodnoj studiji [16].

ZAKLJUČAK

Veličini FOV-a i njegov položaj treba prilagoditi kliničkom pitanju i antropometrijskim značajkama pacijenta jer bitno utječu na doze organa i efektivnu dozu pacijenta, posebice doze štitne žlijezde i žlijezda slinovnica.

Ukoliko rendgenski uređaj to omogućuje, za kut rotacije rendgenske cijevi trebalo bi odabirati 180° jer se na taj način ne umanjuje kvaliteta snimke, a može se bitno smanjiti ozračenje organa koji najviše doprinose efektivnoj dozi (štitna žlijezda, žlijezde slinovnice i ekstratorakalna regija).

S obzirom na to da doze organa i efektivna doza linearno prate promjene umnoška struje i vremena ozračivanja, kad god nije nužno potrebno, predlaže se koristiti što je moguće manji, a u skladu s kliničkim pitanjem.

Rezultati ovog istraživanja potvrđuju da se ni u slučaju ponovljenih postupaka dentalnim CBCT uređajem ne može dosegnuti prag za determinističke efekte vezane uz očnu leću.

Zahvala

Rad je izrađen uz financijsku potporu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku putem projekta ZUP-2018-15.

LITERATURA

- [1] Scarfe WC, Farman AG. What is Cone-Beam CT and How Does it Work? Vol. 52, Dental Clinics of North America. 2008. p. 707–30.
- [2] Scarfe WC, Angelopoulos C, editors. Maxillofacial Cone Beam Computed Tomography. 1st ed. Springer International Publishing; 2018. XIX, 1242.
- [3] Goorley T. MCNP6. 1.1-beta release notes. Los Alamos National Laboratory Technical Report. 2014;

- [4] Kralik I, Faj D, Lauc T, Škarica M, Popić J, Brkić H. Dose area product in estimation of effective dose of the patients undergoing dental cone beam computed tomography examinations. *Journal of Radiological Protection* 2018;38(4):1412–27.
- [5] Zubal IG, Harrell C, Smith E. Zubal phantom data. *Voxel-based anthropomorphic phantoms*. 2003;
- [6] Zubal IG, Harrell CR, Smith EO, Smith AL, Krischlunas P. Two dedicated software, voxel-based, anthropomorphic (torso and head) phantoms. In: *Proceedings of an International Workshop on Voxel Phantom Development held at the National Radiological Protection Board, Chilton, UK*. 1995. p. 6–7.
- [7] ICRU. *Neutron Interaction Data for Body Tissues*. ICRU Report. 1992;46:1–8.
- [8] ICRP. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 103. 2007;ICRP 37(2–4).
- [9] Kramer R, Houry HJ, Vieira JW, Kawrakow I. Seletal dosimetry in the MAX06 and FAX06 phantoms for external exposure to photons based on vertebral 3D-microCT images. *Physics in Medicine & Biology* 2006;51:6265–89.
- [10] Lee C, Lee C, Shah AP, Bolch WE. An assessment of bone marrow and bone endosteum dosimetry methods for photon sources. *Physics in Medicine & Biology*. 2006;51:5391–407.
- [11] Zankl M, Fill U, Petoussi-Henss N, Regulla D. Organ dose conversion coefficients for external photon irradiation of male and female voxel models. *Physics in Medicine & Biology* 2002;47:2367–85.
- [12] Zhang G, Marshall N, Bogaerts R, Jacobs R, Bosmans H. Monte Carlo modeling for dose assessment in cone beam CT for oral and maxillofacial applications. *Medical Physics* 2013;40:072103.
- [13] Pauwels R, Zhang G, Theodorakou C, Walker A, Bosmans H, Jacobs R, et al. Effective radiation dose and eye lens dose in dental cone beam CT: effect of field of view and angle of rotation. *The British Journal of Radiology* 2014;87:20130654.
- [14] Pauwels R, Beinsberger J, Collaert B, Theodorakou C, Rogers J, Walker A, et al. Effective dose range for dental cone beam computed tomography scanners. *European Journal of Radiology* 2012;81:267–71.
- [15] Ludlow JB, Timothy R, Walker C, Hunter R, Benavides E, Samuelson DB, et al. Effective dose of dental CBCT—a meta analysis of published data and additional data for nine CBCT units. *Dentomaxillofacial Radiology* 2015;44(1):20140197.
- [16] Morant JJ, Salvadó M, Hernández-Girón I, Casanovas R, Ortega R, Calzado A. Dosimetry of a cone beam CT device for oral and maxillofacial radiology using Monte Carlo techniques and ICRP adult reference computational phantoms. *Dentomaxillofacial Radiology* 2013;42(3):92555893.

INFLUENCE OF SCANNING PARAMETERS ON ORGAN DOSES AND EFFECTIVE DOSE OF THE PATIENT UNDERGOING DENTAL CBCT EXAMINATIONS

Ivana Kralik¹, Tomislav Lauc^{2,3,4,5,6}, Hrvoje Brkić^{3,7}, Dario Posedel⁸, Hrvoje Vavro¹, Jelena Popić^{9,10}, Ivana Rupičić⁵, Dario Faj^{3,7}

¹University hospital Dubrava, Zagreb, Croatia

²Faculty of Social Sciences and Humanities, University of Zagreb, Zagreb, Croatia

³Faculty of Dental Medicine and Health, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Osijek, Croatia

⁴ Faculty of Dentistry, University of Sarajevo, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

⁵Dental Clinic Apolonija, Zagreb, Croatia

⁶Imaging center dr. Lauc, Varaždin, Croatia

⁷Faculty of Medicine, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Osijek, Croatia

⁸QA MED, Osijek, Croatia

⁹University hospital Merkur, Zagreb, Croatia

¹⁰Faculty of Medicine, University of Zagreb, Zagreb, Croatia

ikralik@kbd.hr

Cone beam computed tomography (CBCT) used in dental medicine results in complex dose distributions owing to different performance of devices and examination procedures. The aim of this study is to examine the influence of scanning parameters on organ doses and effective dose of the patient undergoing dental CBCT examinations.

Investigation was performed by the use of Monte Carlo simulation. CBCT dental unit was simulated using Monte Carlo N-Particle transport code (MCNP® 6.1.1beta). For calculation of organ doses and for the assessment of effective doses computational anthropomorphic phantom was used („Zubal“). Most often clinical protocols involving different exposure geometries including sizes and positions of FOVs, 180° and 360° X-ray tube rotation angles and different tube current-exposure time products (mAs) were simulated.

Organ doses in all simulated CBCT protocols ranged from 55 µGy (brain) to 4119 µGy (bone surface) and effective doses from 31 µSv to 214 µSv, depending on scanning parameters. In average, thyroid gland has the highest contribution to the effective dose (31 %) followed by salivary glands (25 %) and extra thoracic region (21 %).

Results of this study indicate importance of careful choice of FOV's size and its position in optimisation of CBCT procedures considering clinical question and anthropometric features of the patient since size and position of FOV have great impact on organ doses and effective dose, especially on thyroid gland and salivary glands. Choosing 180° for the X-ray tube rotation angle instead of 360° would not decrease image quality but may significantly decrease doses of the organs contributing the most to the effective dose.

Due to linear dependence of organ doses and effective dose on mAs, whenever possible lowest mAs should be used, considering level of the image quality required.

USPJEŠNOST ZAŠTITE DOJKE IZVAN PRIMARNOG PODRUČJA SNIMANJA U SLIKOVNOJ DIJAGNOSTICI ABDOMENA KOMPJUTERIZIRANOM TOMOGRAFIJOM – PRELIMINARNI REZULTATI

Nikola Ivan Leder¹, Jelena Popić¹, Željka Knežević², Vinko Vidjak¹

¹Klinička Bolnica Merkur, Zagreb

²Institut Ruđer Bošković, Zagreb

nikola.leder@gmail.com

UVOD

Zadnjih je desetljeća nagli razvoj kompjutorizirane tomografije (CT) doveo do velikog napretka kvalitete dobivenih dijagnostičkih informacija. Kvaliteta dijagnostičkog prikaza koja omogućuje precizniju dijagnostiku značajno je porasla uvođenjem višeslojnih uređaja (MDCT, MSCT) i mogućnostima multiplanarnih prikaza i rekonstrukcija i primjenom automatskog injektora koji je omogućio snimanja u više faza. Posljedično, suvremena slikovna dijagnostika patoloških stanja i bolesti abdomena osim standardnog rendgenskog snimanja abdomena nativno i ultrazvučnih snimanja podrazumijeva sve češću uporabu CT oslikavanja. Ova su oslikavanja prema modernim dijagnostičkim smjernicama često metoda prvog izbora u inicijalnim obradama nekih entiteta u abdomenu, a osobito metoda izbora u praćenju onkoloških pacijenta [1–5]. Kao posljedica bolje dijagnostičke informacije javio se međutim i trend porasta doza ionizirajućeg zračenja u domeni dijagnostičke radiologije, posebno CT dijagnostike. Prema literaturnim podacima oko 50 % ukupne doze iz medicinskih izvora zračenja otpada na doze prilikom CT pretraga [6,7].

Velik broj literaturnih podataka postoji o ozračenju tkiva i organa u polju snimanja. Problem doza odnosi se na ozračenje tkiva i organa u polju snimanja i o njemu postoji veliki broj literaturnih podataka. Literaturni podaci navode brojne tehnike i metode koje se primjenjuju sa ciljem smanjenja doze, takozvane metode optimizacije CT pregleda. Modulacijom jakosti struje i napona [4,8,9], ali i programskim rješenjima koja koriste naknadnu obradu slike („*post-processing*”) poput algoritama iterativne rekonstrukcije [10–12] moguće je prilagoditi način snimanja dijagnostičkom zahtjevu i antropometrijskim karakteristikama pacijenta uz smanjenje doza na organe i tkiva u primarnom snopu.

Za razliku od dobro istraženih načina smanjenja doza na tkiva u snopu i dalje ostaje problem doza koje primaju organi i tkiva izvan primarnog snopa snimanja, u slučaju kad sami ti organi nisu od interesa za dijagnostiku. Osobiti problem predstavljaju radiosenzitivna tkiva i organi te je upravo to tema ovog istraživanja.

Prema literaturnim podacima doza kojoj se izlaže dojka prilikom snimanja prsišta („*in-plane*”) odnosno kada se nalazi u primarnom snopu kreće se od 14 do 89,1 mGy. Navode se međutim i velike razlike prisutne zbog primjene različitih uređaja i protokola snimanja [13–18].

Apsorbirane doze izmjerene na dojci također su visoke i prilikom CT snimanja drugih regija tijela kada dojke nisu u primarnom snopu zračenja („*out-of-plane*”). Te su doze uzrokovane raspršenim i sekundarnim zračenjem, a kreću se od 0,15 – 28 mGy [19–24]. Kao što niz autora navodi i kod snimanja van polja doze su i dalje značajne u usporedbi sa dozama od 1,86 – 3 mGy prilikom uobičajenog mamografskog pregleda [25–27]. U literaturi se nalaze podaci kako doza od 0.01 Gy na dojku žene mlađe od 35 godina približno 14 % povisuje rizik od razvoja karcinoma dojke u odnosu na bazalni rizik [28]. Stoga je očigledno kako su doze na dojku kada je izvan primarnog snopa prilikom snimanja značajne i nipošto zanemarive.

Radovi koji su do sada istraživali pokrivala dojke pokazali su da je korištenjem površinske zaštite postignuto značajno smanjenje izmjerene apsorbirane doze na površini dojke u oba slučaja: i kada je dojka u primarnom snopu zračenja i kada se radi o snimanju drugog dijela. Rezultati učinkovitosti zaštitnog pokrivala za dojke pokazuju smanjenje doze zračenja 16,2 – 76 % u ovisnosti od korištenog protokola [14–20,22,24]. Važno je istaknuti da primjena zaštitnih pokrivala u području snimanja (npr. zaštita dojki prilikom pretrage CT prsišta) inherentno smanjuje kvalitetu dobivenih snimki jer značajno utječe na vidljivost struktura prsišta koje se trebaju prikazati. Dodatni je problem nužnost stavljanja zaštite nakon inicijalnog snimanja tzv. topograma odnosno plana CT pregleda jer tada nastaje interakcija s automatskom kontrolom ekspozicije, pa se i produljuje vrijeme snimanja [17]. Dostupni radovi o primjeni pokrivala za dojke kada su u primarnom snopu međusobno su kontroverzni [17,29], pa niti primjena zaštitnih pokrivala kada su dojke u primarnom snopu nije postala uobičajenom u kliničkoj praksi.

S druge strane, uloga je zaštitnih pokrivala primijenjenih na organe izvan primarnog snopa apsorbirana raspršenog i sekundarnog zračenja (osim onog raspršenog zračenja unutar tijela pacijenta, na koje ovom metodom ne možemo utjecati) Ovako primijenjeno pokrivalo ne utječe na kvalitetu dobivenih snimki i ne produljuje vrijeme snimanja.

Malo je dostupnih literaturnih podataka o primjeni pokrivala za dojke kod snimanja drugih dijelova tijela, a u svim publiciranim radovima [17,19,20,22,23] istraživane su mogućnosti zaštite dojke prekrivanjem dojki s prednje strane. Obzirom na tehniku rada CT uređaja gdje se RTG cijev kao izvor zračenja rotira 360° oko tijela pacijenta, pretpostavka je kako će primjena zaštitnog pokrivala na način omatanja cijelog prsišta pokrivalom pokazati značajniju učinkovitost i veće smanjenje doze zračenja na dojku prilikom snimanja abdomena, kada dojka nije u primarnom snopu, u odnosu na samo prednju zaštitu. Pretraživanjem dostupne literature nije se našlo podataka o primjeni ovakve zaštite te je ovo prema saznanjima autora prvi rad koji istražuje učinkovitost primjene zaštitnog pokrivala omatanjem cijelog prsišta kod CT snimanja izvan primarnog snopa.

Za procjenu učinkovitosti novog pokrivala za dojke u ovom istraživanju mjerene su doze na dojke kod snimanja abdomena, TLD dozimetrima.

Doze kojima su izloženi pacijenti prilikom CT pregleda moguće je mjeriti direktnom dozimetrijom ili koristeći dozne parametre CT uređaja odnosno „*CT dose index*“ (CTDI) i „*dose length product*“ (DLP), a u konačnici se izražavaju kao efektivna doza na organ [30]. Metoda izračuna doze na temelju vrijednosti DLP-a ne može se koristiti za izračun doze na dojke u ovom istraživanju obzirom se dojke nalaze van polja snimanja.

MATERIJALI I METODE

ISPITANICI

Inicijalna mjerenja u ovoj studiji su provedena na 28 pacijentica podijeljenih u tri grupe: bez zaštite, sa anteriornom zaštitom te sa novim zaštitnim pokrivalom.

Istraživanje je provedeno na pacijenticama obrađivanih kompjuteriziranom tomografijom abdominalne regije u KB Merkur. Svim pacijenticama zabilježene su visina, masa i BMI i podijeljene su u tri skupine.

U ispitivanje su bile uključene pacijentice starije od 18 godina. Kriteriji isključenja su:

- sve anatomske anomalije (npr. stanje nakon mastektomije, prethodni kirurški zahvati, kifoskolioza),
- implantati dojki,
- prisutnost stranih tijela u predjelu regije prsišta ili abdomena (npr. osteosintetski materijal),
- prisutnost kontrastnog sredstva u probavnoj cijevi od prethodnih pretrage,

- pacijenti u lošem kliničkom stanju kod kojih bi manipulacija s dozimetrima mogla produljiti boravak na radiološkom odjelu ili bi omatanje prsišta moglo otežati disanje ili onemogućiti hitne mjere pomoći pacijentu u slučaju pogoršanja stanja ili reakcije na kontrastno sredstvo.

Ispitanice su uključivane postupkom slučajnog odabira. Obzirom na visok protok pacijenata kroz odjel, generirana je se randomizacijska lista s dvije moguće vrijednosti – uključiti i ne uključiti. Kako bi se postigao odgovarajući broj ispitanica u vremenu predviđenom za provođenje ispitivanja, lista je bila generirana u omjeru uključiti/ne uključiti od 1:20, kako bi prosječna vjerojatnost izbora ispitanice bila 5 %.

Pacijentice su bile uključene u ovo ispitivanje isključivo nakon davanja suglasnosti uz potpis informiranog pristanka kojeg je odobrilo etičko povjerenstvo ustanove.

Za zaštitu dojke korištena je posebno skrojena zaštitna pregača ekvivalenta debljine olovnog sloja 0,5 mm koja pruža zaštitu cijelim opsegom prsišta (Slika 1). Ova zaštitna pregača se razlikuje od svih do sada korištenih u dostupnoj literaturi upravo u pružanju zaštite cijelom opsegom tijela, kao i od komercijalno dostupne zaštitne opreme, a koja pruža samo zaštitu sa prednje strane tijela.



Slika 1. Zaštitna pregača

Pregača ujedno pozicionira dojke koje su spuštene i fiksira ih izvan polja snimanja. Koristi se na način da potpuno priliježe uz dojke i prsište i čvrsto drži dojke obzirom na posebno osmišljenu čičak traku. Na taj se način pregača u svakom trenutku i za sve ispitanice nalazi izvan primarnog polja snimanja kako ne bi utjecala na sustav automatske modulacije struje na RTG cijevi.

Snimanje kompjuteriziranom tomografijom vršeno je na multi detektorskom, 64 slojnom CT uređaju Toshiba Aquilion TSX 101A uz OptiVantage DH sustav injektora za kontrastno sredstvo. Sva snimanja su rađena prema standardnim protokolima Kliničkog zavoda za dijagnostičku i intervencijsku radiologiju KB Merkur, ovisno o kliničkoj indikaciji za pojedini pregled. Kod svih snimanja primjenjena je automatska modulacija jačine struje. Za mjerenja doza korišteni su tkivu ekvivalentni termoluminescentni dozimetri LiF: Mg, Ti (TLD-100). U svakom krugu mjerenja korišteni su kontrolni i kalibracijski dozimetri. Kalibracijski dozimetri pakirani su na isti način kao i za mjerenje na pacijentima, i zračeni na izvoru ^{137}Cs dozom od 5 mGy izraženom kao kerma u zraku.

Prilikom snimanja dozimetri su smješteni na dojke u visini gornjeg lateralnog kvadranta dojke (mjesto najveće gustoće žljezdanog parenhima). Dozimetar je pozicioniran na površini tijela za kontrolnu skupinu u kojoj se mjeri ulazna doza bez primjene zaštite (danas standardna praksa) te iznad i ispod zaštitne pregače, u istoj visini u ostalim skupinama ispitanika.

REZULTATI

Nakon što su prikupljeni preliminarni podaci, izmjerenih doza normalnost razdiobe ispitana je Kolmogorov-Smirnovljevim i Shapiro-Wilksovim testom. Obzirom na značajno odstupanje prikupljenih vrijednosti od normalne razdiobe, podaci su analizirani odgovarajućim neparametrijskim metodama (Kruskal Wallis za pregled značajnosti razlika između triju skupina odn. Mann Whitney za usporedbu skupina sa anteriornim i cirkumferentnim pokrivalom te za post-hoc analizu rezultata Kruskal Wallisovog testa).

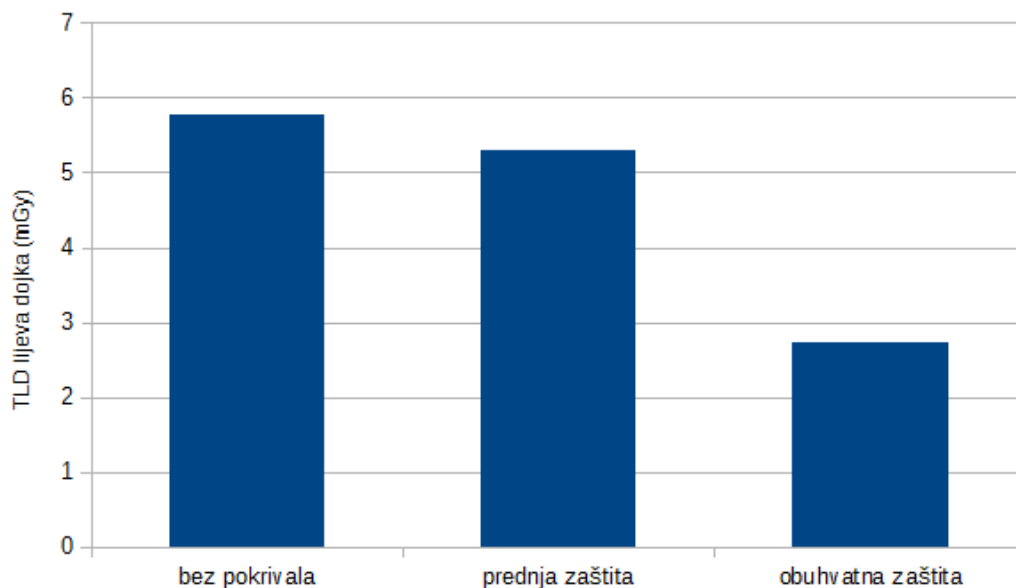
Uvidom u dobivene snimke četiri pacijentice su isključene iz istraživanja. Izmjerene vrijednosti na dojka bez zaštite po seriji iznosile su od 0,97 – 17,42 mGy bez zaštite, 1,53 – 13,43 mGy sa prednjom zaštitom, odnosno 0,81 – 7,57 mGy sa obuhvatnom zaštitom (Tablica 1). Uspješnost redukcije doze analizirali smo usporedbom dobivenih vrijednosti za svaku dojku zasebno.

Dobiveni rezultati unatoč malom uzorku potvrđuju hipotezu da opisana zaštita značajnije umanjuje apsorbiranu dozu u odnosu na primjenu samo anteriornog zaštitnog pokrivala. Usporedbom izmjerenih vrijednosti, prosječna redukcija doze sa prednjom zaštitom u našoj studiji je 23 %, a uz primjenu cirkumferentne zaštite 53 %. Kako bi umanjili utjecaj varijacije antropometrijskih značajki i razlika u protokolu prilikom snimanja, redukciju doze možemo gledati kroz omjer doze izmjerene na dozimetru pozicioniranom na dojku i na visinu ksifoidnog nastavka prsne kosti, a koji je uvijek unutar primarnog snopa zračenja. Ovakvom analizom dobivamo ukupno redukciju doze od 42 % kod primjene prednje zaštite, odnosno uz primjenu cirkumferentne zaštite 57 %.

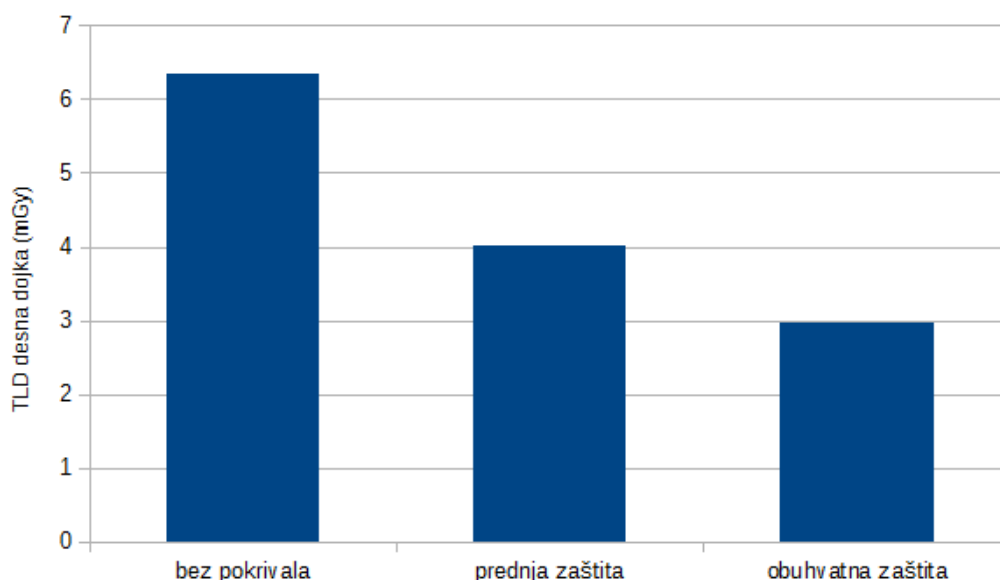
Za analizu rezultata ove pilot studije upotrijebljen je softverski paket NCSS/PASS (Hintze, J. (2011). PASS 11. NCSS, LLC. Kaysville, Utah, USA. www.ncss.com). Koristeći metodologiju po Machinu i Zaru [31,32] uz traženu snagu testa ($1-\beta$) od 90 % i razinu statističke značajnosti (α) od 0,05, tražena veličina uzorka je 21 pacijentica po skupini. Promatrajući manje povoljan slučaj, desnu dojku gdje su srednje vrijednosti bliže a standardne devijacije veće, korištenjem identične metodologije dobiva se tražena veličina uzorka od 28 pacijentica (Slika 2,3).

Tablica 1. Izmjerene vrijednosti TLD u grupama

		Min (mGy)	Max (mGy)	M	SD	Med
bez pokrivala	lijeva dojka	0,97	17,425	5,778	5,765	2,5625
	desna dojka	1,365	14,47	6,349	5,098	4,407
	ksifoid	9,49	54,25	26,629	15,992	20,79
prednja zaštita	lijeva dojka	1,695	13,43	5,285	4,13	3,98
	desna dojka	1,535	10,89	4,001	3,177	3,26
	ksifoid	16,93	57,24	32,782	16,022	28,95
obuhvatna zaštita	lijeva dojka	0,865	5,8	2,737	1,7	2,207
	desna dojka	0,815	7,57	2,975	2,322	2,37
	ksifoid	9,955	58,98	28,497	18,117	23,0475



Slika 2. Izmjerene doze na lijevoj dojci (mGy)



Slika 3. Izmjerene doze na desnoj dojci (mGy)

ZAKLJUČAK

Dobiveni preliminarni rezultati potvrđuju hipotezu da primjena obuhvatne zaštite oko prsišta značajno doprinosi redukciji doze na tkivo dojke kod snimanja abdomena, a koja je značajna čak i kada su dojke u cijelosti izvan primarnog snopa zračenja. Kako smo u inicijalnim mjerenjima potvrdili hipotezu nastavljamo sa istraživanjem na većoj populaciji pacijenata.

Ograničenja ove studije su što su sva mjerenja rađena na jednom CT skeneru u jednoj ustanovi te što ispitanice nisu selektirane po grupama obzirom na antropometrijske značajke (BMI, opseg grudi, postotak žlijezdanog tkiva) što ostavlja mogućnosti daljnjih istraživanja. Ovo istraživanje ne uzima u obzir izvor zračenja na dojku (iz tijela ili izvan tijela) što istražujemo in vitro mjerenjima na antropomorfnom fantomu.

LITERATURA

- [1] Amis ES, Butler PF, Applegate KE, Birnbaum SB, Brateman LF, Hevezi JM, et al. American College of Radiology white paper on radiation dose in medicine. *J Am Coll Radiol* 2007;4(5):272–84.
- [2] Jarry G, DeMarco JJ, Beifuss U, Cagnon CH, McNitt-Gray MF. A Monte Carlo-based method to estimate radiation dose from spiral CT: from phantom testing to patient-specific models. *Phys Med Biol* 2003;48(16):2645.
- [3] ICRP. ICRP PUBLICATION 87: Managing patient dose in computed tomography. *Ann ICRP* 2000;30(4):7
- [4] ICRP. ICRP PUBLICATION 102: Managing Patient Dose in Multi-Detector Computed Tomography (MDCT). *Ann ICRP* 2007;37(1)
- [5] Smith-Bindman R, Miglioretti DL, Larson EB. Rising use of diagnostic medical imaging in a large integrated health system. *Heal Aff* 2008;27(6):1491–502.
- [6] UNSCEAR. SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION. Vol. I. New York; 2000.
- [7] Thomson FJ, Paulson EK, Yoshizumi TT, Frush DP, Nelson RC. Single versus multi-detector row CT: comparison of radiation doses and dose profiles. *Acad Radiol* 2003;10(4):379–85.
- [8] Popić Ramac J, Knezevic Z, Hebrang A, Kristo DR, Vidjak V, Slavica M, et al. Radiation dose reduction by using low dose CT protocol of thorax. *Radiat Meas* 2013;55(0):46–50.
- [9] Lee CH, Goo JM, Ye HJ, Ye SJ, Park CM, Chun EJ, et al. Radiation dose modulation techniques in the multidetector CT era: from basics to practice. *Radiographics* 2008;28(5):1451–9.
- [10] Hara AK, Wellnitz C V, Paden RG, Pavlicek W, Sahani D V. Reducing body CT radiation dose: beyond just changing the numbers. *AJR Am J Roentgenol* 2013;201(1):33–40.
- [11] Litmanovich DE, Tack DM, Shahrzad M, Bankier AA. Dose Reduction in Cardiothoracic CT: Review of Currently Available Methods. *Radiographics* 2014;34(6):1469–89.
- [12] Sodickson A. Strategies for reducing radiation exposure in multi-detector row CT. *Radiol Clin North Am* 2012;50(1):1–14.
- [13] Parker MS, Hui FK, Camacho MA, Chung JK, Broga DW, Sethi NN. Female breast radiation exposure during CT pulmonary angiography. *AJR Am J Roentgenol* 2005;185(5):1228–33.
- [14] Parker MS, Kelleher NM, Hoots JA, Chung JK, Fatouros PP, Benedict SH. Absorbed radiation dose of the female breast during diagnostic multidetector chest CT and dose reduction with a tungsten-antimony composite breast shield: preliminary results. *Clin Radiol* 2008;63(3):278–88.
- [15] Yilmaz MH, Albayram S, Ya?ar D, Ozer H, Adaletli I, Selcuk D, et al. Female breast radiation exposure during thorax multidetector computed tomography and the effectiveness of bismuth breast shield to reduce breast radiation dose. *J Comput Assist Tomog.* 2007;31(1):138–42.
- [16] Yilmaz MH, Ya?ar D, Albayram S, Adaletli I, Ozer H, Ozbayrak M, et al. Coronary calcium scoring with MDCT: the radiation dose to the breast and the effectiveness of bismuth breast shield. *Eur J Radiol* 2007;61(1):139–43.
- [17] Catuzzo P, Aimonetto S, Fanelli G, Marchisio P, Meloni T, Mistretta L, et al. Dose reduction in multislice CT by means of bismuth shields: results of in vivo measurements and computed evaluation. *Radiol Med* 2010;115(1):152–69.

- [18] Einstein AJ, Elliston CD, Groves DW, Cheng B, Wolff SD, Pearson GD, et al. Effect of bismuth breast shielding on radiation dose and image quality in coronary CT angiography. *J Nucl Cardiol* 2012;19(1):100–8.
- [19] Beaconsfield T, Nicholson R, Thornton A, Al-Kutoubi A. Would thyroid and breast shielding be beneficial in CT of the head? *Eur Radiol.* 1998;8(4):664–7.
- [20] Brnic Z, Vekic B, Hebrang A, Anic P. Efficacy of breast shielding during CT of the head. *Eur Radiol* 2003;13(11):2436–40.
- [21] Hurwitz LM, Yoshizumi TT, Reiman RE, Paulson EK, Frush DP, Nguyen GT, et al. Radiation dose to the female breast from 16-MDCT body protocols. *AJR Am J Roentgenol* 2006;186(6):1718–22.
- [22] Chung JJ, Cho ES, Kang SM, Yu JS, Kim DJ, Kim JH. Usefulness of a lead shielding device for reducing the radiation dose to tissues outside the primary beams during CT. *Radiol Med* 2014;
- [23] Fordham LA, Brown ED, Washburn D, Clark RL. Efficacy and feasibility of breast shielding during abdominal fluoroscopic examinations. *Acad Radiol.* 1997;4(9):639–43.
- [24] Gunn ML, Kanal KM, Kolokythas O, Anzai Y. Radiation dose to the thyroid gland and breast from multidetector computed tomography of the cervical spine: does bismuth shielding with and without a cervical collar reduce dose? *J Comput Assist Tomogr* 2009;33(6):987–90.
- [25] Liu B, Goodsitt M, Chan HP. Normalized average glandular dose in magnification mammography. *Radiology* 1995;197(1):27–32.
- [26] Hendrick RE, Pisano ED, Averbukh A, Moran C, Berns EA, Yaffe MJ, et al. Comparison of acquisition parameters and breast dose in digital mammography and screen-film mammography in the American College of Radiology Imaging Network digital mammographic imaging screening trial. *AJR Am J Roentgenol.* 2010;194(2):362–9.
- [27] Gennaro G, di Maggio C. Dose comparison between screen/film and full-field digital mammography. *Eur Radio.* 2006;16(11):2559–66.
- [28] Remy-Jardin M, Remy J. Spiral CT angiography of the pulmonary circulation. *Radiology* 1999;212(3):615–36.
- [29] Geleijns J, Salvado Artells M, Veldkamp WJ, Lopez Tortosa M, Calzado Cantera A. Quantitative assessment of selective in-plane shielding of tissues in computed tomography through evaluation of absorbed dose and image quality. *Eur Radiol* 2006;16(10):2334–40.
- [30] Martin CJ. Effective dose: how should it be applied to medical exposures? *Br J Radiol* 2007;80(956):639–47.
- [31] Machin D, Campbell MJ, Tan SB, Tan SH. *Sample Size Tables for Clinical Studies*, 3rd Edition. Blackwell Science, Malden, MA; 2009.
- [32] Zar JH. *Biostatistical Analysis (Second Edition)*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey; 1984.

EFFECTIVENESS OF BREAST SHIELDING DEVICE IN OUT-OF-PLANE COMPUTERIZED TOMOGRAPHY IMAGING OF THE ABDOMEN – PRELIMINARY RESULTS

Nikola Ivan Leder¹, Jelena Popić¹, Željka Knežević², Vinko Vidjak¹

¹Clinical Hospital Merkur, Zagreb, Croatia

²Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

nikola.leder@gmail.com

ABSTRACT

Aim:

To achieve significant reduction in breast dose during abdominal CT examinations (when breasts are outside of the primary imaging plane) with the use of a shielding device.

Materials and methods:

A custom-tailored shielding device was used which covers the thoracic region in the entire circumference, unlike the currently available anterior protection. Radiation dose was measured using TL dosimeters placed on the surface and below the shielding device. Baseline values were measured by dosimetry in the control group.

Measurements were done in patients admitted for regular abdominal CT examinations with signed informed consent for study inclusion. All female patients with no anatomical anomalies were included in the study.

Expected results:

As expected, according to literature data, measured absorbed doses on the breasts were above the threshold that epidemiological studies determine as increased risk for development of breast cancer, although they were not in the primary imaging plane. Measured average dose reduction with anterior shielding in our study was 42 % and with circumferential shielding was 57 % compared to the doses measured in the control group with no shielding.

KEYWORDS

Breast, Multidetector Computed Tomography, Radiation Protection, Radiation Dose, Thermoluminescent Dosimetry

RADIOEKOLOGIJA

RADIOECOLOGY

ISTRAŽIVANJE KONTAMINACIJE PILETINE RADIOCEZIJEM U SJEVEROZAPADNOJ HRVATSKOJ

Gina Branica, Zdenko Franić, Gordana Marović
Institut za medicinska istraživanja i medicine rada, Zagreb
gina.branica@imi.hr

UVOD

Radioaktivne tvari prisutne u okolišu nastaju prirodnim procesima ili su posljedica ljudske djelatnosti. Kontaminacija životne sredine umjetno stvorenim radionuklidima, tj. fizijskim produktima, a time i kontaminacija ciklusa animalne proizvodnje događa se već nekoliko desetljeća.

Najveće zagađenje okoliša fizijskim produktima datira od vremena intenzivnih eksperimenata nuklearnog oružja u atmosferi u periodu 1954.-1958. godine te 1961.-1962. godine i to zbog depozicije radioaktivnih oborina (*fallout*) na površinu Zemlje. Zbog kemijske sličnosti kaliju radioaktivni izotopi cezija nakupljaju se u mesu.

U Republici Hrvatskoj radioekološka istraživanja koncentracija aktivnosti fizijskih i prirodnih radionuklida provodi Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Jedinica za zaštitu od zračenja, kao dio ekstenzivnog programa monitoringa radioaktivne kontaminacije okoliša u Republici Hrvatskoj koji je započet još 1959. godine. Rezultati se objavljuju u redovnim godišnjim izvještajima [1-4]. Program se provodi pod nadzorom Državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost i harmoniziran je s EU praksom, odnosno preporukama Europske komisije iz 2000. godine o primjeni Članka 36 ugovora Euratom [5]. Regularno praćenje i istraživanje radioaktivnog onečišćenja peradi i jaja provode se od 1987. godine, odmah nakon černobilske havarije. U radu su prikazani rezultati višedesetljetnog ispitivanja koncentracija aktivnosti ^{137}Cs u pilećem mesu u periodu od 1987. do 2018. godine.

MATERIJAL I METODE

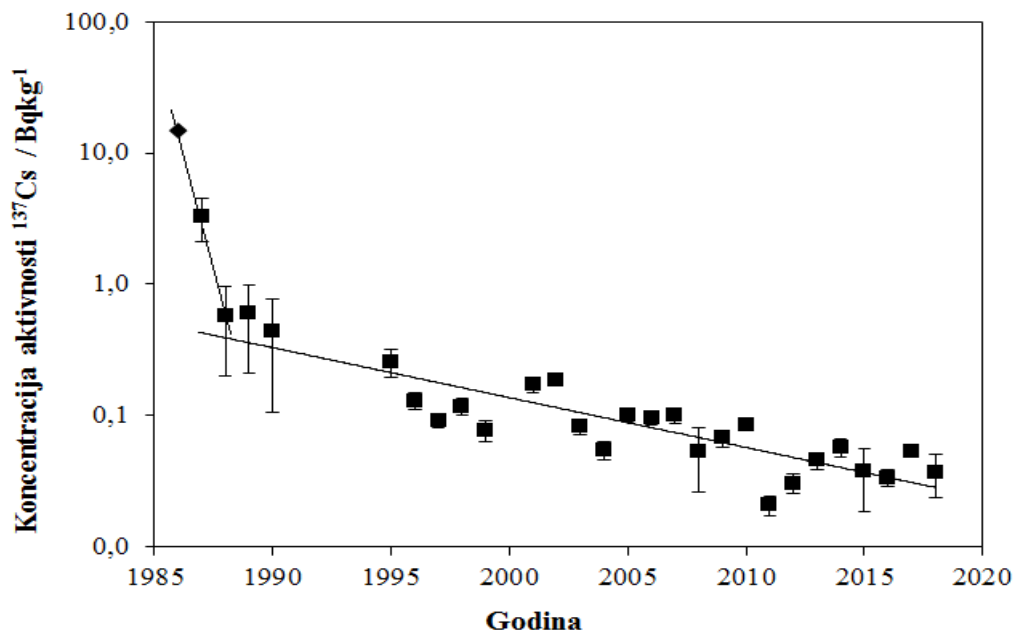
Uzorci pilećeg mesa (5 kg) i jaja (60 komada) nabavljani su na tržnicama sjeverne Hrvatske. Uzorci su spaljeni u mufolnim pećima do pepela od čega je uzet alikvot za analizu. Koncentracija aktivnosti gama-emitera je određena visoko-rezolucijskom gama-spektrometrijskom metodom, akreditiranom sukladno zahtjevima Norme HRN EN ISO/IEC 17025, korištenjem Ge i Ge(Li) detektora spojenih na računalni sustav za analizu spektra.

REZULTATI I RASPRAVA

Nakon černobilske havarije koncentracija aktivnosti ^{137}Cs u pilećem mesu eksponencijalno je padala od $3,30 \pm 0,91 \text{ Bq kg}^{-1}$ u 1987. godini do izmjerenih samo $0,04 \pm 0,01 \text{ Bq kg}^{-1}$ u 2018. godini (Slika 1). Budući da podaci za koncentraciju aktivnosti ^{137}Cs iz 1986. godine nisu bili dostupni, procjena je napravljena iz podataka *fallout-a*. Naime, mjereni podaci za koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u pilećem mesu su dobro korelirani s koncentracijama aktivnosti ^{137}Cs deponiranim na tlo putem *fallout-a*.

Podatak za 1986. godinu za koncentraciju aktivnosti u pilećem mesu procijenjen je iz podataka pomoću jednostavnog regresijskog modela za koncentraciju aktivnosti ^{137}Cs u *fallout-u* (6410 Bq m^{-2}) i iznosi $14,8 \text{ Bq kg}^{-1}$.

Nekoliko godina nakon nesreće u Černobilu (1986.-1988.) uočeno je smanjenje koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u mesu piletine kao i u jajima. Pad koncentracije aktivnosti bio je vrlo brz u usporedbi s periodom koji je slijedio. Isto bimodalno ponašanje u odnosu na vrijeme boravka ^{137}Cs uočeno je i kod druge ispitivane hrane u Republici Hrvatskoj [6].



Slika 1. Koncentracija aktivnosti ^{137}Cs u pilećem mesu u korelaciji s vremenom

Kinetička jednađba prvog reda primijenjena je za parametriziranje vremenskih promjena koncentracija aktivnosti ^{137}Cs u pilećem mesu i mjereni podaci su fitani na eksponencijalnu funkciju:

$$A_h(t) = A_h(0) e^{-kt} \quad (1)$$

gdje je:

$A_h(t)$ vremenski ovisna koncentracija aktivnosti ^{137}Cs u uzorku (Bq kg^{-1}),

$A_h(0)$ početna koncentracija aktivnosti ^{137}Cs u uzorku (Bq kg^{-1})

$\ln(2)/k$ efektivno ekološko poluvrijeme ^{137}Cs u uzorku (godine).

U periodu 1986. - 1988. funkcijskim prilagođavanjem (*fitanjem*) izmjerenih podataka na eksponencijalnu krivulju opisanu jednađbom (1), efektivno ekološko poluvrijeme ^{137}Cs u pilećem mesu procijenjeno na 0,43 god ($r = 0,95$). Međutim, za razdoblje 1988. - 2018., efektivno ekološko poluvrijeme ^{137}Cs u pilećem mesu procijenjeno je na 8,0 godina ($r = 0,88$).

Ispitivani su i podaci za koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u jajima, te je ustanovljena jaka korelacija s vrijednostima za pileće meso ($r = 0,99$).

Efektivna doza primljena uslijed unosa nekog radionuklida tijekom određenog vremenskog perioda zbog konzumacije kontaminirane hrane ovisi o koncentraciji aktivnosti u hrani te konzumiranoj količini. Efektivna doza matematički je prikazana jednađbom:

$$E = C \sum_m D_m^{cf} A_m \quad (2)$$

gdje su:

E efektivna doza u Sv,

C ukupna godišnja *per capita* konzumacija hrane u Bq kg^{-1} ,

D_m^{cf} dozni konverzijski faktor za radionuklid m , tj. efektivna doza po jediničnom unosu koja pretvara ingestiranu aktivnost u efektivnu dozu i

A_m srednja godišnja koncentracija aktivnosti radionuklida m u uzorku (Bq kg^{-1}).

U proračunima je pretpostavljena godišnja konzumacija od 22,8 kg pilećeg mesa [7] za kritičnu populaciju (>17 godina). Dozni konverzijski faktor po jediničnom unosu ingestijom za odraslu osobu za ^{137}Cs je $1,3 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$ [8].

Procijenjena godišnja efektivna doza koju primi odrasla osoba iz hrvatske populacije zbog unosa ^{137}Cs konzumacijom pilećeg mesa vrlo je malena te iznosi 2,0 μSv za cijeli promatrani period tj. 1987. - 2018. Posljedično, može se zaključiti da konzumacija pilećeg mesa nije kritični put za prijenos ^{137}Cs u ljude.

ZAKLJUČAK

Poslije nuklearne nesreće u Černobilu zabilježeno je eksponencijalno smanjivanje koncentracija aktivnosti ^{137}Cs u pilećem mesu. Efektivno ekološko poluvrijeme boravka ^{137}Cs u pilećem mesu procijenjeno je na 8,0 godina. Budući da su koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u pilećem mesu dobro korelirane s koncentracijama aktivnosti u *fallout-u*, to omogućuje razvoj jednostavnog matematičkog modela za predviđanje kontaminacije mesa u slučaju izvanrednih događaja odnosno nuklearnih nesreća.

Općenito, nekoliko godina nakon nuklearne nesreće u Černobilu, koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u pilećem mesu bile su vrlo malene, a koncentracije aktivnosti ^{134}Cs su već 1987 godine bile ispod razine detekcije. Posljedično, doze koje primi opća populacija uslijed ozračivanja ^{137}Cs unesenog u organizam konzumacijom pilećeg mesa su vrlo niske.

Može se zaključiti da u Republici Hrvatskoj konzumacija pilećeg mesa nije kritični put prijenosa radiocezija u ljude.

Monitoring uzoraka iz okoliša kako bi se ispitala sukladnost s akumuliranom maksimalnom koncentracijom aktivnosti izraženom kao ukupna koncentracija aktivnosti ^{134}Cs i ^{137}Cs od 600 Bq kg^{-1} za sve prehrambene proizvode, osim mlijeka, kako je uvjetovano u preporukama Europske komisije (EC) No 733/2008 od 15. srpnja 2008. [9], implicira svojevrsni binarni pristup u procjeni rizika od prisutnosti radionuklida u proizvodima namijenjenim ljudskoj prehrani (ispod/iznad propisane granica odnosno ima/nema kontaminacije). Međutim, napredak u razvoju instrumentacije koji je omogućio smanjivanje granica detekcije gamaspektrometrijskih uređaja, otvaraju mogućnost dobivanja konkretnih validiranih podataka o koncentracijama aktivnosti različitih radionuklida u prehrambenim proizvodima i posljedično, dozimetrijsku analizu i procjenu rizika. To pak omogućuje analizu trendova koncentracija aktivnosti ispitivanih radionuklida i provedbu prikladnih mjera zaštite.

LITERATURA

- [1] Popović V (Ed.) Environmental Radioactivity in Yugoslavia, Annual Reports 1965–1977. Federal Committee for Labour, Health and Social Welfare. Belgrade: 1966–1978. Croatian.
- [2] Bauman A, Cesar D, Franić Z, Kovač J, Lokobauer N, Marović G, Maračić M, Novaković M. Results of Environmental Radioactivity Measurements in the Republic of Croatia, Annual Reports 1978–1991. Institute for Medical Research and Occupational Health. Zagreb: 1979-1992. Croatian.
- [3] Kovač J, Cesar D, Franić Z, Lokobauer N, Marović G, Maračić M. Results of environmental radioactivity measurements in the Republic of Croatia, Annual Reports 1992–1997. Institute for Medical Research and Occupational Health. Zagreb: 1993–1998. Croatian.
- [4] Marović G, Franić Z, Kovač J, Lokobauer N, Maračić M. Results of environmental radioactivity measurements in the Republic of Croatia, Annual Reports 1998–2005. Institute for Medical Research and Occupational Health. Zagreb: 1999–2006. Croatian.

- [5] Commission recommendation of 8 June 2000 on the application of Article 36 of the Euratom Treaty concerning the monitoring of the levels of radioactivity in the environment for the purpose of assessing the exposure of the population as a whole (notified under document number C(2000) 1299). European Commission, 2000/473/Euratom. Web: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000H0473>
- [6] Franic Z, Marovic G, Mestrovic J. Radiocaesium contamination of beef in Croatia after the Chernobyl accident. *Food and Chemical Toxicology* 2009;46(6):2096-2102.
- [7] Agrobiz [Internet]. Kuskunović M. Cekin chicken and Vindon turkey are the only ones that have a GMO free certificate in Croatia. [updated 2017, Oct 26; cited 2019 Feb 27]. Available from: <https://www.agrobiz.hr/agrovijesti/sabljak-cekin-piletina-i-vindon-puretina-jedine-imaju-gmo-free-certifikat-u-hrvatskoj-7331>
- [8] IAEA - International Atomic Energy Agency. Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014.
- [9] Official Journal of the European Union. Council Regulation (EC) No 733/2008 of 15 July 2008 on the conditions governing imports of agricultural products originating in third countries following the accident at the Chernobyl nuclear power station. European Council, 2008.

RADIOCAESIUM CONTAMINATION IN CHICKEN MEAT FROM NORTHWESTERN CROATIA

Gina Branica, Zdenko Franić i Gordana Marović
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
gbranica@imi.hr

As a result of the accidents in the Chernobyl (1986) and Fukushima Daiichi (2011) nuclear power plants, large quantities of radiocaesium were released into the environment, especially ^{134}Cs and ^{137}Cs . This study presents the results of a long-term investigation into the activity concentrations of ^{134}Cs and ^{137}Cs in chicken meat and eggs, as well as their transfer from radioactive fallout. Following an initial increase in activity concentrations caused by the Chernobyl accident, an exponential decrease occurred. The Fukushima Daiichi nuclear power plant accident did not cause a significant rise in Croatia's environmental contamination by radioactivity; therefore, neither in chicken meat and eggs. After the Chernobyl accident, an activity ratio for $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ of 0.55 was determined in almost all environmental samples, reflecting the radiocaesium inventory from the core of the nuclear reactor. After Fukushima, this ratio was approx. 1. The effective dose that an adult member of the Croatian population received from ^{134}Cs and ^{137}Cs intake by means of chicken meat and eggs was very small in the post-Chernobyl period, which indicates that their contamination by radiocaesium is not a critical pathway of radiocaesium transfer to human beings.

SEZONSKO PRAĆENJE KONCENTRACIJA AKTIVNOSTI ^7Be , ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{226}Ra I ^{238}U U SUHOM TKIVU DAGNJI *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* U PRIOBALNIM VODAMA JADRANA

Dijana Pavičić-Hamer¹, Ivana Tucaković², Delko Barišić²

¹Institut Ruđer Bošković, Rovinj

²Institut Ruđer Bošković, Zagreb

dpavicic@irb.hr

UVOD

U radu su prikazani rezultati praćenja stanja radioaktivnosti u priobalnom okolišu Jadrana korištenjem dagnji *Mytilus galloprovincialis* kao indikatora za razdoblje od 11 godina (2008. – 2018.). Dagnje se koriste kao indikator praćenja zagađenja morskog okoliša budući da dnevno filtriraju i do 80 L vode te apsorbiraju i akumuliraju tvari otopljene u morskoj vodi ili adsorbiraju suspendirane tvari. Prikazani rezultati praćenja stanja radioaktivnosti korištenjem dagnji prošireni su nastavak istraživanja projekata *Mediterranean Mussel Watch* i *Sustavno ispitivanje radioaktivnosti u morskim indikatorskim organizmima* [1-5].

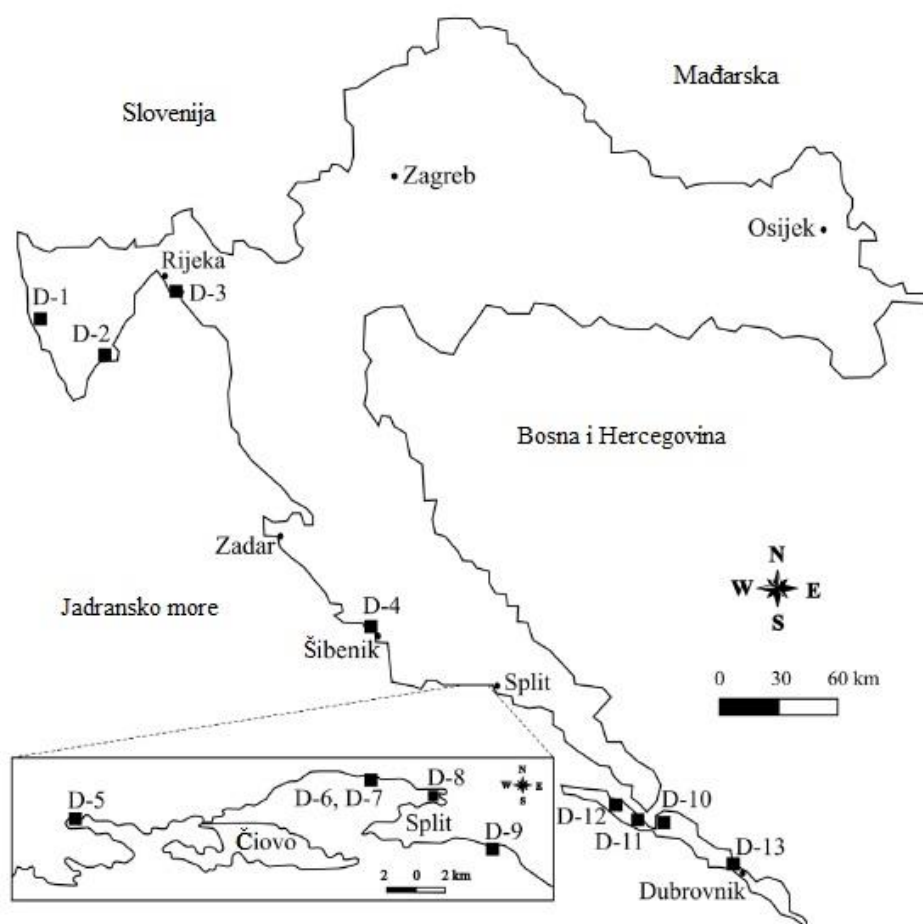
Prirodni radionuklidi ^7Be , ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra i ^{238}U nalaze se u morskoj vodi ili u nju dospijevaju donosom materijala i slatke vode s kopna te depozicijom iz atmosfere. Donos antropogenog ^{137}Cs u morski okoliš je iz atmosfere (*fallout* od testiranja nuklearnog oružja 1960-ih i nesreće u Černobilu 1986. godine) i rijeka. Zbog vremena poluraspada od 31,1 godine i dalje je prisutan u okolišu, te putem hranidbenog lanca dospijeva u organizme koji se koriste kao hrana zbog čega je njegovu prisutnost i količinu potrebno sustavno pratiti [6]. Uzorci sa 13 postaja duž hrvatske jadranske obale sakupljeni su i obrađivani uglavnom dva puta godišnje, u proljetnom i jesenskom periodu. Koncentracije aktivnosti svih navedenih radionuklida određivane su gama-spektrometrijski u suhom tkivu dagnje. Prikazani rezultati diskutirani su i uspoređeni s obzirom na lokaciju uzoraka, sezonu uzorkovanja, donos slatke vode i druge parametre.

MATERIJALI I METODE

U razdoblju od 2008. do 2018. godine uzorci dagnji *M. galloprovincialis* prikupljeni su na 13 lokacija duž jadranske obale, uglavnom dva puta godišnje, u proljeće i jesen. Prilikom uzorkovanja su mjereni salinitet i temperatura mora na svim istraživanim lokacijama. Lokacije su prikazane na karti na Slici 1, a popis lokacija s GPS pozicijama te prosječnim vrijednostima temperature i saliniteta u proljetnoj i jesenskoj sezoni prikazan je u Tablici 1. Po uzorkovanju je prikupljeno između 4 i 5 kg svježih dagnji prosječne veličine od 3 do 5 cm. Nakon zagrijavanja u mikrovalnoj pećnici, tkivo je odvojeno od ljuštura, a zatim se sušilo u sušioniku do konstantne mase. Nakon pripreme, uzorci osušenog tkiva stavljeni su u plastične cilindrične mjerne posude poznate geometrije te mjereni na HPGe detektoru (Canberra). Vrijeme brojanja uzoraka iznosilo je između 80 000 i 200 000 sekundi, a dobiveni spektri analizirani su koristeći Genie 2000 softver. Koncentracije aktivnosti radionuklida ^{137}Cs , ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{238}U i ^7Be određene su s pripadnim proširenim mjernim nesigurnostima (2k). Detektorski je sustav kalibriran odgovarajućim standardima, a točnost i preciznost metode provjeravana i potvrđena u redovitim interkomparacijskim mjerenjima. Laboratorij za radioekologiju Instituta Ruđer Bošković u kojem su rađena mjerenja akreditiran je za određivanje koncentracije aktivnosti / masene aktivnosti radioaktivnih elemenata prema zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025.

Tablica 1. Popis lokacija uzorkovanja s pripadajućim GPS pozicijama te srednjim vrijednostima temperature mora i saliniteta prilikom uzorkovanja u proljeće i jesen.

Lokacija	N	E	Temperatura T (°C) proljeće / jesen	Salinitet proljeće / jesen
D1 – Limski kanal	45° 08,223'	13° 43,280'	15,6 / 19,3	31,0 / 33,0
D2 – Trget	45° 01,218'	14° 03,388'	16,6 / 17,4	29,3 / 33,0
D3 – Bakarski zaljev	45° 18,410'	14° 32,323'	12,8 / 14,8	12,6 / 21,5
D4 – Martinska	43° 46,056'	15° 50,722'	15,2 / 21,0	33,4 / 34,4
D5 – Marina-Poljica	43° 30,900'	16° 09,419'	15,7 / 21,8	35,4 / 36,3
D6 – Kaštel Gomilica	43° 32,682'	16° 24,130'	15,9 / 21,8	35,9 / 36,8
D7 – Giričić	43° 32,755'	16° 24,311'	16,3 / 22,0	35,7 / 35,9
D8 – Vranjic	43° 31,894'	16° 27,652'	15,8 / 21,4	33,4 / 34,4
D9 – Stobreč	43° 30,006'	16° 31,519'	15,7 / 22,7	34,2 / 34,9
D10 – Bistrina	42° 52,373'	17° 42,080'	15,7 / 22,5	36,3 / 36,2
D11 – Mali Ston	42° 50,650'	17° 42,616'	16,2 / 22,5	36,2 / 36,9
D12 – Drače	42° 55,013'	17° 28,089'	15,8 / 22,3	36,6 / 36,1
D13 – Dubrovnik	42° 40,244'	18° 07,565'	16,1 / 22,0	34,6 / 34,6

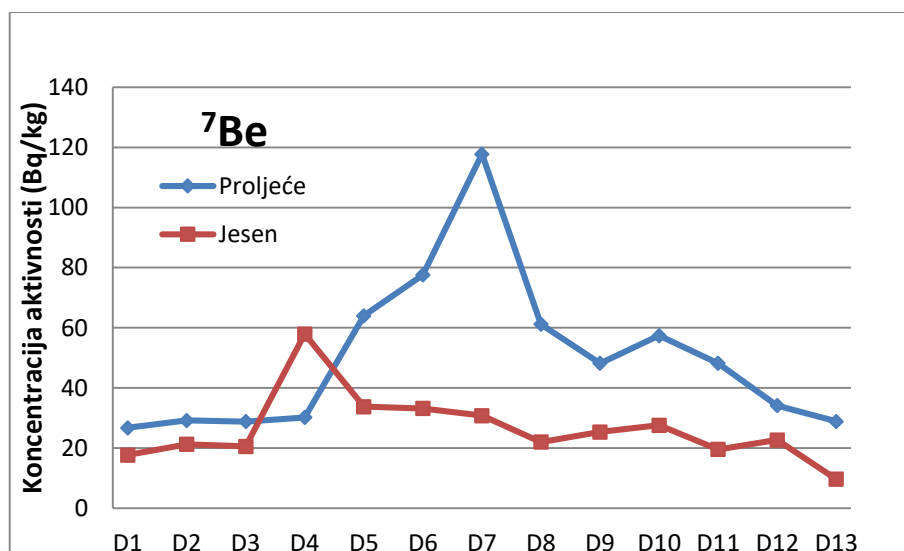


Slika 1. Prikaz lokacija uzorkovanja dagnji *M. galloprovincialis* duž Jadranske obale.

REZULTATI

Koncentracije aktivnosti umjetnog radionuklida ^{137}Cs u tkivu dagnji u istraživanom periodu u velikoj su većini slučajeva bile ispod granica detekcije ($0,3 \text{ Bq kg}^{-1}$). U slučajevima kada je ^{137}Cs detektiran radilo se o niskim koncentracijama (maksimalna vrijednost od $1,05 \text{ Bq/kg}$ izmjerena je na lokaciji Martinska u jesen 2011. godine). Osim na lokaciji D1 (Limski kanal) na kojoj niti u jednom uzorku nije detektirana prisutnost ^{137}Cs , na ostalim je lokacijama ^{137}Cs bio detektiran barem jednom (D6, D7 i D8), većinom dva (D4, D5, D11 i D13) ili tri (D2, D3, D10 i D12) puta. U najvećem je broju slučajeva (6) ^{137}Cs bio detektiran na lokaciji D10 (Stobreč). Uočeno je da na lokacijama gdje je ^{137}Cs detektiran njegovo prisustvo nije ovisilo o sezoni. Uglavnom se radi o gotovo zatvorenim marinskim sredinama koje su pod izrazitim utjecajem dotoka slatkih voda. Prisustvo ^{137}Cs u dagnjama moglo bi biti posljedica njegovog značajnijeg unosa slatkim vodama u morsku sredinu (obilnije oborine i značajniji dotoci u vremenskim periodima koji su prethodili uzorkovanju) i/ili izmjene jadranskih voda zbog dotoka iz Jonskog odnosno Egejskog mora.

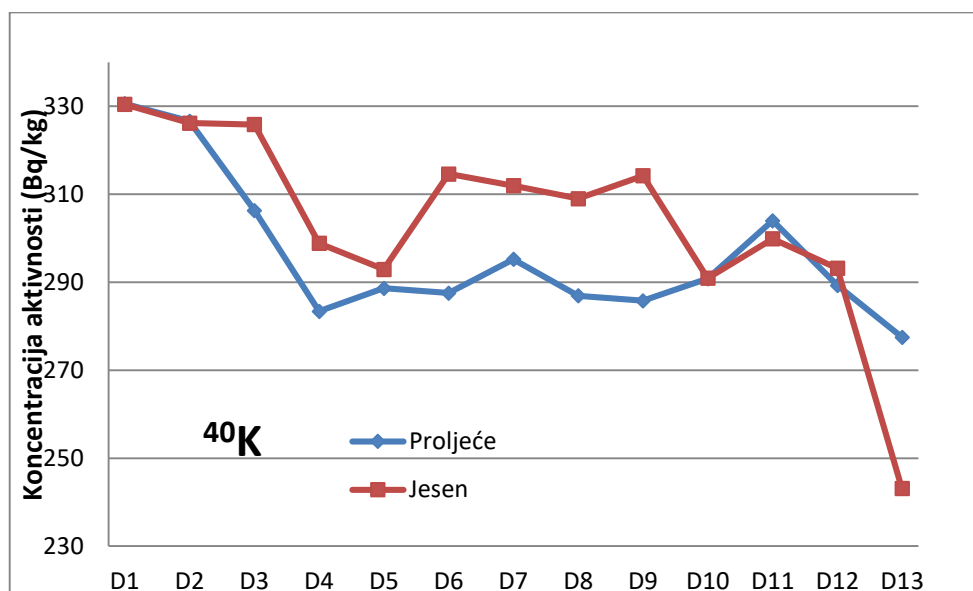
Prosječne vrijednosti koncentracija aktivnosti prirodnog kozmogenog radionuklida ^7Be tijekom proljeća i jeseni, prikazane su na Slici 2. Pojedinačne vrijednosti koncentracije aktivnosti kreću se u širokom rasponu ($<0,2 - 334,8 \text{ Bq kg}^{-1}$), pri čemu su prosječne koncentracije aktivnosti u uzorcima prikupljenim u proljeće na svim lokacijama, s iznimkom one u Martinskoj (D4), veće od aktivnosti izmjerenih u uzorcima prikupljenim u jesen. S obzirom na to da se berilij ugrađuje se u stanične membrane fitoplanktona, ovakvi su rezultati i očekivani budući da je tijekom proljeća bioprodukcija fitoplanktona kojima se dagnje hrane značajnija u odnosu na jesen, što uzrokuje proljetni porast berilija u tkivu dagnji. Obzirom na vrijeme poluraspada ^7Be (53,4 dana) i činjenicu da u morsku vodu dopijeva direktno oborinama i/ili dotokom slatke vode s kopna, sušni ljetni i ranojesenski period stoga rezultiraju niskim koncentracijama ^7Be u tkivima dagnji tijekom rane jeseni.



Slika 2. Prosječne koncentracije aktivnosti ^7Be (Bq kg^{-1} suhe mase) u tkivima dagnji uzorkovanih u proljeće (plavo) i jesen (crveno) u razdoblju od 2008. do 2018. g. prikazane prema lokacijama uzorkovanja.

U razdoblju od 2008. do 2018. godine, koncentracije aktivnosti primordijalnog ^{40}K u tkivu dagnji su u najvećem broju slučajeva više tijekom jeseni od koncentracije aktivnosti u proljeće. Iznimka je uočena na najjužnijoj postaji D13 (Dubrovnik). Prosječne vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{40}K tijekom proljeća odnosno jeseni, prikazane su na Slici 3. Općenito, pojedinačne vrijednosti koncentracije aktivnosti bitno ne variraju niti s obzirom na

lokaciju niti s obzirom na godišnje doba i kreću se u rasponu (193 – 419) Bq kg⁻¹ suhe mase. Prosječne vrijednosti po sezoni gotovo se ne razlikuju i iznose (296 ± 16) Bq kg⁻¹ u proljeće odnosno (304 ± 27) Bq kg⁻¹ u jesen. U priobalnoj morskoj vodi ne očekuje se značajna promjena koncentracija aktivnosti ⁴⁰K čak niti u slučaju izraženijih terigenih utjecaja, budući da je njegova koncentracija u oceanskoj vodi visoka i ujednačena (~12 500 Bq m⁻³). Stoga su koncentracije kalija kao biogenog elementa, a time i mjerene koncentracije aktivnosti ⁴⁰K u tkivima dagnji, prvenstveno odraz kondicijskog stanja tih organizama.



Slika 3. Prosječne koncentracije aktivnosti ⁴⁰K (Bq kg⁻¹ suhe mase) u tkivima dagnji uzorkovanih u proljeće (plavo) i jesen (crveno) u razdoblju od 2008. do 2018. g. po lokacijama

Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida ²³²Th, ²³⁸U i ²²⁶Ra u tkivima dagnji ne razlikuju se bitno s obzirom na sezonu i lokaciju uzorkovanja, uglavnom su se kretale ispod granice detekcije gama-spektrometrijskog određivanja.

Sve izmjerene vrijednosti koncentracija aktivnosti radionuklida u tkivima dagnji tijekom uzorkovanja od 2008. do 2018. godine duž Jadranske obale u skladu su s rezultatima publiciranim u znanstvenoj literaturi [1-6].

ZAKLJUČAK

Koncentracije aktivnosti ¹³⁷Cs u dagnjama *M. galloprovincialis* uzorkovanim duž Jadranske obale u većini su slučajeva bile ispod granica detekcije u razdoblju od 2008. do 2018. godine. Niske vrijednosti koncentracije aktivnosti (maksimalna 1,05 Bq kg⁻¹ suhe mase tkiva) u nekoliko su navrata detektirane gotovo na svim lokacijama, neovisno o sezoni uzorkovanja.

Koncentracije aktivnosti ⁷Be u dagnji kreću se u širokom rasponu (<0,2 – 334,8 Bq kg⁻¹) pri čemu su prosječne koncentracije aktivnosti u uzorcima prikupljenim u proljeće na svim lokacijama, s iznimkom one u Martinskoj, veće od aktivnosti mjerenih u uzorcima prikupljenim u jesen.

Prosječne vrijednosti koncentracija aktivnosti ⁴⁰K u dagnji gotovo da i ne variraju s obzirom na sezonu, no tijekom jeseni na većini lokacija bile su uglavnom nešto veće od koncentracija aktivnosti koje su mjerene u proljeće.

Koncentracije aktivnosti radionuklida ²³²Th, ²³⁸U i ²²⁶Ra u dagnji izrazito su niske i bitno se ne razlikuju s obzirom na sezonu i lokaciju uzorkovanja.

Izmjerene koncentracije aktivnosti pojedinih radionuklida u tkivu dagnji dokazuju iznimnu sposobnost filtracije morske vode i izniman indikatorski potencijal ovih organizama.

Zahvala

Dio rada izrađen je uz financijsku potporu Državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost (*Sustavno ispitivanje radioaktivnosti u morskim indikatorskim organizmima 2008.-2013.*).

LITERATURA

- [1] CIESM Mediterranean Mussel Watch – Designing a regional program for detection radionuclides and trace-contaminants. CIESM Workshop Series no. 15. Monaco; 2002.
- [2] Thebault H, Rodriguez y Baena AM, Andral B, Barisic D, Albaladejo JB, Bologna AS, Boudjenoun R, Delfanti R, Egorov VN, El Khoukhi T, Florou H, Kniewald G, Noureddine A, Patrascu A, Pham MK, Scarpato A, Stokozov NA, Topcuoglu S, Warnau M. ^{137}Cs baseline levels in the mediterranean and Black Sea: A cross-basin survey of the CIESM Mediterranean Mussel Wach programe. *Mar Pollut Bull* 2008;57:801-806.
- [3] Rožmarić Mačefat M, Rogić M, Barišić D, Benedik Lj, Štok M. Sustavno praćenje radioaktivnosti priobalnih voda Jadrana korištenjem dagnji (*Mytilus galloprovincialis*) kao bioindikatora. Zbornik radova Devetog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja, 2013; 361-366.
- [4] Pavičić-Hamer D, Kablar D, Barišić D. Praćenje radioaktivnosti u dagnje *Mytilus galloprovincialis* sjevernog Jadrana. Zbornik radova Desetog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja, 2015; 311-316.
- [5] Krmpotić M, Rožmarić M, Barišić D, Mussles (*Mytilus galloprovincialis*) as a bio-indicator species in radioactivity monitoring of Eastern Adriatic coastal waters. *J Environ Radioactivity* 2015;144:47-51.
- [6] Pavičić-Hamer D, Barišić D, Šimunac B, Petrincec B, Štok M. ^{137}Cs distribution in the northern Adriatic Sea. *J Radioanal Nucl Chem* 2016;309(3):989-998.

SEASONAL MONITORING OF ACTIVITY CONCENTRATIONS OF ^7Be , ^{40}K , ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{226}Ra AND ^{238}U IN DRY TISSUE OF *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* MUSSELS IN CROATIAN ADRIATIC COASTAL SEA

Dijana Pavičić-Hamer¹, Ivana Tucaković², Delko Barišić²

¹Ruđer Bošković Institute, Rovinj, Croatia

²Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

dpavicic@irb.hr

This paper presents the monitoring of radioactivity of the marine coastal seawater environment using mussels *Mytilus galloprovincialis* as an indicator, during a period of 11 years (2008 - 2018). Mussels are used as an indicator organism in marine pollution monitoring programs since they filter up to 80 L of seawater daily, absorb and accumulate dissolved/particulate matter from sea water. The results of radioactivity monitoring presented in this paper are a continuation and extension of the research projects *Mediterranean Mussel Watch* and *Systematic Radioactivity Testing in Marine Indicators Organisms*.

The naturally occurring radionuclides ^7Be , ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{238}U are omnipresent in sea water, they also enter the marine environment through the atmospheric deposition, underground fresh water discharges and river flows. Anthropogenic ^{137}Cs entered the marine environment after events such as nuclear weapons testing and the Chernobyl accident in 1986. Due to the half-life of 31.1 years it is still present in the environment, and through the food chain it also comes in organisms which are used for food. Therefore, its presence and quantity need to be systematically monitored. Samples from 13 stations along the Croatian Adriatic coast were collected and analysed twice a year in spring and autumn. Activity concentrations of all of the mentioned radionuclides are determined by gamma-spectrometry in dry tissue of mussels. The results presented are discussed and compared regarding the sample location, sampling season, fresh water yield and other parameters. All measured values of radionuclide activity concentrations in mussel tissues in coastal waters of the Adriatic are in line with the results published in the scientific literature.

Activity concentrations of ^{137}Cs in *M. galloprovincialis* mussels sampled along the Adriatic coast were below the detection limits in most cases in the period from 2008 to 2018. Low activity concentration values (maximum 1.05 Bq kg^{-1} in dry mass of tissue) have been detected in several cases on almost all sites irrespective of sampling season. The values of activity concentrations of ^7Be in the mussels were spread in a very wide range. Average activity concentrations in the samples collected in spring at all locations, with the exception of the one in Martinska, were greater than the activity concentrations obtained in the samples collected in fall. The average activity concentration of ^{40}K in mussels did not vary significantly with respect to the season at all locations. However, the autumn values were generally slightly higher than the activity concentrations measured in spring. Activity concentrations of ^{232}Th , ^{238}U and ^{226}Ra in mussel were mostly below the detection limit with no seasonal changes.

Measured activity concentration of particular radionuclides in mussel tissues proves their exceptional ability of the seawater filtration and their exceptional indicator potential.

CEZIJ U VUKOVIMA KAO MJERILO RADIOLOŠKE ČISTOĆE OKOLIŠA U HRVATSKOJ

Gordana Marović¹, Slaven Reljić², Josip Kusak², Djuro Huber², Zdenko Franić¹,
Mak Avdić¹, Jasminka Senčar¹

¹Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb

²Veterinarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

marovic@imi.hr

UVOD

Vukovi, divlje životinje, predatori s vrha prehrambenog lanca jedan su od pokazatelja radiološkog onečišćenja okoliša. Način života i prehrana s drugim slobodno živućim životinjama na relativno velikom području doprinose akumulaciji fisijskih produkata i nekoliko puta više u odnosu na ostale životinje. Divlje životinje su osjetljiva sastavnica prirodnog okoliša, čijim se proučavanjem mogu prikupiti podaci o prostornoj i vremenskoj razdiobi i trendovima onečišćenja okoliša [1]. Kao vrsta sivi vuk (*Canis lupus*) strogo je zaštićen od 1995. godine Pravilnikom o zaštiti pojedinih vrsta sisavaca. Od tada je zabranjeno ubijanje vukova, kao i njihovo uznemiravanje u staništu, osim u znanstvene svrhe. Sivi vuk je sisavac iz reda zvijeri i najveći je pripadnik porodice pasa. Sva čula, a naročito njuh i sluh su mu odlično razvijeni. Skupina u kojoj žive vukovi je čopor. Vukovi u čoporu putuju, love, hrane se i odmaraju, zajedno su tijekom cijele godine. Katkad pojedine jedinke napuste čopor. Vuk se hrani isključivo mesom, kostima i drugim dijelovima tijela životinja koje lovi [2].

U Jedinici za zaštitu od zračenja Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada u Zagrebu u suradnji s Veterinarskim fakultetom Sveučilišta u Zagrebu provode se istraživanja radioaktivne kontaminacije divljih životinja i divljači, kao dio proširenog programa praćenja stanja radioaktivnosti uzoraka životne sredine na teritoriju Republike Hrvatske. Dio tih istraživanja su i vukovi. Analizirani su vukovi koji su bilo stradali od različitih uzroka (najčešće od udara vozila), od 2014. do 2018. godine.

Na uzorcima su određene koncentracije aktivnosti radiocezija (¹³⁷Cs i ¹³⁴Cs) u mišićima i iznutricama. Koncentracije aktivnosti ¹³⁴Cs bile su iznosom vrlo malene, na granici detekcije i to tek u nekoliko uzoraka. Naime, taj radionuklid, relativno kratkog vremena poluraspada ($T_{1/2} = 2,06$ godina), u normalnim okolnostima nije prisutan u prirodi. Naime, ¹³⁴Cs ne nastaje u eksplozijama nuklearnog oružja (te posljedično nije prisutan u *falloutu* iz perioda intenzivnih atmosferskih proba nuklearnih bombi) jer se njegov prethodnik, ¹³³Cs, stvara beta raspadanjem izvornih proizvoda fisije tek nakon što je nuklearna eksplozija već završena. Odnosno, ¹³⁴Cs nastaje zahvatom neutrona u stabilni ¹³³Cs koji je kao fisijski produkt nakon dugotrajnog ozračivanja prisutan u gorivim šipkama u reaktorima nuklearnih elektrana. Stoga se ¹³⁴Cs, osim nakon nesreće u Černobilju ponovo pojavio u neznatnim količinama u okolišu tek nakon nesreće u nuklearnoj elektrani Fukushima-Daiichi u Japanu u ožujku 2011. godine [3], kao jasni pokazatelj da je negdje došlo do nuklearne nesreće.

MATERIJALI I METODE

U suradnji s Veterinarskim fakultetom Sveučilišta u Zagrebu, tijekom proteklih pet godina sakupljani su uzorci stradalih vukova. Ovisno o količini pojedinih sakupljenih uzoraka za gamaspektrometrijsko mjerenje pripremani su bilo pojedinačni uzorci tkiva mišića vukova bilo zbirni, uzorak nekoliko životinja. Uzorci iznutrica bili su rijetki i zbog male količine pripremani su za mjerenje kao zbrojni uzorci jedne, odnosno dvije životinje. Uzorci su sušeni na 105 °C, usitnjeni, umrvljeni, potom spaljivani u mufolnoj peći na 450 °C. Dobiveni pepeo je potom spakiran u plastične posudice za mjerenje.

Svi uzorci obrađeni su visokorezolucijskom gamaspektrometrijom, metodom akreditiranoj prema zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025:2007. Korišteni su detektori: Ge(Li) detektor ORTEC rezolucije 1,78 keV na 1,33 MeV ^{60}Co i relativne efikasnosti od 16,8 % na 1,33 MeV ^{60}Co i HP GMX detektor ORTEC rezolucije 2,2 keV na 1,33 MeV ^{60}Co i relativne efikasnosti od 74 % na 1,33 MeV ^{60}Co povezani s elektroničkim sustavom i osobnim računalom. Kalibracija efikasnosti provedena je standardima Češkog metrološkog instituta. Osiguranje kvalitete provodi se sustavnim sudjelovanjima u usporednim mjerenjima u organizaciji Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA), Svjetske zdravstvene organizacije (WHO) kao i Zajedničkog istraživačkog centra Europske komisije (JRC). Vrijeme mjerenja svakog pojedinog uzorka bilo je najmanje 80000 sekundi.

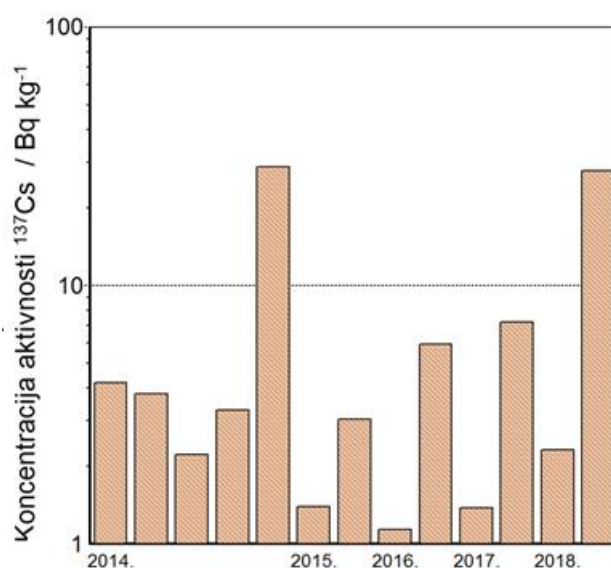
REZULTATI

Dosadašnjim istraživanjima koncentracije aktivnosti radiocezija u divljači pokazano je da je radiocezij prisutniji u divljači negoli u domaćim životinjama [4]. Divljač zbog načina prehrane akumulira radiocezij koji je stalno prisutan u okolišu i godinama poslije nesreće u Černobilju. Također, u nekoliko uzoraka (samo pet od pripremljenih bilo pojedinačnih bilo zbrojnih) detektiran je i ^{134}Cs , u vrijednosti tek nešto većoj od granice detekcije, kao posljedica nuklearne nesreće u Fukushimi u Japanu 2011. godine.

U Tablici 1 prikazani su sumarni rezultati određivanja koncentracija aktivnosti ^{134}Cs , ^{137}Cs i ^{40}K , a na Slici 1 prikazane su koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u vremenskom slijedu od 2014. do 2018. godine.

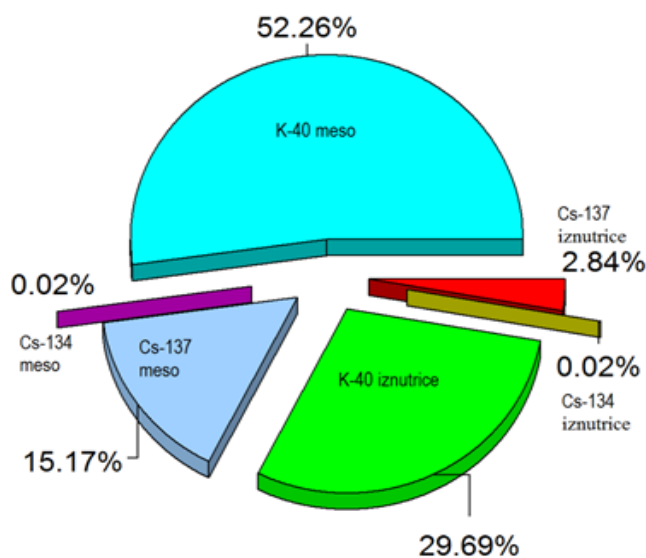
Tablica 1. Sumarni prikaz koncentracija aktivnosti ^{134}Cs , ^{137}Cs i ^{40}K u vukovima od 2014. do 2018. godine.

Radionuklid	Koncentracija aktivnosti / Bq kg ⁻¹		
	Prosjek	Medijan	Raspon
^{134}Cs	0,044	0,038	0,014 – 0,098
^{137}Cs	6,11	2,29	0,13 – 27,76
^{40}K	97,5	99,5	68,6 – 122,1



Slika 1. Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u uzorcima vukova uzorkovanih od 2014. do 2018. godine.

U 2014. godini izmjerena je maksimalna vrijednost koncentracije aktivnosti ^{137}Cs ($27,8 \pm 0,1 \text{ Bq kg}^{-1}$) u uzorku mesa dvaju vukova (vuk WCRO-257 i vuk WCRO-258). Koncentracija aktivnosti ^{134}Cs iznosila je $0,041 \pm 0,005 \text{ Bq kg}^{-1}$, što je bilo na granici detekcije. Izmjerene su i iznutrice tih životinja kao zajednički zbrojni uzorak srca, pluća, bubrega i jetara. Određene koncentracije aktivnosti u iznutricama i mišićnom tkivu tih dvaju vukova prikazane su kao udjeli ukupne aktivnosti životinja (Slika 2).



Slika 2. Udjeli koncentracije aktivnosti ^{134}Cs , ^{137}Cs i ^{40}K u aktivnosti jedinki vukova obilježenih kao WCRO-257 i WCRO-258 uzorkovanih 2014. godine.

Koncentracije aktivnosti cezija u dijelovima dviju jedinki, mišiću i iznutricama, pokazuju da je veća aktivnost cezija akumulirana u mišiću, a isto se može reći i za kalij. U nastavku istraživanja pokušat će se odrediti koncentracije aktivnosti cezija u pojedinim iznutricama kako bi se stekla cjelovitija slika raspodjele aktivnosti u tijelu životinje.

Iznenadujuće visoka koncentracija aktivnosti ^{137}Cs izmjerena je u jedinki oznake WCRO-306 u 2018. godini ($26,8 \pm 0,1 \text{ Bq kg}^{-1}$), dok je, očekivano, ^{134}Cs ispod granice detekcije ($<0,03 \text{ Bq kg}^{-1}$). Koncentracije aktivnosti cezija u mišićnom tkivu vukova više su od onih izmjerenih u medvjedima [4]. Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs istraživanih uzoraka vukova, predatora, krajnjih dionika prehrambenog lanca u prirodi, direktna su posljedica koncentracija aktivnosti prisutnih u okolišu.

ZAKLJUČAK

Vukovi kao divlja vrsta u našoj blizini dobri su pokazatelji radioaktivne kontaminacije. Za bolje tumačenje uočenih razlika potrebna su daljnja sustavna istraživanja vukova, kao i drugih divljih životinja koja bi uključila cijeli prehrambeni lanac, ali i kvalitetu njihovog prirodnog staništa uz praćenje i drugih parametara (npr. meteoroloških i hidroloških). Takva istraživanja omogućit će bolje poznavanje prirodnog sustava i proširivanje spoznaja o prostornim i vremenskim razdiobama fizijske aktivnosti (kontaminacije) u svim sastavnicama okoliša.

Zahvala

Autori zahvaljuju Ljerki Petroci na pomoći.

LITERATURA

- [1] Marović, G. The role of bioindicators in assessing radioactive contamination. *Arh hig rada toksikol* 1990;41:371-378
- [2] Štrbenac A, Kusak J, Huber Đ, Jeremić J, Oković P, Majić-Skrbinšek A, Vukšić I, Katušić L, Desnica S, Gomerčić T, Biščan A, Zec D, Grubešić M. 2010. Plan upravljanja vukom u Hrvatskoj. Državni zavod za zaštitu prirode, Zagreb. 2010:128
- [3] Sugiyama G, Nasstrom J, Pobanz B, Foster K, Simpson M, Vogt Ph, Aluzzi F, Homann S. Atmospheric dispersion modelling: Challenges of the Fukushima-Daiichi response. *Health Phys* 2012;102(5):493-508.
- [4] Marović G, Reljić S, Franić Z, Avdić M, Skoko B, Huber Đ, Senčar J. Cezij u mesu medvjeda kao izvor doznog opterećenja ljudi u Hrvatskoj. U: Radolić V, Poje Sovilj M, Krajcar Bronić I, ur. Zbornik radova Jedanaestog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja s međunarodnim sudjelovanjem; 5.-7. travnja 2017.; Osijek, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2017. str.321-326.

CESIUM IN WOLFES AS AN INDICATOR OF ENVIRONMENTAL RADIOLOGICAL PURITY IN CROATIA

Gordana Marović¹, Slaven Reljić², Josip Kusak², Djuro Huber², Zdenko Franić¹, Mak Avdić¹, Jasminka Senčar¹

¹Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb

²Faculty of Veterinary Medicine of University of Zagreb, Zagreb

marovic@imi.hr

This study was conducted by the Radiation Protection Unit of the Institute for Medical Research and Occupational Health in Zagreb in collaboration with the Faculty of Veterinary Medicine of University of Zagreb as part of an extensive monitoring programme of the Croatian environment. Samples collected from 2014 to 2018 from wolves that were accidentally killed were analysed by gamma-spectrometry to determine ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs activity concentrations. ¹³⁴Cs activity concentrations were found to be very small, near the values of the detection limits and could be attributed to the Fukushima-Daiichi nuclear accident of March 2011.

The average ¹³⁷Cs activity concentration in wolf muscle tissue was found to be 6.1 ± 0.2 Bq kg⁻¹ (range was from 0.04 to 27.8 Bq kg⁻¹) and that of ¹³⁴Cs 0.044 ± 0.020 Bq kg⁻¹ (the range was from 0.014 to 0.098 Bq kg⁻¹).

⁹⁰Sr U POVRĆU U ZAGREBU I ZADRU

Milica Kovačić, Ljerka Petroci, Iva Franulović, Mak Avdić
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
mkovacic@imi.hr

UVOD

Fisijski produkt ⁹⁰Sr, emiter beta čestica (maksimum 546 keV), prisutan je u okolišu kao posljedica nuklearnih proba i nesreća.

Prisutnost ⁹⁰Sr predstavlja potencijalnu opasnost za ljudski organizam zbog dugog vremena poluraspada (28,8 god) i dugog biološkog vremena poluraspada (49,3 god) [1]. U nedostatku kalcija, zbog kemijske i metaboličke sličnosti, stroncij se ugrađuje u koštano tkivo i zube. Iz tih razloga, smatra se jednim od najtoksičnijih radionuklida jer povećanjem akumulacije u ljudskom skeletu može uzrokovati teška oboljenja poput različitih vrsta tumora.

Hranidbeni lanac kontaminira se kroz različita izlaganja radioaktivnim tvarima iz biosfere [2]. Povrće se smatra važnom sastavnicom zdrave i uravnotežene prehrane opće populacije, osobito skupine populacije čija je prehrana temeljena samo na namirnicama biljnog podrijetla. Jedan od osnovnih načina unosa radionuklida u biljke je putem korijena iz tla i vode dostupnima biljkama kao i unos radionuklida nadzemnim dijelovima biljke iz zraka, folijarnim taloženjem na listovima, što ovisi o različitim meteorološkim utjecajima u vrijeme taloženja radionuklida, vrsti i stadiju razvoja biljke [3]. To se posebice odnosi na biljke s velikom lisnatom površinom. Unosom takvog povrća ili mesa životinja hranjenih biljkama kontaminiranih radionuklidima, ljudski organizam je izložen negativnim učincima unutarnje izloženosti ionizirajućem zračenju.

Jedinica za zaštitu od zračenja Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada provodi praćenje stanja radioaktivnosti životne sredine u Republici Hrvatskoj [4]. Provode se radioekološka istraživanja svih vrsta namirnica, pa tako i koncentracija radioaktivnosti u ljudskoj hrani, koja su osnova za procjenu doza i procjenu posljedica radioaktivnog zagađenja na ljudsko zdravlje.

U ovome radu su prikazani rezultati određivanja koncentracija aktivnosti ⁹⁰Sr u odabranim vrstama zelenog povrća, na dvije lokacije u petogodišnjem periodu, od 2013. do 2017. godine. Iz tih podataka procijenjene su očekivane efektivne doze unutarnjeg ozračenja za odrasle pripadnike opće populacije.

MATERIJALI I METODE

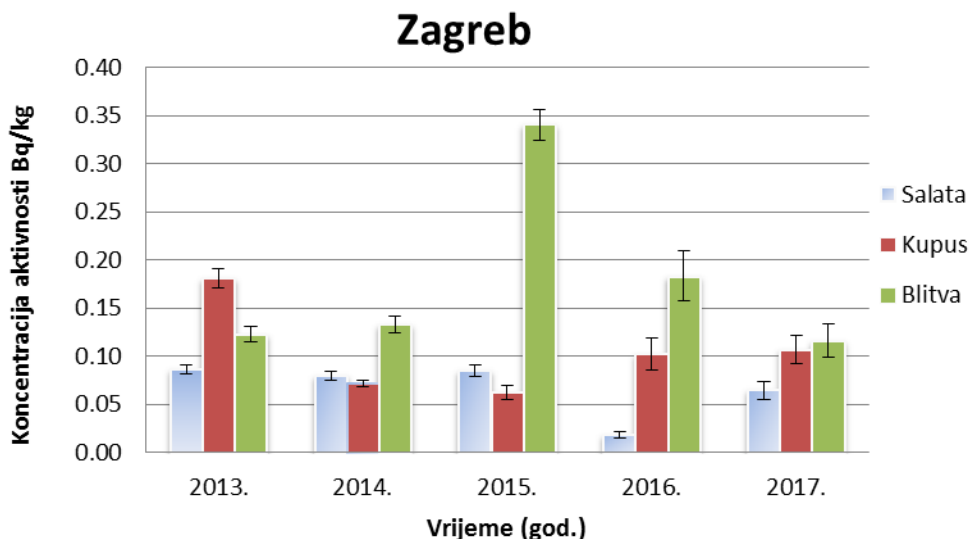
Uzorkovanje je provedeno u vrijeme sezone berbe, salata i blitva u proljeće, a kupus u jesen na dvije lokacije, Zagreb (kontinentalno područje) i Zadar (obalno područje) kod lokalnih proizvođača. Nakon uobičajene pripreme za konzumaciju (pranje, čišćenje i sl.), prikupljeni uzorci su sušeni nekoliko dana na 105 °C te zatim spaljeni otvorenim plamenom.

Za analizu ⁹⁰Sr uzorak se žari u mufolnoj peći na 650 °C u trajanju od 24 sata da bi se uklonili svi organski dijelovi. Usitnjeni i homogenizirani alikvot pepela otopi se u dušičnoj kiselini. Standardnom metodom ekstrakcije tributil-fosfatom (TBP) uz dodatak itrijevog nosača ekstrahira se ⁹⁰Sr temeljem radioaktivne ravnoteže s ⁹⁰Y. Istaloženi itrijev oksalat u planšeti se mjeri u antikoincidentnom beta brojaču niskog osnovnog zračenja model RISØ GM-25-5. Kemijsko iskorištenje itrija je određeno gravimetrijskom metodom. Vrijeme mjerenja uzoraka je najmanje 84000 sekundi.

Kalibracija efikasnosti provedena je standardom ⁹⁰Sr Češkog metrološkog instituta. Osiguranje kvalitete provodi se sudjelovanjem u međunarodnim međulaboratorijskim usporedbama u organizaciji Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) i Zajedničkog istraživačkog centra (JRC) Europske komisije.

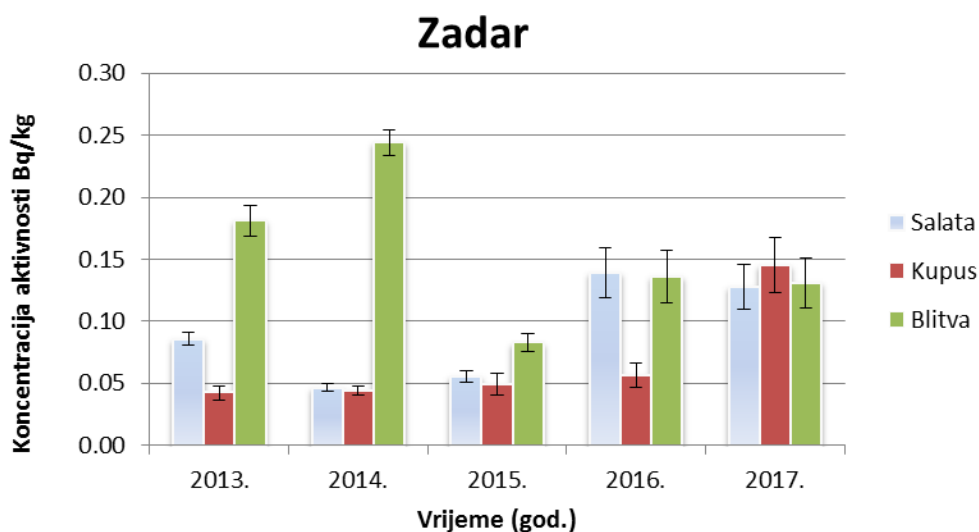
REZULTATI

Na Slici 1 prikazane su vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{90}Sr u ispitivanom povrću tijekom petogodišnjeg vremenskog perioda u Zagrebu. Godišnje vrijednosti se kreću u rasponu od $18,2 \text{ mBq kg}^{-1}$ u uzorku salate iz 2016. godine do 341 mBq kg^{-1} u uzorku blitve iz 2015. godine.



Slika 1. Koncentracija aktivnosti ^{90}Sr u ispitivanom povrću u Zagrebu.

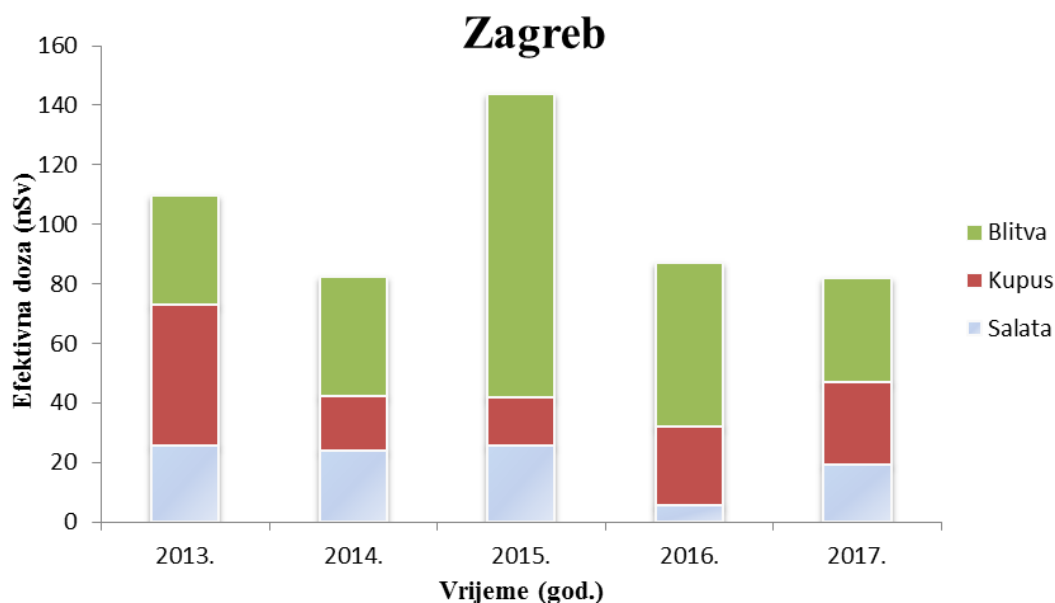
Na Slici 2 prikazani su rezultati koncentracija aktivnosti ^{90}Sr u ispitivanom povrću tijekom petogodišnjeg vremenskog perioda u Zadru. Godišnje vrijednosti se kreću u rasponu od $42,3 \text{ mBq kg}^{-1}$ u uzorku kupusa iz 2013. godine do 244 mBq kg^{-1} u uzorku blitve iz 2014. godine. Izmjerene koncentracije aktivnosti su relativno niske na obje lokacije i variraju unutar dva reda veličine. Uzroci razlika mogu se objasniti različitim čimbenicima. Unos radionuklida u biljke iz tla ovisi o vrsti biljke kao i svojstvima tla na kojemu je uzgajana, poput organskog i kemijskog sastava, kapaciteta zamjene kationa (CEC), pH i dr. Svakako bi trebalo uzeti u obzir i klimatske uvjete u vrijeme uzgoja, pogotovo za ove vrste lisnatog povrća, kao i sam način uzgoja proizvođača. Rezultati uspoređeni s dostupnim objavljenim podacima istraživanja u Europi (Španjolska) su u dobrom slaganju s izmjerenim rezultatima u uzorcima salate, dok su izmjerene vrijednosti koncentracija aktivnosti u kupusu i blitvi nešto više [5].



Slika 2. Koncentracija aktivnosti ^{90}Sr u ispitivanom povrću u Zadru.

Procijenjene su godišnje očekivane efektivne doze unutarnjeg ozračenja unosom ^{90}Sr u ljudski organizam koje ovise o vrijednostima koncentracija aktivnosti izmjerenih i prikazanih na Slikama 1 i 2. Za efektivne doze unutarnjeg ozračenja korišteni su posljednji dostupni podaci o prosjeku godišnje količine utrošenog povrća po stanovniku, koji su navedeni u statističkom ljetopisu Državnog zavoda za statistiku Republike Hrvatske za 2014. godinu i iznose 10,7 kilograma za skupinu lisnatog povrća salate i blitve te 9,3 kilograma za skupinu zeljastog povrća u koju pribrajamo kupus [6]. Isti podaci o utrošenoj godišnjoj količini po stanovniku su upotrijebljeni i za procjenu efektivnih doza unutarnjeg ozračenja i za ostale godine. Ujedno je i uračunat konverzijski faktor efektivne doze po jedinici unesene aktivnosti za odraslog stanovnika (starijeg od sedamnaest godina) za radionuklid stroncija koji iznosi $2,8 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$ [7].

Procijenjene vrijednosti godišnjih očekivanih efektivnih doza unutarnjeg ozračenja ^{90}Sr koje je odrasla populacija primila unosom ispitivanog povrća u Zagrebu i Zadru prikazane su na Slikama 3 i 4. Vrijednosti za Zagreb se kreću u rasponu od 81,84 nSv do 146,79 nSv u ukupnom zbroju pojedinačnih procijenjenih efektivnih doza unutarnjeg ozračenja za sve tri vrste povrća, dok su procijenjene vrijednosti za Zadar u rasponu od 54,16 nSv do 115,16 nSv. Najviša ukupna godišnja vrijednost efektivne doze je procijenjena za 2015. godinu za Zagreb, a najniža procijenjena vrijednost u istoj godini za Zadar. Sve vrijednosti procijenjenih godišnjih efektivnih doza su mnogo niže od dozvoljene ukupne dozne granice izlaganja pojedinca koja iznosi 1 mSv godišnje [8].

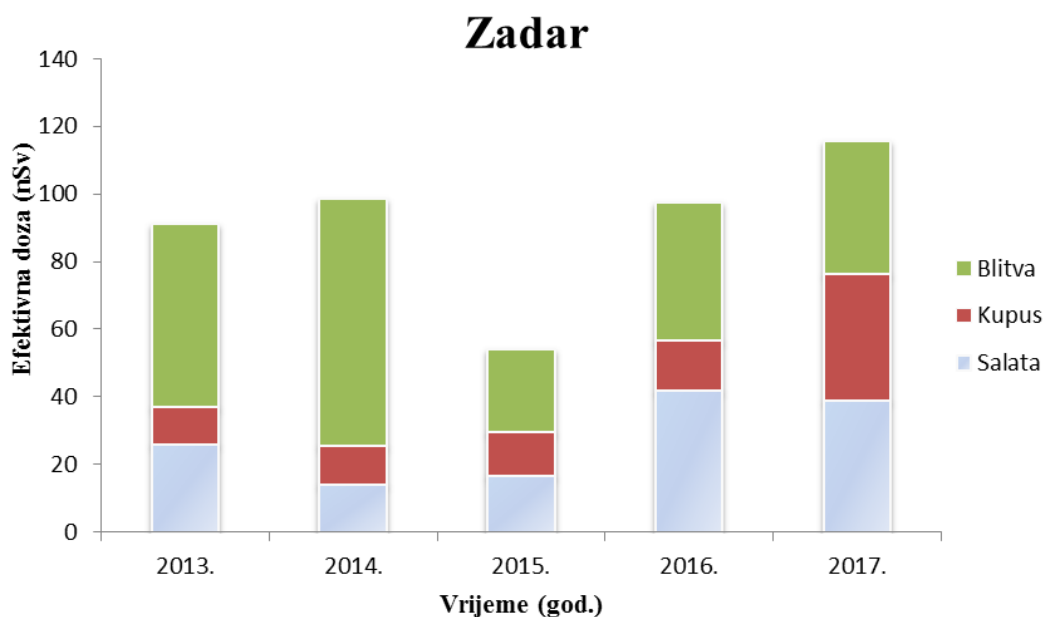


Slika 3. Ukupne godišnje efektivne doze ^{90}Sr koje je odrasla populacija primila konzumiranjem ispitivanog povrća u Zagrebu.

ZAKLJUČAK

Izračunate i prikazane vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{90}Sr na Slikama 1 i 2 su vrlo niske za oba područja. Procijenjene godišnje efektivne doze unutarnjeg ozračenja za odraslu populaciju unosom ispitivanog povrća su također niske. No, možemo zaključiti da su vrijednosti doza procijenjene za Zagreb nešto malo više nego procijenjene vrijednosti za Zadar. Te primljene efektivne doze nemaju značajan utjecaj i ne predstavljaju opasnost za opću populaciju konzumiranjem ovih vrsta povrća. Individualnim pristupom izračuna doza za određene skupine populacije poput djece, vegetarijanaca ili vegana uz podatke o prehranbenim navikama pridonijeli bi boljim saznanjima o primljenim dozama. Svakako bi

trebalo i ubuduće pratiti stanje radioaktivnosti svih sastavnica okoliša i utjecaj svih čimbenika, da bi se lakše uočile promjene i potencijalno radiološko zagađenje te mogući neželjeni učinci na zdravlje čovjeka.



Slika 4. Ukupne godišnje efektivne doze ^{90}Sr koje je odrasla populacija primila konzumiranjem ispitivanog povrća u Zadru.

LITERATURA

- [1] Jakopič R, Benedik Lj. Tracers studies on Sr resin and determination of ^{90}Sr in environmental samples, *Acta Chim Slov* 2005;52:297-302.
- [2] Marović G, Franić Z, Prlić I, Skoko B, Branica G, Senčar J. Aktualna izloženost opće populacije u Hrvatskoj ionizirajućem zračenju, *Arh Hig Rada Toksikol* 2010;61:61-68.
- [3] Burger A, Lichtscheidl I. Strontium in the environment: Review about reactions of plants towards stable and radioactive strontium isotopes. *Sci Total Environ* 2019;653:1458-1512.
- [4] Marović G, Avdić M, Babić D, Bituh T, Branica G, Franić Z, Franulović I, Kolar M, Petrincec B, Petroci LJ, Senčar J, Skoko B, Šoštarić M. Praćenje stanja radioaktivnosti životne sredine u Republici Hrvatskoj za 2013-2017. godinu. Izvještaj IMI-CRZ, Zagreb 2014-2018.
- [5] Ballesteros L, Ortiz J, Gallardo S, Martorell S. An overview of measurements of radionuclides in foods of the *Comunidad Valenciana* (Spain). *Radiat Phys Chem* 2015;116:111-115.
- [6] Statistički ljetopis Republike Hrvatske 2016. Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske, 2016.; str. 211.
- [7] International Atomic Energy Agency Safety Standards for protecting people and the environment. Radiation protection and safety of radiation sources. International Basic Safety Standards No. GRS Part 3. Vienna: IAEA; 2014.
- [8] Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja, NN 38/18.

⁹⁰Sr IN VEGETABLES IN THE CITY OF ZAGREB AND ZADAR

Milica Kovačić, Ljerka Petroci, Iva Franulović, Mak Avdić
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
mkovacic@imi.hr

The Radiation Protection Unit of the Institute for Medical Research and Occupational Health in Zagreb monitors activity concentrations of radionuclides in environmental samples in the Republic of Croatia. This paper presents the results of monitoring ⁹⁰Sr in samples of lettuce, chard and cabbage, obtained in the period from 2013 to 2017 at two locations, in Zagreb and Zadar.

Results for the samples of lettuce, cabbage, and chard vary within two orders of magnitude, ranging from 18.2 mBq kg⁻¹ for lettuce to 341 mBq kg⁻¹ for chard, both samples being collected in Zagreb. These differences can be explained by various factors like pH, organic and chemical properties of soil, different climatic conditions, etc.

We calculated the annual effective doses from ⁹⁰Sr intake by ingestion. The highest value of 146.79 nSv was estimated for 2015 for Zagreb, and the lowest, 54.16 nSv, for Zadar for the same year.

Since the upper limit of public exposure is 1 mSv per year, we can conclude that the estimated doses are low and do not present a health hazard for the population living at these locations and consuming these types of vegetables. Certainly, the radiological condition of the environment and the influence of all related factors should be monitored, in order to detect changes and potential radiological contamination that in the future possibly could have adverse effects on human health.

RADIOAKTIVNOST I ELEMENTI PLATINSKE SKUPINE U ZRAKU ZAGREBA

Gordana Pehnek, Jasmina Rinkovec, Gordana Marović, Branko Petrincec, Jasminka Senčar
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
gpehnek@imi.hr

UVOD

Sustavno praćenje stanja radioaktivnosti u okolišu Republike Hrvatske provodi se u Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI) od 1959. godine, dok su istraživanja kvalitete zraka započela šezdesetih godina prošlog stoljeća. Između brojnih aktivnosti na lokaciji IMI provode se uzorkovanja zraka kroz različite filtre i različite analize među kojima su određivanje koncentracija aktivnosti u zraku prisutnih radionuklida i fizikalno-kemijske analize sastava lebdećih čestica.

U zraku su prisutni prirodni radionuklidi, oni kozmogenog podrijetla ali i oni prirodnog terestrijalnog podrijetla. U ove potonje spada ^{40}K sveprisutan u prirodi, u svim sastavnicama okoliša, dok je ^{210}Pb niži član uranijevog prirodnog radioaktivnog niza. Povišene vrijednosti ^{210}Pb u zraku mogle bi biti posljedica tehnoloških procesa kojima se u nusproduktima ili proizvodima ili otpadu/ispustu uslijed istih tih procesa povećava prirodna radioaktivnost.

Elementi platinske skupine zbog svojih specifičnih svojstava imaju značajnu primjenu u kemijskoj, naftnoj i farmaceutskoj industriji, zrakoplovstvu, poljoprivredi, stomatologiji i medicini. Najrašireniju primjenu imaju platina (Pt), paladij (Pd) i rodij (Rh) u izradi automobilskih katalitičkih pretvornika, čija je svrha smanjenje emisija štetnih plinova iz motornih vozila u zrak. Zbog sve raširenije upotrebe ovih elemenata posljednjih desetljeća dolazi do porasta njihovih koncentracija u zraku [1].

U ovom radu prikazani su rezultati mjerenja koncentracija aktivnosti ^{40}K i ^{210}Pb te masenih koncentracija Pt, Pd i Rh vezanih na lebdeće čestice aerodinamičkog promjera manjeg od $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) u zraku s ciljem utvrđivanja njihovog hoda i međusobnih odnosa.

MATERIJALI I METODE

Mjerenja koncentracije aktivnosti ^{40}K i ^{210}Pb , kao i masenih koncentracija Pt, Pd i Rh u PM_{10} frakciji lebdećih čestica provedena su tijekom 2016. godine na jednoj lokaciji u Zagrebu. Mjerno mjesto nalazilo se u sjevernom, stambenom dijelu grada s umjerenom gustoćom prometa (urbana pozadinska postaja).

Za određivanje koncentracije aktivnosti ^{40}K i ^{210}Pb uzorci zraka skupljaju se neprekidnim pumpanjem velikog volumena zraka pomoću ASS-500 HVS (*High volume sampler*) stanice preko Petrianov filtera (FPP-15-1.5) postavljenih 1,5 metara iznad tla. Uzorak za gamaspektrometrijsko mjerenje zbrojni je uzorak jednog do tri filtra. Svi uzorci obrađeni su visokorezolucijskom gamaspektrometrijom, metodom akreditiranoj prema zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025:2007. Gamaspektrometrijska analiza uzoraka provedena je gamaspektrometrijskim sustavom detektora u laboratoriju Jedinice za zaštitu od zračenja. Detektori su kristali germanija visoke čistoće, proizvođača ORTEC Oak Ridge, SAD, sljedećih karakteristika:

- Ge(Li) detektor (rezolucija 1,87 keV na 1,33 MeV, ^{60}Co , relativna efikasnost 16,8 % na 1,33 MeV, ^{60}Co)
- HP Ge GMX detektor (rezolucija 2,24 keV na 1,33 MeV ^{60}Co , relativna efikasnost 74,3 % na 1,33 MeV ^{60}Co)

Detektori su smješteni u olovne kontejnere, kako bi se osigurala zaštita i nisko osnovno zračenje; povezani su na računala s programskim paketima za skupljanje podataka - spektara,

kao i obradu skupljenih gamaspektara. Korišten je programski paket GammaVision proizvođača ORTEC. Kalibracija efikasnosti provedena je standardima Češkog metrološkog instituta, osiguranje kvalitete određivanja radionuklida provodi se sustavnim sudjelovanjima u usporednim mjerenjima u organizaciji Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) i Svjetske zdravstvene organizacije (WHO) kao i JRC EU

Za određivanje masenih koncentracija Pt, Pd i Rh tjedni uzorci lebdećih čestica sakupljani su na filtre od kvarcnih vlakana proisavanjam približno 700 m³ zraka u razdoblju od 28.12.2015. do 2.1.2017. godine. Uzorci su pripremljeni mikrovalnom razgradnjom u kiselinu (smjesa HNO₃ i HCl) pod povišenom temperaturom i tlakom te analizirani spektrometrijom masa uz induktivno spregnutu plazmu (ICP-MS). Kao unutarnji standard korišten je ¹¹⁵In. Granice detekcije za Pt su 0.045 pg m⁻³, za Pd 0.908 pg m⁻³ i za Rh 0.177 pg m⁻³. Točnost metode određena je dodavanjem poznatih količina certificirane standardne otopine Pt, Pd and Rh na referentni materijal NIST 1648 i ERM CZ120 (PM₁₀ like CRMs). Djelotvornost metode bila je 86 % - 100 % za Pt, 92 % - 115 % za Pd i 90 % - 104 % za Rh [2].

REZULTATI

U Tablici 1 prikazani su sumarni statistički podaci koncentracija aktivnosti ⁴⁰K i ²¹⁰Pb, iz ⁴⁰K izračunatih masenih koncentracija kalija [3], te masenih koncentracija Pt, Pd i Rh u PM₁₀ frakciji lebdećih čestica tijekom 2016. godine. Na Slici 1 prikazan je hod koncentracije aktivnosti ⁴⁰K i ²¹⁰Pb, a na Slici 2 hod masenih koncentracija Pt, Pd i Rh tijekom 2016. godine.

Tablica 1. Sumarni podaci koncentracija aktivnosti ⁴⁰K i ²¹⁰Pb, izračunatih masenih koncentracija K, te masenih koncentracija Pt, Pd i Rh u PM₁₀ tijekom 2016. godine na jednoj lokaciji u Zagrebu.

	Broj uzoraka	Minimum	Maksimum	Srednja vrijednost	Medijan
⁴⁰ K (mBq m ⁻³)	14	0,003	0,034	0,011	0,009
K (μg m ⁻³)	14	0,09	1,09	0,35	0,31
²¹⁰ Pb (mBq m ⁻³)	14	0,256	1,060	0,587	0,585
Pt (pg m ⁻³)	53	0,091	1,895	0,489	0,377
Pd (pg m ⁻³)	53	n.d.*	9,562	2,904	2,845
Rh (pg m ⁻³)	53	n.d.*	1,580	0,429	0,366

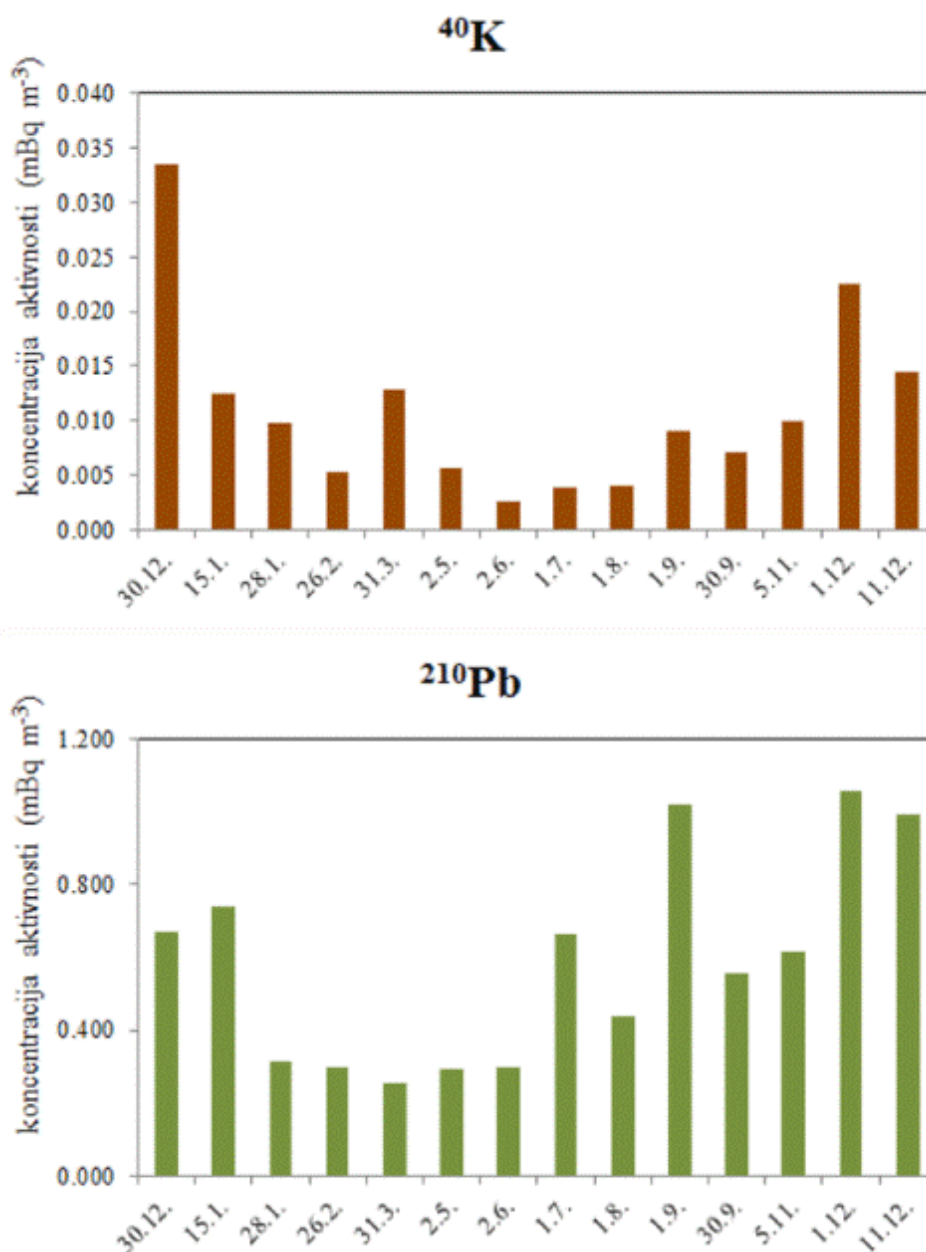
*ispod granica detekcije metode

Kako bi se ispitali međusobni odnosi navedenih elemenata, masene koncentracije Pt, Pd i Rh uprosječene na isti način kao što su određivane koncentracije aktivnosti (mjesečno i dvotjedno usrednjavanje). Metodom linearne regresije izračunati su korelacijski koeficijenti između elemenata (Tablica 2).

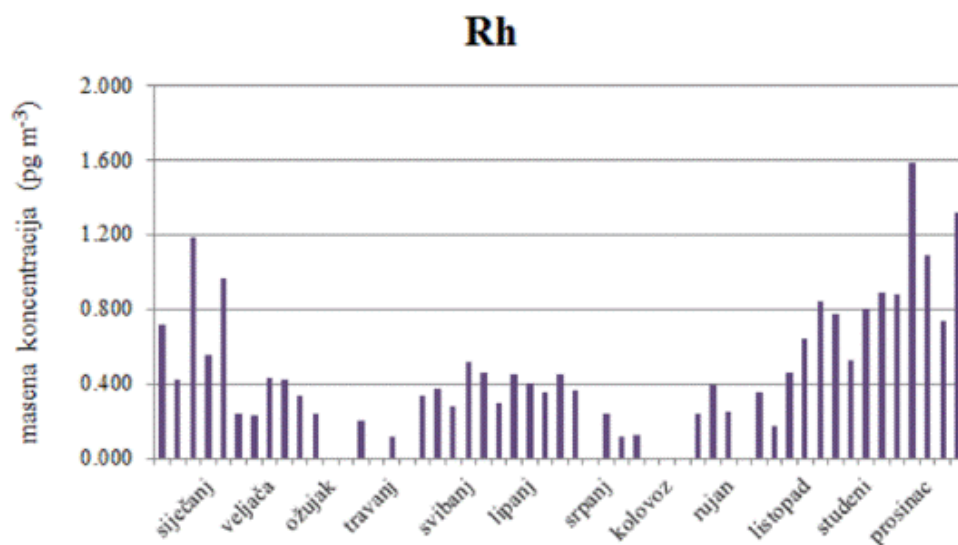
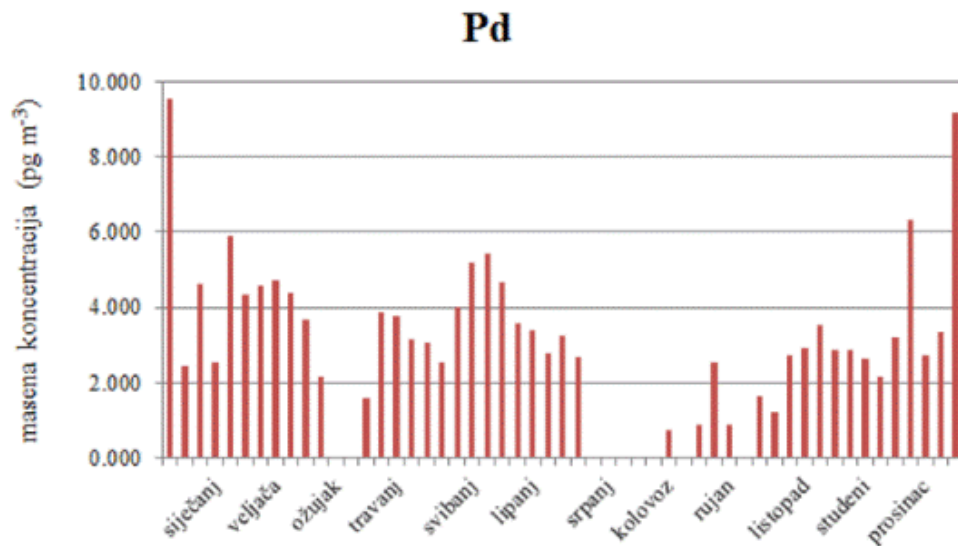
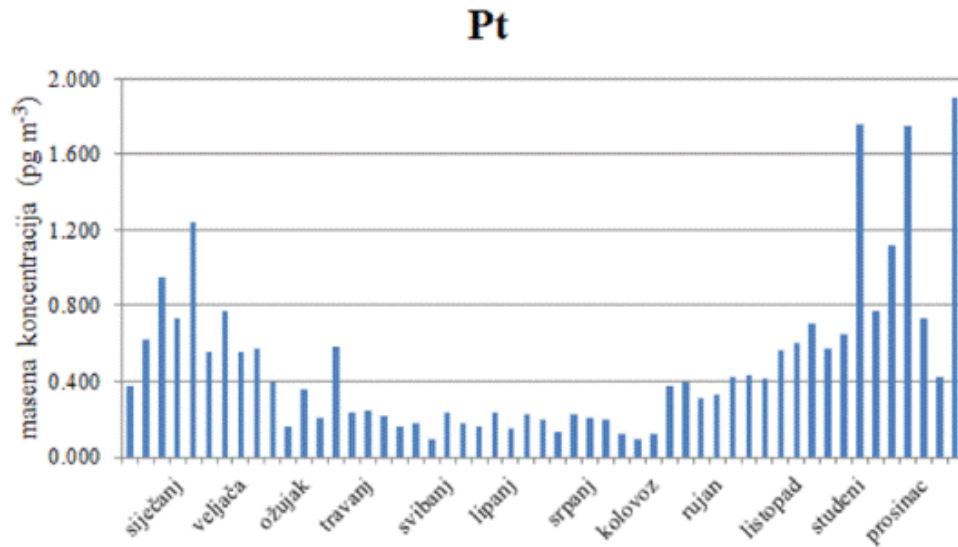
Tablica 2. Linearni korelacijsku koeficijenti između masenih koncentracija elemenata Pt, Pd i Rh i koncentracija aktivnosti ^{40}K i ^{210}Pb (N = 14).

	Pd	Rh	^{40}K	^{210}Pb
Pt	0,495	0,915*	0,498	0,653*
Pd		0,662*	0,693*	0,157
Rh			0,522	0,658*
^{40}K				0,447

*statistički značajne korelacije ($p < 0,05$)



Slika 1. Hod koncentracija aktivnosti ^{40}K i ^{210}Pb tijekom 2016. godine na jednoj lokaciji u Zagrebu.



Slika 2. Hod masenih koncentracija Pt, Pd i Rh tijekom 2016. godine na jednoj lokaciji u Zagrebu.

ZAKLJUČAK

Koncentracije aktivnosti ^{40}K i ^{210}Pb , masene koncentracije K, kao i masene koncentracije Pt, Pd i Rh varirale su tijekom godine, a najviše vrijednosti izmjerene su u pravilu u hladnijem dijelu godine. Povišene koncentracije kalija u zimskim mjesecima mogle bi biti povezane s izgaranjem drva u kućnim ložištima. Omjer koncentracija Pt:Pd:Rh bio 1,1:6,7:1 što je slično odnosu platine, paladija i rodija u novijim automobilskim katalitičkim pretvornicima (0-1 : 8-16 : 1) te ukazuje na promet kao dominantni izvor ovih elemenata u zraku.

Statistički značajna korelacija ($p < 0,05$) pronađena je između Pd i ^{40}K te između Pt i ^{210}Pb . Koncentracije Rh korelirale su s Pt, Pd i ^{210}Pb . Ovi rezultati mogli bi upućivati na njihovo zajedničko porijeklo, te se za donošenje konačnog zaključka planira nastavak istraživanja na većem broju uzoraka.

LITERATURA

- [1] Rao CRK, Trivedi DC. Chemical and electrochemical depositions of platinum group metals and their applications. *Coord Chem Rev* 2005; 249: 613-631.
- [2] Rinkovec J, Pehcec G, Žužul S, Rončević S. Determination of platinum group elements in particulate matter by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Bull Environ Contam Toxicol* 2017; 98: 672-676.
- [3] Marović G, Avdić M, Babić D, Bituh T, Branica G, Franić Z, Franulović I, Kolar M, Petrincec B, Petroci Lj, Senčar J, Šoštarić M. Praćenje stanja radioaktivnosti životne sredine u Republici Hrvatskoj za 2016. godinu. Izvještaj IMI-CRZ-97, Zagreb 2017.

RADIOACTIVITY AND PLATINUM GROUP ELEMENTS IN THE AIR OF ZAGREB

Gordana Pehnec, Jasmina Rinkovec, Gordana Marović, Branko Petrincec, Jasminka Senčar
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
gpehnec@imi.hr

Systematic monitoring of radioactivity in the environment of the Republic of Croatia has been performed at the Institute of Medical Research and Occupational Health (IMROH) since 1959, while air quality research began in the 1960s. Various analyses are carried out, including gamma spectroscopic measurements of air samples and physicochemical analysis of particulate matter. ^{40}K and ^{210}Pb are terrestrial radionuclides of natural origin. Platinum group elements due to their specific properties have significant application in different branches of the industry. The most widely used applications are those of platinum (Pt), palladium (Pd) and rhodium (Rh) in the production of automotive catalytic converters, whose purpose is to reduce the emission of harmful gases from motor vehicles to the air.

This paper presents the results of measurements of ^{40}K and ^{210}Pb radioactivity and mass concentrations of Pt, Pd and Rh bound to airborne particulate matter with an aerodynamic diameter smaller than $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) during 2016 at one location in Zagreb (urban background station).

Average activities of ^{40}K and ^{210}Pb were $0.011\ \text{mBq m}^{-3}$ and $0.587\ \text{mBq m}^{-3}$, respectively. Average mass concentrations of Pt, Pd and Rh were $0.091\ \text{pg m}^{-3}$, $1.895\ \text{pg m}^{-3}$ and $0.734\ \text{pg m}^{-3}$, respectively. All of the measured elements/isotopes showed characteristic variations with the highest values during the colder part of the year. Concentration ratio Pt:Pd:Rh was 1.1:6.7:1 which is similar to the ratio of these elements in newer automobile catalytic converters (0-1 : 8-16:1). Traffic is indicated as a dominant source of Pt, Pd and Rh at this location in Zagreb. A statistically significant correlation ($p < 0.05$) was found between Pd and ^{40}K , and between Pt and ^{210}Pb . Rh correlated with Pt, Pd and ^{210}Pb . These results could indicate their common origin, but to make a final conclusion it is necessary to continue the investigation on a larger number of samples.

ANALYSIS OF INFLUENCE OF METEOROLOGICAL PARAMETERS TO COSMOGENIC RADIONUCLIDES IN FALLOUT

*Nataša B. Sarap, Milica M. Rajačić, Marija M. Janković, Dragana J. Todorović,
Jelena D. Krneta Nikolić*

University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Republic of Serbia
natasas@vinca.rs

INTRODUCTION

Radioactivity in the atmosphere is caused by the presence of radioactive gases and aerosols. These radioactive substances enter the atmosphere as a result of both natural and man-made processes, namely naturally radioactive material, cosmogenic production, nuclear weapons testing and nuclear accidents [1].

Among natural radioactive substances are the isotopes of radon, which are formed through the radioactive decay of ^{238}U , ^{232}Th , and ^{235}U . These isotopes enter the atmosphere through the exchange of soil air with atmospheric air (exhalation) or through diffusion. Most of the other natural radioactive isotopes, such as ^7Be , ^{10}Be , ^{35}S , ^{32}P , ^{33}P , ^{22}Na , ^{14}C , and ^3H arise from the interaction of cosmic rays with the nuclei of the elements present in the air. Mentioned radioisotopes are formed in the stratosphere, which is also the area of their highest concentrations [2].

Radioisotope ^7Be (half-life of 53.3 days) with its short-lived progenies, is the most abundant among naturally occurring radionuclides in air [3]. Tritium is a radioactive isotope of hydrogen (half-life of 12.4 years) that occurs in nature, can originate from natural sources, i.e., from the interaction of cosmic radiation with atmospheric nitrogen. Besides that, elevated levels of tritium arise from anthropogenic sources, thereby disturbing the natural level of tritium [4]. This radioisotope is readily incorporated into water and falls to Earth as precipitation, thus entering the natural hydrological cycle [5].

Artificial radioactive aerosols are formed in nuclear explosions and contain different radioactive isotopes. Among these, ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{14}C , and ^{131}I are considered the most toxic. The altitude that the radioactive aerosols attain and the way in which particles are dispersed, depend on the power of the explosion and on the size of the particles [2].

Radioactive aerosols are removed from the atmosphere mainly by precipitation. This study reports on ten years continuous measurements of concentrations of ^3H and ^7Be in the fallout. The present research was undertaken with the following principal goals: to perceive variations of ^3H and ^7Be concentrations in fallout, to identify the main meteorological parameters which are responsible for the variations of these concentrations and to estimate the correlation between the ground level concentrations associated with changes in meteorological conditions.

MATERIAL AND METHODS

Daily fallout samples were collected at site in Vinča Institute of Nuclear Sciences (N: 44° 47', E: 20° 32', altitude 95 m) using collector with area of 0.24 m². About 500 mL composite monthly sample was distilled to remove any impurities, to reduce quenching, and to prevent the introduction of other radionuclides, which might influence the results of determination of ^3H measurement. Determination of ^7Be in fallout samples was performed in composite monthly samples formed from daily samples which were evaporated to dry residue under infrared lamp, and after then mineralized at 450 °C in annealing furnace. Mineralized sample was packed in geometry of planchet.

The distilled samples were prepared for measurement of ^3H concentration using the method of electrolytic enrichment. The activity concentration of tritium was determined by measuring samples on ultra-low-level liquid scintillation spectrometer LKB-Wallac 1219 RackBeta. The measurement time was 1200 s with series of 12 repetitions for each sample. The tritium concentration was calculated as an average of multiple measurements.

The activity concentration of ^7Be was determined by gamma spectrometry on Canberra HPGc detector of 23 % relative efficiency. The counting time was 60 000 s. The spectra were analysed by Canberra software Genie 2000. The activity concentration of ^7Be was determined via the emission of gamma ray at 477.6 keV.

RESULTS AND DISCUSSION

One of the possible ways of tracking the time change in the concentration of cosmogenic radionuclides in lower layers of the atmosphere is the regular determination of their activity in samples of the total deposit [6,7]. In this study, the monthly activity concentrations of ^3H and ^7Be , given as activities of composite monthly sample per volume (for ^3H) or surface (for ^7Be) are presented.

The results of measurements of monthly activity concentrations ^3H and ^7Be during the period of ten years (1995-2005), are showed in Figures 1 and 2. The activity concentrations of ^3H ranged from 4.03 to 62.47 Bq/L (Figure 1), while the values for ^7Be were between 0.18 and 9.76 Bq/m² (Figure 2).

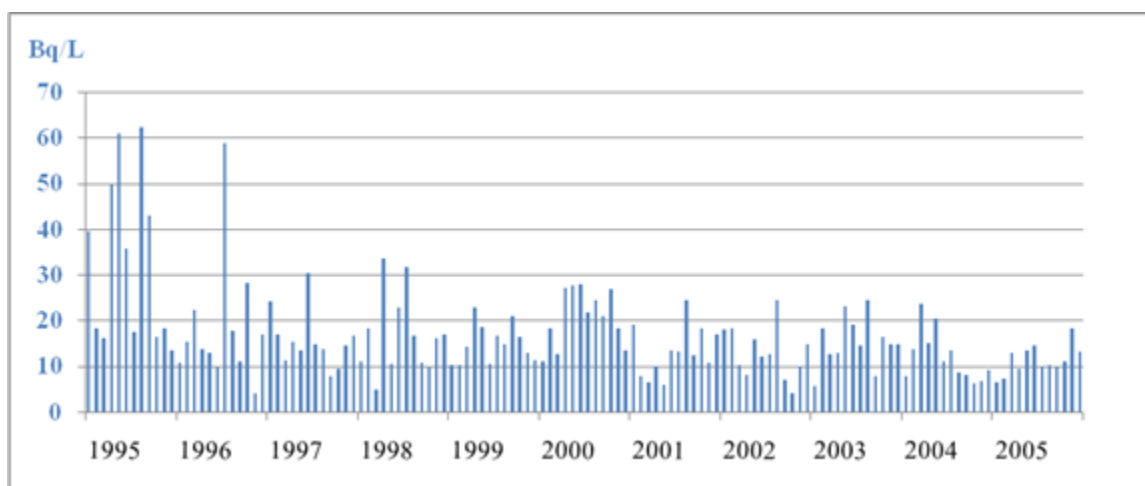


Figure 1. Monthly activity concentration of ^3H during 1995-2005.

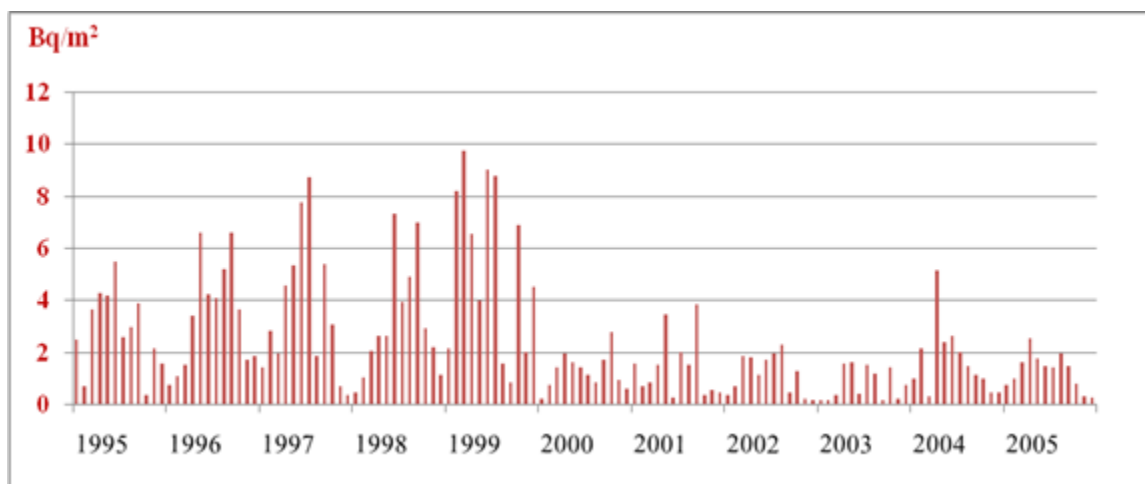


Figure 2. Monthly activity concentration of ^7Be during 1995-2005.

It is evident that the activity concentrations of investigated radionuclides varied during year, so the average values of monthly activity concentrations of each month (monthly indices) were determined. The mentioned values are showed in Figure 3.

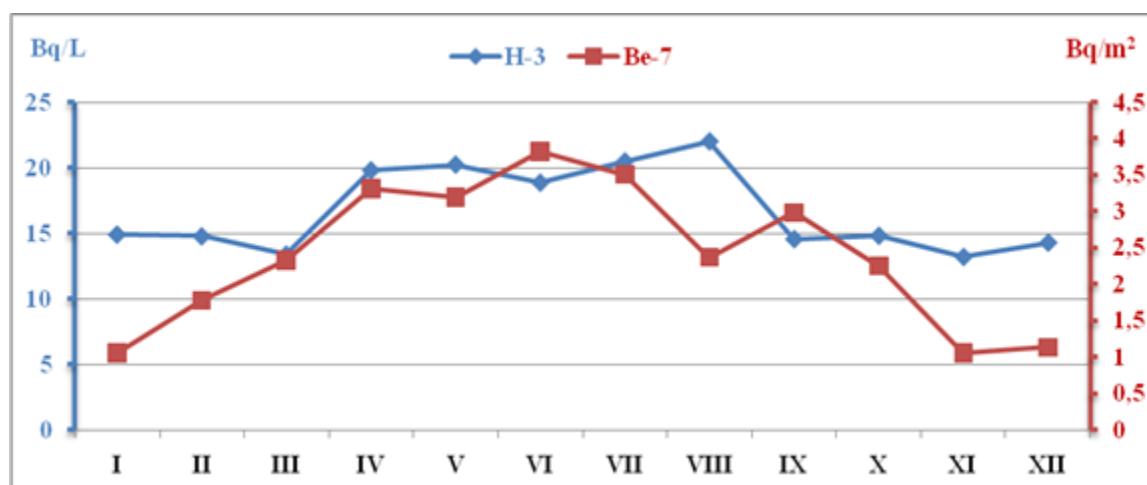


Figure 3. Monthly indices of ³H and ⁷Be activity concentration during 1995-2005.

It was noticed that in warmer period of year the higher concentrations of both investigated cosmogenic radionuclides were detected. This indicates the seasonal character of concentration of cosmogenic radionuclides in the lower layers of the atmosphere. The effect of seasonal character is more pronounced for ⁷Be (Figure 3).

Given that the values of meteorological parameters change with seasons, it was examined in this study how and to what extent these parameters correlate with the change of the concentration of cosmogenic radionuclides in lower layers of the atmosphere. The Pearson's correlation coefficients (r) between the monthly indices of the cosmogenic radionuclides and meteorological parameters such as average daily temperature (°C), air pressure (mbar), cloudiness (scale from 0 oktas - no cloud to 8 oktas - no blue sky), humidity (%) and amount of precipitation (mm) are presented in Table 1.

Table 1. The Pearson's correlation coefficients between cosmogenic radionuclides and meteorological parameters.

Pearson's coefficient	Average daily temperature	Air pressure	Cloudiness	Humidity	Precipitation
³ H	0.77	-0.83	-0.67	-0.70	0.60
⁷ Be	0.83	-0.85	-0.77	-0.85	0.51

Based on the correlations given in Table 1, it was noticed that increase of air pressure, cloudiness and humidity influence on decrease of activity concentration of cosmogenic radionuclides in lower layers of atmosphere ($r < 0$), while the increase of average daily temperature of air and amount of precipitation has the opposite effect ($r > 0$). The correlation with meteorological conditions is associated with the change in the stability of the atmosphere. The increase in air temperature leads to bigger vertical mixing of air, thus enabling the cosmogenic radionuclides formed in the stratosphere to descend into the troposphere easily.

CONCLUSION

This study is focused on the analysis of the results of ^3H and ^7Be activity concentrations in fallout collected at site in Vinča Institute of Nuclear Sciences. Based on the long-term measurements of mentioned radionuclides, seasonal variations were observed. The both investigated cosmogenic radionuclides showed the maximal values concentrations in summer months and minimal in winter months, with the fact that the effect of seasonal character is more pronounced for ^7Be . Besides that, the influence of the meteorological parameters to concentration of ^3H and ^7Be in fallout is analysed. The calculated Pearson's correlation coefficients were indicated that the investigated meteorological parameters have significant influence on the concentration of the both radionuclides in fallout.

Acknowledgement

The authors would like to thank to the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia for material support (Grants III 43009).

REFERENCES

- [1] Arkian F, Salahinejad M, Bidokhti AA, Meshkatee A. Analysis of gross alpha, gross beta activities and beryllium-7 concentrations in surface air: their variations and statistical prediction model. *Environ Monit Assess* 2008;140:325-330.
- [2] Karol' IL. Radioaktivnye izotopy i global'nyi perenos v atmosfere. Leningrad, 1972.
- [3] Todorović D, Popović D, Ajtić J, Nikolić J. Leaves of higher plants as biomonitors of radionuclides (^{137}Cs , ^{40}K , ^{210}Pb , ^7Be) in urban air. *Environ Sci Pollut Res* 2013;20:525-532.
- [4] Nikolov J, Todorovic N, Jankovic M, Vostinar M, Bikit I, Veskovic M. Different methods for tritium determination in surface water by LSC. *Appl Radiat Isotopes* 2013;71:51-56.
- [5] Ojovan MI, Lee WE. Short-lived waste radionuclides. An introduction to nuclear waste immobilisation, Elsevier Science, 2005.
- [6] Janković MM, Todorović DJ. Examining the relationships between the activities of ^3H in precipitation and ^{137}Cs in ground-level air in Belgrade city area. *Water Air Soil Pollut* 2012;223:4471-4483.
- [7] Rajačić MM, Todorović DJ, Janković MM, Nikolić JD, Sarap NB, Pantelić GK. ^7Be in atmospheric deposition: determination of seasonal indices. *J Radioanal Nucl Chem* 2015;303:2535-2538.

ANALYSIS OF INFLUENCE OF METEOROLOGICAL PARAMETERS TO COSMOGENIC RADIONUCLIDES IN FALLOUT

*Nataša B. Sarap, Milica M. Rajačić, Marija M. Janković, Dragana J. Todorović,
Jelena D. Krneta Nikolić*

University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Republic of Serbia
natasas@vinca.rs

The knowledge about cosmogenic radionuclides behaviour and their concentration in fallout is of extreme importance for prevention and control of atmospheric contamination. Due to this, the aim of this study is the determination of ^3H and ^7Be activity concentrations in fallout and the relationship between their activity concentration and the meteorological parameters. For the purpose of this study the fallout samples from the territory of Belgrade city (Republic of Serbia), location Vinča Institute of Nuclear Sciences, were chosen for investigation. The long-term measurements of concentration of mentioned cosmogenic radionuclides in the samples of fallout from this location is performed continuously.

Because of the seasonal character of variation in activity concentrations of ^3H and ^7Be the monthly indices were determined. It was evident that the higher concentrations of both investigated cosmogenic radionuclides detected in warmer period of year. The calculated indices imply that the changes in the climate seasons are followed by the changes in the ^3H and ^7Be activity concentration in fallout. Having in mind since the measured radionuclides are produced by the interaction of the cosmic radiation with the nuclei of the elements present in the atmosphere, the influence of the atmospheric parameters as average daily temperature, atmospheric pressure, cloudiness, humidity and amount of precipitation on monthly indices of the cosmogenic radionuclides was examined. It was concluded that the investigated meteorological parameters have significant influence on the concentration of the both radionuclides in fallout.

ODREĐIVANJE BRZINE AMBIJENTALNOG EKVIVALENTA DOZE ($H^*(10)/t$) U KOPAČKOM RITU

Tomislav Meštrović¹, Branko Petrinec¹, Marko Šoštarić¹, Ana Heđi², Katarina Marjanović²,
Igor Miklavčić², Dinko Babić¹

¹Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb

²Odjel za fiziku Sveučilišta u Osijeku, Osijek

tomislav@imi.hr

UVOD

Dunav kao druga najveća europska rijeka ima poseban značaj u ekosustavu Europe. Riječni sliv podložan je različitim vanjskim utjecajima koji generiraju zagađenja, uglavnom uzrokovane ljudskim djelovanjem poput blizine velikih naseljenih mjesta, ispuštanjem nusprodukata raznih industrija, eksploatiranja poljoprivrednih zemljišta i radom nuklearnih elektrana. Park prirode Kopački Rit (PPKR) jedinstveno je područje zbog svog zemljopisnog položaja u blizini ulijevanja Drave u Dunav, približno na polovini toka Dunava. Također kao zaštićeni Park prirode netaknuto je područje, u najvećoj mogućoj mjeri zaštićeno od direktnog utjecaja ljudi. Cijelo područje PPKR podložno je čestim plavljenjima; izlivanje Dunava iz korita donosi novi materijal koji se u plavnom području taloži. PPKR se nalazi nizvodno od nuklearne elektrane Paks u Mađarskoj. Stoga je potrebno provoditi konstantno praćenje stanja okoliša kako bi se odredila potencijalna zagađenja i njihov utjecaj na živi svijet [1]. Mjerenja brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta ($H^*(10)/t$) gama zračenja u Kopačkom ritu provedena su u sklopu zajedničkog projekta Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada iz Zagreba i Odjela za fiziku Sveučilišta u Osijeku pod nazivom "Radiološka karakterizacija Kopačkog rita".

MATERIJALI I METODE

Mjerenja su provedena metodom "ME - 608 - 002 Određivanje brzine prostornog (ambijentalnog) ekvivalenta doze; $H^*(10)/t$ " koja je akreditirana prema zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025. Mjerenje je uređajem Thermo Eberline FH40G-L10 (10 nSv/h - 100 mSv/h; 30 keV – 4,4 MeV) i pripadajućom sondom NBR-Detector FHZ 672 E-10 (1 nSv/h - 100 μSv/h; 40 keV – 4,4 MeV), umjerenima u SSDL Instituta Jožef Stefan, Slovenija. Vremenski interval mjerenja bio je 5 s, a ukupno mjerenje na pojedinoj lokaciji trajalo je minimalno 15 minuta, što daje 180 pojedinačnih mjerenja iz kojih je izračunata srednja vrijednost s pripadajućom nesigurnošću.

Izbor mjernih lokacija nije bio proizvoljan već je bio uvjetovan dodatnim zahtjevima: potrebno je bilo uskladiti lokacije mjerenja s već utvrđenim lokacijama na kojima je provedeno uzorkovanje i mjerenje ostalih parametara (radon, koncentracija aktivnosti radionuklida u tlu), kako bi se mogli dobiti što pouzdaniji rezultati. Osim toga, cjelokupno područje PPKR zbog svoje povremene plavnosti nedostupno je za mjerenja na proizvoljnim lokacijama. Stoga je bilo potrebno odabrati mjesta na koja će se moći pristupiti većim dijelom godine, s obzirom da je ukupna površina od 177 km² uglavnom neprohodna i nedostupna za vršenje ispitivanja. Prikazani su rezultati za 15 lokacija na kojima su vršena mjerenja. Neke od lokacija nalaze se van samog parka prirode, no mogu se smatrati područjem od interesa za ovu vrstu ispitivanja.

REZULTATI

Na Slici 1 prikazane su lokacije 15 mjernih točaka koje su dio ovog rada.



Slika 1. Lokacije mjerenja $H^*(10)/t$.

1 Batina, 2 Bilje, 3 Vukovar, 4 Kneževi Vinogradi, 5 Tikveš, 6 Zlatna greda, 7 Podunavlje - Park prirode, 8 Kazuk, 9 Dvorac Tikveš, 10 Zlatna Greda II, 11 Kozjak, 12 Mirkovac, 13 Kopačko Jezero / Hulovski kanal, 14 Sokolovac, 15 Lug

U Tablici 1 dane su vrijednosti za svaku pojedinu lokaciju. Rezultati prikazani u navedenoj tablici srednje su vrijednosti svih mjerenja vršenih na spomenutim lokacijama u razdoblju od 2016. do 2018. godine.

Ukupna srednja vrijednost za cijelo mjerno područje iznosi:

$$\dot{H}^*(10) = (88 \pm 9) \text{ nSv/h}$$

te je niža od prosječne vrijednosti brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta za Republiku Hrvatsku [2].

Tablica 1. Vrijednost $H^*(10)/t$ na svih 15 lokacija.

Lokacija	$H^*(10)/t$ (nSv/h)
1 Batina	(84 ± 6)
2 Bilje	(100 ± 4)
3 Vukovar	(86 ± 3)
4 Kneževi Vinogradi	(93 ± 4)
5 Tikveš	(105 ± 5)
6 Zlatna Greda	(83 ± 5)
7 Podunavlje - Park prirode	(82 ± 5)
8 Kazuk	(80 ± 20)
9 Dvorac Tikveš	(105 ± 5)
10 Zlatna Greda II	(85 ± 5)
11 Kozjak	(81 ± 5)
12 Mirkovac	(82 ± 5)
13 Kopačko Jezero/Hulovski kanal	(83 ± 5)
14 Sokolovac	(82 ± 5)
15 Lug	(88 ± 5)

ZAKLJUČAK

Provedena su mjerenja brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta ($H^*(10)/t$) na području PPKR na 15 lokacija. Rezultati pokazuju vrijednosti brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta manje od prosjeka u RH [2]. Ostala mjerenja koja nisu ovdje prikazana, a dio su projekta "Radiološka karakterizacija Kopačkog rita" također potvrđuju da su vrijednosti niže od prosječnih vrijednosti te da na cijelom području nije nađeno mjesto ni izvor povećane vrijednosti brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta ($H^*(10)/t$) [3].

Daljnja mjerenja i ispitivanja su u planu, praćenje stanja na istim lokacijama, a u dogovoru s ostalim suradnicima na projektu možda će se mjerenja vršiti i na novim dodatnim lokacijama.

Zahvala

Sva mjerenja izvršena su uz logističku podršku djelatnika Odjela za fiziku Sveučilišta u Osijeku te im se ovim putem zahvaljujem na suradnji.

LITERATURA

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA). International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. Vienna: IAEA; 1996.
- [2] Marović G, Avdić M, Babić D, Bituh T, Branica G, Franić Z, Franulović I, Kolar M, Petrincec B, Petroci LJ, Senčar J, Skoko B. Praćenje stanja radioaktivnosti životne sredine u Republici Hrvatskoj za 2012-2017. godinu. Izvještaj IMI-CRZ, Zagreb 2013-2018.
- [3] Petrincec B, Poje Sovilj M, Babić D, Meštović T, Miklavčić I, Radolić V, Stanić D, Vuković B, Šošarić M. Assessing the radiological load on the environment in the middle Danube river basin on the basis of a study of the Kopački Rit Nature Park, Croatia; Radiation and Environmental Biophysics 2018;57:285-292.

AMBIENT DOSE EQUIVALENT RATE ($\dot{H}^*(10)/t$) IN KOPAČKI RIT NATURE PARK

Tomislav Meštrović¹, Branko Petrinc¹, Marko Šoštarić¹, Ana Heđi², Katarina Marjanović², Igor Miklavčić², Dinko Babić¹

¹Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia

²J. J. Strossmayer University in Osijek, Department of Physics, Osijek, Croatia

tomislav@imi.hr

This paper reports on results of the measurements of ambient dose equivalent rate $\dot{H}^*(10)$ at 15 locations in the Kopački Rit Nature Park. These measurements were performed between 2016 to 2018.

The primary focus of this research was to obtain the values of $\dot{H}^*(10)$ in the area, in order to check whether they are below the limits set up by the State Office for Radiological and Nuclear Safety. Each measurement was carried out at 1 meter above the ground (soil), the sampling time being 15 minutes.

Measurement results show no significant differences between the locations, and the measured values are lower than or within the range of values for natural background radiation in Croatia. Further monitoring and measurements are planned.

RETROSPEKTIVNI PRIKAZ RADIOAKTIVNOSTI TEKUĆIH ISPUSTA IZ NUKLEARNE ELEKTRANE KRŠKO

Gorana Karanović¹, Ivana Coha¹, Ivana Tucaković¹, Aleš Volčanšek², Borut Breznik²,
Željko Grahek¹

¹Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska

²Nuklearna elektrana Krško, Krško, Slovenija

zgrahek@irb.hr

UVOD

U tekućim ispuštima iz Nuklearne elektrane Krško (NEK) u rijeku Savu nalaze se rezidui radioaktivnih izotopa zaostalih iz procesa evaporacije tekućeg radioaktivnog otpada te pranja radne odjeće koja se upotrebljava u kontroliranom području elektrane. Glavnina ispuštenih izotopa dolazi iz tzv. *waste monitor tanka* WMT-a dok je doprinos radioaktivnosti ostalih ispusta, kao što su ispusti parogeneratora i ocjednika zgrade za hlađenje komponenta, zanemariv. S obzirom da domaća i međunarodna legislativa propisuje dopuštene granične vrijednosti radioaktivnosti koja se smije ispustiti u prirodni vodotok, u sklopu redovitog nadzora rade se analize sadržaja radionuklida u tekućim ispuštima dugi niz godina. To uključuje praćenje količine ispuštenih gama emitera, tricija, ^{89,90}Sr te ⁵⁵Fe. Stoga je glavni cilj ovog rada prikazati količinu ispuštenih radionuklida u rijeku Savu u razdoblju od 2008. do 2018. godine te usporediti dobivene podatke s dopuštenim graničnim vrijednostima pripadne radioaktivnosti. Istodobno se želi pokazati podudarnost rezultata mjerenja radionuklida u tekućim ispuštima koje čitavo vrijeme istovremeno rade Laboratorij NEK-a te Laboratorij za radioekologiju (LRE) Instituta Ruđer Bošković (temeljem ugovora o praćenju ispusta iz NEK) s ciljem ocjene pouzdanosti i točnosti dobivenih rezultata.

MATERIJALI I METODE

Količina ispuštenih radionuklida procjenjuje se na temelju njihovog kvantitativnog određivanja u mjesečnim kompozitnim uzorcima WMT-a koji se pripremaju uzimanjem alikvota svakog pojedinog ispusta tijekom mjeseca. U kompozitnim uzorcima radionuklide određuju oba laboratorija. Laboratorij NEK-a također kvantificira radionuklide u svakom pojedinom ispustu. Za kvantitativno određivanje radionuklida oba laboratorija upotrebljavaju akreditirane metode sukladno međunarodnoj normi ISO 17025; gama spektrometrija za gama emitere, LSC (liquid scintillation counting-tekućinsko scintilacijsko brojenje) za tricij i ⁵⁵Fe te beta brojenje za određivanje ^{89,90}Sr. Gama emiteri i tricij određuju se u oba Laboratorija, a ^{89,90}Sr i ⁵⁵Fe samo u LRE. Uspoređuju se rezultati mjerenja kompozitnih uzoraka u IRB-u s rezultatima mjerenja kompozitnih i pojedinačnih uzoraka u NEK-u (IRB/NEK kompozit, IRB/NEK pojedinačno).

REZULTATI I RASPRAVA

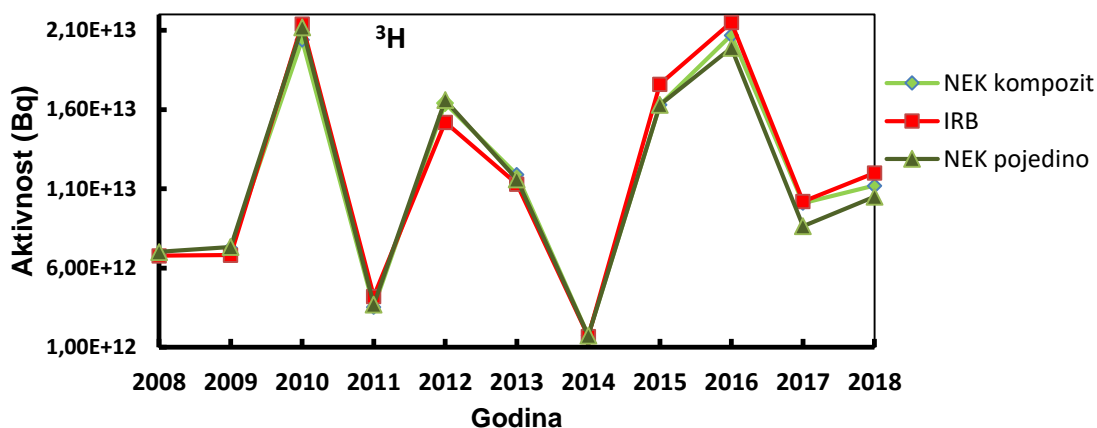
Operativna dozvola dopušta NEK-u godišnji ispust 45 TBq tricija te 100 GBq ostalih radionuklida (gama emiteri, ⁵⁵Fe, ^{89,90}Sr) u vodotok rijeke Save. U razdoblju od 2008. do 2018. godine NEK je proizvela 61,3 TWh sati električne energije s ukupno ispuštenim volumenom tekućeg otpada iz WMT-a od 18100 m³. U navedenom jedanaestogodišnjem razdoblju prema mjerenjima IRB-a ukupno je iz WMT-a ispušteno 129 TBq ³H, 358 MBq gama emitera, 63 MBq ⁵⁵Fe i 0,9 MBq ⁹⁰Sr. Računajući prema dopuštenim granicama to za jedanaestogodišnje razdoblje iznosi 26 % od dopuštene aktivnosti za tricij te svega 0,038 % za ostale radionuklide od čega 85 % čine ispusti gama emitera (za 11 godina dopušteno 495 TBq tricija i 1100 GBq ostalih). U Tablici 1 prikazani su podaci o proizvedenoj električnoj energiji

te postotak ispuštenog tricija i gama emitera u odnosu na dopuštene vrijednosti, a izračunate iz rezultata mjerenja IRB-a [1,2]. Nadalje, na Slikama 1 i 2 prikazani su rezultati mjerenja ispuštene aktivnosti tricija po godinama u laboratorijima na IRB-u i u NEK-u.

Tablica 1. Godišnja proizvedena električna energija i postotak od dopuštene godišnje aktivnosti tekućih ispusta izračunatih prema mjerenjima IRB-a u WMT-u.

Godina	2008.	2009.	2010.	2011.	2012.	2013.	2014.	2015.	2016.	2017.	2018.
TWh	5,97	5,46	5,38	5,90	5,24	5,04	6,06	5,37	5,43	5,97	5,49
$^3\text{H}(\%)$	15,1	15,2	47,6	9,4	33,8	25,1	3,1	39,7	47,8	22,7	26,7
Gama(%)	0,065	0,049	0,028	0,023	0,084	0,045	0,032	0,016	0,006	0,003	0,006

Kao što je vidljivo, najveće ispuštene aktivnost tricija bile su u 2010. i 2016. godini cca. 48 % od dopuštene na godišnjoj razini. Treba napomenuti da je dopuštena aktivnost tricija od 45 TBq za godišnji ispušt sama po sebi vrlo konzervativna pogotovo ako se usporedi s primjerice 19 PBq koliko je dopušteno za godišnji ispušt nuklearne elektrane PAKS [3].



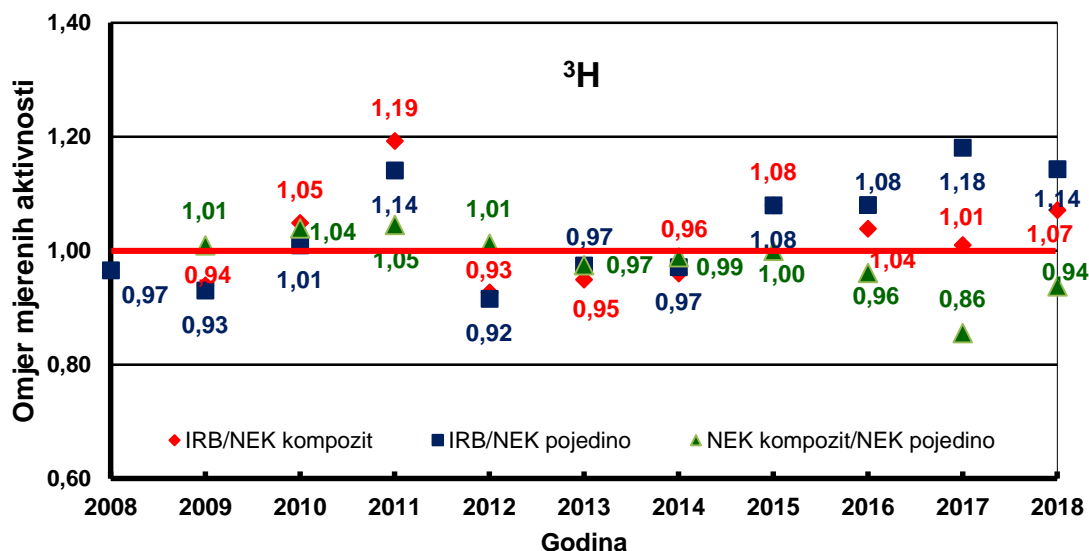
Slika 1. Usporedba rezultata mjerenja godišnje ukupne ispuštene aktivnosti ^3H iz WMT-a dobivene kao umnožak volumena ispuštene vode iz WMT i koncentracije aktivnosti tricija izmjerenog u laboratorijima IRB-a i NEK-a.



Slika 2. Usporedba rezultata mjerenja godišnje koncentracije aktivnosti ^3H u WMT-u.

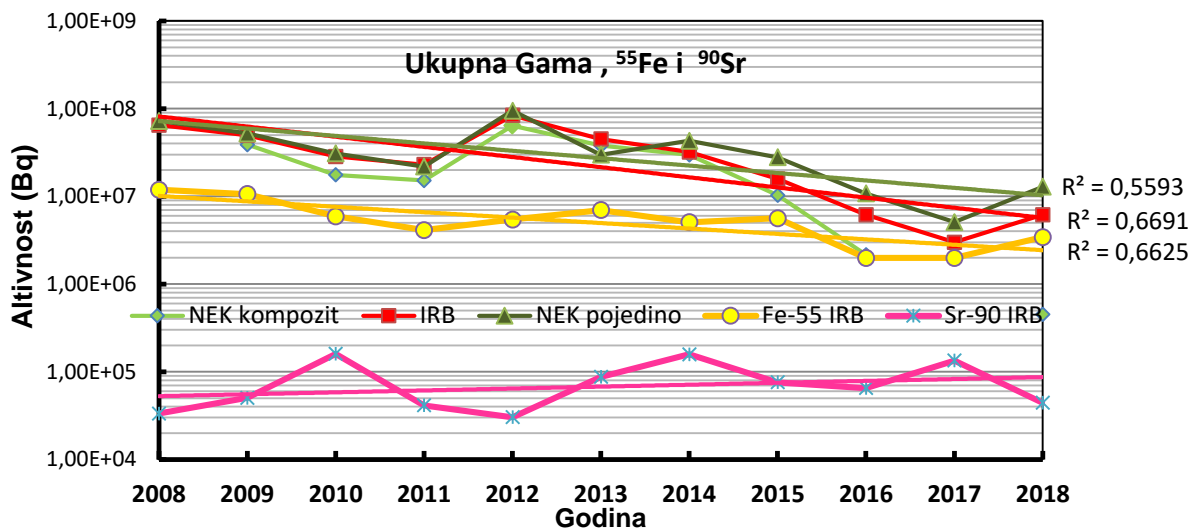
Prema mjerenjima NEK-a u pojedinačnim uzorcima u jedanaestogodišnjem razdoblju ispušteno je 125 TBq tricija i 402 MBq gama emitera, a prema mjerenjima kompozitnog uzorka, 120 TBq tricija i 216 MBq gama emitera (dopušteno 495 TBq tricija i 1100 GBq ostalih). Usporede li se rezultati mjerenja tricija u oba laboratorija proizlazi da je međusobno odstupanje 3,2 % za pojedinačne i 7,5 % za kompozitni uzorak što govori u prilog prihvatljivoj

pouzdanosti procjene ukupne ispuštene godišnje aktivnosti. Potrebno je napomenuti da oba laboratorija koriste akreditirane metode za određivanje te se tijekom godine uspoređuju rezultati mjerenja na mjesečnoj bazi. Na Slici 3 prikazana su međulaboratorijska odstupanja u mjerenjima u kompozitnom uzorku te u pojedinačnim uzorcima. Kao što se može vidjeti, odstupanja u mjerenjima u NEK-u i IRB-u su u granicama prihvatljivosti s tim da valja napomenuti da u promatranom razdoblju (11 godina) prosječno odstupanje u mjerenjima između IRB i NEK-a za kompozitne uzorke iznosi 2 %, a za pojedinačne 4 %.



Slika 3. Međulaboratorijska odstupanja u mjerenju aktivnosti tricija u WMT-u na godišnjoj razini.

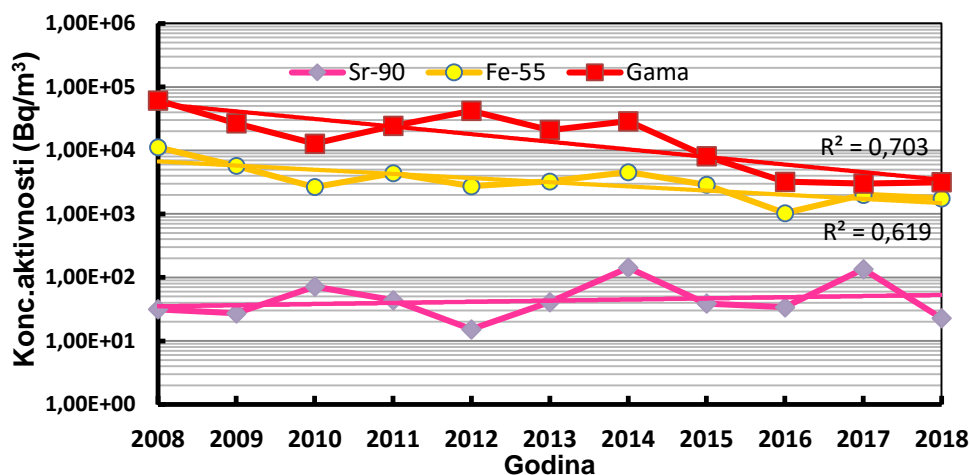
U usporedbi s tricijem, ukupna ispuštena gama aktivnost gotovo je zanemariva, a to vrijedi i u odnosu na aktivnost dopuštena za ispušt (gama i ostali ukupno 100 GBq godišnje).



Slika 4. Usporedba mjerenja ispuštene ukupne godišnje aktivnosti gama emitera te godišnje ispuštene aktivnosti ^{55}Fe i ^{90}Sr mjerene na IRB-u.

Uz to, postoji vidljiv trend smanjivanja ispuštene aktivnosti u razdoblju od 2008. do 2018. godine (Slika 4). Tako je u 2008. godini IRB u kompozitnom uzorku detektirao ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{125}Sb , ^{134}Cs i ^{137}Cs dok je NEK u pojedinačnim uzorcima uz navedene izotope detektirao još ^{99}Mo , ^{131}I i ^{133}I . U 2018. godini u pojedinačnim uzorcima sporadično su detektirani ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ^{137}Cs te ^{95}Nb i ^{255}Sb , a IRB je detektirao

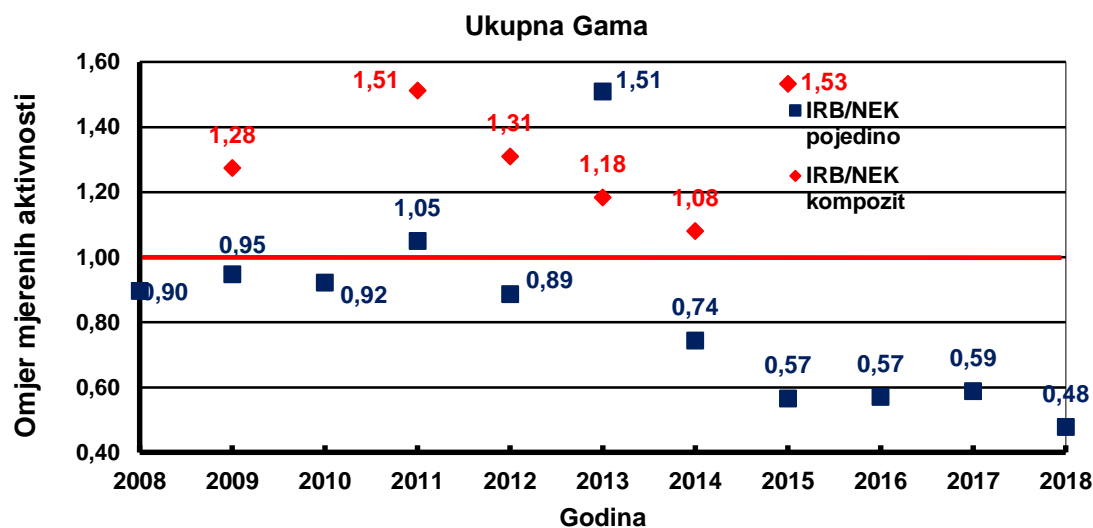
samo ^{58}Co , ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ^{137}Cs . Na Slici 4 prikazani su rezultati usporednih mjerenja gama emitera u IRB-u i NEK-u za promatrano razdoblje koji potvrđuju navedenu konstataciju. Iz rezultata mjerenja ^{55}Fe i ^{90}Sr u IRB-u može se uočiti trend opadanja ispuštene aktivnosti ^{55}Fe dok je ispuštena aktivnost ^{90}Sr gotovo konstantna kroz čitavo razdoblje. To je bolje uočljivo na Slici 5 gdje su dane koncentracije aktivnosti izračunate iz ispuštenog godišnjeg volumena te mjerenja godišnjih aktivnosti koje je radio IRB.



Slika 5. Ispuštene godišnje koncentracije aktivnosti gama emitera, ^{55}Fe i ^{90}Sr izračunate iz godišnjeg ispuštenog volumena WMT-a i mjerenih aktivnosti na IRB-u

Za razliku od usporednih mjerenja koncentracije aktivnosti tricija, gdje je podudarnost rezultata mjerenja na zavidnoj razini, kod mjerenja gama emitera postoje značajne razlike. Naime, iz rezultata prikazanih na Slici 6 proizlazi da su odstupanja u pojedinim godinama veća od 50 %. Ta odstupanja rezultat su metodologije gamaspektrometrijskih mjerenja. U pravilu, odstupanja su veća za godine u kojima je ispuštena aktivnost manja. Naime, NEK nije detektirao aktivnosti ispod svog propisanog praga detekcije. S druge strane IRB je zbog znatno dužeg vremena brojenja odredio niske aktivnosti pojedinih nuklida koje su onda uzete za izračun ukupne aktivnosti pa od tuda proizlazi spomenuta razlika. Primjerice, NEK u 2011. godini nije detektirao ni jedan gama emiter u pet mjesečnih kompozitnih uzoraka WMT-a dok je IRB u tom razdoblju detektirao barem jedan u svim mjesečnim kompozitnim uzorcima. Prema tome, iz kalkulacija je proizašlo da je odstupanje na godišnjoj razini 51 % premda rezultati mjerenja pojedinih izotopa u mjesečnim uzorcima nisu odstupali u prosjeku više od 10 % (iako je sporadično bilo i 30 % odstupanja uglavnom kod mjerenja nižih aktivnosti). S druge strane, odstupanje između NEK-a za pojedinačne uzorke i IRB-a za tu godinu bilo je svega 5 %. Razlog tome je što je kompozit presjek aktivnosti svih ispusta od kojih neki mogu biti bez aktivnosti dok se kod svakog ispusta mjere aktivnosti u pojedinom uzorku. Međutim, i kod pojedinačnih mjerenja možemo primijetiti da odstupanja rastu s opadanjem aktivnosti. Naime, i to se može promatrati kao rezultat metodologije mjerenja jer se kod kratkog vremena mjerenja smanjuje točnost te povećava mjerna nesigurnost što može dovesti do podcijenjenosti ili precijenjenosti stvarne aktivnosti. Ako se pogledaju rezultati u Tablici 1 te na Slikama 4, 5 i 6, vidjet ćemo da su međusobna odstupanja u procijenjenoj aktivnosti manja kad je veća ispuštena gama aktivnost i obrnuto. To je naročito uočljivo za nekoliko zadnjih godina kad je postotak ispuštene aktivnosti u odnosu na dopuštenu manji od $2 \cdot 10^{-2} \%$. Međutim, unatoč odstupanju većem od 20 % u zadnjih nekoliko godina, za promatrano jedanaestogodišnje razdoblje razlika u procijenjenoj ispuštenoj aktivnosti između IRB-a i NEK-a na monitoru iznosi 10 % ($3,58\text{E}+08$ Bq IRB, $4,02\text{E}+08$ Bq NEK monitor). To znači da je procijenjena ispuštena gama aktivnost za promatrano razdoblje realna i daleko je ispod

dopuštene granice. Usporedbe radi, ispuštena aktivnost gama emitera od 400 MBq za jedanaest godina jednaka je aktivnosti jedne PET CT pretrage (3,7 – 7,4 MBq po kilogramu mase pacijenta), odnosno gotovo je dva puta manja od prosječne aktivnosti koja se upotrebljava kod scintigrafije kostiju (740 MBq ^{99m}Tc) [4,5].



Slika 6. Međulaboratorijska odstupanja u mjerenju gama emitera u WMT-u po godinama.

Tablica 2. Usporedba godišnjih ispuštenih aktivnosti tricija u Savu s prosječnom godišnjom koncentracijom aktivnosti tricija u savskoj vodi na lokaciji Jesenice

Godina	2008.	2009.	2010.	2011.	2012.	2013.	2014.	2015.	2016.	2017.	2018.
^3H NEK (TBq)	6,78	6,82	21,4	4,21	15,2	11,3	1,68	17,6	21,5	10,2	12,0
^3H Sava (Bq/l)	1,4	1,3	3,6	1,1	3,1	2,2	0,53	1,9	3,4	1,4	1,3

Na kraju, ako se analiziraju prethodni rezultati može se zaključiti da je doprinos radioaktivnom zagađenju rijeke Save putem tekućih ispusta iz NEK-a minoran, a i taj dio uglavnom je rezultat ispusta tricija. Naime, jedino je ispušten tritij mjerljiv u vodi rijeke Save što se može vidjeti iz rezultata prikazanih u Tablici 2 [6]. Lako je zapaziti da variranje koncentracije tricija u Savi ovisi o ispuštenoj aktivnosti tricija iz NEK-a, tj. utjecaj na godišnjoj razini je vidljiv kad ispuštena aktivnost prijeđe određenu granicu (prirodna aktivnost tricija kreće se do 1 Bq/l) o čemu je detaljno pisano u radu [7].

LITERATURA

- [1] Izvještaji o tekućim radioaktivnim ispustima iz NE Krško 2008.-2018., IRB, Zagreb.
- [2] Godišnje izvješće za 2017. NEK, Krško 2018.
- [3] HAKSER, Annual review 2014, OKSSI Budapest 2016.
- [4] Miller J, Radiopharmaceutical development at the Massachusetts General hospital archived from the original. on February 11, 2015. http://www2.massgeneral.org/imagingintranet/pdf/news/miller_janet_4_17_09.pdf
- [5] Van den Wyngaert, T, Strobel, K et al. The EANM practice guidelines for bone scintigraphy. Eur J Nucl Med Mol Imaging 2016;43:1723–1738.
- [6] Nadzor radioaktivnosti v okolici NEK, letna poročila 2008.-2018., IJS Ljubljana.
- [7] Grahek Ž, Breznik B, Stojković I, Cocha I, Nikolov J, Todorović N. Measurement of tritium in the Sava and Danube Rivers. J Environ Radioact 2016;162-163:56-67.

RETROSPECTIVE REVIEW OF RADIOACTIVITY OF LIQUID EFFLUENTS FROM THE NUCLEAR POWER PLANT KRŠKO

*Gorana Karanović¹, Ivana Coha¹, Ivana Tucaković¹, Aleš Volčanšek², Borut Breznik²,
Željko Grahek¹*

¹Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

²Nuclear Power Plant Krško, Krško, Slovenia

zgrahek@irb.hr

In liquid effluents from Nuclear Power Plant Krško (NEK) that are discharged into the Sava River, residual radioactive isotopes are left behind from the process of liquid waste treatment. Most of the isotopes released come from the waste monitor tanks WMT. Given that domestic and international legislation prescribes permitted limit values of radioactivity that can be released into natural watercourses under regular surveillance, radionuclide content analysis has been carried out in liquid waste for many years. This includes monitoring the amount of gamma emitters, tritium, ^{89,90}Sr and ⁵⁵Fe so that the results of the measurement of the amount of discharged radionuclides in the Sava River in the period 2008-2018 are presented and compared with the permissible radioactivity limit. Simultaneously the match of the results of the radionuclide measurements in the Laboratory of Nuclear Power Plant Krško, (NEK) and the Laboratory for Radioecology of the Ruđer Bošković Institute (IRB) are shown.

In the eleven-year period according to the IRB measurements, 129 TBq of ³H, 358 MBq of gamma emitters, 63 MBq of ⁵⁵Fe and 0.9 MBq of ⁹⁰Sr were discharged from WMT into the Sava River. According to NEK measurements of single release samples from WMT in the eleven-year period, 125 TBq of ³H and 402 MBq of gamma emitters were discharged into the Sava River. In addition, 120 TBq of ³H and 216 MBq of gamma emitters were discharged according to the NEK measurement of composite samples. These values reached for eleven-year period 26 % of the permitted tritium discharge and only 0.038 % of the permitted discharged radioactivity for other radionuclides in which 85 % was gamma emitters (for 11 years 495 TBq of ³H and 1100 GBq of other radionuclides can be discharged according to operational license, 45 TBq per year for tritium and 100 GBq per year of gamma and others). If the results of measurement of ³H activity are compared, it arises that the difference between assessed ³H activity in IRB laboratory and in NEK laboratory was 3.2 % and 7.5 %, for measuring single released and composite samples, respectively. These results support the reliability of the reported total annual ³H activity discharge into the Sava River. Compared with tritium, the total released gamma activity is almost negligible and shows visible trend of reducing the discharged activity from 2008 to 2018. Unlike ³H, where high correlation in the measurement results in both laboratories was observed, there are specific deviations between NEK and IRB results for gamma emitting radionuclides. These deviations can be attributed to the methodology of gamma spectrometric measurement. Namely, the deviations were greater for years with low released activity, where NEK did not detect the activities below its prescribed detection threshold, while, due to the use of significantly longer counting time, the IRB determined the low-level activity of certain nuclides, which were then considered for the calculation of total activity and hence resulted in greater deviations.

IZOTOPNE ANALIZE U ZAGREBAČKOM VODONOSNIKU – VODOCRPILIŠTE KOSNICA

Jadranka Barešić¹, Zoran Kovač², Jelena Parlov², Ivona Mijatović³, Ines Krajcar Bronić¹,
Andreja Sironić¹, Damir Borković¹

¹ Institut Ruđer Bošković, Zagreb

² Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

³ IFB Eigenschenk GmbH, Deggendorf, Bavaria, Germany

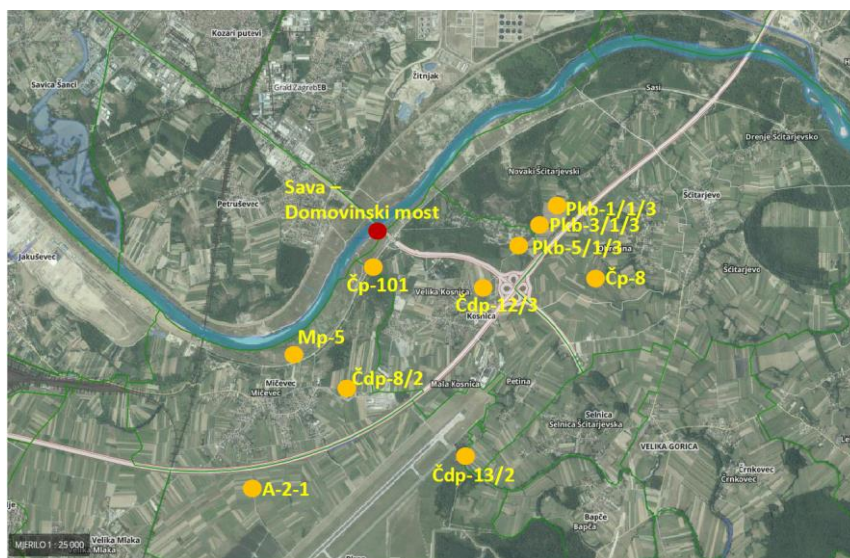
jbarešic@irb.hr

UVOD

U okviru IAEA (engl. *International Atomic Energy Agency*) TC (engl. *Technical Cooperation*) projekta *An environmental isotope investigation of the groundwater-surface water interactions at the regional well field Kosnica in the area of the city of Zagreb*, CRO7001, praćena je koncentracija aktivnosti radioaktivnog izotopa vodika, tricija (³H), te omjeri stabilnih izotopa ²H/¹H i ¹⁸O/¹⁶O u uzorcima s opažачkih postaja u širem području vodocrpilišta Kosnica. Istraživanja ovog vodocrpilišta provode se u svrhu određivanja brzina toka podzemne vode i područja prihranjivanja vodocrpilišta koje će u budućnosti biti jedno od glavnih vodocrpilišta za vodoopskrbu grada Zagreba i Zagrebačke županije. Podaci o izotopnom sastavu površinske savske vode i oborina na području Zagreba se sakupljaju dulji niz godina u svrhu prikupljanja podataka za svjetsku bazu podataka GNIR (engl. *Global Network of Isotopes in Rivers*), odnosno za svjetsku bazu podataka GNIP (engl. *Global Network of Isotopes in Precipitation*) [1-3]. Obje baze održavane su od strane IAEA, a podaci sakupljeni u bazama služe kao ulazni podaci kod hidrogeoloških i drugih istraživanja. Ovdje prikazani rezultati odnose se na razdoblje jednogodišnjeg uzorkovanja tijekom provođenja spomenutog IAEA TC projekta.

UZORKOVANJE I METODE

Uzorci podzemne vode sakupljeni su u širem području vodocrpilišta Kosnica jednom mjesečno, u razdoblju od veljače 2016. godine do siječnja 2017. godine, na 10 piezometara (Slika 1).



Slika 1. Lokacije uzorkovanja piezometara u širem području crpilišta Kosnica (podzemna voda) i lokacija Domovinski most (površinska voda).

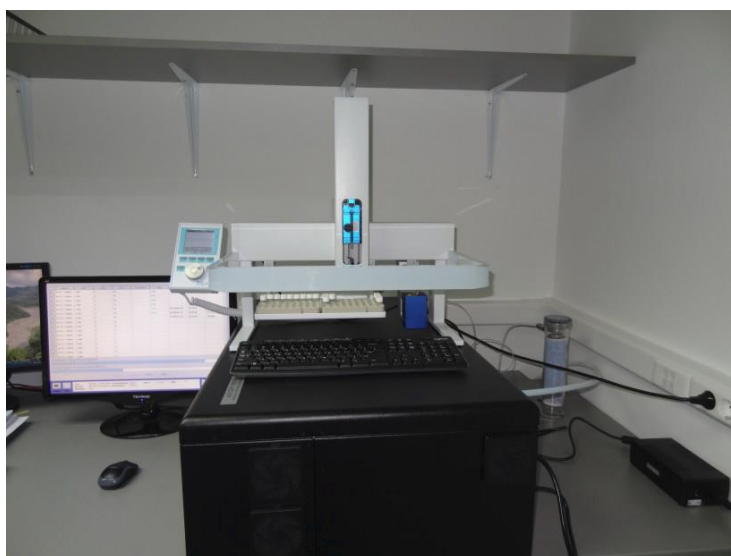
Za praćenje izotopnog sastava površinske vode uzorkovana je rijeka Sava na Domovinskom mostu, a izotopni sastav oborina praćen je u jednomjesečnim uzorcima koji se sakupljanju na meteorološkoj stanici Državnog hidrometeorološkog zavoda Grič, Zagreb.

Koncentracija aktivnosti tricija ($A^3\text{H}$) određena je u Laboratoriju za mjerenje niskih radioaktivnosti Instituta Ruđer Bošković, mjerenjem u tekućinskom scintilacijskom brojaču Quantulus 1220 (engl. *Liquid Scintillation Counter* - LSC). Prije mjerenja u LSC, uzorci su obogaćeni obzirom na tricij metodom elektrolitičkog obogaćenja [4]. Faktor obogaćenja tricijem iznosio je $29,6 \pm 2,2$, a određen je na temelju redukcije mase vode u pojedinoj ćeliji i razlike u koncentraciji ^3H uzorka poznate aktivnosti (tzv. *spike*) prije i nakon elektrolize [5]. Sve aktivnosti izražene su u tricijevim jedinicama, TU (engl. *tritium unit*, $1 \text{ TU} = 0,118 \text{ Bq/L}$).

Omjeri stabilnih izotopa vodika ($^2\text{H}/\text{H}$) i kisika ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) određeni su u Laboratoriju za spektroskopiju Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, na uređaju LWIA-45-EP tvrtke „*Los Gatos Research*“ (LGR), (Slika 2), dobivenom u okviru IAEA TC nacionalnog projekta. Za pripremu, obradu i interpretaciju podataka korišten je informacijski sustav za upravljanje laboratorijskim podacima LIMS (engl. *Laboratory information management system*) [6]. Izmjerene vrijednosti izražene su kao relativno odstupanje u promilima u odnosu na standard, $\delta^2\text{H}$ i $\delta^{18}\text{O}$:

$$\delta(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{uzorak}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

pri čemu je R omjer koncentracije težeg i lakšeg izotopa u uzorku (R_{uzorak}), odnosno standardu (R_{standard}).

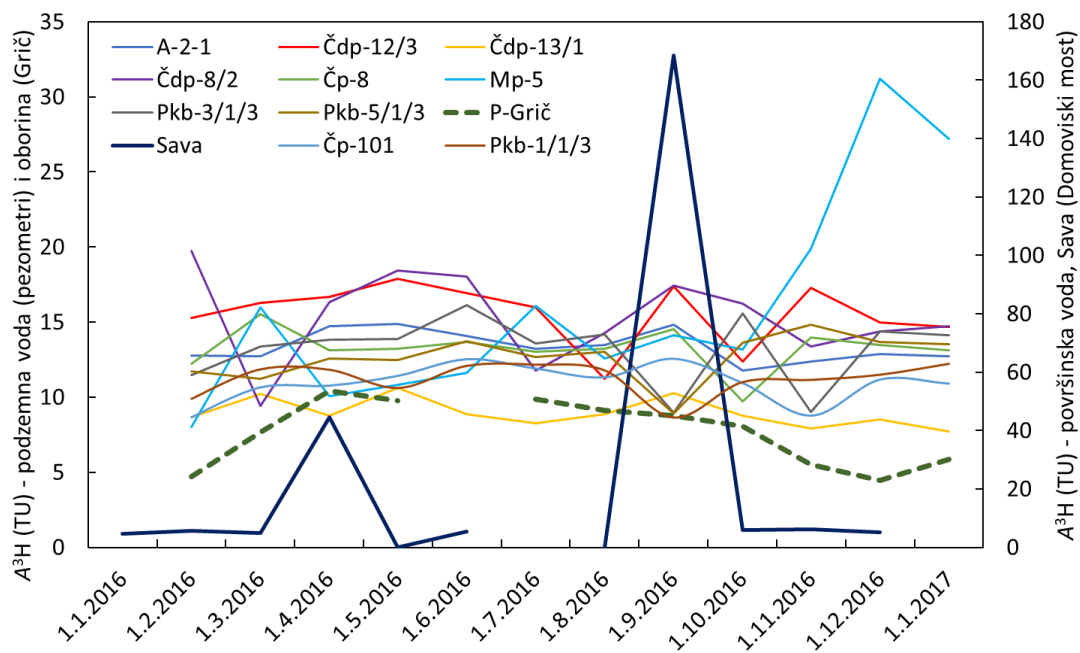


Slika 2. Uređaj za određivanje omjera stabilnih izotopa $^2\text{H}/\text{H}$ i $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, LWIA-45-EP.

REZULTATI

Koncentracije aktivnosti tricija u jednogodišnjem razdoblju praćenja aktivnosti u 10 piezometara, savskoj vodi i oborinama prikazane su na Slici 3, a popis lokacija sa srednjim vrijednostima izotopnog sastava dan je u Tablici 1. Vrijednosti izmjerene u oborini kreću se u rasponu 4,5 – 10,4 TU što odgovara aktivnosti atmosfere bez antropogenog utjecaja. Povišene ljetne vrijednosti posljedica su godišnjeg ciklusa spuštanja troposfere gdje tricij nastaje, tzv. *jet stream* [7]. Aktivnosti izmjerene u piezometrima (podzemna voda) nalaze se (izuzev piezometra Mp-5) unutar intervala 7,7 – 19,8 TU. Povišene aktivnosti u odnosu na oborinu

posljedica su utjecaja Save u kojoj je izmjerena najviša A^3H uslijed ispuštanja rashladne vode iz Nuklearne elektrane Krško. Odziv podzemnih voda je najuočljiviji na piezometru Mp-5 koji je najbliži Savi (Slika 1). Naime, maksimalna A^3H izmjerena u Savi ($168,6 \pm 20,9$ TU) u listopadu 2016. godine jasno se odrazila na piezometar Mp-5 s dva mjeseca zakašnjenja i smanjenom aktivnošću od $31,2 \pm 4,0$ TU, ali ipak znatno većom od prosječnih aktivnosti podzemnih voda ($13,1 \pm 2,2$ TU). Treba naglasiti da je navedeno razdoblje mjerenja od jedne godine relativno kratko i da je do povećanja aktivnosti najvjerojatnije došlo i u ostalim piezometrima, ali s većim kašnjenjem koje nije obuhvaćeno istraživanim razdobljem. U prilog tome govore povišene aktivnosti u piezometrima u odnosu na oborine, te fluktuacija A^3H u podzemnoj vodi (10 – 20 TU).

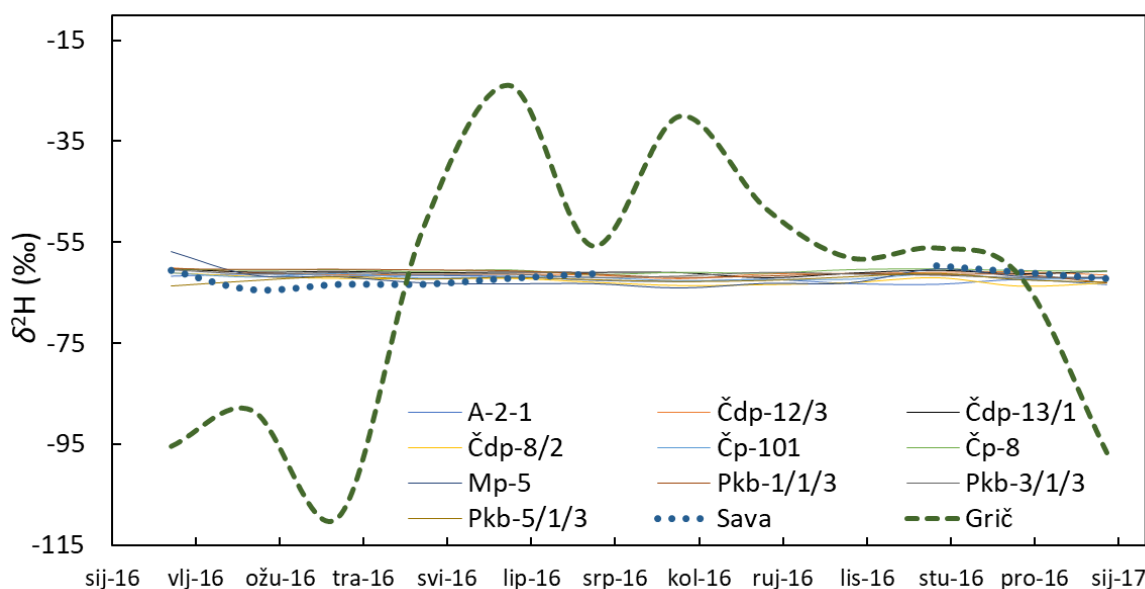


Slika 3. Koncentracije aktivnosti tricija, lijeva skala – piezometri i oborina, desna skala – Sava .

Izotopni sastav stabilnih izotopa vodika i kisika podzemnih voda, oborine i površinske vode izražen u δ vrijednostima prikazan je na Slici 4. Izotopni sastav savske i podzemne vode je ujednačen tijekom cijele godine te raspon vrijednosti za δ^2H iznosi od $-64,3$ ‰ do $-57,0$ ‰ (Slika 4), a $\delta^{18}O$ vrijednosti su unutar raspona $-9,6$ ‰ i $-8,7$ ‰. Izotopni sastav oborina vrlo je varijabilan i ovisan o atmosferskoj temperaturi (godišnjem dobu) te se δ^2H vrijednosti kreću od $-109,4$ ‰ do $-23,4$ ‰, a $\delta^{18}O$ vrijednosti od $-14,6$ ‰ do $-3,3$ ‰. Iz navedenih podataka proizlazi da je prosječni izotopni sastav podzemne i površinske vode vrlo sličan, dok je izotopni sastav oborine malo drugačiji, što je vidljivo kroz usporedbu u odnosu na lokalnu liniju meteorske vode (engl. *Local Meteoric Water Line*, LMWL; Tablica 1, Slika 5).

Tablica 1. Srednje vrijednosti izotopnog sastava podzemnih voda na širem području vodocrpilišta Kosnica (piezometri), površinske vode (Sava, Domovinski most), te oborina (meteorološka stanica Zagreb – Grič). Vrijednosti se odnose na jednogodišnje razdoblje uzorkovanja (veljača 2016. – siječanj 2017.)

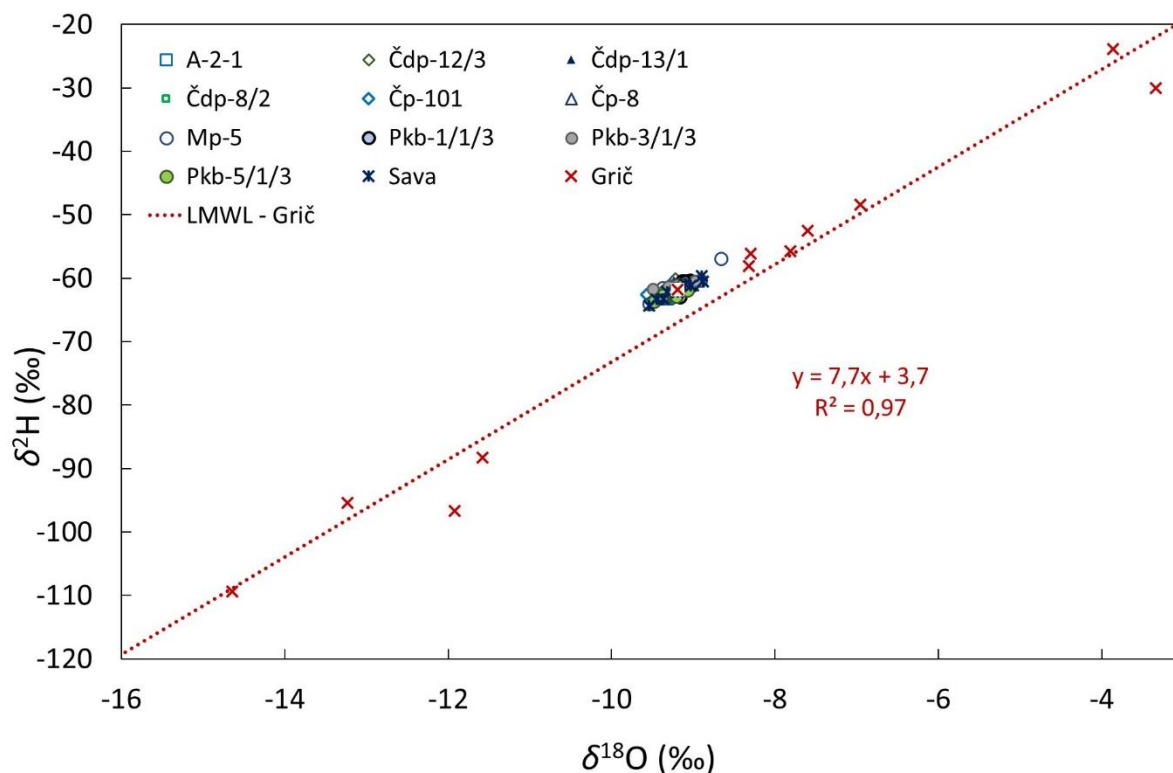
	Lokacija	A ³ H (TU)	δ ² H (‰)	δ ¹⁸ O (‰)
Podzemna voda (piezometri)	A-2-1	13,4 ± 1,0	-62,3 ± 0,7	-9,3 ± 0,1
	Čdp-12/3	15,6 ± 2,0	-61,3 ± 0,5	-9,2 ± 0,1
	Čdp-13/1	9,0 ± 0,9	-61,0 ± 0,4	-9,2 ± 0,1
	Čdp-8/2	15,4 ± 3,0	-62,6 ± 0,8	-9,3 ± 0,1
	Čp-101	11,0 ± 1,2	-61,9 ± 0,5	-9,3 ± 0,1
	Čp-8	13,2 ± 1,4	-60,7 ± 0,3	-9,1 ± 0,1
	Mp-5	15,9 ± 7,0	-62,0 ± 1,9	-9,2 ± 0,2
	Pkb-1/1/3	11,2 ± 1,1	-61,2 ± 0,8	-9,1 ± 0,1
	Pkb-3/1/3	13,2 ± 1,5	-61,4 ± 0,4	-9,2 ± 0,1
	Pkb-5/1/3	12,7 ± 1,5	-62,3 ± 0,6	-9,2 ± 0,1
Podzemna voda	Srednja vr.	13,1 ± 2,2	-61,7 ± 1,0	-9,2 ± 0,1
Površinska voda, Sava		22,8 ± 49,9	-62,0 ± 1,5	-9,2 ± 0,2
Površinska i podzemna voda	Srednja vr.	13,9 ± 14,5	-61,7 ± 1,0	-9,2 ± 0,1
Oborina	Zagreb – Grič	7,7 ± 2,2	-64,7 ± 27,0	-8,9 ± 3,5



Slika 4. Izotopni sastav (δ²H) podzemne i površinske vode, te oborina.

ZAKLJUČAK

Istraživanje izotopnog sastava voda na širem području vodocrpilišta Kosnica pokazala su da izotopni sastav δ²H, δ¹⁸O podzemnih voda (piezometri) odgovara izotopnom sastavu površinske vode (Save) što potvrđuje prihranjivanje vodocrpilišta vodom iz Save. Izotopni sastav oborina ovisi o temperaturi te su vrijednosti raspoređene unutar širokog raspona od maksimalnih ljetnih vrijednosti do minimalnih zimskih.



Slika 5. Izotopni sastav ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) istraživanih voda i lokalna linija meteorske vode (LMWL): $\delta^2\text{H} = 7,7 \delta^{18}\text{O} + 3,7$.

Postojanje izravne veze između rijeke Save i vodonosnika ukazuje na nužnost detaljnijeg praćenja izotopnog sastava površinske i podzemne vode. Nadalje, ulogu oborine u prihranjivanju vodonosnika je potrebno detaljnije kvantificirati. Treba napomenuti da izmjerene povišene koncentracije aktivnosti ^3H u Savi kao posljedica ispuštanja rashladne vode iz Nuklearne elektrane Krško, ne predstavljaju ugrozu stanovništvu jer se radi o aktivnostima koje su pet puta niže od onih propisanih zakonom. Međutim, tricij se u ovom slučaju pokazao kao odličan traser infiltracije savske vode u podzemnu vodu te je pokazano da je u piezometar (Mp-5) koji je najbliži Savi voda iz Save dospjela nakon dva mjeseca. Ove informacije su vrlo bitne jer ističu važnost definiranja brzina toka podzemne vode, pogotovo u području između rijeke Save i vodocrpilišta Kosnica. Određivanje detaljnih brzina toka i smjera kretanja podzemne vode omogućit će pravovremenu i učinkovitu implementaciju mjera zaštite vodocrpilišta Kosnica.

Zahvala

Rad je izrađen u sklopu IAEA TC projekta CRO7001, a autori zahvaljuju Hrvatskim vodama i Bioinstitutu iz Čakovca na pomoći i suradnji.

LITERATURA

- [1] Horvatinčić N, Barešić J, Krajcar Bronić I, Karman K, Forisz I, Obelić B. Study of the bank filtered groundwater system of the Sava River at Zagreb (Croatia) using isotope analyses. *Central European Geology* 2011; 54:121-127.
- [2] Krajcar Bronić I, Horvatinčić N, Obelić B. Two decades of environmental isotope records in Croatia: Reconstruction of the past and prediction of future levels. *Radiocarbon* 1998; 40:399-416.

- [3] Vreča P, Krajcar Bronić I, Horvatinčić N, Barešić J. Isotopic characteristics of precipitation in Slovenia and Croatia: Comparison of continental and maritime stations. *J Hydrology* 2006; 330:457–469.
- [4] Barešić J, Krajcar Bronić I, Horvatinčić N, Obelić B, Sironić A, Kožer Logar J. Mjerenje tricija u uzorcima voda tekućinskim scintilacijskim brojačem uz elektrolitičko obogaćenje. U: Krajcar Bronić I, Kopjar N, Milić M, Branica G, ur. Zbornik radova osmog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja, 13.-15.4.2011. Krk, Hrvatska, HDZZ; 2011. str. 461-8.
- [5] Rozanski K, Groening M. Tritium assay in water samples using electrolytic enrichment and liquid scintillation spectrometry. In: *Quantifying uncertainty in nuclear analytical measurements*, IAEA-TECDOC-1401; 2004. p.195-217.
- [6] Coplen TB, Wassenaar LI. LIMS for Lasers for achieving long-term accuracy and precision of $\delta^2\text{H}$, $\delta^{17}\text{O}$, and $\delta^{18}\text{O}$ of waters using laser absorption spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 2015; 29(22):2122–2130.
- [7] Nikolov J, Krajcar Bronić I, Todorović N, Stojković I, Barešić J, Petrović-Pantić T. Tritium in water – hydrology and health implications. In *Tritium*, ed. Marija M. Janković. 2018. Nova Science Pub. ISBN: 978-1-5361-506-0. p. 157-213.

ISOTOPIC ANALYSES OF ZAGREB AQUIFER – KOSNICA WELL FIELD

*Jadranka Barešić¹, Zoran Kovač², Jelena Parlov², Ivona Mijatović³, Ines Krajcar Bronić¹,
Andreja Sironić¹, Damir Borković¹*

¹Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

²Faculty of Mining, Geology and Petroleum and Oil Engineering, University of Zagreb,
Zagreb, Croatia

³IFB Eigenschenk GmbH, Deggendorf, Bavaria, Germany

jbarešić@irb.hr

This paper presents results of isotopic investigation (tritium activity, $A^3\text{H}$, stable isotope composition $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) of water samples from Zagreb aquifer – Kosnica well field, the future main well field of the Zagreb County. Research was conducted within the IAEA TC project *An environmental isotope investigation of the groundwater-surface water interactions at the regional well field Kosnica in the area of the city of Zagreb*, CRO7001. Results obtained from 10 piezometers (ground water) and surface water (Sava, Domovinski most) showed that stable isotope values are within very narrow range both for $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$: -64.3 ‰ – (-57.0) ‰ and -9.6 ‰ – (-8.7) ‰, respectively and fit within the LMWL: $y = 7.7x + 3.7$ (Local Meteoric Water Line) obtained from precipitation collected within one-year period from Meteorological Station Grič – Zagreb. $A^3\text{H}$ of precipitation showed natural values between 4,5 and 10, 4 TU. The maximum $A^3\text{H}$ of 168,6 TU observed in the Sava River due to discharge of cooling water from Nuclear Power Plant Krško (30 km upstream) was reflected in piezometer nearest to the Sava River (Mp-5) with 2-month delay and smaller intensity ($A^3\text{H} = 32.3$ TU), indicating $A^3\text{H}$ as excellent tracer for the Zagreb aquifer studies.

PROCJENA RADIOLOŠKOG UTJECAJA FOSFOGIPSA NA BIOTU UPORABOM PROGRAMA ERICA TOOL

Tomislav Bituh, Božena Skoko, Branko Petrincec, Gordana Marović
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
tbituh@imi.hr

UVOD

Fosfogips je materijal (*Naturally Occurring Radioactive Material* – NORM) koji nastaje tijekom proizvodnje fosforne kiseline kao dijela postupka proizvodnje fosfatnih mineralnih gnojiva.

Fosfatna ruda, sirovina koja se koristi u postupku, ovisno o podrijetlu, sadrži povišenu prirodnu radioaktivnost radionuklida uranijevog i torijevog prirodnog radioaktivnog niza. U procesu proizvodnje fosfatnih mineralnih gnojiva prirodni ^{238}U uglavnom se zadržava u proizvodima, dok se njegov potomak ^{226}Ra potpuno ugrađuje u fosfogips zamjenjujući Ca u kemijskoj strukturi. U mokrom postupku (postupak sa sumpornom kiselinom) na svaku tonu fosfatne rude koja uđe u proces nastane oko 5 tona fosfogipsa koji se odlaže na odlagalište. Time se fosfogips definira kao NORM materijal kojem je tehnološkim postupcima povišena prirodna radioaktivnost [1-4]. Kemijski, fosfogips je sastavljen uglavnom od $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ (95,62 %), dok ostatak čine neproreagirani fosfati (1,4 %), neotopljeni fluorosilikati (1,25 %), zaostali topivi P_2O_5 (0,36 %), te minerali i organske tvari (< 1 %).

Odlagalište fosfogipsa smješteno je oko 5 km južno od tvornice i nalazi se na granici Parka prirode Lonjsko polje. Sastoji se od četiri kazete ukupne površine oko 1,6 km², te dubine oko 4 m. Kapacitet odlagališta je 16 milijuna tona, dok je trenutno odloženo oko 4 milijuna tona fosfogipsa [1,2].

Već duže vrijeme istraživanja su usmjerena na iskoristivost fosfogipsa, s namjerom da ga se u određenim omjerima rabi za izradu temelja u cestogradnji, kao aditiv za beton, kod remedijacije rudnika, u proizvodnji sumpora te u agrikulturi [5]. Fokus ovog istraživanja je na ispitivanju potrebe za radiološkom zaštitom okoliša u neposrednoj blizini odlagališta, i pripadajuće biote, posebice s obzirom na specifičnost položaja odlagališta u Lonjskom polju.

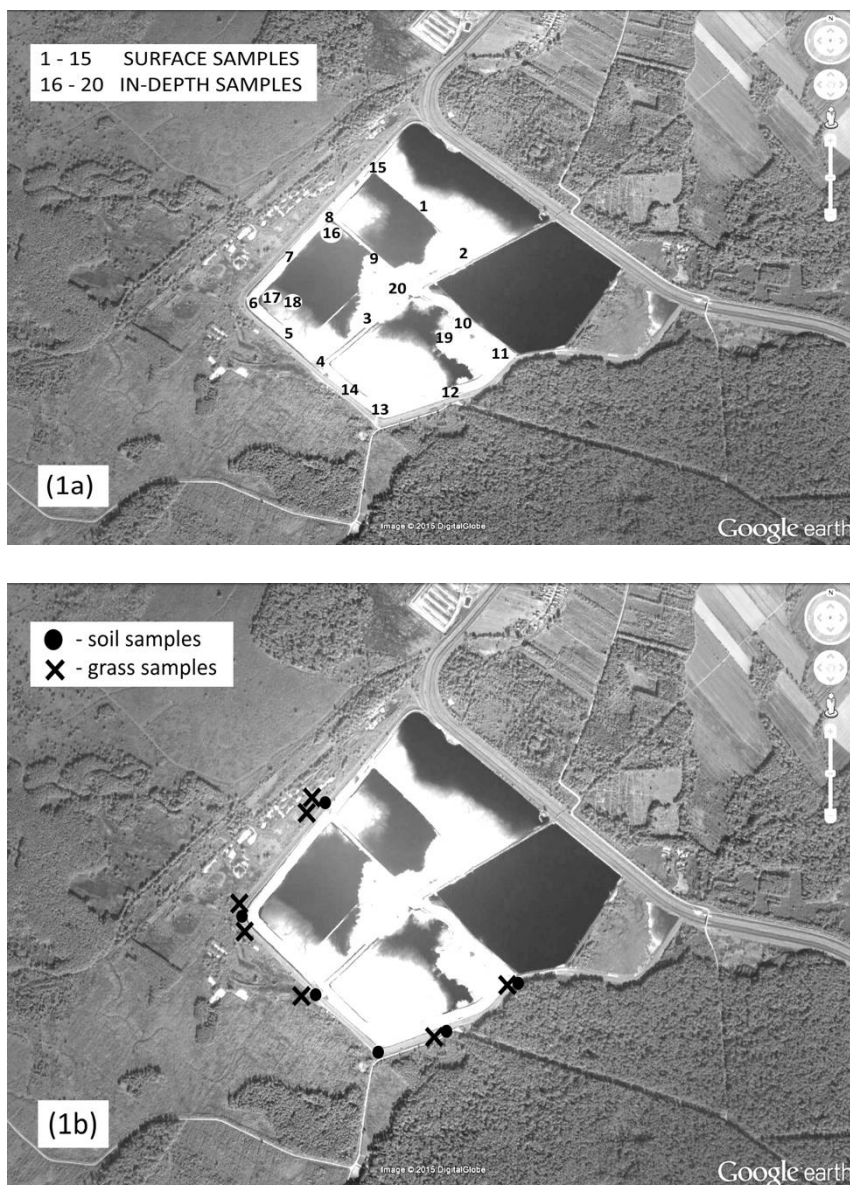
Naime, radionuklidi iz fosfogipsa mogu utjecati na ekosustav Parka prirode Lonjsko polje, koje je bogato divljim i domaćim životinjama, a koje nesmetano pasu u okolici odlagališta. Osim radioaktivnosti, kemijski sastav, elementi u tragovima i kiselost fosfogipsa također mogu utjecati na biotu. Nadalje, postoji mogućnost da će lokalne biljke biti korištene za buduću sanaciju odlagališta (npr. *Amorpha fruticosa*). S toga je konzervativni pristup izračuna radiološkog rizika na biljke i životinje nužan. Ovakav pristup je u skladu s preporukama ICRP-a o nužnosti znanstveno evidentne i demonstrirane radiološke zaštite okoliša [6]. U tu svrhu je korišten program ERICA Tool v.1.2 (ERICA - *Environmental Risk from Ionizing Contaminants: Assessment and Management*), koji omogućuje i pojednostavljuje procjenu radiološkog rizika za biotu s obzirom na kompleksnost ekosustava i utjecaja raznih parametara na dinamiku radionuklida unutar njih. Rezultati ovog istraživanja mogu pomoći u određivanju smjernica za očuvanje stabilnost ekosustava u neposrednoj blizini odlagališta.

MATERIJALI I METODE

Uzorci fosfogipsa uzeti su površinski na 15 lokacija, dok su dubinski uzorci uzeti na 5 lokacija na dubinama od 50 cm, 100 cm, 150 cm i 200 cm (Slika 1a). Uzorci su sušeni na temperaturi od 105 °C, homogenizirani i pakirani u hermetički zatvorene Marinelli posude od 1 L. Uzorci trave i tla uzeti su oko odlagališta na 6 lokacija (Slika 1b). Uzorci neobrađenog tla su prosijani (sito 2 mm) te sušeni tijekom 72 sata na temperaturi od 105 °C, zatim žareni na

450 °C u mufolnoj peći i pakirani u hermetički zatvorene posudice od 100 mL. Trava je uzeta rezanjem 5 cm iznad tla, te sušena tijekom 72 sata na temperaturi od 105 °C, zatim žareni na 450 °C u mufolnoj peći i pakirani hermetički zatvorene posudice od 100 mL. Svi uzorci stajali su najmanje 30 dana radi postizanja ravnoteže potomaka ^{226}Ra .

Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb , i ^{40}K) određene su gamaspektrometrijskim mjerenjem pomoću HPGe detektora (rezolucija 1,56 keV na 1,33 MeV ^{60}Co , efikasnost 18,7 %) mjereno najmanje 80000 sekundi.



Slika 1. Lokacije uzorkovanja fosfogipsa na odlagalištu (1a); lokacije uzorkovanja tla i trave u blizini odlagališta (1b) (Google Earth, 2014).

Za procjenu radiološkog rizika utjecaja fosfogipsa na biotu korišten je program ERICA Tool. To je računalni program za procjenu brzina doza kojima je izložena biota i posljedičnog radiološkog rizika, a sama procjena se odvija na nekoliko razina. Program je internetski povezan sa bazom podataka o radiološkim efektima FREDERICA [7], a koja je svojevrstni sažetak poznatih bioloških efekata koji se javljaju u organizmima prilikom radiološke izloženosti različitim brzinama doza. Također, program omogućuje identifikaciju radionuklida koji najviše doprinose brzini doze, kao i najizloženije organizme. Program

ERICA Tool detaljno je opisan u nekoliko publikacija [8-12]. U ovom radu su za procjenu brzina doza, kojima su izloženi referentni kopneni organizmi, korištene prosječne vrijednosti izmjerenih koncentracija aktivnosti ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{226}Ra te ^{210}Pb u tlu u neposrednoj blizini odlagališta. Za referentni organizam koji se odnosi na travu i bilje koristili smo izmjerene koncentracije aktivnosti navedenih radionuklida u uzorcima trave koja je rasla u neposrednoj blizini odlagališta da bi dobili što preciznije procjene rizika s obzirom na uobičajenu sklonost navedenog programa da precjenjuje brzine doza [13]. U svrhu ove procjene je korištena druga razina programa, tzv. Tier 2, a kao granična brzina doze, ispod koje se ne očekuje nikakav negativan efekt na populaciju bilo koje biljne ili životinjske vrste, je odabrano $10 \mu\text{Gy h}^{-1}$. Ostali parametri poput faktora boravka organizma u mediju ili težinskih faktora za izračun energije ionizirajućeg zračenja su korišteni u onoj veličini u kojoj ih sam program postavlja kao početnu vrijednost.

REZULTATI

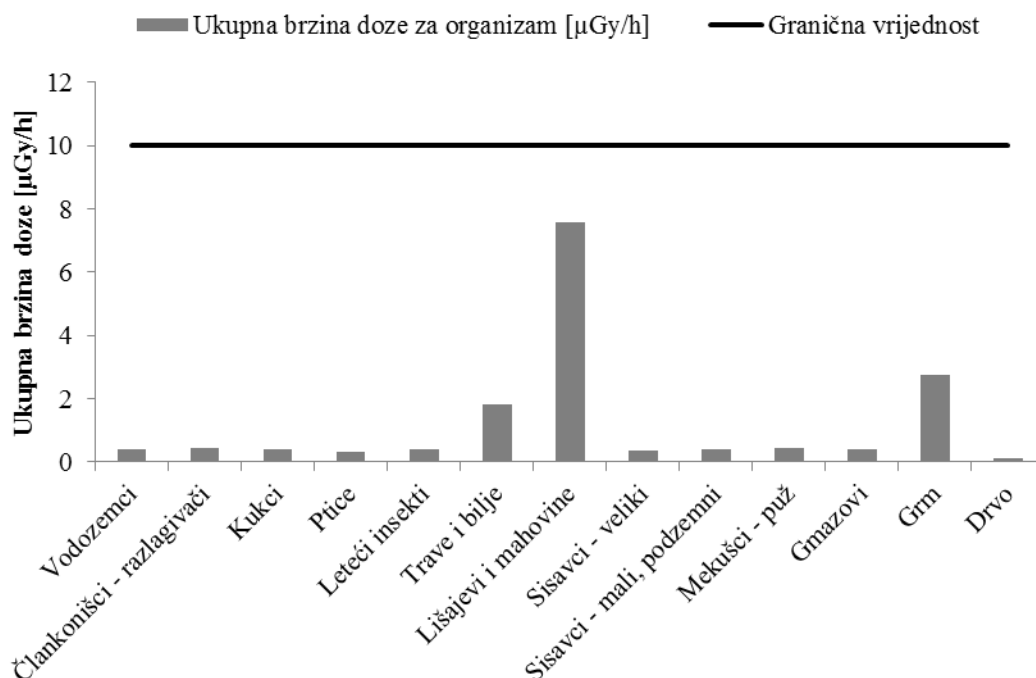
Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida prikazane su u Tablici 1. Koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u fosfogipsu kretale su se od $507 \pm 12 \text{ Bq kg}^{-1}$ do $1054 \pm 22 \text{ Bq kg}^{-1}$ u površinskim uzorcima te $473 \pm 9 \text{ Bq kg}^{-1}$ do $1626 \pm 29 \text{ Bq kg}^{-1}$ u dubinskim uzorcima. Koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u fosfogipsu najčešće ovise o podrijetlu fosfatne rude koja je bila korištena u procesu, u ovom slučaju ruda sedimentarnog podrijetla. Dobiveni rezultati slažu se s literaturnim podacima [3-5, 15-17]. Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u uzorcima tla i trava uzetih na nasipu oko odlagališta odgovaraju prosječnim vrijednostima u RH.

Tablica 1. Koncentracije aktivnosti (Bq kg^{-1}) prirodnih radionuklida u fosfogipsu, tlu i travi.

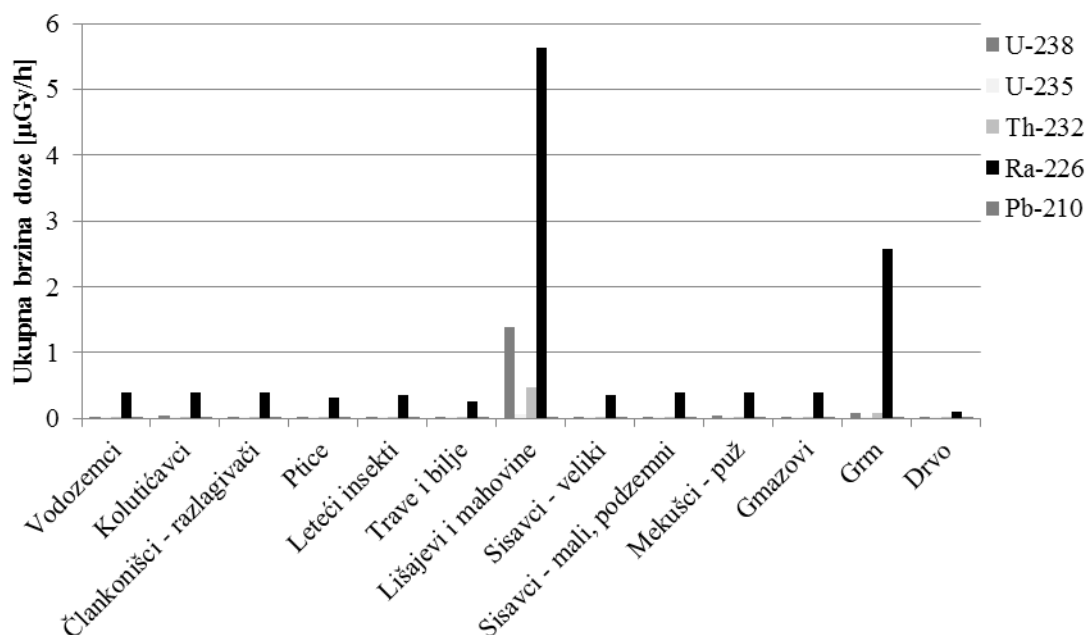
Radionuklid	Koncentracije aktivnosti (Bq kg^{-1})			
	Fosfogips		Tlo uz odlagalište	Trava uz odlagalište
	Površinski uzorci (n = 15)	Dubinski uzorci (n = 20)		
^{238}U	104 ± 7 (46 – 172)	125 ± 10 (70 – 207)	$62,6 \pm 0,6$ (52 – 76)	$0,93 \pm 0,04$ (0,2 – 1,9)
^{235}U	$7,9 \pm 0,4$ (3 – 21)	$10,5 \pm 0,5$ (5 – 16)	$3,23 \pm 0,05$ (3 – 4)	$0,46 \pm 0,02$ (0,2 – 0,8)
^{232}Th	$7,5 \pm 0,3$ (4 – 14)	$8,4 \pm 0,3$ (3 – 15)	$54,2 \pm 0,1$ (44 – 68)	$0,94 \pm 0,03$ (0,3 – 1,5)
^{226}Ra	757 ± 4 (507 – 1054)	962 ± 4 (473 – 1626)	$57,1 \pm 0,8$ (44 v 69)	$1,80 \pm 0,02$ (0,9 – 4,4)
^{210}Pb	746 ± 7 (532 – 1281)	865 ± 18 (401 – 1089)	57 ± 1 (40 – 80)	$21,6 \pm 0,4$ (15 – 29)
^{40}K	$12,7 \pm 0,6$ (7 – 23)	$12,5 \pm 0,5$ (10 – 17)	663 ± 1 (601 – 774)	491 ± 1 (157 – 779)

Rezultati procjene radiološkog rizika korištenjem programa ERICA Tool prikazani su na Slikama 2 i 3. Ukupna procijenjena brzina doze (unutarnja i vanjska) kojoj su izloženi referentni organizmi u okolini odlagališta fosfogipsa prikazana je na Slici 2. Svi rezultati manji su od izabrane granične vrijednosti brzine doze od $10 \mu\text{Gy h}^{-1}$. Najviše vrijednosti izračunate su za lišajevе i mahovine ($7,58 \mu\text{Gy h}^{-1}$), a najmanje za drveće ($0,12 \mu\text{Gy h}^{-1}$). Iz

Slike 3 vidljivo je da ^{226}Ra najviše doprinosi ukupnoj brzini doze (u prosjeku 91 %). Značaj ^{226}Ra u ukupnoj izloženosti biote nije iznenađujući s obzirom da je ovaj radionuklid poznati alfa emiter. Ostali radionuklidi pridonose u prosjeku 2 % ili manje ukupnoj dozi, osim ^{238}U koji u prosjeku pridonosi 6 % ukupnoj brzini doze. Rezultati također potvrđuju da su lišajevi i mahovine dobri bioindikator radioaktivne kontaminacije.



Slika 2. Ukupna brzina doze kojoj su izloženi ERICA Tool referentni organizmi u okolici odlagališta fosfogipsa.



Slika 3. Ukupna brzina doze prema radionuklidima kojoj su izloženi ERICA Tool referentni organizmi u okolici odlagališta fosfogipsa.

Iz ovih rezultata možemo zaključiti da čestice fosfogipsa koje odlaze s odlagališta u okoliš ne predstavljaju radiološki rizik kopnene organizme i da se ne očekuju nikakvi negativni biološki efekti kao posljedica izloženosti ionizirajućem zračenju radionuklidima u neposrednoj blizini odlagališta.

ZAKLJUČAK

Položaj odlagališta fosfogipsa na samom rubu Parka prirode Lonjsko polje zahtijeva provedbu istraživanja utjecaja na okoliš. U ovom radu istraživanje je usmjereno na određivanje radiološkog rizika utjecaja odlagališta na kopnene organizme, uporabom programa ERICA. Rezultati su pokazali da izmjerene koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u neposrednoj blizini odlagališta fosfogipsa ne predstavljaju radiološki rizik za biotu.

LITERATURA

- [1] Bituh T, Marović G, Franić Z, Senčar J, Bronzović M. Radioactive contamination in Croatia by phosphate fertilizer production. *J Hazard Mater* 2009;162:1199-1203.
- [2] Bituh T, Vučić Z, Marović G, Prlić I. A new approach to determine the phosphogypsum spread from the deposition site into the environment. *J Hazard Mater* 2013;261:584-92.
- [3] Laiche TP, Scott LM. A radiological evaluation of phosphogypsum. *Health Phys* 1991;60:691-693.
- [4] Rutherford PM, Dudas MJ, Samek RA. Environmental impact of phosphogypsum. *Sci Total Environ* 1994;149:1-38.
- [5] Shroeyers W. *Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction*. Duxford, UK. Elsevier, 2017. ISBN 978-0-08-102009-8.
- [6] International Commission on on Radiological Protection (ICRP). The 2007 Recommendations of the ICRP. 2007 ICRP Publication 103. *ICRP* 2007;37(2-4).
- [7] Copplestone D, Higinson J, Real A. The development and purpose of the FREDERICA radiation effects database. *J Environ Radioact* 2008;99:1456-1463.
- [8] Brown JE, Alfonso B, Avila R, Beresford NA, Copplestone D, Prohl G, Ulanovsky A. The ERICA Tool. *J Environ Radioact* 2008;99:1371-83.
- [9] Mrdakovic Popic J, Salbu B, Skipperud L. Ecological transfer of radionuclides and metals to free-living earthworm species in natural habitats rich in NORM. *Sci Total Environ* 2012;414:167-76.
- [10] Oughton DH, Stromman G, Salbu B. Ecological risk assessment of Central Asian mining sites: application of the ERICA assessment tool. *J Environ Radioact* 2013;123:90-8.
- [11] Oughton DH, Aguero A, Avila R, Brown JE, Copplestone D, Gilek M. Addressing uncertainties in the ERICA integrated approach. *J Environ Radioact* 2008;99:1384-92.
- [12] Petrinc B, Štok M, Franić Z, Smodiš B, Pavičić-Hamer D. Radionuclides in the Adriatic sea and related dose-rate assessment for marine biota. *Radiat Prot Dosim* 2013;154:320-30.
- [13] Brown JE, Beresford NA, Hosseini A. Approaches to providing missing transfer parameter values in the ERICA Tool – How well do they work? *J Environ Radioact* 2013;126:399-411.
- [14] International Commission on on Radiological Protection (ICRP). Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. 2008 ICRP Publication 108. *Ann ICRP* 2008;38(4-6).
- [15] Papastefanou C, Stoulos S, Ioannidou A, Manolopoulou M. The application of phosphogypsum in agriculture and the radiological impact. *J Environ Radioact* 2006;89:188-198.

- [16] Abril J-M, Garcia-Tenorio R, Manjon G. Extensive radioactive characterization of a phosphogypsum stack in SW Spain: ^{226}Ra , ^{238}U , ^{210}Po concentrations and ^{222}Rn exhalation rate. *J Hazard Mater* 2009;164:790-797.
- [17] Heijde, van der HB, Klijn PJ, Passchier WF. Radiological impacts of the disposal of phosphogypsum. *Radiat Prot Dosim* 1988;24:419-423.

ASSESSMENT OF THE PHOSPHOGYPSUM DEPOSITION SITE IMPACT ON THE ENVIRONMENT USING ERICA TOOL

Tomislav Bituh, Božena Skoko, Branko Petrinc, Gordana Marović
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
tbituh@imi.hr

Phosphogypsum (PG) is a residue originating from the production of phosphoric acid. The PG deposition site in Croatia is situated at the edge of Lonjsko Polje Nature Park, a sensitive ecosystem possibly impacted by PG particles. This study investigates radiological impact of PG on the environment. Activity concentrations of natural radionuclides (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb , and ^{40}K) were measured in the PG (at the deposition site), soil, and grass samples (near the site). The ERICA Assessment Tool was used to estimate the radiological impact of PG particles on non-human biota of the Lonjsko Polje Nature Park. The results showed that there is no radiological risk PG to terrestrial organisms.

RADON

RADON

EUROPEAN PROJECT MetroRADON - TO IMPROVE RADON MEASUREMENT IN EUROPE

*Gordana Pantelić, Igor Čeliković, Miloš Živanović, Ivana Vukanac, Jelena Krneta Nikolić,
on the behalf of MetroRADON*

"Vinča" Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

pantelic@vinca.rs

INTRODUCTION

The three-year MetroRADON project under the EMPIR (European Metrology Programme for Innovation and Research) program brings together seventeen European partners from National Metrology Institutes and research institutes, including "Vinča" Institute of Nuclear Sciences. The project is focused on the traceable measurement of low radon activity concentrations and will contribute to the creation of a coordinated metrological infrastructure for radon monitoring in Europe.

The specific objectives of the project are:

- To develop novel procedures for the traceable calibration of radon (^{222}Rn) measurement instruments at low activity concentrations (100 Bq/m^3 to 300 Bq/m^3) with relative uncertainties $\leq 5\%$ ($k = 1$) and to develop new radioactive reference sources with stable and known radon emanation rates.
- To investigate and to reduce the influence of thoron (^{220}Rn) and its progeny on radon end-user measurements and radon calibrations.
- To compare existing radon measurement procedures in different European countries and from the results optimise the consistency of indoor radon measurements and soil radon exhalation rate measurements across Europe.
- To analyse and develop methodologies for the identification of radon priority areas, including the development of the concept of a Radon Hazard Index, and to investigate the relationship between soil radon exhalation rates and indoor radon concentrations.
- To validate traceability of European radon calibration facilities, and to publish guidelines and recommendations on calibration and measurement procedures for the determination of radon concentration in air.
- To facilitate the take up of the technology and measurement infrastructure developed by the project by end users (regulators, radiological protection bodies and policy makers), standards developing organisations and the measurement supply chain (accredited laboratories, instrumentation manufacturers).

TRACEABLE CALIBRATION OF RADON

When preparing their national radon action plan European member states are obliged to consider several aspects for conducting surveys of indoor radon concentrations according to the Council Directive [1]. This requires reliable calibration and accurate measurement methods for low radon activity concentrations (between about 100 Bq/m^3 and 300 Bq/m^3). Radon calibrations at low activity concentrations need a significant improvement in the metrological infrastructure in Europe.

The traceability of calibrations and measurements of the radon activity concentration to national or international standards is established by using either a reference atmosphere (primary standard) or one or more reference instruments (secondary standard). MetroRADON partners have developed new radioactive reference sources for ^{220}Rn with stable and known radon emanation rates for the realisation of the reference fields for radon activity concentration in air [2]. Emanation sources are less complex, cheaper and less sophisticated

than conventional radon standards and hence will enable more laboratories to establish radon calibration capabilities.

Also a new radon calibration facility was designed and constructed in Romania, in order to assure international and national metrological traceability for the measurements of ^{222}Rn activity concentration in air [3].

INVESTIGATION THE INFLUENCE OF THORON

It has been observed that the presence of thoron and its progeny can have an influence on radon activity concentration measurements. Although several scientific studies on the influence of thoron on radon measurements are available in the literature, this information is in general not harmonised and therefore not usable by end users and decision makers.

MetroRADON partners have undertaken the literature review of potential techniques and materials to reduce the influence of thoron on radon measurements and calibrations [4]. More than 60 scientific articles were reviewed, but only a part was included in this document. Discriminative radon-thoron detectors, diffusion through membranes, air gaps and pin holes as well as different membrane materials are discussed. The diffusion properties of radon detectors or thoron barrier membranes may be optimized to eliminate the transport of thoron. Also problems that need more detailed research within the MetroRADON project are identified and planned. The influence of thoron on active radon monitors and on passive integrating radon detectors that implement some of the reviewed techniques for thoron discrimination will be studied. The properties of different filters/foils/membranes that might potentially serve as efficient barriers for thoron, whilst not reducing radon permeability significantly, will be investigated in order to propose methods for reducing the influence of thoron on the radon measurements.

RADON MEASUREMENT METHODOLOGIES IN EUROPE

According to the EU-BSS [1] all member states are required to have a radon action plan and inform the population about their radon levels. Radon activities and radon surveys therefore were started or repeated in several countries in the last years and are still ongoing and perhaps will be increased in the next years. For non-EU-member states IAEA BSS require radon surveys and IAEA guidelines how to perform radon surveys exist also [5].

A first overview of indoor radon surveys in Europe has been performed in 2005 by Dubois [6]. MetroRADON partners have worked on update of this report and a new report on the literature review of indoor radon surveys in Europe has been published online as a JRC Technical Report (Joint Research Centre of the European Commission) [7]. Journal papers and papers in international and national conference proceedings were reviewed, resulting in data collected from 45 countries. Different steps of the “survey chain”, e.g. from survey design through sampling, measurements to evaluation and interpretation, that yield an output have been explored. For each country some of the most important details regarding Rn survey were included in the report, such as: survey goal, sampling strategy, sampling procedure, measurement technique, evaluation of single measurements, survey period, time of year, single measurement duration, number and type of locations, evaluation, interpretation of results, quality assurance, thoron measurements.

Methodologies used in the radon surveys were very diverse, to such extent that it is impossible to find two completely same methodologies. This diversity makes comparison between different surveys difficult and likewise, makes compiling the data to produce an overall European radon map difficult also. The information contained in the report should serve as an input to propose approaches to reduce inconsistencies and improve harmonization of indoor radon data.

MetroRADON partners have also worked on literature review of existing geogenic radon surveys in Europe using collected journal papers through journal databases, conference papers from international and national proceedings and found additional papers by analysing references listed in the papers already identified. The results of this research have been summarized in a dedicated report [8]. The main focus of the report is: geogenic radon potential concepts; relationships between various parameters used to estimate geogenic radon potential; spatial distribution of radon in Europe, and distribution of radon measurement methods and measurement devices in Europe. The methodology for surveying geogenic radon quantities is different from indoor radon. Geogenic radon maps may serve as a base for defining radon priority areas.

In order to collect the missing information from the literature, and to obtain information about how the countries intend to implement the EU-BSS into national law two questionnaires have been designed: one on indoor radon surveys and the other on geogenic radon surveys. Both questionnaires were distributed to competent institutions, research institutes and universities of European countries. The results of the questionnaires will be compared with the information of literature sources to identify and describe differences and possible inconsistencies.

RADON PRIORITY AREAS

An important topic of MetroRADON is the definition and delineation of Radon Priority Areas (RPAs), which are geographical regions in which according to the stated criteria, expected indoor radon levels can be so high that preventive, mitigating or remedial action should be applied with priority. RPA can be estimated from indoor Rn concentration, the geogenic Rn potential, geochemical concentrations or geological units. Labelling an area an RPA or not, can make an important economic difference, given the possible high costs of measures (prevention, remediation) [9, 10].

The relationships between indoor radon concentration and quantities related to geogenic radon, including soil exhalation are investigated and the concept of a “geogenic radon hazard index” (RHI) is developed as a tool to help identify radon priority areas [11]. This index is also a step towards harmonizing attempts among European countries that will have to adopt the requirements of the EURATOM Basic Safety Standards.

RPAs are sometimes estimated differently in different countries or regions which can lead to inconsistency across borders. This can have a significant impact on the credibility of the prediction of radon hazard areas and renders the data incomparable. MetroRADON partners will work on development of a methodology for a harmonised RHI. The concept of the RHI is to provide a universally applicable tool to quantify the susceptibility of an area to geogenic Rn and hence to quantify the “Rn prone-ness”, independent of available datasets, and applicable irrespective borders.

VALIDATION OF TRACEABILITY OF EUROPEAN RADON CALIBRATION FACILITIES

The traceability of measurements plays an important role in many quality systems. MetroRADON partners have identified existing European radon calibration facilities and primary radon gas standards using questionnaires and have obtained information about their capabilities. The questionnaire was designed to obtain information about the national standards, used reference atmospheres, radon chambers, instruments measuring radon activity concentrations, calibration procedures and traceability chains in order to determine the suitability for inclusion in the traceability validation exercises. The international comparisons will be performed which will fulfil the need to provide confidence in the capability of European radon calibration facilities in the field of radon activity concentration measurements

in air and which will allow the operators of radon calibration facilities to reduce the relative uncertainties related to their facilities to below 5 % ($k = 1$).

In May 2018 the radon intercomparison for the validation of European radon calibration facilities in the range from 300 Bq/m³ to 10 000 Bq/m³ has started [12]. As a result of the intercomparison, the precision and performance of European radon calibration facilities as well as differences in traceability will be identified. Thus it will contribute to further harmonisation of radon metrology in Europe. The results and findings will be a part of the guideline and recommendations on calibration and measurement procedures for the determination of radon concentration in air that will be published in 2020.

PROJECT IMPACT

MetroRADON project will have significant impact through appropriate dissemination and uptake of the results and outputs, and exchange of knowledge and feedback between external bodies and the partners. The external bodies include national authorities, policy makers, regulators, industry, standardisation bodies and technical committees (CEN, CENELEC, ISO, IEC, EURAMET TC-IR) and international bodies and associations (BIPM, ICRM, ICRU, IAEA, WHO, IRPA, ICRP, ERA, COIRA).

The project will improve quality assurance of certain technical procedures which facilitate the achievement of the aims of the EU-BSS to protect the public by reducing their exposure to radon. Also knowledge transfer is particularly important and MetroRADON partners gave many presentations at scientific conferences (some of them are [2,3,10,11]) for new developments and results.

CONCLUSION

The project MetroRADON will contribute to the creation of a coordinated metrological infrastructure for radon monitoring in Europe. The following results are expected:

- novel procedures for the traceable calibration of radon (²²²Rn) measurement instruments at low activity concentrations (100 Bq/m³ to 300 Bq/m³) with relative uncertainties $\leq 5\%$ ($k = 1$);
- new radioactive reference sources with stable and known radon emanation rates;
- improved understanding of the influence of thoron and its progeny on radon measurements and calibrations;
- harmonisation and optimised consistency of indoor radon and soil radon exhalation rate measurements in Europe;
- methodologies for the identification of radon priority areas and information on the relationship between soil radon exhalation rates and indoor radon concentration;
- radon calibration facilities for traceable calibrations at low activity concentrations in Europe;
- guidelines and improved standards for radon monitoring.

Every six months a newsletter is issued showing progress and upcoming activities, in order to support knowledge transfer to stakeholders and external bodies. All the information is available on the website www.metroradon.eu.

ACKNOWLEDGEMENT

This work is supported by the European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR), JRP-Contract 16ENV10 MetroRADON (www.euramet.org). The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States.

Support of the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia P171018 and III43009 is acknowledged.

REFERENCES

- [1] European Council (EC). Council Directive 2013/59/Euratom laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. Off J Eur Union 2014;L13:57.
- [2] Luca A, Șerbina L, Varlam C, Sahagia M, Schitea D, Făurescu I, Sima O, Ioan MR, Antohe A, Teodorescu C, Bătrîneanu V, Ivan C, Teodorescu L. Designing and construction of a new radon calibration facility in Romania. 5th European Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA), 4-8 June 2018, The Hague, The Netherlands; 2018.
- [3] Mertes F, Röttger S, Röttger A. Towards new primary emanation sources for Rn-222. 5th European Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA), 4-8 June 2018, The Hague, The Netherlands; 2018.
- [4] <http://metroradon.eu/wp-content/uploads/2018/07/Review-techniques-to-reduce-influence-of-thoron.pdf>
- [5] International Atomic Energy Agency (IAEA). Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards Interim edition. General safety requirements, Part 3. Vienna: IAEA; 2011.
- [6] Dubois G. An overview of radon surveys in Europe (Report EUR21892, EC, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg); 2005.
- [7] Pantelić G, Čeliković I, Živanović M, Vukanac I, Nikolić JK, Cinelli G, Gruber V. Literature review of Indoor radon surveys in Europe, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018. ISBN 978-92-79-97643-8 (online), doi:10.2760/977726 (online), JRC114370
- [8] <http://metroradon.eu/wp-content/uploads/2018/07/Geogenic-radon-potential-short-overview.pdf>
- [9] Bossew P. Radon Priority Areas – Definition, Estimation and Uncertainty. Nuclear Technology and Radiation Protection 2018;33/3:286-292.
- [10] Bossew P. Determination of radon priority areas – a classification problem. 2nd International Workshop on the European Atlas of Natural Radiation (IWEANR 2017), 6–9 November 2017, Verbania, Italy, Book of abstracts, ISBN 978-92-79-74131-9, doi:10.2760/72011; 2017. p.50.
- [11] Bossew P, Cinelli G, Tollefsen T, DeCort M. The geogenic radon hazard index – another attempt, 2nd International Workshop on the European Atlas of Natural Radiation (IWEANR 2017), 6–9 November 2017, Verbania, Italy, Book of abstracts, ISBN 978-92-79-74131-9, doi:10.2760/72011; 2017. p. 41.
- [12] http://metroradon.eu/wp-content/uploads/2018/07/Newsletter_July_2018.pdf

EUROPEAN PROJECT MetroRADON - TO IMPROVE RADON MEASUREMENT IN EUROPE

*Gordana Pantelić, Igor Čeliković, Miloš Živanović, Ivana Vukanac, Jelena Krneta Nikolić
on the behalf of MetroRADON*

"Vinča" Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

pantelic@vinca.rs

The MetroRADON research project, which brings together fifteen European partners, including "Vinča" Institute of Nuclear Sciences, has five main objectives: to establish novel calibration procedures for radon measurement instruments at low activity concentrations; to look into how thoron concentrations may affect radon measurements; to revise the existing radon measurement in Europe and compare and harmonize of radon measurement procedures in Europe; to study methodologies for the identification of radon priority areas and relationship between soil radon exhalation and indoor radon concentrations and to revise the existing radon calibration facilities in Europe.

Until now MetroRADON partners have developed new radioactive reference sources for ^{220}Rn with stable and known radon emanation rates for the realisation of the reference fields for radon activity concentration in air, organize radon calibration facilities intercomparison for the validation of European radon calibration facilities, have undertaken the literature review of potential techniques and materials to reduce the influence of thoron on radon measurements and calibrations, have undertaken a qualitative overview of indoor radon surveys and geogenic radon surveys performed in European countries, with main focus on the data that are not included in other survey overviews. Therefore, special attention is given to the qualitative and conceptual description of surveys such as types of surveys, sampling strategies and measurement techniques, applied corrections, interpretation of survey results and dealing with thoron issue. The relationships between indoor radon concentration and quantities related to geogenic radon, including soil exhalation are investigated and the concept of a "geogenic radon hazard index" is developed as a tool to help identify radon priority areas.

MetroRADON project will have significant impact through appropriate dissemination and uptake of the results and outputs, and exchange of knowledge and feedback between external bodies and the partners. Every six months a newsletter will be issued showing progress and upcoming activities. All the information is available on the website www.metroradon.eu.

RADON SURVEY IN SLOVENIA IN 2018 ACCORDING TO EU EURATOM

Gregor Omahen, Peter Jovanovič
ZVD Zavod za varstvo pri delu d.o.o., Ljubljana, Slovenia
gregor.omahen@zvd.si

INTRODUCTION

Slovenia in 2018 adopted the new ordinance where the requirements of the Council of the European Union 2013/59 EURATOM on radon were taken into account. As the new ordinance requires systematic survey of radon concentrations in public institutions and dwellings in Slovenia, Ministry of Health announced two tenders for the radon surveys in 2018. ZVD Zavod za varstvo pri delu successfully competed on both tenders. The radon concentrations were measured in 325 rooms in public institutions, mainly schools and kindergartens and in 500 private dwellings in 24 municipalities which were in recognised as radon prone areas from previous measurements. The radon concentrations were measured with track etched detectors. Additionally 60 measurements were done with active methods in places where it was known from previous measurements the radon concentrations are high (above 1000 Bq/m³). In the article the results of the survey are presented as well as the difficulties we encountered during sending track etched detectors to people.

RADON PRONE AREAS IN SLOVENIA

In last 20 years many measurements of radon concentrations in Slovenia were done. Slovenian Radiation Protection Administration at Ministry of Health financed a study [1] where authors reviewed all the radon concentration measurements in buildings and radon examination measurements in Slovenia in last 20 years. The geological composition with Ra-226 concentration in soil and stone was also taken into account. In the study authors proposed three radon areas in Slovenia: areas where radon concentrations in buildings are expected to be high, the area where radon concentration in buildings are expected to be elevated and areas where radon concentration in building are expected to be low. In the ordinance on National Radon Programme Slovenia adopted in 2018 (Slovenian Official gazette 18/18, called also "radon ordinance") 24 municipalities are recognized as areas with possible high radon concentrations in buildings, 27 municipalities are recognized as areas where radon concentration above 300 Bq/m³ were measured in buildings (elevated concentration) in the past. The classification of radon areas is debatable, someone would include more areas, even other areas but at the end we have what we have (*Figure 1*). After 5 years of measurements in these areas the evaluation will be done and maybe the map of radon prone areas in Slovenia will change.

In the radon ordinance it is required that living and working environment is systematically surveyed in schools, kindergartens and hospitals as well as in other buildings on radon prone areas. At least 50 schools, kindergartens or hospitals and at least 100 homes must be measured every year. Measurements are financed by the Ministry of Health.

Besides measurements that are financed by the Ministry of Health employers on radon prone areas must ensure radon concentration measurements if he has building on radon prone areas. Measurements must be done in basement and ground floor.

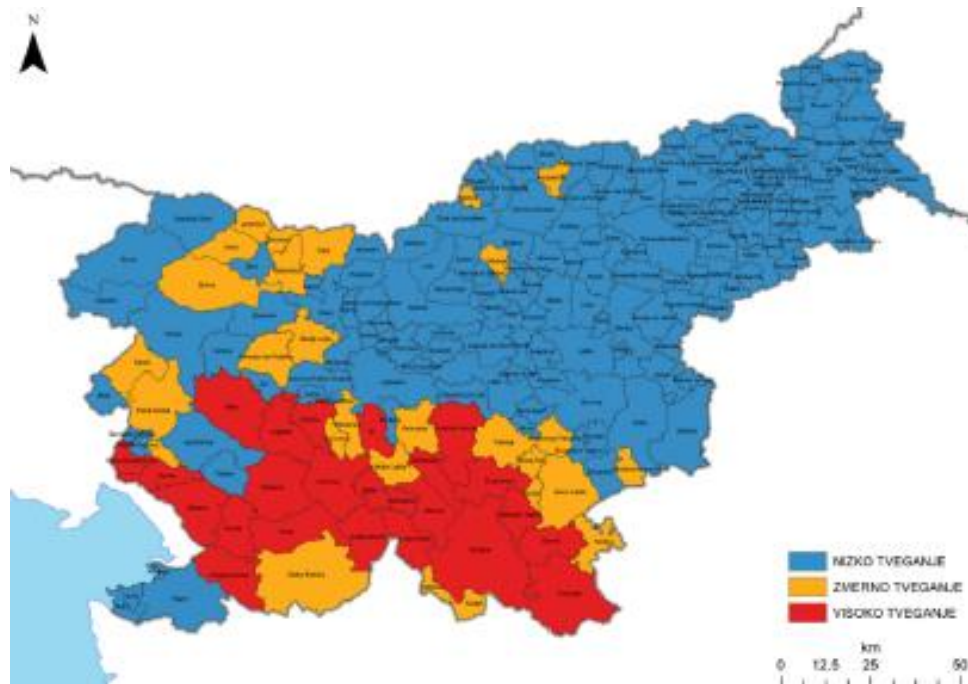


Figure 1. Map of radon prone areas in Slovenia. Red colour: high risk, orange colour: medium risk, blue colour – low risk. Map is taken from [1].

MEASURING CAMPAIGN

In 2018 ZVD won two tenders issued by Ministry of Health for radon concentration measurement. The first one was for radon measurements in schools, kindergartens and hospitals. The Ministry of Health defined all the buildings and rooms where the measurements must be done. Approximately 300 measurements were done by track etched detector with the aim to find out what are average radon concentration. Additionally, measurements of radon concentration with active methods were done in 60 locations where it was known that radon concentration are high and the aim of the measurements was to find out where the radon is coming from. In this project it was very easy to call schools or kindergartens since the responsible person was contacted in advance by Ministry of Health. Our main concern was to send track etched detectors on time and check if they are properly put in place. For active measurements we visited each pre-defined location, put instruments in place and after 1 week of measurements came to pick up instruments and transfer data into computer.

The second project contained measurements of radon concentration in private homes in radon prone areas with track etched detectors. The intension of the project was to measure radon concentration in 12 municipalities with high radon risk. The 12 municipalities were chosen from the 24 municipalities recognized in the radon ordinance. The first idea was to find 40 private homes in each of 12 municipalities, send track etched detectors to owners and after 2-3 months exposure owners return detectors which are than analysed. In order to find 40 owners of private homes in each municipality we decided to start with people our workers know from personal relations (relatives), previous measurements (teachers in schools) or workers that are working with ionizing radiation and are involved in personal dosimetry. Soon it became clear that we will not be able to find 40 names in every municipality. We decided to advertise free radon measurements in local radio media, we launched internet page with short and clear explanation of the project, we called mayors of every municipality and offer radon measurements. In some municipalitis mayors were clearly against radon measurements since

they have just foreseen problems in case of measured high concentration. The connected high results with actions they should do to lower the radon concentration. No explanation helped to change their conviction. We spend a lot of time on telephones, we visited municipalities and explained the project and measurements to local people. Despite all the efforts it was clear that we will not be able to find 40 private homes in every municipality. There was also the problem that some municipalities are small compared to others (*Table 1*) and 40 locations means in some municipalities more than 10 % of all the homes while in the others less than 1 %. Due to difficulties in getting measurement location we informed Ministry of Health and it was agreed that we can expand measurement to all 24 municipalities and that it does not matter if we get exactly 40 locations, could be more or less, what only matters is the total number of locations which should be 480 as requested in the project. With that solution we were able to continue with the project and found desired number of locations for measurements (*Table 1*). In *Table 1* not all the measuring locations are taken into account since we did not get detectors back yet. We can conclude that at least 10 % of all the detectors sent are lost due to different reasons. The most common cause of lost detectors is that people just forgot to return it, some of them did not even put it in place.

Table 1: Radon prone municipalities in Slovenia and numbers of residents in these municipalities. In bold text are first 12 locations where measurements should be done.

Municipality	Number of residents	Number of measuring locations (private houses)	Number of locations with Rn concentration above 300 Bq/m ³
Bloke	1529	2	2
Cerknica	11 502	15	7
Črnomelj	14 293	17	3
Divača	4 093	54	7
Dobrepolje	3 847	34	1
Dolenjske Toplice	3 471	43	12
Hrpelje - Kozina	4 426	4	2
Idrija	11 730	43	18
Ig	7 441	0	0
Ivančna Gorica	16 611	1	1
Kočevje	15 681	92	25
Komen	3 523	42	6
Logatec	14 048	7	1
Loška dolina	3 739	12	1
Loški Potok	1 830	21	6
Miren - Kostanjevica	4 885	19	2
Pivka	6 112	18	3
Postojna	16 120	13	1
Ribnica	9 424	12	6
Semič	3 766	36	5
Sežana	13 287	60	15
Sodražica	2 187	3	0
Vrhnika	17 071	10	2
Žužemberk	4 631	7	3

RESULTS

Measurements of radon concentrations in private houses were done in 466 locations in 24 municipalities which were found to be radon prone areas [1] Almost 40 % of measurements is below 100 Bq/m³ what is low for the Slovenia. The results of about 30 % measured concentrations were above 300 Bq/m³ (*Table 1*). The average measured radon concentration was 360 ± 28 Bq/m³. This is quite high value but we must take into consideration that all the measurements were taken in radon prone areas.

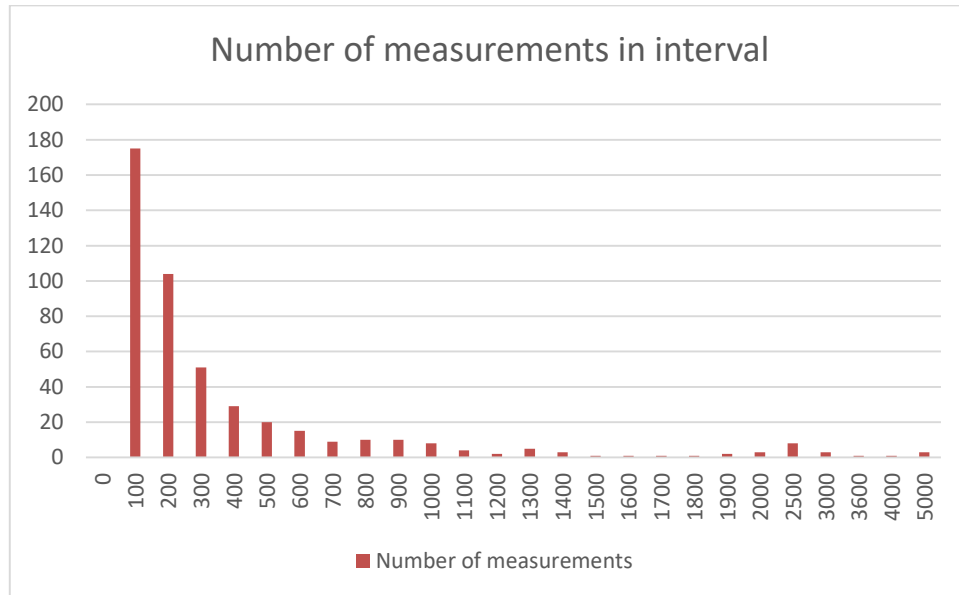


Figure 2. Number of measurements of radon concentrations in concentration intervals

Due to small number of measurements we cannot draw clear conclusions but first impression is that radon prone areas are not equal, and in some municipalities higher concentrations are expected. Among those municipalities are Idrija, Cerknica, Žužemberk and Ribnica (*Figure 3*). We would say that inner Slovenia has higher risk due to radon exposure than coastal Slovenia in general.

The highest radon concentration 5361 ± 383 Bq/m³ was measured in Idrija in a living room. There was also one location in Kočevje and one in Loški potok with radon concentrations above 5000 Bq/m³. Due to very high concentration measured we were interested if people living in these houses are aware of radon risk. They were not aware and are not worried. If we calculate doses to the inhabitants in these houses we would get more than 200 mSv per year. No further action was taken in these houses. Since we informed people on high radon concentrations they are interested in additional measurements in other rooms. Measurements are in plan for 2019.

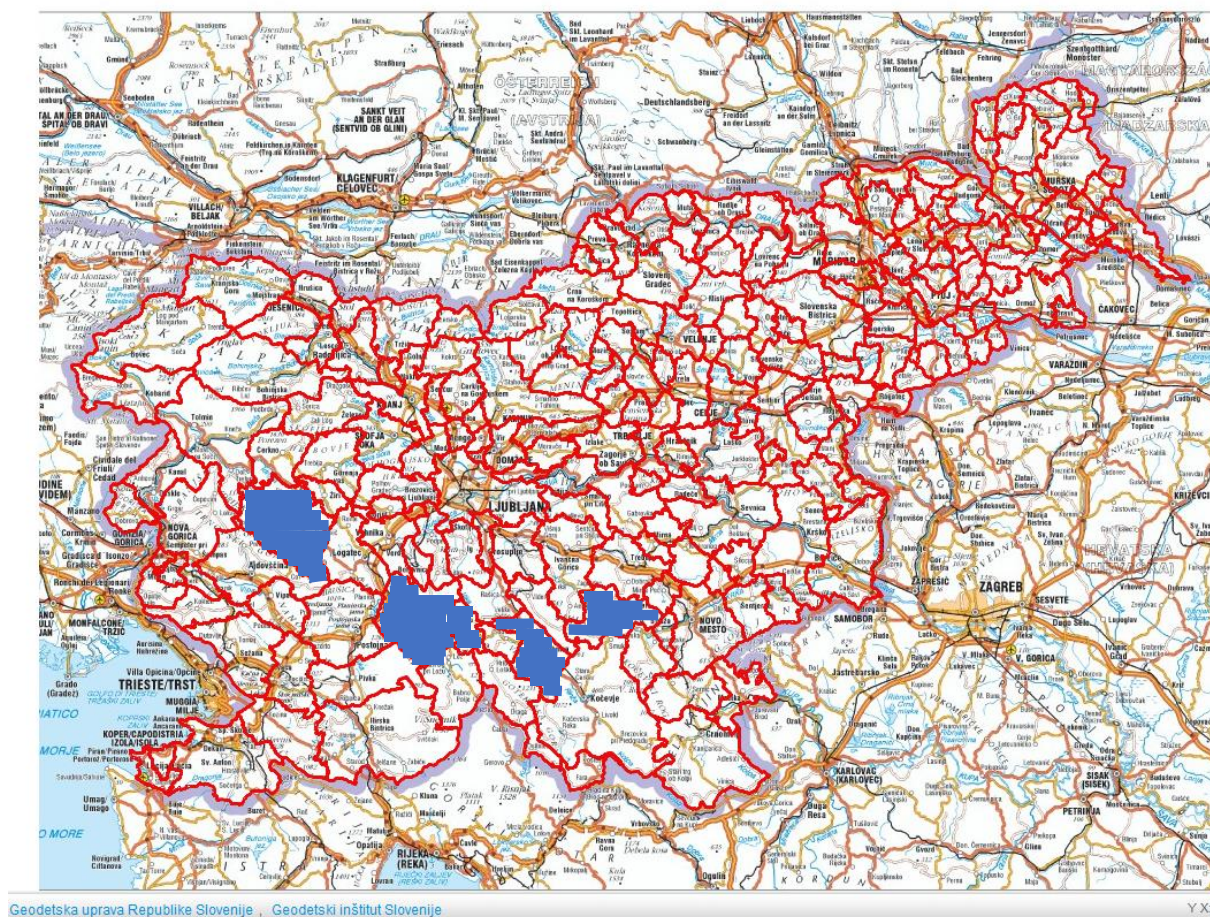


Figure 3. The map of municipalities with highest number of houses with indoor radon concentration above 300 Bq/m^3 . The map of Slovenia is from geopedia.si.

CONCLUSION

In 2018 ZVD made approximately 480 measurements of radon concentrations in private houses in Slovenia. The measurements were done in the frame of new EU Directive and requirements in radon ordinance adopted in 2018 in Slovenia. Measurements were performed in 24 municipalities declared as radon risk areas. In 30 % of measurements radon concentrations were found to be above reference level of 300 Bq/m^3 . People living in these houses were informed on high radon risk and basic information were given how to lower radon concentration. To our knowledge people did not undertake any action to lower radon concentration in their houses.

REFERENCE

- [1] Vaupotič J, Gregorič A. Priprava radonskega zemljevida Slovenije na ravni naselij, IJS-DP-12349, 2017.

RADON SURVEY IN SLOVENIA IN 2018 ACCORDING TO EU EURATOM

Gregor Omahen, Peter Jovanovič
ZVD Zavod za varstvo pri delu d.o.o., Ljubljana, Slovenia
gregor.omahen@zvd.si

Slovenia in 2018 adopted the new ordinance where the requirements of the Council of the European Union 2013/59 EURATOM on radon were taken into account. As the new ordinance requires systematic survey of radon concentrations in public institutions and dwellings in Slovenia, Ministry of Health announced two tenders for the radon surveys in 2018. ZVD Zavod za varstvo pri delu successfully competed on both tenders. The radon concentrations were measured in 325 rooms in public institutions, mainly schools and kindergartens and in 500 private dwellings in 24 municipalities which were in recognised as radon prone areas. The radon concentrations were measured with track etched detectors. Additionally, 60 measurements were done with active methods in places where it was known from previous measurements the radon concentrations are high (above 1000 Bq/m³). In the article the results of the survey are presented as well as the difficulties we encountered during sending track etched detectors to people.

DNEVNE VARIJACIJE RADONA U NEKIM ŠKOLAMA I VRTIĆIMA ISTARSKE ŽUPANIJE U KOJIMA JE PROSJEČNA KONCENTRACIJA RADONA VIŠA OD REFERENTNE VRIJEDNOSTI – IMPLIKACIJE NA PROCJENU PRIMLJENE DOZE

Vanja Radolić, Denis Stanić, Marina Poje Sovilj, Igor Miklavčić
Odjel za fiziku, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek
vanja@fizika.unios.hr

UVOD

Radon je plemeniti radioaktivni plin koji nastaje radioaktivnim raspadom atoma radija uz emisiju alfa-čestice. Postoje tri prirodna izotopa radona: ^{222}Rn (radon; $\tau_{1/2}=3,825$ d), ^{220}Rn (toron; $\tau_{1/2}=55,6$ s) i ^{219}Rn (aktinon; $\tau_{1/2}=3,9$ s) koji su pripadni produkti radioaktivnih nizova: ^{238}U , ^{232}Th i ^{235}U , redom kako slijedi. S obzirom na vrijeme njihova poluživota, radon i njegovi kratkoživi potomci (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi i ^{214}Po) daju najveći doprinos efektivnoj dozi koju stanovništvo primi od prirodnih izvora zračenja [1]. Koncentracija radona u zraku koji udišemo na otvorenom je niska (između 5 i 15 Bq m^{-3}) i općenito ne predstavlja zdravstveni problem, ali može biti visoka unutar zatvorenog prostora u kojem živimo i/ili radimo (od nekoliko desetaka do nekoliko tisuća Bq m^{-3}). Glavni izvori radona u zatvorenim prostorima su: tlo neposredno ispod zgrade (85 – 90 %), građevni materijal (5 – 10 %), podzemne vode (oko 5 %). Pritom se parametri koji utječu na koncentraciju radona u zatvorenim prostorima mogu podijeliti na prirodne (*geološki sastav, količina radija u tlu i stijenama, struktura i permeabilnost tla, klimatski i meteorološki parametri*), tehničke (*način i kvaliteta gradnje i održavanja zgrada - broj i veličina mikropukotina u zgradama*) odnosno tehnološke (*životne navike ljudi – način i učestalost provjetravanja prostorija, način zagrijavanja i sl.*). Radon u zatvorene prostore ulazi kroz pukotine na podu ili na spojevima zidova, međuprostore oko cijevi i instalacija, odvoda i sl. pa su i koncentracije radona obično najveće u podrumu i prizemlju.

Dugotrajna izloženost visokim razinama radona povećava rizik nastanka karcinoma pluća što je svojedobno bilo uočeno u epidemiološkim istraživanjima na rudarima iz rudnika uranija [2]. Stoga je Svjetska zdravstvena organizacija (WHO; *World Health Organization*) 1998. godine preko svoje Agencije za istraživanje karcinoma (IARC; *International Agency for Research on Cancer*) stavila radon na listu potencijalnih uzročnika karcinoma nedvojbeno utvrdivši da su radon i njegovi kratkoživi potomci kancerogeni za ljude [3]. Nedavna epidemiološka istraživanja pokazala su da rizik od radona postoji i pri vrijednostima za koje se ranije smatralo da je zanemariv [4]. Tako je utvrđeno da je povećanje koncentracije radona za 100 Bq m^{-3} povezano s približno 16 %-tnim povećanjem vjerojatnosti incidencije karcinoma pluća [5]. Odgovarajućim epidemiološkim modelima procijenjeno da je u 2012. godini u RH bilo 538 smrtnih slučajeva zbog karcinoma pluća, a koji se mogu pripisati radonu kao uzročniku što čini ukupno 4 % svih smrtnih slučajeva zbog karcinoma [6].

S obzirom da djeca veći dio vremena, osim u kući, provedu u vrtiću odnosno školi, mnoge zemlje su provele ili provode sustavna mjerenja radona u vrtićima i školama kako na nacionalnoj razini tako i unutar radonski interesantnih (prioritetnih) područja [7]. U Republici Hrvatskoj je prije 20-tak godina radon mjeren u nekim vrtićima i školama u Osijeku i Zagrebu [8-10], a od 2012. godine se provode sustavna mjerenja u školama i vrtićima u okviru redovnog programa praćenja stanja radionuklida u okolišu RH, a pod ingerencijom bivšeg Državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS). Do sada su provedena mjerenja u više od 1000 objekata u 8 županija (Brodsko-posavskoj, Virovitičko-podravskoj, Ličko-senjskoj, Karlovačkoj, Istarskoj, Požeško-slavonskoj, Sisačko-moslavačkoj i Vukovarsko-srijemskoj, a u Primorsko-goranskoj su u tijeku) u kojima je bilo izloženo oko 6000 detektora. Utvrđeno je

da se prosječne koncentracije radona u školama i vrtićima, ovisno od županije do županije kreću u rasponu od 10 – 1600 Bq m⁻³, tj. unutar pojedinih županija mogu se naći mikrolokacije s vrlo visokim razinama radona [11, 12]. Nakon što su izvršena mjerenja i rezultati javno objavljeni na web stranicama DZRNS-a, Istarska županija odnosno neki gradovi/općine su reagirale i pokazale interes za aktivnostima usmjerenim na trajno smanjenje koncentracija radona u objektima s povišenim vrijednostima radona. U ovom radu su prikazani rezultati kontinuiranih mjerenja radona u izabranim objektima s utvrđenom povišenom koncentracijom radona kao i implikacije na trenutno korišteni protokol i metode mjerenja radona u školama RH odnosno na izračun doze koju učenici i zaposlenici prime u školama i vrtićima.

MATERIJALI I METODE

Na petnaestak lokacija (škola i vrtića) u Istarskoj županiji u kojima su ranije utvrđene povišene vrijednosti koncentracije radona, a na zahtjev Istarske županije i grada Pule, od rujna 2018. godine, provode se mjerenja koncentracije radona pasivnom metodom s odvojivim (engl. *strippable*) detektorima nuklearnih tragova LR115 tip II (proizvođač: Kodak-Pathé, Francuska). Detektori se u ovoj, drugoj fazi izlažu u svim prostorijama u kojima borave učenici i zaposlenici. Cilindrični plastični nosač detektora, RadonOS-Z (posuda promjera 11 cm i visine 7 cm), prekriven je na vrhu filterom papirnom površinske gustoće 0,078 kg m⁻². Unutar nosača se nalazi jedan film LR-115 tip II, veličine 3 × 3 cm², koji služi kao difuzni detektor [13]. Nakon izlaganja, detektori se kemijski obrađuju (jetkaju) u 10 % vodenoj otopini NaOH na 50 °C u trajanju od 150 minuta, a potom se tragovi broje pomoću brojača iskri, AIST-2V (proizvođač: V. Khlopin Radium Institute, Sankt Petersburg, Rusija). Koeficijent osjetljivosti, K, određen je kalibracijom filmova u radonskoj komori PTP BEV (*Physikalisch-technischer Prüfdienst pri Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen*, Beč, Austrija). Za odvojive LR-115 II filmove iznosi: $K = 65 \pm 23 \text{ Bq m}^{-3} / \text{tr cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Od listopada 2018. do travnja 2019. godine kontinuirano se mjere koncentracije radona TSR3 mjernim uređajima (proizvođač Tesla, Republika Češka) u minimalnom trajanju od 3 tjedna po školi s vremenskom rezolucijom od 1 h. Dobiveni kontinuirani vremenski nizovi omogućuju uvid u dnevne varijacije u koncentraciji radona i posljedično bolju procjenu doze koju učenici i zaposlenici prime za vrijeme svog boravka u objektu. Naime, za izračun primljene doze ne koristi se prosječna koncentracija radona u prostoriji odnosno školi već prosječna koncentracija radona u radnom vremenu škole (kad u objektu borave djeca odnosno zaposlenici), a koja se računa prema sljedećoj relaciji [14,15]:

$$Rn_{\text{radno vrijeme škole}} = Rn_{\text{Faza1}} \cdot \frac{Rn_{\text{Faza2, radno vrijeme škole}}}{Rn_{\text{Faza2, cijeli interval mjerenja}}}, \quad (1)$$

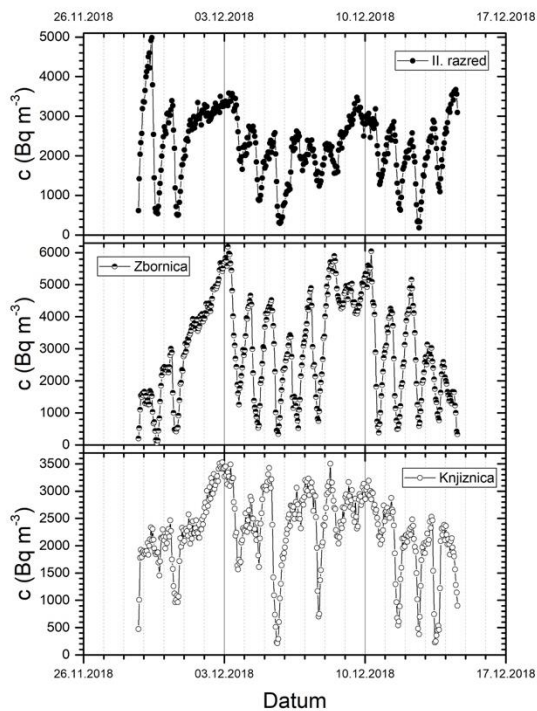
gdje su Rn_{Faza1} prosječna godišnja koncentracija radona u školi dobivena mjerenjem detektorima nuklearnih tragova, a $Rn_{\text{Faza2, cijeli interval mjerenja}}$ i $Rn_{\text{Faza2, radno vrijeme škole}}$ prosječne koncentracije radona u cijelom intervalu mjerenja odnosno radnom vremenu škole mjerene TSR3 detektorima radona.

Primljena doza od radona i njegovih kratkoživićih potomaka izračunata je primjenom doznog koeficijenta $F = 16,8 \text{ mSv} / \text{MBq h m}^{-3}$ koji proizlazi iz biokinetičkog i dozimetrijskog pristupa [16].

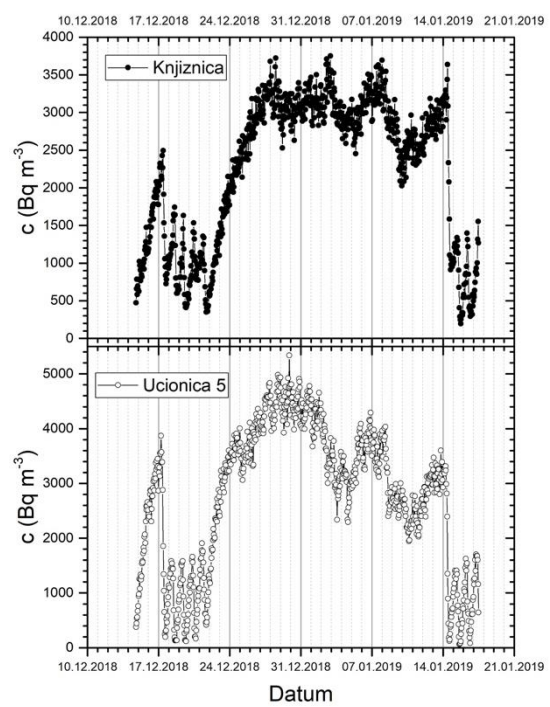
REZULTATI I RASPRAVA

Na Slici 1 su prikazane dnevne varijacije radona u četiri škole u Istarskoj županiji u kojoj je u prvoj fazi mjerenja utvrđena prosječna koncentracija viša od referentne [12]. U svim školama su uočene “klasične” dnevne varijacije koncentracije radona (rast tijekom noćnih sati te postupno smanjenje tijekom radnog vremena), ali s različitim amplitudama.

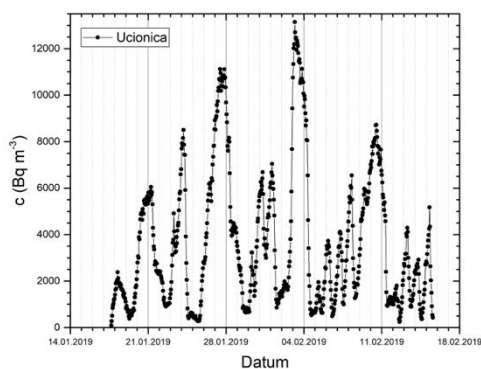
Takav obrazac radonskih razina karakterističan je za objekte s prirodnom ventilacijom i rezultat je promjenjivog gradijenta tlaka zraka između tla i objekta. Čim se smanji provjetranje povećava se koncentracija radona što je vidljivo u svim objektima na Slici 1. Naime, maksimalne vrijednosti koncentracije radona su u dane vikenda kad su škole zatvorene, a učinak je posebno uočljiv u objektu (B) u kojem su mjerenja vršena i za vrijeme novogodišnjih praznika kad je škola tri tjedna bila zatvorena (deblje vertikalne linije na Slici 1 predstavljaju početak tjedna). Primjenom jednadžbe (1), koncentracija radona normirana na radno vrijeme škole je prosječno oko 15 % niža u objektu (A), a oko 30 % niža u objektu (C) negoli u cijelom intervalu mjerenja. Ona bi se dodatno mogla smanjiti ranijim početkom provjetranja škole (2-3 sata prije početka radnog vremena) ili instalacijom zatvorenog sustava izmjene zraka čime bi se smanjio/regulirao gradijent tlaka zraka između tla ispod objekta i samog objekta i time kontrolirao ulazak radona u objekt.



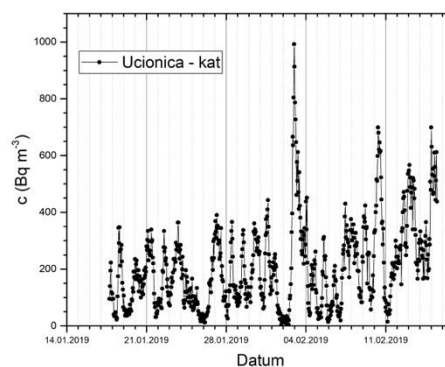
(A)



(B)



(C)

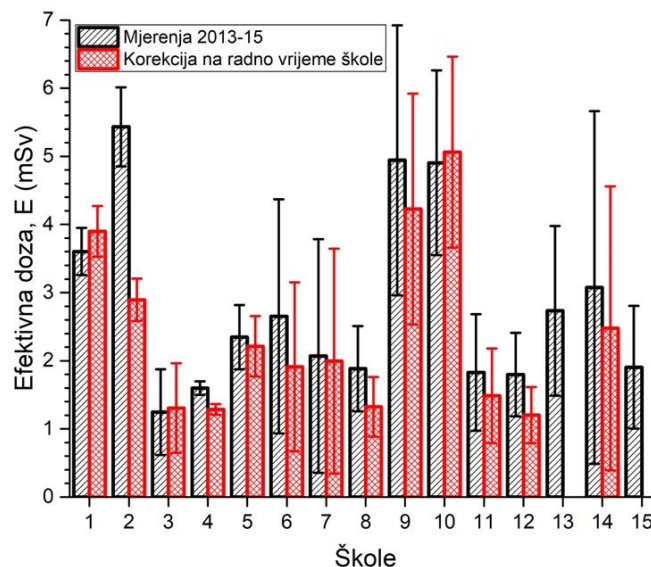


(D)

Slika 1. Dnevne varijacije koncentracije radona u četiri škole u Istarskoj županiji u kojoj su u prvoj fazi mjerenja u trajanju od godinu dana izmjerene visoke vrijednosti (tanje vertikalne linije predstavljaju početak dana, a deblje početak radnog tjedna).

Učionica u objektu (D) se nalazi na katu zgrade pa je i učinak porasta koncentracije radona puno manje vidljiv u odnosu na ostale objekte. Međutim, zbog relativno kratkog radnog vremena škole (radi se o područnoj školi u kojoj se nastava održava samo prijepodne) učinak provjetravanja ne smanjuje koncentraciju radona u radnom vremenu škole s obzirom da se učinak uočava tek nakon par sati, a tada je nastava već završila.

Efektivna doza, primljena od radona i njegovih kratkoživićih potomaka, izračunata je iz biokinetičkog i dozimetrijskog pristupa [16] korištenjem doznog koeficijenta $F = 16,8 \text{ mSv} / \text{MBq h m}^{-3}$ uz pretpostavku da ravnotežni faktor između radona i njegovih kratkoživićih potomaka iznosi 0,4 te da učenici i zaposlenici u objektu prosječno borave 860 radnih sati godišnje u razrednoj nastavi odnosno do 1200 radnih sati u predmetnoj nastavi u osnovnoj školi kao i u srednjoj školi. To čini oko 650 sati boravka godišnje u područnim školama, 780 sati u osnovnim školama te oko 900 sati u srednjim školama. Primljene doze u ovih petnaest škola u Istarskoj županiji u mjerenjima provedenim u razdoblju od 2013. – 2015. bile su u intervalu od 1,2 do 5,4 mSv s prosječnom vrijednosti i pripadnom standardnom devijacijom od $2,8 \pm 1,3 \text{ mSv}$ (Slika 2). Ako se za izračun primljene doze primijeni koncentracija radona normirana na radno vrijeme škole, tada se primljena doza u radnom vremenu škole u prosjeku smanjila za oko 15 %.



Slika 2. Efektivne doze primljene od radona i njegovih kratkoživićih potomaka u petnaest škola Istarske županije u kojima je ponovljeno mjerenje. U školama 13 i 15, kontinuirana mjerenja radona u trenutku pisanja rada su u tijeku.

ZAKLJUČAK

Postojeći protokol za mjerenje koncentracije radona u školama i vrtićima je potrebno revidirati uvodeći drugu fazu mjerenja u onim školama u kojima je, u prvoj fazi, utvrđena koncentracija viša od referentne ($>300 \text{ Bqm}^{-3}$). Naime, provedenim kontinuiranim mjerjenjima uočena je povezanost dnevnih varijacija radona s radnim vremenom škole kao i opravdanost korištenja jednadžbe (1) za karakterizaciju koncentracije radona u školama. Ova revizija protokola bi trebala biti dio aktivnosti postojećeg Akcijskog plana za radon za razdoblje 2019. – 2024. [17].

Zahvala

Autori zahvaljuju Istarskoj županiji i gradu Puli na financijskoj potpori, a ravnateljima i nastavnicima škola u kojima se mjerenja obavljaju na suradnji.

LITERATURA

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and Effects of Ionising Radiation. Volume I: Sources. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with scientific annexes. United Nations, New York. 2000.
- [2] Biological effects of Ionizing Radiation IV, Health risks of radon and other internally deposited Alpha-emitters. BEIR, Washington D.C., National Academy Press, 1988.
- [3] International Agency for Research on Cancer (IARC). IARC Monographs on the Evaluation of the Cancerogenic Risk to Humans, Vol. 43 - Man-made Mineral Fibres and Radon, 173-259, Lyon, IARC, 1988.
- [4] World Health Organization (WHO). WHO Handbook on indoor radon: A public health perspective. WHO, Geneva. 2009.
- [5] Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, Bochicchio F, Deo H, Falk R, Forastiere F, Hakama M, Heid I, Kreienbrock L, Kreuzer M, Lagarde F, Mäkeläinen I, Muirhead C, Oberaigner W, Pershagen G, Ruano-Ravina A, Ruosteenoja E, Schaffrath Rosario A, Tirmarche M, Tomásek L, Whitley E, Wichmann H-E, Doll R. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal* 2005;330:223.
- [6] Gaskin J, Coyle D, Whyte J, Krewski D. Global Estimate of Lung Cancer Mortality Attributable to Residential Radon. *Environmental Health Perspective* 2018;126:057009.
- [7] Vaupotič J. Radon in kindergartens in schools: A review. Chapter 22 In: Z. Li, C. Feng, Eds. *Handbook of Radon: Properties, Applications and Health*, 477-523, New York, Nova Science Publishers Inc., 2012. ISBN 978-1-62100-177-5.
- [8] Lokobauer N, Senčar J, Franić Z, Bauman A, Erceg J, Gajer-Pjacun Đ. Radon u dječjim vrtićima, školama i pripadajućim skloništim na području Zagreba. U: *Zbornik radova Prvog simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja*; 24-26. studeni 1992; Zagreb, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 1992. str. 321-326.
- [9] Planinić J, Kobal I, Vaupotič J. Radon concentrations in kindergartens of Osijek and Ljubljana. *J Radioanal Nucl Chem* 1993;175:103.
- [10] Planinić J, Šmit G, Šuveljak B, Vuković B, Radolić V. Radon in schools and dwellings of Osijek. *J Radioanal Nucl Chem* 1995;191:45-51.
- [11] Radolić V, Miklavčić I, Stanić D, Poje M, Krpan I, Mužević M, Petrincec B, Vuković B. Identification and mapping of radon-prone areas in Croatia - preliminary results for Lika-Senj and the southern part of Karlovac Counties. *Radiat Prot Dosim* 2014;162:29-33.
- [12] Radolić V, Miklavčić I, Poje Sovilj M, Stanić D, Petrincec B, Vuković B. The natural radioactivity of Istria, Croatia. *Radiat Phys Chem* 2019;155:332-340.
- [13] Planinić J, Radolić V, Faj Z, Šuveljak B. Radon equilibrium factor and aerosols. *Nucl Instrum Methods Phys Res A* 1997;396:414.
- [14] Norwegian Radiation Protection Authority (NRPA), Protocol for radon measurements in schools and kindergartens, NRPA, Oslo, 2015.
- [15] Health Canada (HC), Guide for radon measurements in public buildings. HC Pub: 4175. 2008.
- [16] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. *Ann ICRP* 45 (3/4), 2018.
- [17] Akcijski plan za radon za razdoblje 2019. – 2024., NN 118/2018 (27.12.2018.)

DAILY VARIATIONS OF RADON IN SOME SCHOOLS AND KINDERGARTENS WITH ELEVATED RADON LEVELS IN ISTRIA COUNTY – IMPLICATIONS ON ESTIMATION OF RECEIVED DOSES

Vanja Radolić, Denis Stanić, Marina Poje Sovilj, Igor Miklavčić
Department of Physics, J. J. Strossmayer University of Osijek, Osijek, Croatia
vanja@fizika.unios.hr

Radon concentrations in schools and kindergartens of Istria county were systematically measured by track etched detectors from November 2013 until February 2015. Detectors were exposed for a year in every playroom in kindergartens and selected classrooms and offices (such as: libraries, teaching staff offices, administrative offices etc.) evenly distributed across areas and floors in schools. In total, 302 radon detectors in 87 kindergartens and 630 detectors in 117 schools were exposed. The obtained average radon concentrations were higher than the reference value (300 Bq m^{-3}) in 15.5 % of kindergartens and 21.0 % of schools.

At fifteen selected locations where radon concentrations were elevated, from September 2018, integrated follow up radon measurements at every classroom and office are performed by track etched detectors. Simultaneously, continuous radon measurements are conducted by TSR3 radon detector (manufacturer Tesla Company, Czech Republic) with 1-hour time resolution.

The observed daily variations of radon concentrations in these objects (schools and kindergartens) show strong dependence on increased natural ventilation during working hours. It means that radon concentrations significantly decrease in the morning and early afternoon and consequently increase at night and during weekends. Despite these variations, due to very high maximum values during nights (up to twelve thousand Bq m^{-3} in some objects) and short period of working time in some schools (a few hours per day), radon levels are during working hours, in average 15% less than during the entire measurement period. Consequently, estimation of effective doses received from radon and its short-lived progeny, using the ICRP bio-kinetic and dosimetric model, are also decreased by 15% using radon concentrations corrected on working hours. Those effective doses were in range from 1.2 to 5.1 mSv with average value \pm standard deviation of $2.6 \pm 1.4 \text{ mSv}$.

Daily variations of radon concentrations and their influence on corrected radon concentrations during working hours show the need for revision of the protocol for radon measurements in schools and kindergartens introducing two step measurements in those objects with elevated radon levels. This will be proposed as a part of activity within existing national Radon Action Plan.

NEW DOSE COEFFICIENTS FOR RADON IN MINES AND KARST CAVES

Peter Jovanovič

ZVD. D. D., Ljubljana-Polje, Slovenia
peter.jovanovic@zvd.si

INTRODUCTION

Radon is an inert radioactive gas, produced naturally by the uranium and thorium decay chains. Its most abundant isotopes are radon-222 (^{222}Rn), with a half-life of 3.8 days, radon-220 (^{220}Rn), with a half-life of 55.6 seconds, commonly referred to as thoron, and radon-219 (^{219}Rn), with a half-life of 3.96 seconds, commonly referred to as actinon. Given the respective half-lives of these isotopes, only ^{222}Rn and to a lesser extent ^{220}Rn are likely to produce significant doses in the event of intake. For simplification, in the remainder of this document, the term radon will be used indiscriminately to refer to the element or its isotope radon-222. The radon gas present in the ambient air transforms, by alpha decay, into solid progeny, themselves radioactive with short half-lives (less than 30 minutes). Among these progeny, two – polonium-218 and polonium-214 – are also alpha emitters [1,2].

Due to their high mobility, radon's short half-life radioactive progeny fix onto water vapour or gas molecules in trace form in the air (constituting the "unattached fraction" of nanometric size) or onto atmospheric aerosols (forming the "attached fraction" with a size from a few nanometres to a micrometres). Progeny, regardless of whether fixed onto aerosols or not, quickly diffuse in the atmosphere and are ultimately deposited onto the ground or the walls of buildings, such that, regardless of the location, they are never totally in radioactive equilibrium with radon. The equilibrium fractions of radon's short half-life progeny are described by a dimensionless factor called the "equilibrium factor" F . This factor ranges from 0 (when radon is present in the air without progeny) to 1 (when radon's short half-life progeny are present in the air at the same concentration as radon) [1,2].

When a person is exposed to radon and its short half-life progeny, whether attached to dust or not, the inhaled progeny are deposited in the respiratory system and irradiate it. The delivered dose depends on the location of the deposits, which is itself a function of particle size. Finer particles (in particular the unattached fraction) can reach the sensitive cells of the bronchial epithelium and the pulmonary alveoli and thereby deliver larger doses [1,2].

Epidemiological studies on uranium miners have shown a risk of excess mortality due to lung cancer associated with radon exposure. More recent studies in the general population have shown that this risk is also significant for continuous domestic exposure to radon at concentrations above approximately 200 Bq m^{-3} . Since 1987, the World Health Organisation has recognised radon as a known cause of human lung cancer. Its action, combined with that of smoking, leads to a relative lung cancer risk somewhere between the sum and the product of the two relative risks [1,2].

EPIDEMIOLOGICAL APPROACH

In 2010, ICRP Publication 115 gave an update to the lung cancer risk due to radon and its progeny based on recent epidemiological data from studies of weakly exposed uranium miners and studies in the general public [2]. The recent epidemiological studies, in particular in the general population, led to an upward reassessment of the lung cancer risk after radon inhalation in dwellings, for both smokers and non-smokers. Analysis of all epidemiological data showed that the lifetime risk of fatal lung cancer among adults chronically exposed to

low concentrations of radon was 5×10^{-4} per WLM, that is approximately twice as high as the 2.83×10^{-4} per WLM estimated in 1993 on the basis of knowledge available at the time [2-5].

On this basis, and taking into account the new values for total detriment given by ICRP Publication 103 [4], namely 4.2×10^{-2} per Sv for workers and 5.7×10^{-2} per Sv for the public, the dose coefficient estimated by the epidemiological approach was: 12 mSv per WLM (or 3.3 mSv for 1 mJ h m^{-3}) for a worker and 9 mSv per WLM (or 2.5 mSv for 1 mJ h m^{-3}) for the public [6].

As the values derived from the epidemiological approach were order-of-magnitude consistent with those derived from the dosimetric approach, the ICRP chose to harmonise its approach for determining dose coefficients by using the dosimetric approach for radon inhalation, as for other radionuclides [2].

DOSIMETRIC APPROACH

In the case of radon inhalation, the main contribution to the effective dose is from alpha irradiation of radiosensitive lung cells. This irradiation is mainly due to radon progeny deposited in the respiratory system during breathing. The contribution of radon gas itself is estimated to represent only around 2 % to 5 % of the effective dose.

The human respiratory tract model on which the dosimetric approach adopted in ICRP Publication 137 [8] is based is described in ICRP Publication 66 [7]. This model is used to estimate the fraction of radioactive aerosols deposited in the bronchi and pulmonary alveoli, based on their aerodynamic and thermodynamic properties. After being deposited, radioactive particles are removed from the lung by mechanical transport to the digestive tract and by absorption into the blood. The short radioactive half-life of radon progeny means that no significant proportion of these radionuclides is removed before their decay. The energy deposited in the lung cells is calculated based on their position with respect to the radionuclide deposit sites and the range of the alpha particles emitted. Furthermore, the respiratory tract model used considers that a fraction of the radon gas present in the air in the lung is dissolved into the blood stream which distributes it in the body causing irradiation of other organs. As stated above, this irradiation only marginally contributes to the effective dose [1,3,8].

In the effective dose calculation, a radiation weighting factor $WR = 20$ is assigned to the dose resulting from alpha radiation with respect to that from gamma radiation and a tissue weighting factor $WT = 0.12$ is assigned to the pulmonary dose with respect to the whole body dose [3].

Specifically, ICRP Publication 137 adopts four exposure situations covering three types of location: buildings, underground mines and tourist caves. For these three types of location, exposure is defined in reference to the case of a worker engaged in physical activity two thirds of the time, with a mean breathing rate of $1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. For buildings, the ICRP also considers the case of an individual performing sedentary work, such as office work. This is assumed to involve mild physical activity one third of the time and a mean breathing rate of $0.86 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ [8].

To calculate the dose coefficients for each of the four situations adopted, the ICRP has set default values for the following key parameters: (i) the unattached fraction of radon progeny, which depends on the aerosol concentration in the air and the size of these aerosols; (ii) the equilibrium factor which depends on the ventilation rate and the unattached fraction; (iii) the aerosol size distribution, which affects the location of pulmonary deposits and thus the distribution of received dose among the various regions of the respiratory tract; (iv) finally, the humidity, which will affect the apparent size of particles at the entrance to the upper airways and therefore their distribution in the lungs [1,8].

Table 1 provides a summary of the exposure parameters ultimately used in ICRP Publication 137 for each of the four situations considered and provides the correspondence between exposure for 300 Bq m^{-3} , 2000 working hours per year, in one of the units mentioned earlier (WLM and mJ h m^{-3}) and the effective dose in mSv [8].

Table 1. Correspondence between exposure and effective dose for various work situations [8]

	Indoor work activity	Indoor sedentary work activity	Mine work activity	Tourist cave work activity
Exposure parameter values used				
Mean breathing rate	$1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	$0.86 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	$1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	$1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
Equilibrium factor	0.4	0.4	0.2	0.4
Unattached fraction	8 %	8 %	1 %	15 %
Activity median thermodynamic diameter of the unattached fraction (AMTD)	30 nm (for 20 %) and 250 nm (for 80 %)	30 nm (for 20 %) and 250 nm (for 80 %)	250 nm	200 nm
Exposure \ Dose (mSv) ICRP 137 Recommendation	Indoor work activity	Indoor sedentary work activity	Mine work activity	Tourist cave work activity
1 WLM	20	10	10	20
1 mJ h m^{-3}	6	3	3	6

For the calculation of doses following inhalation of radon and radon progeny in underground mines and in buildings, in most circumstances, the Commission recommends a dose coefficient of $3 \text{ mSv per mJ h m}^{-3}$ (approximately 10 mSv per WLM). The Commission considers this dose coefficient to be applicable to the majority of situations with no adjustment for aerosol characteristics. The corresponding dose coefficient expressed in terms of radon-222 gas exposure depends on the equilibrium factor, F , between radon gas and its progeny. Using the standard assumption of $F = 0.4$ for most indoor situations, $3 \text{ mSv per mJ h m}^{-3}$ corresponds to $6.7 \times 10^{-6} \text{ mSv per Bq h m}^{-3}$ (Table 1) [8,9].

For the specific situations of indoor work involving substantial physical activity, and exposures in tourist caves, the Commission recommends a dose coefficient of $6 \text{ mSv per mJ h m}^{-3}$ (approximately 20 mSv per WLM). Using the standard assumption of $F = 0.4$ for most situations, $6 \text{ mSv per mJ h m}^{-3}$ corresponds to $1.3 \times 10^{-5} \text{ mSv per Bq h m}^{-3}$ (Table 1) [8,9].

In the absence of precise, available data for all exposure situations, the ICRP has issued assumptions on the dust level in mines, on the type of aerosols based on the heating method and on their behaviour based on ambient humidity. For tourist caves, it has also made the assumption that the ambient humidity would modify particle size before entry into respiratory airways [1,8].

In cases where the environmental working conditions are very different from the standard conditions adopted by the ICRP, it provides the aspects needed for calculation of potentially more appropriate dose coefficients. The ICRP thus proposes methods for calculating doses by changing the size of aerosols based on their formation mode or changing the unattached fraction of radon progeny [1,8].

KARST CAVES IN SLOVENIA

Continuous measurements of radon and radon progeny concentrations (attached and unattached) were performed in two caves in Slovenia, Postojna cave and Škocjan cave and one mine, Mežica lead mine. Continuous measurements of attached and unattached radon daughter concentrations were performed by BWLM PLUS 2S (Tracerlab, Germany). Device has two alpha detectors, one connected to filter and another to screen of mesh number 200. The measured 50 % cut-off for unattached fraction measurement by BWLM PLUS 2S is 5 nm. Measuring interval was one hour for radon concentration and 30 minutes or less for attached and unattached radon progeny concentrations.

A typical tourist guide through the cave takes between one and two hours, depending on the cave, but visitors are walking around 1 km. Radon concentrations and aerosol characteristics are different on different locations in the cave. In Postojna cave, visitors are walking 1.5 hours and about 20 minutes in a part with higher unattached fraction and lower equilibrium factor. These parameters change from location to location and from the period of the year. Lowest values for unattached fraction were measured on the location Pod goro, which is valid for about two thirds of the cave, higher values are connected to the location Partizan or The lowest point (around one third of the cave). Also in Škocjan caves a guided tour takes 1.5 hours, but much lower unattached fraction was measured. Measurements in both caves were performed four times per year for the period of one week. Unattached fraction f_p for both caves (Postojna cave and Škocjan caves) is presented in Figure 1.

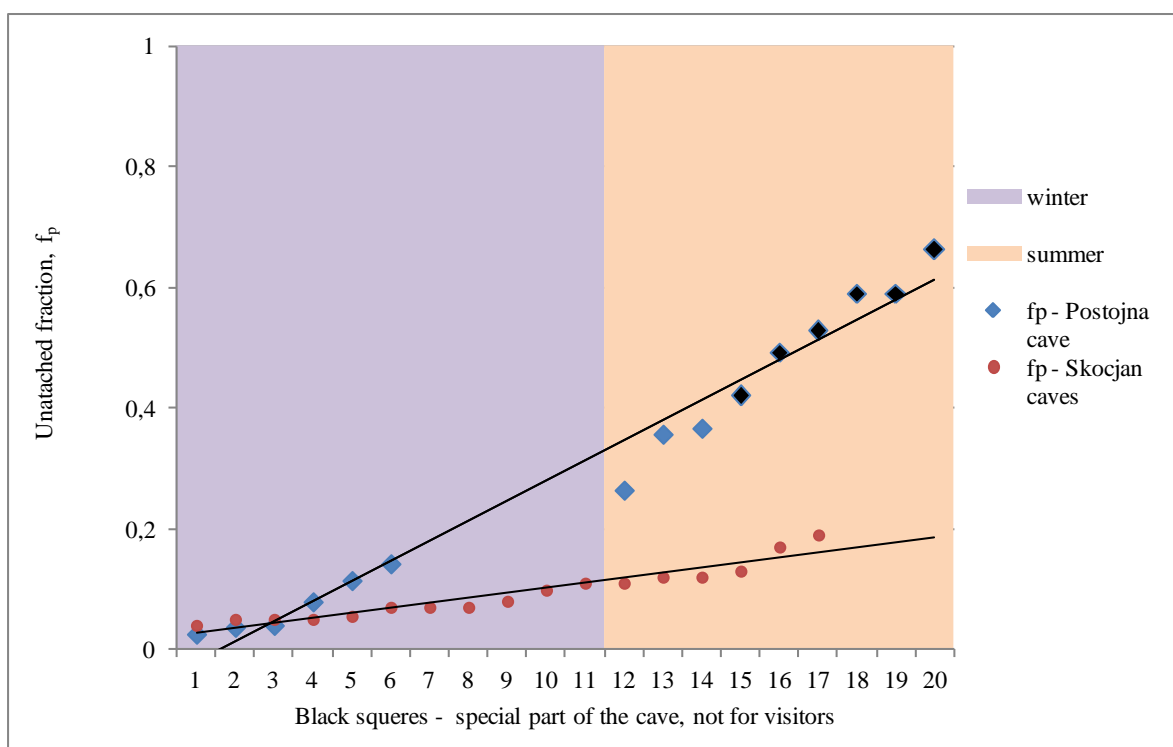


Figure 1. Unattached fractions in Postojna cave and Škocjan caves

Average f_p value for Postojna cave is 0.18 (0.03 – 0.59), in winter period 0.07 and in summer period 0.31. Average value for unattached fraction in Škocjan caves is 0.09 (0.04 – 0.19), in winter period 0.07 and in summer period 0.14. In Postojna cave unattached fraction f_p is much higher than in Škocjan caves. Unattached fraction f_p was also higher in summer period than in winter period. Difference between summer and winter period in Postojna cave is more evident than in Škocjan caves. The reason for such difference is in climatic parameters as number of aerosols and ventilation of the cave.

Measurements we did in Škocjan cave with SMPS (10 – 700 nm) show two modal distribution of aerosols in cave air, first mode between 20 – 50 nm, second between 60 – 150 nm. Measurements with Hauke Impactor show one mode in the range from 400 nm up to 1.5 μm , depending on the period of the year (lower in winter period). Around 20 % of particles lie in the range of 200 nm in winter period and only 4 % in summer period.

CONCLUSIONS

Measurements of unattached fraction and aerosol characteristics in two caves in Slovenia show big difference between winter and summer period with much higher values in summer time. Mean value of unattached fraction f_p for Škocjan caves is 0.09 and for Postojna cave 0.18. First measurements of aerosol size distribution in Škocjan caves show there could be a big difference between aerosol characteristics in different caves.

Because of various time spend on different locations dose coefficient proposed by ICRP 137 maybe cannot be appropriate for tourist guides for all karst caves or mines.

REFERENCES

- [1] IRSN 2018: New dose coefficient-s for radon, recommended in ICRP Publication 137, Report PSE-SANTE/2018-00002.
- [2] ICRP 115: Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. ICRP Publication 115, Ann ICRP 40(1), 2010.
- [3] ICRP 103: 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Users Edition). ICRP Publication 103 (Users Edition). Ann ICRP 37(2–4), 2007.
- [4] SSK: Radon dose coefficients, Recommendation by the German Commission on Radiological Protection, 2017.
- [5] Wolfgang-Ulrich Muller: Current knowledge on radon risk: implications for practical radiation protection? Radon workshop, 1/2 December 2015, Bonn, BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit; Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety), 2016.
- [6] Marsh JW, Harrison JD, Laurier D, et al. Dose conversion factors for radon: recent developments. Health Phys 2010;99:511-516.
- [7] ICRP 66: Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann ICRP 24(1–3), 1994.
- [8] ICRP 137: Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann ICRP 46 (3-4), 2017.
- [9] ICRP Letter on Radon Dose Coefficients November 2017

NEW DOSE COEFFICIENTS FOR RADON IN MINES AND KARST CAVES

Peter Jovanovič

ZVD. D. D., Ljubljana-Polje, Slovenia

peter.jovanovic@zvd.si

New dose coefficients for radon progeny are published in Publication 137, Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. The new dose coefficients are consistent with the estimates of lung cancer risk. The new ICRP approach will apply the ICRP reference biokinetic and dosimetric models to the inhalation of the radon progeny, consistent with the approach for other radionuclides. This approach uses the ICRP Human Respiratory Tract Model and information about the radon progeny aerosol characteristics in the workplace.

For the calculation of doses following inhalation of radon and radon progeny in mines and most buildings, the ICRP recommends a dose coefficient of 3 mSv per mJ h m⁻³ (approximately 10 mSv per WLM). The ICRP considers this dose coefficient to be applicable to the majority of circumstances with no adjustment for aerosol characteristics.

For indoor workplaces where workers are engaged in physical activities, and for workers in tourist caves, the ICRP recommends a dose coefficient of 6 mSv per mJ h m⁻³ (approximately 20 mSv per WLM).

Measurements in karst caves and mines in Slovenia show big difference in aerosol characteristics which are significantly different from typical conditions. Those are different also on different location in cave or mine. Because of various time spend on different locations proposed dose coefficient maybe cannot be appropriate for tourist guides for all karst caves or mines.

INFLUENCE OF ^{226}Ra ON ^{222}Rn IN WATER MEASUREMENTS

Jovana Nikolov¹, Nataša Todorović¹, Ivana Stojković², Andrej Vraničar¹

¹University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia

²University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia

jovana.nikolov@df.uns.ac.rs

INTRODUCTION

On the basis of Articles 35-36 of the EURATOM Treaty [1] monitoring and reporting of environmental radioactivity is an obligation for the EU Member States [2]. In general, surface and underground waters contain natural activity concentrations of radionuclides. The content of radionuclides in waters will depend on their origin. The main source of radon (^{222}Rn) in water is natural processes of decay of its parent nuclide ^{226}Ra and predominantly dissolution from the surrounding geological environment (rocks, soils) as discussed in literature [3,4]. Radon in water may also origin from dissolution of airborne radon into water and other higher radon bearing water in-flows in the catchment area [2]. Water intended for drinking purposes has to be analysed for its radon content according to the new EURATOM Drinking Water Directive 2013 [5].

The relatively low cost and simplicity of many ^{222}Rn measurement techniques (like RAD7 detector, Alpha-guard, liquid scintillation counter - LSC, and similar) has made them common to apply in many laboratories. Most of the used methods suffer from the influence of ^{226}Ra naturally presented in waters on real estimation of ^{222}Rn activity concentration in water. Therefore, although naturally available in water samples ^{226}Ra could highly compromise obtained results of ^{222}Rn in water measurements and lead to the overestimation of the real activity concentrations. Usually, if we assume that ^{226}Ra is present in the water sample, there will be a constant production of ^{222}Rn and it becomes necessary to perform a second measurement after secular equilibrium has been established between ^{226}Ra and ^{222}Rn . Since the ^{222}Rn half-life is 3.824 days one needs to wait a significant period of time (preferably 10 half-lives, more than 30 days) for this correction to be applied, which could introduce severe complication and delays in obtaining the results. This paper presents study of the influence of presence of ^{226}Ra in natural waters in precise determination of activity concentration of ^{222}Rn by LSC method with using different scintillation cocktails [6].

MATERIALS AND METHODS

Samples for this analysis were taken from the spring Školska česma in radon spa Niška Banja, Serbia, which is well known for elevated levels of ^{222}Rn in water [7]. In order to test the influence of the presence of ^{226}Ra in water on measurements of ^{222}Rn in water, a known amount of standard reference material - aqueous solution of ^{226}Ra , a standard radioactive source activity produced from Czech Metrology Institute, Inspectorate for Ionizing Radiation, was added to natural water samples taken from the spring Školska česma. Certified activity of the used standard solution is $A(^{226}\text{Ra}) = 39.67 \text{ Bq ml}^{-1}$ with combined standard uncertainty 0.5 %, reference date 1/10/2013. In order to test suitability of LSC method we tested 4 different scintillation cocktails (UGAB (*Ultima Gold AB*), OFO (*Opti-Fluor O*), MOS (*High Efficiency Mineral Oil Scintillator*) and UGF (*Ultima-Gold F*)), therefore testing advantages and disadvantages of one-phase and two-phase method [6]. The set of samples was prepared on the following way: one water sample (3 probes) were prepared immediately after arriving of the samples in the laboratory by direct mixing of 10 ml of water with 10 ml of scintillation cocktail (4 different scintillation cocktails were used and 12 vials were prepared); other samples (all in 3 probes with 4 different scintillation cocktails) were prepared by adding of

different amount of ^{226}Ra standard solution into a mixture of 10 ml of sample and 10 ml of scintillation cocktail. The added volumes of standard solutions were 20 μl , 100 μl and 200 μl , which corresponds to the activity concentrations of 80 Bq l^{-1} , 396.7 Bq l^{-1} and 793.4 Bq l^{-1} , respectively. The samples were prepared on 23.3.2018.

All samples were measured on the LSC Quantulus 1220 (Perkin Elmer, Finland) [8] and the EPA Method 913.0 [9] was used [10,11].

Prepared set of samples was measured one day after preparation and after 7 days, after almost one month and after two months in order to check the influence of pure ^{226}Ra and the ingrowth of ^{222}Rn in water from decay of ^{226}Ra during establishing a secular radioactive equilibrium.

RESULTS

Results of the activity concentration of ^{222}Rn in water in sample from Školska česma measured by two different LSC methods: one-phase (UGAB) and two-phase (OFO, MOS and UGF) are presented in Table 1.

Table 1. ^{222}Rn in water with different scintillation cocktails

Scintillation cocktail	Window [channels]	Background [cpm]	Calibration factor CF (Bq l^{-1})	Activity concentration of ^{222}Rn A (Bq l^{-1})
UGAB	600-790	0.065	218(6)	389(11)
OFO	760-910	0.396	151(4)	515(14)
MOS	725-875	0.075	140.8(20)	531(8)
UGF	830-970	0.099	150.6(25)	505(9)

Results of the activity concentration of ^{222}Rn in water sample with added ^{226}Ra standard solution in three different volumes (different activities) for all four scintillation cocktails are presented in Tables 2-5.

According to the obtained results, it is obvious that the presence of ^{226}Ra in water will influence the measured value for ^{222}Rn in water. That is expected because as soon as the ^{226}Ra standard solution enters measuring vial it starts to decay to ^{222}Rn and build-up the measured activity concentration of natural ^{222}Rn presented in water. At the same time, ^{222}Rn naturally presented in water will decay. Therefore, the validation of the used method can be carried out only by analysing the results which are obtained by establishing a secular radioactive equilibrium $^{226}\text{Ra}/^{222}\text{Rn}$ (third and fourth row in Tables 2-5), when natural ^{222}Rn which was present in the water decayed in total. After secular radioactive equilibrium is established, the measured activity concentration of ^{222}Rn in water should belong only to ^{222}Rn from ^{226}Ra standard solution and the expected results should correspond to the spiked activity values. The obtained results showed that only one-phase LSC method (UGAB) gave expected results. For two-phase LSC method, in samples prepared with all three scintillation cocktails (OFO, UGF and MOS), underestimated results were obtained. This investigation needs more detailed analysis and study of the chemical properties of scintillation cocktails used and interactions with natural water from the spring Školska česma, also the “capacity” of the used scintillation cocktails has to be carefully studied. “Capacity” of the scintillation cocktails should be taken in the sense of attachment of radon in the organic phase from spiked activity concentration, which is due to the fact that the ^{226}Ra remains in the aqueous phase and does not pass into the organic phase, while its daughter nuclei ^{222}Rn has a greater affinity for the organic phase and passes from the aqueous phase to the volume of the cocktail. The other possible reason could be that not all ^{222}Rn that is present in the sample after one month of preparation is entering scintillation cocktail phase and therefore it could not be detected.

Table 2. $^{222}\text{Rn} + ^{226}\text{Ra}$ in water, UGAB scintillation cocktail.

Date of measurements	Elapsed time t [days]	Theoretical activity concentration of ^{222}Rn	Measured activity concentration of ^{222}Rn	Corrected activity concentration* of ^{222}Rn
		A_{teo} (Bq l $^{-1}$)	A_{meas} (Bq l $^{-1}$)	A_{cor} (Bq l $^{-1}$)
Added activity of ^{226}Ra $A=80$ Bq l $^{-1}$				
24.3.2018.	4.62	168(5)	216(5)	500(13)
30.3.2018.	10.85	54.3(15)	130(3)	
20.4.2018.	31.08	1.38(4)	88.2(23)	
22.5.2018.	63.85	$361(10) \cdot 10^{-5}$	87.6(23)	
Added activity of ^{226}Ra $A=396.7$ Bq l $^{-1}$				
24.3.2018.	4.69	166(5)	441(11)	1032(26)
30.3.2018.	10.94	53.4(15)	442(11)	
20.4.2018.	31.15	1.36(4)	432(11)	
22.5.2018.	63.94	$355(10) \cdot 10^{-5}$	425(11)	
Added activity of ^{226}Ra $A=793.4$ Bq l $^{-1}$				
24.3.2018.	4.75	164(5)	723(18)	1713(42)
30.3.2018.	11.00	52.8(15)	838(21)	
20.4.2018.	31.23	1.34(4)	863(21)	
22.5.2018.	64.00	$352(10) \cdot 10^{-5}$	842(21)	
Background [cpm]			0.198	
CF [cpm Bq $^{-1}$]			246(6)	

*Activities were corrected on the date of sampling, 20.3.2018.

Table 3. $^{222}\text{Rn} + ^{226}\text{Ra}$ in water, OFO scintillation cocktail.

Date of measurements	Elapsed time t [days]	Theoretical activity concentration of ^{222}Rn	Measured activity concentration of ^{222}Rn	Corrected activity concentration* of ^{222}Rn
		A_{teo} (Bq l $^{-1}$)	A_{meas} (Bq l $^{-1}$)	A_{cor} (Bq l $^{-1}$)
Added activity of ^{226}Ra $A=80$ Bq l $^{-1}$				
24.3.2018.	5.15	202(6)	260(7)	663(17)
30.3.2018.	11.40	65.0(18)	140(4)	
20.4.2018.	31.62	1.66(5)	85.6(24)	
22.5.2018.	64.40	$433(12) \cdot 10^{-5}$	66.3(19)	
Added activity of ^{226}Ra $A=396.7$ Bq l $^{-1}$				
24.3.2018.	5.17	201(5)	366(9)	935(24)
30.3.2018.	11.44	64.6(18)	171(5)	
20.4.2018.	31.65	1.65(4)	68.0(19)	
22.5.2018.	64.46	$428(12) \cdot 10^{-5}$	67.9(19)	
Added activity of ^{226}Ra $A=793.4$ Bq l $^{-1}$				
24.3.2018.	5.21	200(5)	394(10)	1013(26)
30.3.2018.	11.48	64.1(17)	206(5)	
20.4.2018.	31.69	1.64(4)	127(3)	
22.5.2018.	64.48	$427(12) \cdot 10^{-5}$	130(4)	
Background [cpm]			0.676	
CF [cpm Bq $^{-1}$]			160(4)	

*Activities were corrected on the date of sampling, 20.3.2018.

Table 4. $^{222}\text{Rn} + ^{226}\text{Ra}$ in water, MOS scintillation cocktail.

Date of measurements	Elapsed time t [days]	Theoretical activity	Measured activity	Corrected activity
		concentration of ^{222}Rn A_{teo} (Bq l $^{-1}$)	concentration of ^{222}Rn A_{meas} (Bq l $^{-1}$)	concentration* of ^{222}Rn A_{cor} (Bq l $^{-1}$)
Added activity of ^{226}Ra $A=80$ Bq l $^{-1}$				
24.3.2018.	4.83	221(3)	286(4)	688(9)
30.3.2018.	11.08	71.1(11)	154.2(23)	
20.4.2018.	31.33	1.80(3)	93.0(15)	
22.5.2018.	64.08	473(7)·10 $^{-5}$	88.8(15)	
Added activity of ^{226}Ra $A=396.7$ Bq l $^{-1}$				
24.3.2018.	4.92	217(3)	414(6)	1011(13)
30.3.2018.	11.15	70.2(11)	204(3)	
20.4.2018.	31.37	1.80(3)	85.5(15)	
22.5.2018.	64.15	467(7)·10 $^{-5}$	74.9(14)	
Added activity of ^{226}Ra $A=793.4$ Bq l $^{-1}$				
24.3.2018.	4.98	215(3)	441(6)	1089(14)
30.3.2018.	11.23	69.2(11)	243(3)	
20.4.2018.	31.46	1.76(3)	161.7(24)	
22.5.2018.	64.48	440(7)·10 $^{-5}$	153.0(23)	
Background [cpm]			0.290	
CF [cpm Bq $^{-1}$]			167(2)	

*Activities were corrected on the date of sampling, 20.3.2018.

Table 5. $^{222}\text{Rn} + ^{226}\text{Ra}$ in water, UGF scintillation cocktail.

Date of measurements	Elapsed time t [days]	Theoretical activity	Measured activity	Corrected activity
		concentration of ^{222}Rn A_{teo} (Bq l $^{-1}$)	concentration of ^{222}Rn A_{meas} (Bq l $^{-1}$)	concentration* of ^{222}Rn A_{cor} (Bq l $^{-1}$)
Added activity of ^{226}Ra $A=80$ Bq l $^{-1}$				
24.3.2018.	5.02	184(3)	277(5)	689(12)
30.3.2018.	11.27	59.2(11)	154.3(28)	
20.4.2018.	31.50	1.51(3)	89.9(18)	
22.5.2018.	64.27	394(7)·10 $^{-5}$	87.1(17)	
Added activity of ^{226}Ra $A=396.7$ Bq l $^{-1}$				
24.3.2018.	5.06	183(3)	387(7)	970(16)
30.3.2018.	11.31	58.8(11)	203(4)	
20.4.2018.	31.54	1.50(3)	99.4(19)	
22.5.2018.	64.31	391(7)·10 $^{-5}$	91.7(18)	
Added activity of ^{226}Ra $A=793.4$ Bq l $^{-1}$				
24.3.2018.	5.10	181(3)	415(7)	1047(18)
30.3.2018.	11.35	58.4(11)	210(4)	
20.4.2018.	31.58	1.49(3)	113.6(22)	
22.5.2018.	64.35	398(7)·10 $^{-5}$	100.4(19)	
Background [cpm]			0.246	
CF [cpm Bq $^{-1}$]			159.2(25)	

*Activities were corrected on the date of sampling, 20.3.2018.

CONCLUSIONS

The main conclusion of this investigation is that ^{226}Ra in water can greatly affect the measurement of ^{222}Rn in natural water and if we want to be sure in the measured activity concentration of ^{222}Rn in water, the ^{226}Ra activity concentration has to be measured by some other method or the sample should be measured after one month when secular equilibrium is reached. According to the obtained results with using different scintillation cocktails, one-phase LSC method gave better results and therefore for the measurement of ^{222}Rn in natural water which belongs to the decay of ^{226}Ra it is better to use mixable scintillation cocktails. Although, according to the reported values in reference [6] water immiscible scintillation cocktails gave better results.

Acknowledgement

The authors acknowledge the financial support of the Ministry of Education, Science and Technological Development of Republic of Serbia, within the projects No.171002 and No.43002, and the Provincial Secretariat for higher education and scientific research within the project No. 142-451-2447/2018.

REFERENCES

- [1] EURATOM, 2010. Treaty Consolidated Version of the Treaty Establishing the European, Atomic Energy Community (2010/C 84/01). Article 35-36.
- [2] Jobbágy V, Altzitzoglou T, Malo P, Tanner V, Hult M. A brief overview on radon measurements in drinking water, *J Environ Radioact* 2017;173:18-24.
- [3] Moreno V, Bach J, Baixeras C, Font L. Radon levels in groundwaters and natural radioactivity in soils of the volcanic region of La Garrotxa. Spain. *J Environ Radioact* 2014;128:1-8.
- [4] Fonollosa E, Penalver A, Borrull F, Aguilar C. Radon in spring waters in the south of Catalonia. *J Environ Radioact* 2016;151:275-281.
- [5] EURATOM, Council Directive 2013/51/Euratom of 22 October 2013 Laying Down Requirements for the Protection of the Health of the General Public with Regard to Radioactive Substances in Water Intended for Human Consumption. 2013.
- [6] Nikolov J, Stojković I, Todorović N, Tenjović B, Vuković S, Knežević J. Evaluation of different LSC methods for ^{222}Rn determination in waters. *Appl Radiat Isotop* 2018;142: 56-63.
- [7] Nikolov J, Todorovic N, Petrovic Pantic T, Forkapic S, Mrdja D, Bikit I, Krmar M, Veskovic M. Exposure to radon in the radon spa Niska Banja, Serbia. *Radiat Measur* 2012;47:443-450.
- [8] Quantulus 1220, 2002. Instrument manual, Ultra low level liquid scintillation spectrometer. PerkinElmer 1220-931-06.
- [9] EPA Method, 913.0, 1991. Determination of radon in drinking water by liquid scintillation counting. Radioanalysis Branch, Nuclear Radiation Assessment Division, Environmental Monitoring Systems Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency Las Vegas Nevada 89119.
- [10] Todorović N, Nikolov J, Forkapić S, Bikit I, Mrđa D, Krmar M, Vesković M. Public exposure to radon in drinking water in SERBIA. *Appl Radiat Isotop* 2012;70:543-549.
- [11] Stojković I, Todorović N, Nikolov J, Tenjović B. PSA discriminator influence on ^{222}Rn efficiency detection in waters by liquid scintillation counting. *Appl Radiat Isotop* 2016;112:80-88.

INFLUENCE OF ^{226}Ra ON ^{222}Rn IN WATER MEASUREMENTS

Jovana Nikolov¹, Nataša Todorović¹, Ivana Stojković², Andrej Vraničar¹

¹University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia

²University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia

jovana.nikolov@df.uns.ac.rs

Radon is released into waters as a result of natural processes like decay of its parent nuclide ^{226}Ra and predominantly dissolution from the surrounding geological environment (rocks, soils). ^{226}Ra and its decay product ^{222}Rn in water contribute to human exposure in two ways: ingestion (drinking water) and inhalation (while drinking water and using thermal waters in health purposes). Water intended for drinking purposes has to be analyzed for its radon content according to the new EURATOM Drinking Water Directive 2013. There are different methods for ^{222}Rn in water measurements developed (RAD7, Alpha-guard, LSC, etc.). Most of the used methods suffer from the influence of ^{226}Ra presented in water on real estimation of ^{222}Rn activity concentration in water. This paper presents study of the influence of presence of ^{226}Ra in natural waters in precise determination of activity concentration of ^{222}Rn in natural water.

Samples for this analysis were taken from the spring Školska česma in radon spa Niška Banja, Serbia, which is well known for elevated levels of ^{222}Rn in water. In order to test the influence of the presence of ^{226}Ra in water on measurements of ^{222}Rn in water, a known amount of standard reference material - aqueous solution of ^{226}Ra was added to natural water samples taken from the spring. The activity concentration of ^{222}Rn in water is measured with LSC method and by using four scintillation cocktails.

The main conclusion of this investigation is that ^{226}Ra in water can greatly affect the measurement of ^{222}Rn in natural water and if we want to be sure in the measured activity concentration of ^{222}Rn in water, the ^{226}Ra activity concentration has to be measured by some other method or the sample should be measured after one month when secular equilibrium is reached. According to the obtained results with using different scintillation cocktails, one-phase LSC method gave better results and therefore for the measurement of ^{222}Rn in natural water which belongs to the decay of ^{226}Ra it is better to use mixable scintillation cocktails. The obtained results showed that only one-phase LSC method gave expected results, which means that ^{222}Rn in water from ^{226}Ra standard solution was measured in expected activity concentrations which correspond to the spiked values in prepared samples with UGAB scintillation cocktail. For two-phase LSC method, in samples prepared with all three scintillation cocktails (OFO, UGF and MOS) and added known activity concentration of ^{226}Ra standard solution in natural water, underestimated results were obtained. This investigation needs more detailed analysis and study of the chemical properties of scintillation cocktails used and interactions with natural water from the spring, also the “capacity” of the used scintillation cocktails have to be carefully studied.

INTERKOMPARACIJA METODA MJERENJA RADONA U VODI

*Marina Poje Sovilj¹, Jovana Nikolov², Ivana Coha³, Ana Pavlačić¹, Ivana Tucaković³,
Nataša Todorović², Vanja Radolić¹*

¹Odjel za fiziku, Sveučilište J. J. Strossmayer u Osijeku, Osijek, Hrvatska

²Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija

³Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska

marina.poje@fizika.unios.hr

UVOD

Voda za piće u mnogim se zemljama crpi iz podzemnih izvora (bunari, arteški bunari). Uobičajeno je da je koncentracija radona u vodi iz tih izvora viša od koncentracije radona u površinskoj vodi (rijeke, prirodna i umjetna jezera). Radon i njegovi kratkoživi potomci prepoznati su kao javno zdravstveni problem [1]. Određene preporuke [2], ali i zahtjevi [3] usmjereni na zaštitu zdravlja opće populacije od ozračenja radonom iz pitke vode stavili su mjerenje koncentracije radona u vodi u fokus interesa u mnogim zemljama Europe. Poseban naglasak je stavljen na metrološko razumijevanje pogrešaka u uzorkovanju i mjerenju kao i na harmonizaciju i standardizaciju mjernih metoda [4].

U ovom radu će biti prikazani rezultati interkomparacije tri nezavisna laboratorija: Laboratorije za ispitivanje radioaktivnosti uzoraka i doze jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja Departmana za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu (DP-PMF UNS), Laboratorija za niske radioaktivnosti Odjela za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku (DP-UNIOS) i Laboratorija za radioekologiju Zavoda za istraživanje mora i okoliša Instituta Ruđer Bošković (IRB). Pritom su DP-PMF UNS i IRB akreditirani laboratoriji prema normi ISO 17025, a DP-UNIOS je u procesu pripreme dokumentacije za akreditaciju. Posebna pažnja posvećena je provjeri utjecaja pravilnog uzorkovanja vode, jer ono najčešće i najznačajnije utječe na rezultat mjerenja. Voda je uzorkovana na dva različita izvora: "Limanski park" u Novom Sadu i "Školska česma" u Niškoj Banji u Srbiji. Izvor "Školska česma" poznat je po vrlo visokim koncentracijama radona u vodi koje značajno (i do 6 puta) premašuju [5] referentnu vrijednost od 100 Bq/l [2,6].

MATERIJALI I METODE

Koncentracije aktivnosti radona u vodi određene su korištenjem četiriju različitih tehnika mjerenja (alfa spektrometrija, gama spektrometrija, ionizacijska komora, tekućinski scintilacijski detektori) s pomoću šest različitih mjernih uređaja na tri navedene institucije, a dobiveni rezultati mjerenja međusobno su uspoređeni pomoću z -vrijednosti. Koncentracija aktivnosti radona u vodi direktno je mjerena gama spektrometrijom (IRB) te indirektno emanometrijskim postupkom otplinjavanja iz tekuće u plinovitu fazu (mjerenje ionizacijskom komorom AlphaGUARDa (DP-UNIOS) odnosno alfa spektrometrijom pomoću mjernog uređaja RAD7 (DP-PMF UNS)) te u tekućoj fazi miješanjem uzoraka s odgovarajućim scintilacijskim koktelima (tekućinski scintilacijski detektori Quantulus (DP-PMF UNS) i TriCarb (IRB, DP-UNIOS)).

Na DP-UNIOS dobiveni uzorci vode mjereni su pomoću dva uređaja: ionizacijske komore AlphaGUARD i tekućinskog scintilacijskog detektora TriCarb 2900. Određivanje koncentracije radona u uzorku vode pomoću mjernog sustava AlphaGUARD temelji se na određivanju koncentracije radona u zraku. Eksperimentalni postav se osim uređaja AlphaGUARD i AlphaPUMP sastoji i od dviju staklenih posuda - posude za otplinjavanje i sigurnosne posude (AquaKIT modul). Obujam vode koja je mjerena iznosio je 100 ml, a korišten je tzv. brzi postupak mjerenja u ukupnom trajanju od 30 minuta: 10 minuta

otplinjavanja i 20 minuta mjerenja u mjernom ciklusu od 1 min [7]. Koncentracija radona u vodi c_v (Bq/l) izračunava se iz sljedeće jednadžbe :

$$c_v = \frac{c_z \left(\frac{V_{sistem} - V_{uzorak}}{V_{uzorak}} + k \right) - c_0}{1000} \quad (1)$$

gdje je c_z (Bq/m³) mjerena koncentracija radona u zraku, c_0 (Bq/m³) koncentracija radona u prostoriji u kojoj se izvodi mjerenje, V_{sistem} (ml) je obujam zraka u zatvorenom sustavu, V_{uzorak} (ml) obujam uzorka vode, a k je tzv. Bunsenov koeficijent koji opisuje omjer radona u tekućoj i plinovitoj fazi i ovisan je o temperaturi uzorka.

TriCarb 2900 (DP-UNIOS) i 3180 (IRB) odnosno Quantulus 1220 (DP-PMF UNS) su tekućinski scintilacijski brojači (računalno upravljani) koji detektiraju alfa i beta radioaktivnost. Detektori ovih uređaja sadrže dva fotomultiplikatora koji su postavljeni jedan nasuprot drugog u reflektirajućoj optičkoj komori, i detektiraju signal iz uzorka u koincidenciji. Softver QuantaSmart (Tri-Carb), odnosno EasyView (Quantulus) omogućava u spektralnom prozoru grafički 2D pregled spektra uzorka koji se analizira u stvarnom vremenu. Korišteni su monofazni scintilacijski kokteli Ultima Gold AB, XR (DP-UNIOS i IRB) te dvofazni F i Opti Fluor O (DP-PMF UNS). Kalibracija tekućinskih scintilacijskih brojača, a potom i koncentracija aktivnosti radona u vodi određeni su prema metodi EPA 913.0 [8] Za kalibraciju je korištena otopina standarda radija (²²⁶Ra) iz češkog Instituta za metrologiju (*Czech Metrology Institute, Inspectorate for Ionizing Radiation*) specifične aktivnosti 39,67 (20) Bq ml⁻¹ na dan 1.10.2013. Iz navedenog standarda pripremi se 100 ml otopine ²²⁶Ra približne koncentracije aktivnosti 1,3 kBq l⁻¹. Po 10 ml pripremljenog standarda pomiješa se s 10 ml scintilacijskog koktela u staklenim scintilacijskim bočicama. Mjerenja se izvode u više ciklusa u trajanju od po 50 minuta, 30 dana nakon pripreme, odnosno nakon uspostavljanja radioaktivne ravnoteže između ²²⁶Ra i ²²²Rn. Tri uzorka osnovnog zračenja (*background*) pripremaju se odmjerkavanjem 10 ml destilirane vode i 10 ml scintilacijskog koktela u staklenim bočicama i mjere se i u svrhu kalibracije mjernog sustava i kasnije, u svakom setu uzoraka vode u kojima se određuje sadržaj radona. Neposredno prije mjerenja, uzorci se ostavljaju 3 sata u mraku radi eliminacije eventualnih fotoluminiscentnih reakcija.

Kalibracijski faktor, CF (min⁻¹ Bq⁻¹), koji zapravo predstavlja efikasnost detekcije ²²⁶Ra, odnosno ²²²Rn, računa se prema izrazu:

$$CF = \frac{S-B}{C \cdot V} \quad (2)$$

gdje je S (min⁻¹) broj impulsa u minuti radijevog standarda, B (min⁻¹) broj impulsa u minuti backgrounda, C (Bq/l) koncentracija aktivnosti kalibracijskog ²²⁶Ra standarda u ravnoteži sa ²²²Rn, V (l) je volumen mjerenog standarda.

Minimalna detektibilna aktivnost, MDA (Bq l⁻¹) određuje se prema izrazu:

$$MDA = \frac{2,71 + 4,65 \sqrt{B \cdot T_B}}{CF \cdot D \cdot V \cdot T_B}, \quad (3)$$

gdje je T_B vrijeme mjerenja backgrounda.

Nakon određivanje kalibracijskog faktora CF , koncentracija aktivnosti radona u uzorcima pitke vode određuje se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$c_v \left(\frac{Bq}{l} \right) = \frac{G-B}{CF \cdot D \cdot V} \quad (4)$$

gdje je G broj impulsa u minuti uzorka, B broj impulsa u minuti backgrounda (uzorak destilirane vode), D korekcijski faktor za raspad radona ²²²Rn za vrijeme proteklo od vremena uzorkovanja do vremena mjerenja, V volumen uzorka koji se mjeri.

Na DP-PMF UNS koncentracije radona u vodi određene su alfaspektrometrijskom metodom na uređaju RAD7 i tekućinskim scintilacijskim brojačem Quantulus 1220. Koncentracija aktivnosti radona u vodi na uređaju RAD7 zasniva se na mjerenju radonova potomka polonija ^{218}Po na sljedeći način: radon se ekstrahira iz uzorka vode (volumena 200 ml kada se očekuje koncentracija aktivnosti ^{222}Rn manja od 100 Bq/l ili 40 ml za koncentracije aktivnosti ^{222}Rn u vodi veće od 100 Bq/l) strujanjem zraka kroz njega (mjehuričenjem uzorka), cirkuliranjem zraka radon ulazi u ionizacijsku komoru (automatska pumpa omogućava protok suhog zraka brzinom 1 l/min kroz komoru). Na ulazu u komoru se nalazi filter koji sprječava ulazak radonovih potomaka u komoru i time omogućava mjerenje samo koncentracije radona u komori dok svi njegovi potomci ostaju nataloženi na filteru. Jezgre radona ^{222}Rn koje se nalaze unutar ionizacijske komore se raspadaju na jezgre polonija ^{218}Po koje su pozitivni ioni i one su električnim poljem usmjerene prema silicijskom α detektoru na kojemu se talože. Nataloženi polonij se raspada α i β raspadom, a α čestice se detektiraju s točno određenom energijom od 6,03 MeV. Svi ostali α raspadi će se detektirati s drugom upadnom energijom, a raspadi nastali β raspadom se neće detektirati. Alfa čestice nastale raspadom ^{222}Rn u zraku unutar komore se također neće detektirati jer su nastale u zraku, a ne na površini detektora. Naime, na površini detektora se ne talože atomi radona jer su kemijski inertni i električki neutralni i ne mogu biti privučeni električnim poljem. Koncentracija aktivnosti radona se određuje iz koncentracije aktivnosti polonija. Faktori koji utječu na preciznost i točnost dobivenih rezultata pomoću detektora RAD7 su: tehnika uzorkovanja, koncentracija i volumen uzorka, vrijeme mjerenja, temperatura, relativna vlažnost i razina pozadinskog zračenja [9]. Po završenom ciklusu mjerenja dobiva se izvještaj srednje koncentracije aktivnosti radona i njene standardne devijacije za dani interval mjerenja, ukupan broj impulsa, zatim broj impulsa po energetskim prozorima i njihov postotni udio u ukupnom broju impulsa, kao i histogrami srednjih koncentracija po zadanim ciklusima te kumulativni alfa spektar. Također su prikazani mjerni parametri: temperatura i vlažnost unutar mjerne komore, datum i vrijeme završetka mjerenja te stanje napunjenosti baterije. Ukoliko mjerenje uzorka nije obavljeno u roku od par sati nakon uzorkovanja, dobiveni rezultat se korigira na raspad radona.

Gama spektrometrijska mjerenja (IRB) izvršena su na visoko rezolucijskim HPGe gama spektrometrima proizvođača Canberra. Korištena su dva planarna detektora (BEGe), te koaksijalni detektor (XTRA) relativnih efikasnosti redom 34 % , 48 % i 30 % te razlučivosti 1,9 keV, 2,0 keV i 1,7 keV na 1332 keV. Uzorci vode pažljivo su u potpunosti do vrha uliveni u 250 mililitarske Nalgene posude širokog grla načinjene od plastike visoke gustoće (HDPE). Svaka je boca odmah po ulijevanju uzorka začepljena originalnim čepom s navojem te dodatno oko čepa zalijepljena samoljepljivom izolir-trakom. Posuda s uzorkom postavljena je za mjerenje direktno na zaštitnu kapu detektora te su vršena brojenja duljine u rasponu od 5000 do 80000 sekundi. Na temelju prikupljenog spektra, aktivnost ^{222}Rn određena je iz vrha na 609 keV, energiji raspada radonovog potomka ^{214}Bi . Kalibracija efikasnosti korištenih detektora izrađena je matematički modeliranjem opisanog eksperimentalnog postava, korištenjem kalibracijskog softvera LabSOCS proizvođača Canberra.

REZULTATI I RASPRAVA

U Tablici 1 su prikazani rezultati provedene interkomparacije kao i jednostavna statistička analiza korištenjem z -vrijednosti. S obzirom da su analize rađene na prirodnom uzorku vode, točna (referentna) vrijednost nije poznata. Za potrebe ove interkomparacije, kao referentna vrijednost uzeta je srednja vrijednost svih izmjerenih rezultata. Tako je za uzorak "Školska česma" dobivena referentna vrijednost iznosila 435 ± 68 Bq/l, a za uzorak "Limanski park" $26,2 \pm 4,3$ Bq/l. Odstupanja u vidu z -vrijednosti računata su prema:

$$z = \frac{x - \bar{X}}{sd} \quad (5)$$

gdje su x izmjerene pojedinačne vrijednosti koncentracija aktivnosti radona u vodi, \bar{X} je srednja odnosno referentna vrijednost, a sd je standardna devijacija srednje vrijednosti.

Na osnovu izračunatih z -vrijednosti koje su sve bile manje ili jednake od $\pm 1,5$ može se zaključiti da se sve korištene metode mogu koristiti za mjerenje radona u vodi i da sve daju zadovoljavajuće rezultate.

Tablica 1. Rezultati interkomparacije različitih tehnika mjerenja koncentracije aktivnosti radona u vodi

Uzorak	DP-PMF UNS			
	LSC Quantulus OFO [Bq/l]	LSC Quantulus UGF [Bq/l]	LSC Quantulus UGAB [Bq/l]	RAD7 [Bq/l]
“Školska česma”	505 ± 10 $z = 1,03$	458 ± 6 $z = 0,34$	388 ± 5 $z = -0,69$	475 ± 25 $z = 0,59$
“Limanski park”	32,8 ± 1,1 $z = 1,5$	30,6 ± 0,9 $z = 1,02$	24,5 ± 0,6 $z = -0,39$	23,6 ± 2,5 $z = -0,60$
Uzorak	DP UNIOS		IRB	
	AlphaGUARD [Bq/l]	LSC TriCarb UGXR [Bq/l]	Gamma [Bq/l]	LSC TriCarb UGAB [Bq/l]
“Školska česma”	480 ± 43 $z = 0,66$	347,1 ± 2,7 $z = -1,29$	493 ± 67 $z = 0,85$	336 ± 2,0 $z = -1,46$
“Limanski park”	23,7 ± 4,6 $z = -0,58$	22,1 ± 0,9 $z = -0,95$	30,5 ± 4,5 $z = 1,00$	22,1 ± 0,7 $z = -0,95$

Uočeno je da su rezultati dobiveni tekućinskim scintilacijskim detektorima TriCarb 2900 i 3180 niži u odnosu na rezultate dobivene drugim metodama. Najvjerojatniji razlog je da su u oba slučaja korišteni monofazni scintilacijski kokteli (UGAB i UGXR) što bi se moglo potvrditi rezultatima dobivenim na Quantulusu, gdje su korišteni i dvofazni (OFO i UGF) i monofazni (UGAB) kokteli. Rezultat dobiven monofaznim koktelom je niži u odnosu na rezultate dobivene drugim metodama, dok su rezultati dobiveni korištenjem dvofaznih koktela njima sličniji. Naime, čini se da dvofazni kokteli bolje vežu radon pa je i efikasnost detekcije takvih uzoraka viša u odnosu na monofazne, a što će se dodatno istražiti.

ZAKLJUČAK

Rezultati provedene interkomparacije metoda mjerenja radona u vodi su unutar statistički prihvatljivih vrijednosti (z -vrijednosti unutar intervala $\pm 1,5$) što ukazuje da svi laboratoriji mogu izmjeriti koncentracije radona s prihvatljivom točnošću. To ujedno potvrđuje mogućnost korištenja različitih metoda u laboratoriju i/ili direktno na mjestu uzorkovanja, ovisno o opremljenosti laboratorija.

LITERATURA

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Report to the General Assembly with scientific annexes: Sources and Effects of Ionising Radiation. Volume I: Sources. UNSCEAR 2000. New York: United Nations, 2000.
- [2] Commission Recommendation of 20 December 2001 on the protection of the public against exposure to radon in drinking water supplies, 2001/928/Euratom, Official Journal L 344, 28/12/2001 P. 0085 - 0088
- [3] Council directive 2013/59/Euratom of laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. Official Journal of the European Union, 5 December 2013; L13: 1-73.
- [4] ISO 13164-1, Water quality – Radon-222 – Part 1: General principles, 2013.
- [5] 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 47: 443-450, 2012.
- [6] European Drinking Water Directive 98/83/EC. The minimum requirements on the quality of drinking water and water intended for human consumption.
- [7] AlphaGUARD PQ2000/MC50 Multiparameter Radon Monitor. Characterisation of its physical properties under normal climatic and severe environmental conditions, User manual, Genitron Instruments, Germany, 1998.
- [8] EPA 913.0 Determination of Radon in Drinking Water by Liquid Scintillation Counting, Radioanalysis Branch, Nuclear Radiation Assessment Division, Environmental Monitoring Systems Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada, May 1991.
- [9] RAD7 RAD H2O, Radon in water Accessory, Owner's manual, DurrIDGE Company, 2009

INTERCOMPARATION OF METHODS FOR RADON IN WATER DETERMINATION

*Marina Poje Sovilj¹, Jovana Nikolov², Ivana Coha³, Ana Pavlačić¹, Ivana Tucaković³,
Nataša Todorović², Vanja Radolić¹*

¹Department of Physics, University of Osijek, Osijek, Croatia

² Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia

³Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

marina.poje@fizika.unios.hr

In many countries drinking water is drawn from underground sources (wells, deep wells). Such water sources may contain higher concentrations of radon from surface water sources such as rivers, natural and artificial lakes. Radon and its short-lived daughters are recognized as a public health problem. Furthermore, EU Member States from February 6 2018, have the obligation to measure radon and make the risk assessments at workplaces and objects of special interest (schools, kindergartens, hospitals, etc.).

The aim of this paper is an intercomparison of three independent laboratories – one in Serbia and two in Croatia. Special attention is paid to the influence of proper water sampling, as this can be main source of measurement errors. Water is sampled in two different sources (Limanski Park, Novi Sad and Školska česma, Niška Banja, Serbia). Školska česma spring is known for very high radon concentration values that significantly exceed (more than 6 times) the reference value of 100 Bq/l.

Radon activity concentrations in water samples were determined using six devices and four different measurement methods (alpha spectrometry, gamma spectrometry, ionization chamber, liquid scintillation detectors) at three different laboratories, and the resulting measurements were compared using z -score values. The radon activity concentration in water samples was measured by gamma spectrometry (IRB) directly and indirectly by degassing the radon in the gaseous phase (AlphaGUARD ionisation chamber (DP-UNIOS) and alpha spectrometry with RAD7 (DP-PMF UNS) measuring device or in the liquid phase by mixing water samples with appropriate scintillation cocktails (Quantulus Liquid Scintillation Detectors (DP-PMF UNS) and TriCarb Liquid Scintillation Detectors (IRB, DP-UNIOS)).

Statistical analysis of the obtained measurement results was performed using the z -score values (a measure of the standard deviation of the single measurement result from the mean of all measurements) and all of the results were within the interval $z_i = \pm 1.5$. These results show that all three laboratories can determine radon activity concentration in water with satisfying precision. Such intercomparison measurements are very useful, moreover necessary and obligatory in terms of ensuring the quality of measurement in each laboratory.

INSTRUMENTACIJA I MJERNE TEHNIKE

INSTRUMENTATION AND MEASURING TECHNIQUES

RAZVOJ TERENSKIH METODA ZA NADZOR RADIOAKTIVNOSTI OKOLIŠA

Branko Petrinec, Marko Šoštarić, Dinko Babić, Mak Avdić
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
petrinec@imi.hr

UVOD

Nadzor radioaktivnosti okoliša u Republici Hrvatskoj do sada je proveden kroz sakupljanje uzoraka na terenu i mjerenja istih u laboratorijskim uvjetima. Ta metoda ima svoje prednosti ali i nedostatke. Prednosti se odnose na visoku preciznost mjerenja, a nedostaci se povezuju sa sporošću dobivanja rezultata, što uključuje i ograničenja u pravovremenoj reakciji na posebne radiološke okolnosti poput incidentne pojave povišene radioaktivnosti u okolišu. Terenska mjerenja su u pravilu manje precizna, ali ih odlikuje velika mobilnost i brzina dobivanja rezultata, što vodi do mogućnosti da se u vrlo kratkom roku dobije radiološka slika određenog područja na osnovi velikog broja mjerenja s različitih lokacija. U Republici Hrvatskoj su dosad terenska mjerenja uglavnom bila ograničena na mjerenja brzine prostornog (ambijentalnog) ekvivalenta doze, $H^*(10)/t$.

Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost je 2015. godine u sklopu IPA projekta pod nazivom "Nabava vozila s mobilnom opremom za detekciju zračenja u svrhu unapređenja sustava za (van)mrežno nadziranje radioaktivnosti u okolišu u Republici Hrvatskoj u uobičajenim i izvanrednim situacijama" proveo nabavu vozila opremljenog kao mobilni radiološki laboratorij s odgovarajućom opremom za terensku gamaspektrometriju. Sukladno projektu, vozilo je dano na korištenje Jedinici za zaštitu od zračenja Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada u Zagrebu.

Kako bi se potencijal nabavljene opreme mogao u potpunosti iskoristiti u izvanrednim situacijama, potrebno je razviti i standardizirati terenske metode za nadzor okolišne radioaktivnosti u Republici Hrvatskoj koje uključuju i terensku gamaspektrometriju. Nadalje, uporabom tih metoda potrebno je napraviti radiološku sliku prirodnog stanja okoliša u područjima Republike Hrvatske najbližim Nuklearnoj elektrani Krško u Sloveniji i Nuklearnoj elektrani Paks u Mađarskoj.

MATERIJALI I METODE

Terenska mjerenja uključivala su visokorezolucijska gamaspektrometrijska mjerenja uređajima ORTEC Detective-EX i Canberra HPGe "P"-TYPE.

Uzorci zraka uzorkovani su na mjestu mjerenja prijenosnom pumpom za uzorkovanje zraka RADECO H-810. Uzorkovano je na filterima od staklenih vlakana, promjera 4,7 cm.

Sakupljeni uzorci tla su u laboratoriju mjereni visokorezolucijskom gamaspektrometrijom koristeći GAMMA-X HPGe detektor ORTEC rezolucije 2,2 keV te relativne efikasnosti od 74 %, sve na 1,33 MeV ^{60}Co , povezan s elektroničkim sustavom i osobnim računalom. Kalibracija energije i efikasnosti gamaspektrometara učinjena je uz pomoć kalibracijskih izvora Češkog metrološkog instituta, koji pokrivaju energiju između 40 i 2000 keV [1].

Kalibracija terenskih gamaspektrometara provedena je pomoću točkastog izvora ^{152}Eu i programskog paketa InSiCal 0.91. Točkasti izvor postavljen je ispred detektora na udaljenost 1 m. Mjerenje je trajalo 17000 s. Iz dobivenih spektara, za svaki detektor zasebno, određen je broj detektiranih gama zraka koje imaju emisivnost veću od 5 %, tj. za kalibraciju su korištene gama zrake na energijama 121,78 keV, 244,70 keV, 344,28 keV, 778,90 keV, 1112,08 keV i 1408,01 keV. Dobiveni podaci su zajedno s fizičkim parametrima detektora, gustoćom tla i pretpostavkom o raspodjeli radionuklida u tlu uneseni u program InSiCal 0.91. Na temelju tih

podataka program računa krivulju efikasnosti detektora pomoću koje se određuje masena koncentracija ili površinska koncentracija aktivnosti radionuklida u tlu [2].

Na svim lokacijama na kojima su provedena uzorkovanja i terenska mjerenja izmjerene su geografske koordinate i nadmorske visine. Podaci su prikazani u Tablici 1.

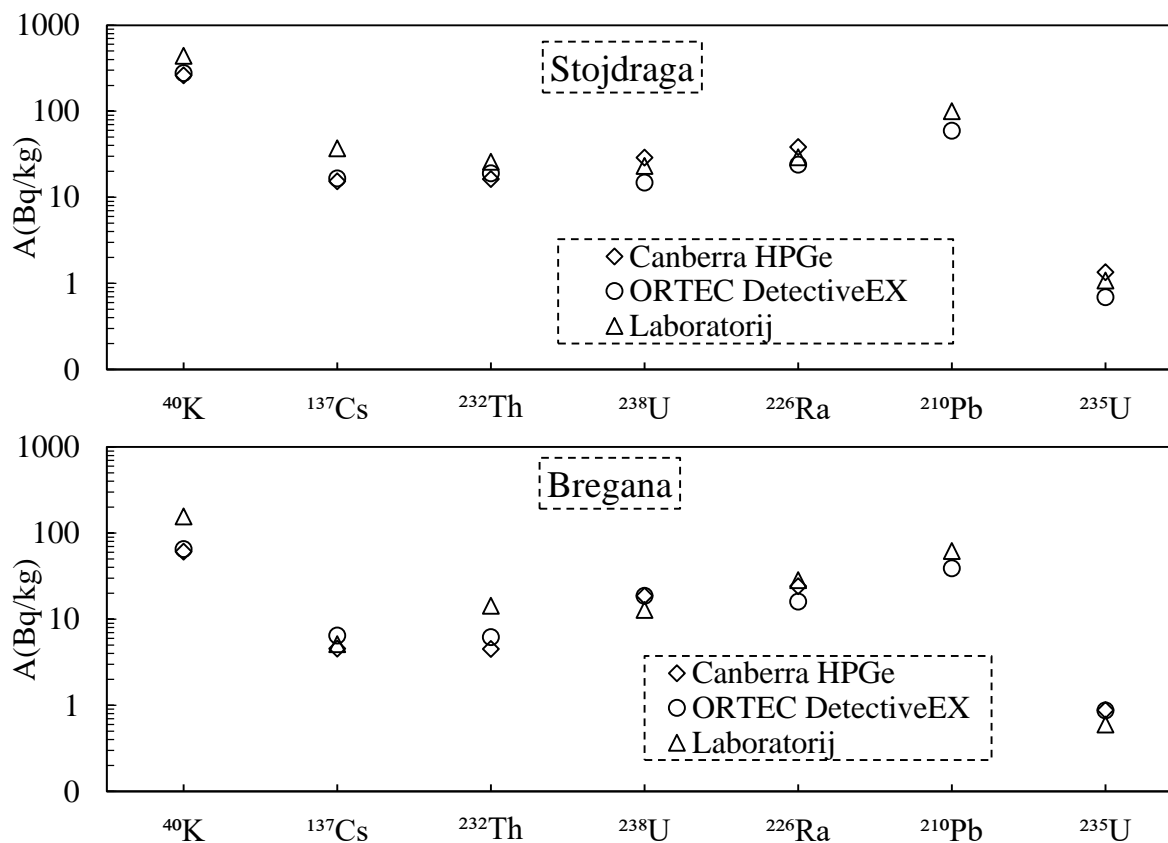
Tablica 1. Geografske koordinate i nadmorska visina lokacija mjerenja i uzorkovanja.

Lokacija	Nadmorska visina (m)	N	E
Stojdraga	296	45,819503	15,567078
Bregana	187	45,824941	15,634977
Klanjec	169	46,0455556	15,7311111
Plavić	202	46,1163889	15,6125000
Batina	80	45,840330	18,848300
Beli Manastir	102	45,753970	18,637250
Baranjsko Petrovo Selo	89	45,763180	18,462940
Zlatna Greda	79	45,721080	18,866520

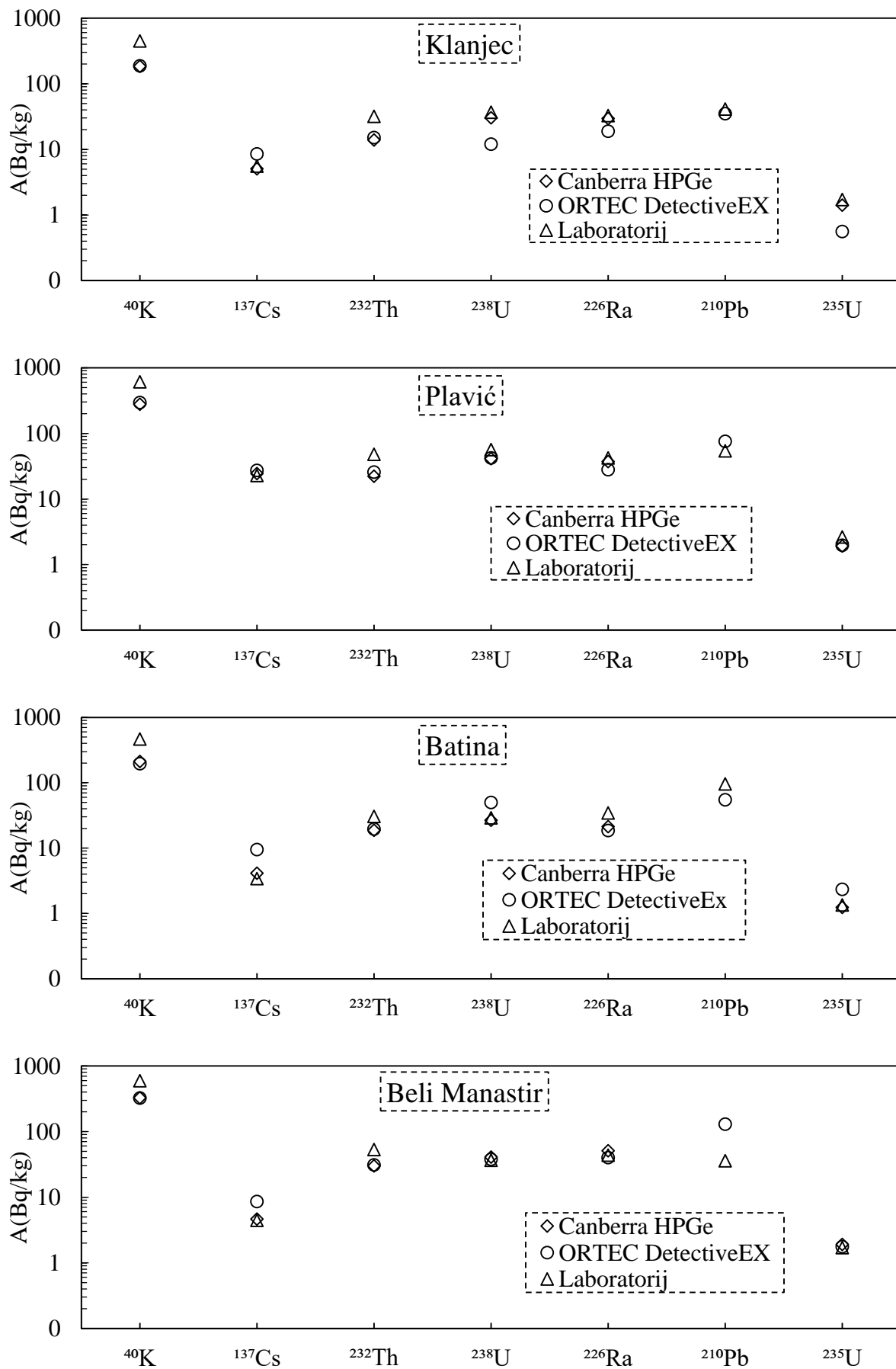
Oba korištena terenska gamaspektrometra postavljena su na stalke na visini 1 m iznad tla te spojena s pripadnom elektronikom i računalnim sustavom. Mjerenja su provedena u trajanju od 5000 s.

REZULTATI

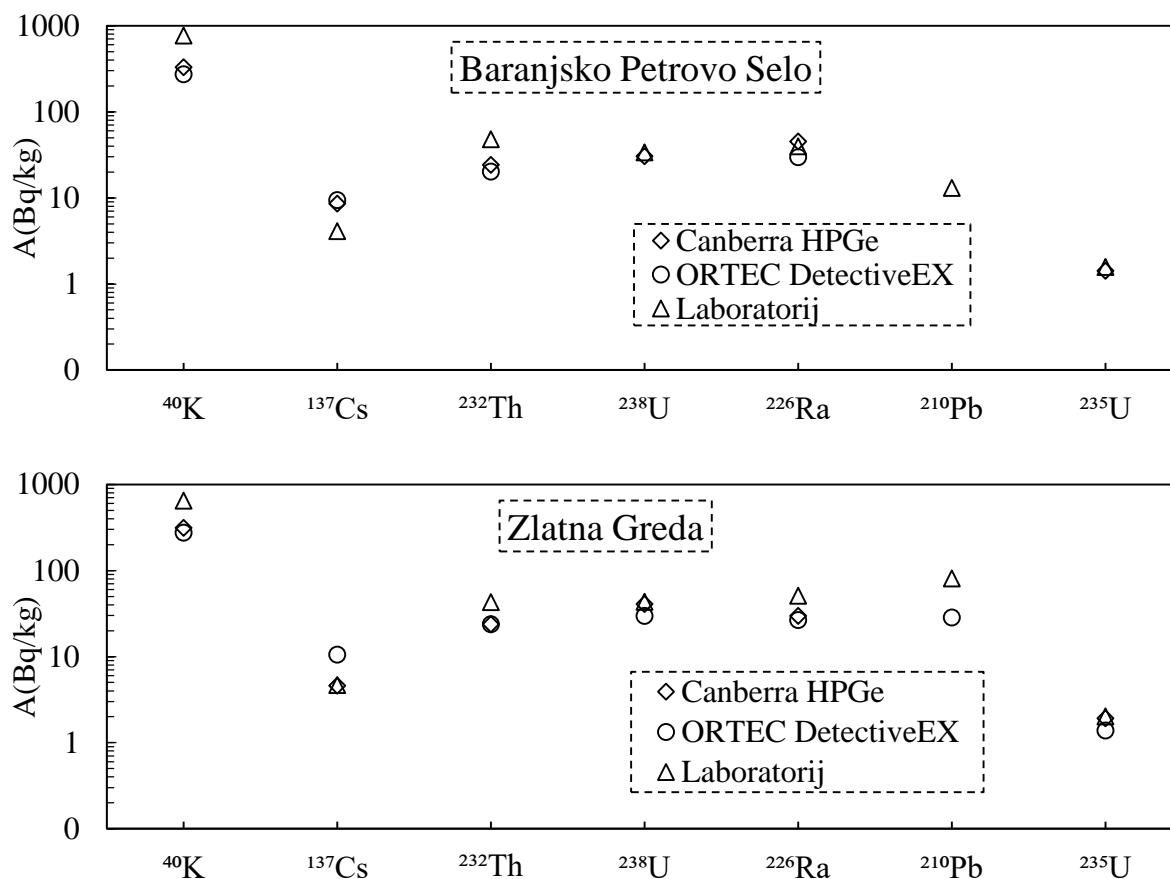
Rezultati za najvažnije prirodno pojavne (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{210}Pb , ^{235}U i ^{238}U) i antropogene (^{137}Cs) radionuklide prikazani su na Slici 1.



Slika 1. Usporedba dviju metoda mjerenja (terenska i laboratorijska).



Slika 1. (nastavak) Usporedba dviju metoda mjerenja (terenska i laboratorijska).



Slika 1. (nastavak) Usporedba dviju metoda mjerenja (terenska i laboratorijska).

Laboratorijska gamaspektrometrijska mjerenja koncentracije aktivnosti prikupljenih uzoraka tla provedena su na uzorcima mase približno 0,2 kg, te u trajanju od 80 000 s.

Laboratorijska gamaspektrometrijska mjerenja koncentracije aktivnosti sakupljenih uzoraka zraka provedena su na filterima kroz koje je propumpano 1 m³ zraka istovremeno s provođenjem gamaspektrometrijskih terenskih mjerenja. Koncentracija aktivnosti filtera mjerena je 250 000 s u laboratoriju. Za sve proučavane radionuklide je koncentracija aktivnosti bila ispod granice detekcije, tj. najveći doprinos koncentracijama aktivnosti (mjerenim terenskim gamaspektrometrom) dolazi od tla.

Na Slici 1 grafički su uspoređeni rezultati gamaspektrometrijskih mjerenja na terenu i u laboratoriju. Ta je usporedba moguća jer je ustanovljeno da se terenski rezultati odnose na radioaktivnost tla uz zanemariv doprinos zraka. Iz rezultata je vidljivo da terenski rezultati dobro prate one ostvarene u laboratoriju, i to za oba spektrometra i sve radionuklide, odnosno preko cijelog raspona energije. To je ohrabrujući rezultat koji upućuje na dobro polazište za daljnju optimizaciju terenskih mjerenja na osnovi stečenih iskustava.

ZAKLJUČAK

Korištenjem lokaliziranog radioaktivnog izvora te prikladnih eksperimentalnih i računskih metoda kalibrirali smo dva terenska gamaspektrometra. Time smo ostvarili važan preduvjet za kvantifikaciju koncentracije aktivnosti radionuklida u okolišu putem terenskih mjerenja.

Terenska mjerenja provedena su na po četiri lokacije u blizini granica Hrvatske sa Slovenijom i Mađarskom, gdje bi potencijalno moglo doći do radioaktivnog onečišćenja iz nuklearnih elektrana u Krškom i Paksu. Na istim lokacijama izmjerena je brzina ambijentalnog doznog ekvivalenta te su uzorkovani tlo i zrak. Sakupljeni uzorci podvrgnuti su gamaspektrometrijskim mjerenjima u laboratoriju. Usporedba tih rezultata s onima dobivenim

iz terenskih mjerenja ukazuje na zadovoljavajuće slaganje, što implicira dobru perspektivu terenske gamaspektrometrije kao nove metode za kvantifikaciju radioaktivnosti okoliša u Republici Hrvatskoj.

Identificirani su i neki praktični problemi koji će biti tema budućeg rada. Na primjer, treba optimizirati vrijeme mjerenja za svaki spektrometar kao i kalibraciju terenskih spektrometara korištenjem jačih radioaktivnih izvora i većeg broja radionuklida.

Ostvareni rezultati ukazuju da nema povišene radioaktivnosti na lokacijama mjerenja, pa stoga ni štetnog utjecaja nuklearnih elektrana u Krškom i Paksu.

LITERATURA

- [1] Petrinc B, Franić Z, Bituh T, Babić D. Quality assurance in gamma-ray spectrometry of seabed sediments. *Arh Hig Rada Toksikol* 2011;62(1):17-23.
- [2] Mauring A, Vidmar T, Gafvert T, Drefvelin J, Fazio A. InSiCal – A tool for calculating calibration factors and activity concentrations in in situ gamma spectrometry. *J Environ Radioact* 2018;188:58-66.

DEVELOPMENT OF *IN-SITU* METHODS FOR ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY MONITORING

Branko Petrinc, Marko Šoštarić, Dinko Babić, Mak Avdić

Institute for medical research and occupational health, Zagreb, Croatia

petrinc@imi.hr

Environmental radioactivity monitoring in the Republic of Croatia has been so far carried out by collecting samples on site and measuring them in laboratory. This method has both advantages and disadvantages. The advantages are related to a high measurement resolution, whereas the disadvantages originate in the slowness of obtaining results, which leads to a delayed response to the occurrence of an elevated radioactivity level in the environment. As a rule of thumb, the resolution of *in-situ* measurements is lower, but this method relies on high mobility and reduced measurement time. In this way, one can assess the radiological condition of a given area on the basis of a large number of measurements on different locations. Until now, *in-situ* radiological measurements in the Republic of Croatia were restricted to dose rate measurements.

In this work, we present a comparison of laboratory and *in-situ* gamma spectrometric measurements, and also discuss related practical problems. Since the contribution of airborne radionuclides is negligible in *in-situ* measurements, we compare results of our *in-situ* measurements with those from laboratory measurement on collected soil samples. Over the entire energy range and for all of the addressed radionuclides, results of the *in-situ* and laboratory measurements agree well for both of the used *in-situ* spectrometers. This is an encouraging result and a good starting point for a further optimisation of *in-situ* radiological measurements.

COMPARISON OF DIFFERENT MATHEMATICAL CALCULATIONS (LabSOCS, ANGLE and EFFTRAN) FOR HPGe EFFICIENCY CALCULATIONS

*Andrej Vraničar¹, Jovana Nikolov¹, Goran Stanić¹, Ivana Tucaković², Nataša Todorović¹,
Dušan Mrđa¹, Jan Hansman¹, Ivana Coha², Željko Grahek²*

¹University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia

²Ruđer Bošković Institute, Zagreb

andrej.vranicar@df.uns.ac.rs

INTRODUCTION

Possibly the biggest problem in quantitative gamma-ray spectroscopy is to determine the efficiency of detection for different source-detector geometries, energies and different composition of voluminous sources. Normally in gamma-spectrometry, measurements are done using the relative method, which dictates that, first, a calibrated sample is prepared that should correspond to the sample that is measured in all relevant characteristics, like its chemical composition, size, and density. This calibrated sample, commonly known as the standard, must contain known activities of distinct radio-nuclides that are present in the sample that is measured. The activities of certain radionuclides in the measured sample are thus obtained from known activities of the standard, the count rates and ratios in corresponding full energy peaks in spectra of the standard and measured sample. The mentioned method requires the possession of a set of standard samples of different matrices and radionuclide composition in order to obtain the efficiency of detection, which can be very costly and time consuming. Thus, an alternative way to compute these efficiencies is very sought-after, that is using a designated software for numerical or semi-empirical calculations. One of the most common approaches for this purpose is called the efficiency transfer method, which is utilised in all software codes used in this work. Efficiency transfer has been a popular method of calculating full-energy peak efficiencies of a sample of interest on the basis of an experimental efficiency curve measured on the same detector, but with a calibration source of different size, geometry, density or composition. The main aim of this work is to compare three commercially available software codes (LabSOCS, Angle and Efftran) in the frame of their precision, accuracy and limitations. This work is continuing research done in [1].

MATERIALS AND METHODS

EFFTRAN is a mathematical code which is written in Fortran 77 and runs on the Windows platform through a Microsoft Excel interface by using some of its Visual Basic for Applications (VBA) features [2]. One of the main drawbacks of EFFTRAN is that it is limited to cylindrical detectors and samples and axially symmetrical setups. It represents an implementation of the efficiency transfer method (ETM) for cylindrical samples in gamma-ray spectrometry, based on a Monte Carlo integration of the interaction probabilities of gamma rays throughout the detector and sample volumes. This approach makes it possible for the computer code to be relatively straightforward to write and the speed of the calculation to be adequate for routine on-line analysis of gamma-ray spectra.

The mechanism of this method is calculating the ratio of the efficiencies for the sample of interest and for the calibration sample and by multiplying it with the measured Full Energy Peak Efficiency (FEPE) of the latter [3]. Major advantage of the method, as pointed out and verified by its founders, is that in the calculated ratio many inaccuracies in the detector model can be expected to cancel out to a large degree, making it possible to work directly with non-optimized detector data supplied by the manufacturer. The cancellation of differences also

applies to the interaction cross-section data that different implementations of the ETM may use and to their physical models of particle interaction and tracking. The ETM, is carried out according to the equation:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{ref}} \frac{\eta}{\eta_{\text{ref}}} \quad (1)$$

Here, full-energy-peak efficiencies are designated by ε and virtual total efficiencies by η . Quantities without labels refer to the volume source we are interested in and those labeled “ref” to the calibration reference source geometry, usually a point source. The two virtual total efficiencies are computed by the code and the point source full energy-peak efficiency has to be measured. The result of the method is the required full-energy peak efficiency of the volume source. To be able to calculate these virtual efficiencies, a model of the detector must be constructed [4].

In order to get accurate results of gamma spectrometry measurements, it is of great importance that the efficiency of a detector gets precisely calculated for different energies, source geometries and matrices, either with the help of a source standard with known activities of radionuclides where there is no need for approximations or by using a designated software for numerical or semi-empirical calculations. Therefore, efficiency calibration is an intrinsic part of any measurement dealing with detectors with parameter-specific efficiencies.

After the spectra are measured, the reference efficiency calculation process can be approached. First, after measuring a well-defined source with known activity, we make a peak selection from which activity analysis is done for specific radionuclide. Then, efficiency can be derived from the following formula:

$$\varepsilon_{\text{ref}} = \frac{N}{t \cdot p_{\gamma} \cdot A} \quad (2)$$

In this formula, N stands for the total number of detected gamma photons, t is the collection time, p_{γ} is the probability of emission of a photon at a given energy, and A is the activity of a radionuclide with the decay correction. The coincidence summing factor is excluded. Reference efficiency curves (REC) can be calculated for reference material, for different detectors, sample geometries and matrices. Knowing that, detector, sample and standard specifications, EFFTRAN software can give us the desired efficiency values for our measured sample.

Measuring uncertainties for calculated activities are calculated according to:

$$u_A = \sqrt{(\delta N)^2 + (\delta \varepsilon)^2} \quad (3)$$

where δN is statistical uncertainty of the number of events and $\delta \varepsilon$ uncertainty of efficiency which is taken to be 5 % [1].

For the measurements we used HPGe detectors, whose characteristics along with their abbreviations are given in Table 1.

Characteristics of the used detectors and samples are described in reference [1].

RESULTS

Measurements of soil and vegetation samples typically have statistical uncertainties on the photopeak areas at the level of 10-15 %. Therefore, there is little gain in having the efficiency of the HPGe detector calibrated more precisely.

Combined results from the measurements from Novi Sad and Zagreb for vegetation and soil samples, as well as for Monocalcium Phosphate sample using Angle, Efftran and LabSOCS codes, respectively, are shown in Figures 1 and 2 and Tables 1 and 2.

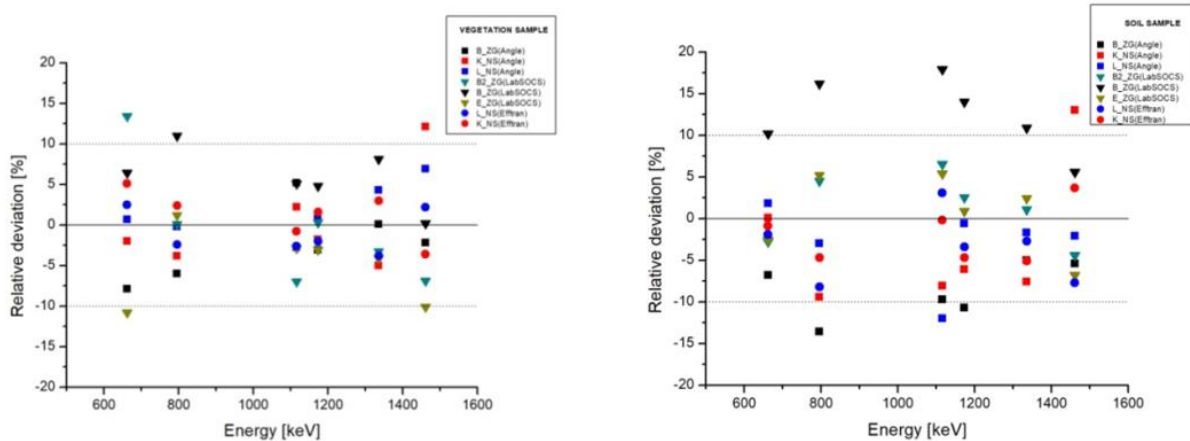


Figure 1. Dependence of relative deviation on radioisotopes (energies) and detectors listed in Table 2 for vegetation (left) and soil (right) samples. Same colour represents the same detector, and same shape of the point illustrates the same software.

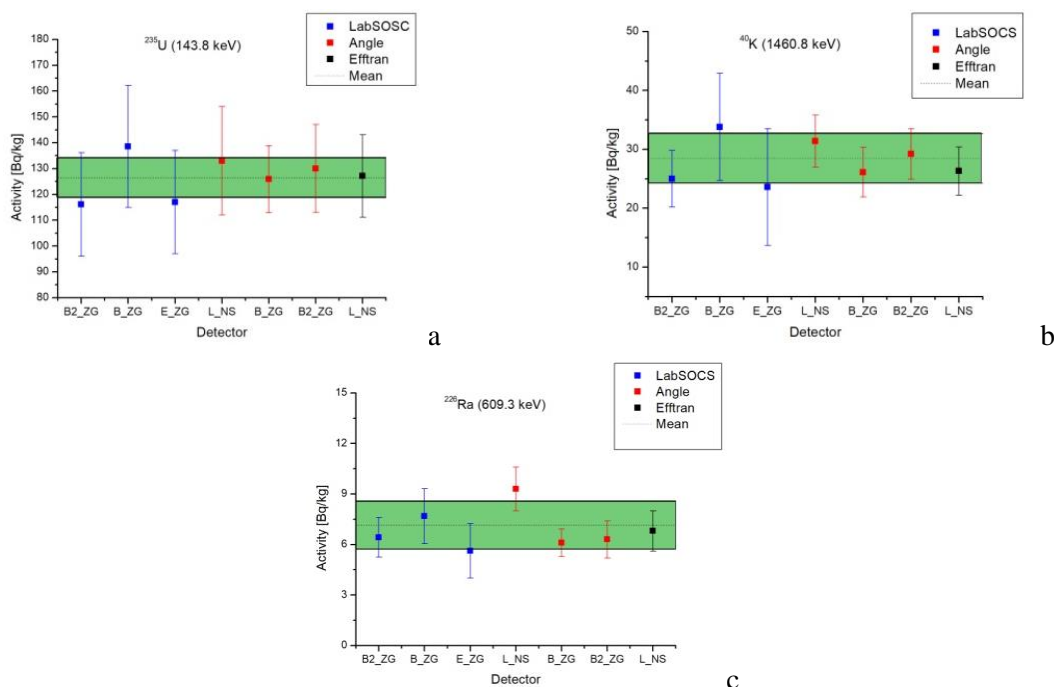


Figure 2. Activity concentration calculated by using the parameters given in Table 2, a) ^{235}U ; b) ^{226}Ra ; c) ^{40}K .

As seen in the Figure 1, both for soil and vegetation samples, an acceptable agreement between Angle, Efftran and LabSOCS software has been observed, most points are within 10 % deviation from average value, which indicates that detector and source parameters were well defined.

For Monocalcium Phosphate sample different approach in analysis was taken. The reference value for this sample is unknown therefore the analysis was done based in the average value from all measurements. In Figure 2, the dotted line represents the mean value from all detectors, and green area stands for standard deviation from that value, which is about 10 %. Because of nature of the sample, it had greater activities of ^{235}U than of ^{232}Th .

Table 1. Activity concentration for different radioisotopes in soil and vegetation samples.

A [Bq kg ⁻¹]						
SOIL						
Detector	¹³⁷ Cs (661.7 keV)	¹³⁴ Cs (795.8 keV)	⁶⁵ Zn (1115.5 keV)	⁶⁰ Co (1173.2 keV)	⁶⁰ Co (1332.5 keV)	⁴⁰ K (1460.8 keV)
B2_ZG(LS)	289 ± 35 z = -0.48	348 ± 42 z = 0.42	246 ± 20 z = 0.55	177 ± 14 z = 0.29	171 ± 14 z = 0.17	365 ± 32 z = -0.56
B_ZG(LS)	328 ± 39 z = 1.76	387 ± 47 z = 1.49	272 ± 22 z = 1.52	197 ± 16 z = 1.66	188 ± 15 z = 1.67	403 ± 35 z = 0.73
E_ZG (LS)	290 ± 35 z = -0.45	350 ± 42 z = 0.47	243 ± 20 z = 0.46	175 ± 14 z = 0.11	174 ± 14 z = 0.37	355 ± 31 z = -0.88
B_ZG (Angle)	270 ± 27 z = -1.18	288 ± 29 z = -1.25	208 ± 22 z = -0.82	155 ± 17 z = -1.27	161 ± 18 z = -0.77	361 ± 39 z = -0.70
K_NS(Angle)	301 ± 30 z = 0.03	302 ± 30 z = -0.86	212 ± 22 z = -0.69	163 ± 16 z = -0.73	156 ± 16 z = -1.17	431 ± 45 z = 1.68
L_NS (Angle)	306 ± 31 z = 0.32	323 ± 33 z = -0.28	203 ± 21 z = -1.02	172 ± 17 z = -0.07	166 ± 17 z = -0.27	373 ± 40 z = -0.27
L_NS(Efftran)	290 ± 29 z = -0.41	299 ± 31 z = -0.93	239 ± 23 z = 0.30	165 ± 16 z = -0.55	163 ± 17 z = -0.61	364 ± 42 z = -0.57
K_NS(Efftran)	293 ± 30 z = -0.25	310 ± 32 z = -0.62	231 ± 23 z = 0.03	163 ± 16 z = -0.71	159 ± 16 z = -0.97	395 ± 45 z = 0.46
VEGETATION						
B2_ZG(LabSOCS)	102.5 ± 10.1 z=1.49	62.4 ± 7.0 z = 0.02	26.9 ± 3.5 z = -1.41	48.5 ± 4.2 z = 0.73	46.5 ± 4.2 z = -0.63	(108±9.3) ·10 z = -0.82
B_ZG (LabSOCS)	96.2 ± 9.5 z=0.71	69.2 ± 7.8 z = 1.88	30.4 ± 3.2 z = 1.03	49.6 ± 4.8 z = 1.40	52.1 ± 4.8 z = 1.56	(117 ± 10) ·10 z = 0.02
E_ZG (LabSOCS)	80.6 ± 8.0 z=-1.20	61.6 ± 6.8 z = -0.20	28.1 ± 3.2 z = -0.59	45.9 ± 4.0 z = -0.98	46.2 ± 4.0 z = -0.78	(105 ± 9) ·10 z = -1.21
B_ZG (Angle)	83.3 ± 8.1 z=-0.88	58.6 ± 5.8 z = -1.02	30.4 ± 3.6 z = 1.05	45.9 ± 4.8 z = -0.98	48.2 ± 5.1 z = 0.01	(114 ± 11) ·10 z = -0.27
K_NS(Angle)	88.6 ± 8.4 z=-0.22	60.0 ± 6.3 z = -0.65	29.6 ± 3.7 z = 0.44	46.5 ± 5.0 z = -0.56	45.7 ± 5.0 z = -0.96	(130 ± 13) ·10 z = 1.45
L_NS (Angle)	91.1 ± 8.9 z=0.08	62.2 ± 6.7 z = -0.04	28.1 ± 4.1 z = -0.56	47.8 ± 5.3 z = 0.24	50.2 ± 5.6 z = 0.82	(124 ± 13) ·10 z = 0.82
K_NS(Efftran)	85.5 ± 8.4 z=0.24	63.8 ± 6.1 z = 0.39	28.6 ± 2.7 z = -0.26	48.1 ± 4.7 z = 0.49	49.5 ± 4.8 z = 0.54	(112 ± 11) ·10 z = -0.46
L_NS (Efftran)	92.3 ± 9.1 z=-0.60	60.8 ± 5.9 z = -0.43	28.0 ± 2.6 z = -0.62	46.4 ± 4.2 z = -0.66	46.2 ± 4.5 z = -0.76	(119 ± 14) ·10 z = 0.24

Table 2. Activity concentration for different radioisotopes in Monocalcium-phosphate.

Detector	A [Bq kg ⁻¹]		
	²³⁵ U (143.8 keV)	²²⁶ Ra (609.3 keV)	⁴⁰ K (1460.8 keV)
B2_ZG (LS)	116 ± 20 z = -1.18	6.4 ± 1.2 z = -0.35	25.0 ± 4.8 z = -0.81
B_ZG (LS)	136 ± 24 z = 1.31	7.7 ± 1.6 z = 0.57	33.8 ± 9.1 z = 1.41
E_ZG (LS)	117 ± 20 z = -1.12	5.6 ± 1.6 z = -0.94	23.6 ± 9.9 z = -1.16
L_NS(Angle)	133 ± 21 z = 0.70	9.3 ± 1.3 z = 1.73	31.4 ± 4.4 z = 0.81
B_ZG (Angle)	126 ± 13 z = -0.08	6.1 ± 1.1 z = -0.59	26.1 ± 4.2 z = -0.53
B2_ZG(Angle)	130 ± 17 z = 0.37	6.3 ± 0.8 z = -0.44	29.2 ± 4.3 z = 0.25
L_NS(Efftran)	127 ± 16 z = 0.10	6.8 ± 1.2 z = -0.24	26.3 ± 4.1 z = -0.57

CONCLUSION

The main conclusion of this study is that Efftran calculation code can be successfully applied in everyday gamma spectrometry measurements as it gave comparable results to the other two used software (Angle and LabSOCS). The parameter needed for this job are usually taken from the manufacturer's data sheet, which gives rise to a big drawback of this programme – the need for detailed description of the detector, which is not available in every case. For the calculations to be done properly, detector geometry, source geometry, source-detector positioning as well as source composition must be very well defined. From the other side, in order to get more reliable results some additional effects (coincidence counting, self-attenuation in sample, etc.) have to be included which will be done in future studies.

Acknowledgement

The authors acknowledge the financial support of the Ministry of Education, Science and Technological Development of Republic of Serbia, within the projects No. 171002 and No. 4300 and the Provincial Secretariat for higher education and scientific research within the project No. 142-451-2793/2018.

REFERENCES

- [1] Stanic G et al. Angle vs. LabSOCS for HPGe efficiency calibration. Nucl Instrum Methods Phys Res A 2019;920:81-87.
- [2] Vidmar T. EFFTRAN-A Monte Carlo efficiency transfer code for gamma-ray spectrometry. Nucl Instrum Methods Phys Res A 2005;550:603-608.
- [3] Vidmar T et al. Testing efficiency transfer codes for equivalence. Appl Radiat Isot 2010;68:355.359.
- [4] Nikolic J et al. Calculation of HPG Efficiency for environmental samples: comparison of EFFTRAN and GEANT4. Nucl Instrum Methods Phys Res A 2014;763:347-353.

COMPARISON OF DIFFERENT MATHEMATICAL CALCULATIONS (LabSOCS, ANGLE and EFFTRAN) FOR HPGe EFFICIENCY CALCULATIONS

*Andrej Vraničar¹, Jovana Nikolov¹, Goran Stanić¹, Ivana Tucaković², Nataša Todorović¹,
Dušan Mrđa¹, Jan Hansman¹, Ivana Coha², Željko Grahek²*

¹University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia

²Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

andrej.vranicar@df.uns.ac.rs

In order to perform radioactivity measurements with adequate accuracy, the main task of every gamma spectrometry laboratory is to determine detection efficiency as precise as possible. This can be done by using the standard calibration materials with known activities or in a mathematical way by detector and sample setup modelling. Classical, experimental way of efficiency determination requires that laboratory have different reference materials in different geometries and this could be really expensive. From the other side, numerous of software has been developed.

The main aim of this work is to test Efftran software in comparison to other two commercially available software (LabSOCS and Angle) in the frame of its precision, accuracy and limitations. The same set of samples were measured in two laboratories (in Novi Sad, Serbia and Zagreb, Croatia), on different HPGe detectors and analysed by different software codes. The obtained results with all three software calculations were compared and confronted with the referenced values in order to check the accuracy and precision of the methods used. All three used calculations have its advantages and disadvantages.

The main conclusion of this study is that Efftran calculation code can be successfully applied in everyday gamma spectrometry measurements as it gave comparable results to the other two used software (Angle and LabSOCS). The parameters needed for precise definition of detector's characteristics are usually taken from the manufacturer's data sheet, which gives rise to a big drawback of this programme - the need for detailed description of the detector, which isn't available in every case. The similar conclusions were made also in using other two software codes in previous research. For the calculations to be done properly, detector geometry, source geometry, source-detector positioning as well as source composition must be very well defined. From the other side, in order to get more reliable results some additional effects (coincidence counting, self-attenuation in sample, etc.) have to be included which will be done in future studies.

MATEMATIČKA KALIBRACIJA EFIKASNOSTI NEKARAKTERIZIRANIH DETEKTORA KORIŠTENJEM PROGRAMSKOG PAKETA LabSOCS

Ivana Tucaković, Željko Grahek, Delko Barišić
Institut Ruđer Bošković, Zagreb
ivana.tucakovic@irb.hr

UVOD

Gama spektrometrija visoke razlučivosti je nuklearna analitička tehnika koja se koristi za određivanje radionuklida u najrazličitijim vrstama uzoraka, od konzumnih namirnica i okolišnih uzoraka, do otpada nuklearnih elektrana. Za točno kvantitativno određivanje ova tehnika zahtijeva visoku točnost pri određivanju efikasnosti eksperimentalnog postava koja, između ostalog, ovisi i o vrsti i sastavu materijala te o geometriji uzorka kojeg treba analizirati. Uobičajeno se za kalibraciju efikasnosti koriste standardi s nuklidima poznate aktivnosti, koji su svojim sastavom i geometrijom najsljedniji mjerenom uzorku. Osim toga, postoji i mogućnost matematičkog određivanja efikasnosti, modeliranjem zadane geometrije uporabom općih, specijaliziranih i/li komercijalnih softvera za modeliranje ili transfer efikasnosti.

U Laboratoriju za radioekologiju (LRE) Instituta Ruđer Bošković za gama spektrometrijska određivanja radionuklida u najrazličitijim vrstama uzoraka koristimo germanijske detektore visoke čistoće (HPGe) tvrtke Canberra koja je razvila i *Laboratory SOurceless Calibration Software* (LabSOCS), alat za određivanje efikasnosti bez izvora. Matematičke kalibracije efikasnosti korištenjem LabSOCS-a mogu znatno olakšati ukupnu proceduru analize, budući da je za standardne kalibracije često teško doći do zadovoljavajućeg standardnog materijala koji bi odgovarao ponekad vrlo specifičnoj vrsti uzorka kojeg treba analizirati. Međutim, za kalibraciju LabSOCS-om, potrebno je da je detektor karakteriziran od strane proizvođača. Točnost i preciznost matematičkih kalibracija za mjerenja na karakteriziranim detektorima u LRE prethodno je provjeravana za standardne i specifične vrste uzoraka, uspoređivana sa standardnim kalibracijama, te s kalibracijama korištenjem drugih softvera [1-3].

Svrha ovog rada je utvrditi mogućnost i pouzdanost provedbe matematičke kalibracije efikasnosti mjernih postava na starijim, nekarakteriziranim detektorima. Ispitivana je točnost i preciznost rezultata dobivenih kalibracijama uz korištenje u softveru predefiniраниh karakterizacija tipičnih detektora s obzirom na veličinu germanijskog kristala, te mogućnost internih unosa karakteristika korištenih nekarakteriziranih detektora.

MATERIJALI I METODE

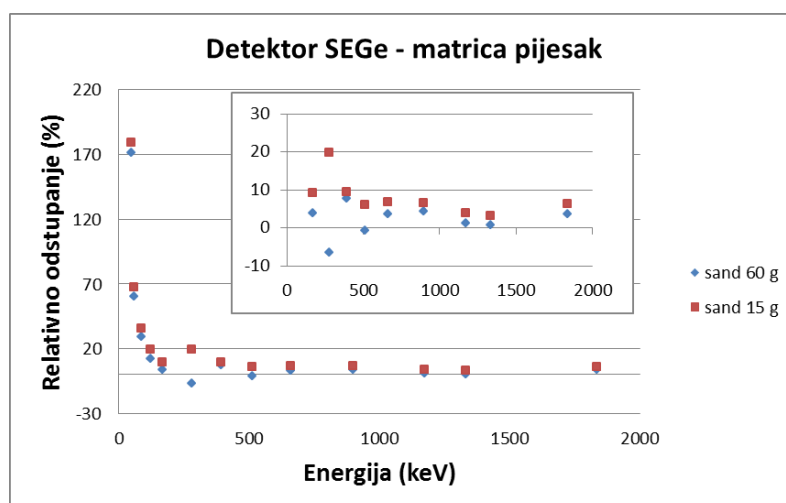
Pouzdanost i točnost matematičkih kalibracija korištenjem programskog paketa LabSOCS za starije i nekarakterizirane detektore provjeravane su analizom mjerenja vršenih na dva HPGe detektora – standardnom koaksijalnom (SEGe) relativne efikasnosti 25,4 % i razlučivosti od 1,76 keV na 1332 keV-a, te na reverznom koaksijalnom (REGe) relativne efikasnosti od 28,3 % i razlučivosti od 1,81 keV na 1332 keV-a. Mjereni su uzorci pripremljeni od standardnog materijala matrice pijeska s mješavinom radionuklida sa širokim rasponom energija gama zračenja (Eckert & Ziegler Isotope Products, SAD), te interkomparacijski uzorci matrica vode, tla i vegetacije (shema MRAD-29). Za provjeru matematičkih kalibracija različitih geometrija, standardni uzorci matrice pijeska pripremljeni su postavljanjem različitih odvaga materijala u plastične cilindrične mjerne posude poznate geometrije. Interkomparacijski uzorci tla i vegetacije pripremljeni su potpunim punjenjem

istih cilindričnih mjernih posuda, dok su uzorci vode pripremljeni ulijevanjem 125 ml uzorka u 250 mililitarske Nalgene posude načinjene od plastike visoke gustoće (HDPE). Mjerenja su vršena u rasponu trajanja od 80 000 do 200 000 sekundi. Prikupljeni spektri analizirani su korištenjem programa Genie 2000, a matematička kalibracija efikasnosti određena je korištenjem paketa LabSOCS. Opis metode matematičke kalibracije, validacija njezine točnosti, kao i studije nesigurnosti mjernih rezultata zbog nesigurnosti u sastavu mjerene matrice, gustoće i geometrije uzorka za tipične okolišne uzorke (voda, tlo vegetacija), mogu se naći u literaturi [4-6].

Geometrija detektora za modeliranje mjernog postava u LabSOCS-u u pravilu se unosi korištenjem datoteke s navedenim unutarnjim parametrima detektora načinjena detaljnom karakterizacijom od strane proizvođača. Osim toga, u softver LabSOCS prethodno su uneseni parametri za nekoliko tipičnih modela koaksijalnih i planarnih detektora. Detektori korišteni u ovoj studiji nisu karakterizirani budući da karakterizacija starijih detektora u nekim slučajevima nije moguća ili pak nije isplativa. Osim glavnih karakteristika, kao što je promjer i duljina germanijskog kristala, ostali detaljni podaci unutarnjih karakteristika ovih detektora nisu dostupni. Zato su za geometriju korištenih detektora odabrani u LabSOCS već uneseni parametri za tipične koaksijalne detektore prema veličini kristala najbližiji korištenim detektorima, te je korigiran samo promjer i duljina kristala, poznati iz specifikacije detektora. Budući da među predefiniranim detektorima nema parametara za reverzibilni tip, i u slučaju njegovog korištenja odabrana je parametrizacija za standardni koaksijalni detektor. Geometrija mjerne posude, apsorberi te materijal i količina uzorka modelirani su korištenjem alata *Geometry Composer*.

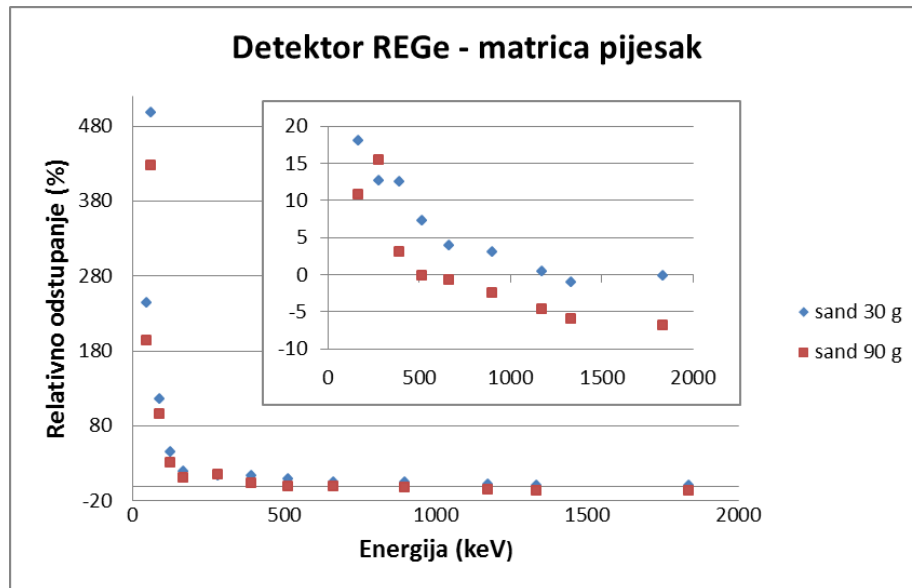
REZULTATI I RASPRAVA

Na Slici 1 prikazana su relativna odstupanja dobivenih vrijednosti koncentracija aktivnosti u odnosu na referentne vrijednosti dane od proizvođača standarda matrice pijeska, za dvije geometrije uzorka – 15 g i 60 g, za mjerenja izvršena na standardnom koaksijalnom detektoru (SEGe). Budući da rezultati pokazuju izrazita odstupanja na niskim energijama (<200 keV), na slici je istaknut uvećani prikaz relativnog odstupanja rezultata bez nižih energija. Za nuklide koje emitiraju gama zrake energija viših od 200 keV dobivena su vrlo dobra slaganja s referentnim vrijednostima, posebno u slučaju geometrije veće količine uzorka (60 g prikazano plavom bojom) gdje su odstupanja za sve vrijednosti unutar raspona od $\pm 10\%$.



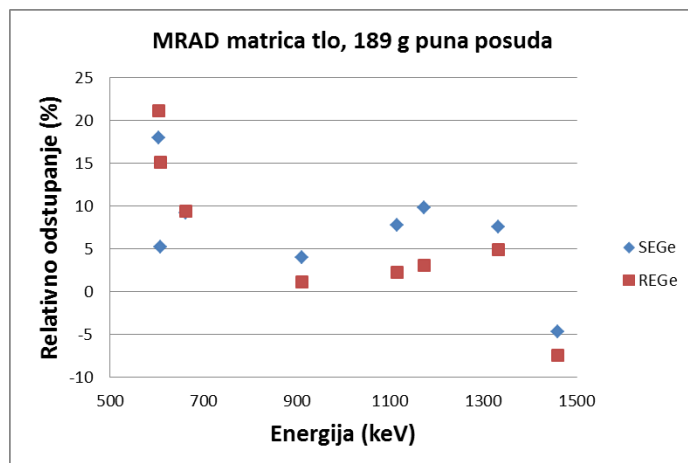
Slika 1. Relativno odstupanje (%) dobivenih vrijednosti koncentracija aktivnosti u odnosu na referentne vrijednosti za matricu pijeska, geometrije 15 g (crveno) i 60 g (plavo), mjerenja izvršena na standardnom koaksijalno detektoru (SEGe), po energijama.

Slični se rezultati dobivaju analizom mjerenja uzoraka pijeska (geometrije 30 g i 90 g) na reverznom koaksijalnom detektoru (REGe), što je na isti način kao prethodno prikazano na Slici 2. Ekstremna odstupanja na energijama nižim od 200 keV-a u ovom su slučaju još izraženija, čime se potvrđuje da se za ove energije matematička kalibracija nekarakteriziranih detektora LabSOCS-om ne može koristiti. Međutim, za energije iznad 200 keV-a, i u ovom se slučaju dobivaju vrlo dobra slaganja, posebice u slučaju veće količine uzorka (90 g uzorka, prikazano crveno). Ovakav se ishod mogao i očekivati s obzirom na to da s povećanjem količine uzorka poznate matrice u posudi poznate geometrije dolazi do povećanja utjecaja geometrije uzorka na ukupnu efikasnost u odnosu na geometriju detektora, posebice s povećanjem energije.

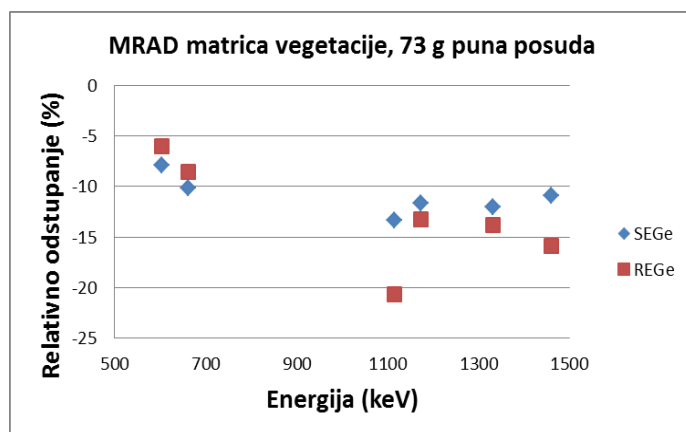


Slika 2. Relativna odstupanja (%) dobivenih vrijednosti koncentracija aktivnosti u odnosu na referentne vrijednosti za matricu pijeska, geometrije 90 g (crveno) i 30 g (plavo), mjerena izvršena na reverznom koaksijalnom detektoru (REGe), po energijama.

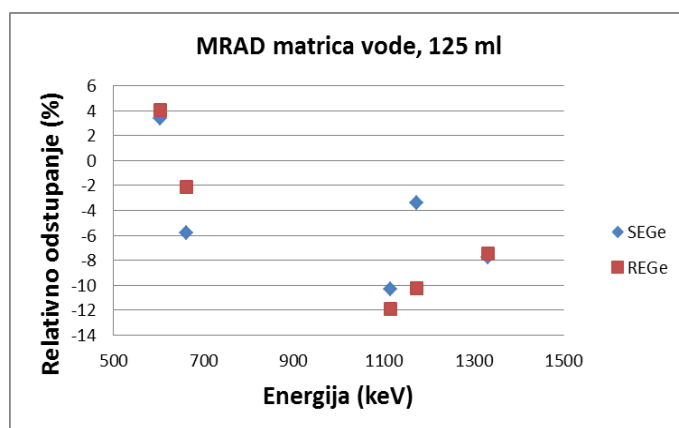
Analize mjerenja matrice tla, vegetacije i vode iz sheme interkomparacije MRAD na oba detektora pokazala su slične rezultate. Izrazita odstupanja na niskim energijama još su veća za reverzibilni detektor i prelaze znatno više od 100 %, za razliku od standardnog koaksijalnog detektora gdje to nije slučaj. Ova razlika ne čudi s obzirom na to da su dimenzije kristala slične zbog čega je odabrana ista parametrizacija za oba detektora, koja se zasigurno više slaže sa stvarnim parametrima SEGe detektora u odnosu na REGe. Naime, za razliku od SEGe detektora, zbog svoje izvedbe REGe detektor ima tanak prozor otvora kućišta prema detektoru, što u parametrizaciji nije uzeto u obzir. Očekuje se da taj parametar uvelike utječe na rezultate, posebice na niskim energijama. Zato su na Slikama 3 - 5 u nastavku prikazana relativna odstupanja rezultata samo na višim energijama, za mjerenja izvršena na oba detektora redom za matrice tla, vegetacije i vode. Uočava se da su odstupanja rezultata većinom zadovoljavajuća, unutar raspona od $\pm 15\%$. Također, vidi se da su za matrice veće gustoće (tlo) dobivene manja odstupanja, te da su vrijednosti uglavnom veće (precijenjene) za razliku od matrica manje gustoće (voda, vegetacije) gdje su gotovo svi rezultati niži, tj. podcijenjeni u odnosu na referentne vrijednosti. Kao i u slučaju usporedbe rezultata s obzirom na količinu uzorka (Slike 1 i 2), i u ovom se slučaju može pretpostaviti da je razlog većeg odstupanja za uzorke matrice manje gustoće taj što u ukupnom doprinosu efikasnosti veću ulogu imaju karakteristike detektora od karakteristika uzorka i mjerne posude.



Slika 3. Relativna odstupanja (%) dobivenih vrijednosti koncentracija aktivnosti u odnosu na referentne vrijednosti za matricu tla, geometrije 189 g, puna cilindrična posuda, mjerenja izvršena na standardnom koaksijalnom detektoru (SEGe, plavo) i reverznom koaksijalnom detektoru (REGe, crveno).



Slika 4. Relativna odstupanja (%) dobivenih vrijednosti koncentracija aktivnosti u odnosu na referentne vrijednosti za matricu vegetacije, geometrije 73 g, puna cilindrična posuda, mjerenja izvršena na standardnom koaksijalnom detektoru (SEGe, plavo) i reverznom koaksijalnom detektoru (REGe, crveno).



Slika 5. Relativna odstupanja (%) dobivenih vrijednosti koncentracija aktivnosti u odnosu na referentne vrijednosti za matricu vode, geometrije 125 ml u Nalgene boci (HDPE, 250 mL), mjerenja izvršena na standardnom koaksijalnom detektoru (SEGe, plavo) i reverznom koaksijalnom detektoru (REGe, crveno).

ZAKLJUČAK

Ovo istraživanje pokazalo je da su matematičke kalibracije korištenjem softvera LabSOCS za nekarakterizirane detektore odabirom predefiniраниh parametara detektora zadovoljavajuće pouzdane za energije iznad 200 keV, dok su odstupanja rezultata ispod te energije prevelika.

Odstupanja se, kao što se i očekuje, smanjuju s povećanjem energije detektirane gama zrake. Za energije iznad 200 keV-a za korištene detektore i matrice uglavnom su dobivena odstupanja rezultata manja od 15 %.

Dobiveni rezultati pokazuju da se odstupanja smanjuju s povećanjem količine i gustoće uzorka. Može se pretpostaviti da je razlog tome taj što tada doprinos smanjenju efikasnosti zbog geometrije uzorka prevladava u odnosu na geometriju detektora, a pri čemu k tome geometriju uzorka i mjerne posude poznamo, pa ju možemo i točnije modelirati.

LITERATURA

- [1] Stanić G et al. Angle vs. LabSOCS for HPGe efficiency calibration. Nucl Instrum Methods Phys Res A 2019;920:81-97.
- [2] Tucaković I, Grahek Ž, Barišić D. Application of mathematical calibrations in measurements of gamma emitting radionuclides in honey samples and borosilicate filters, Appl Radiat Isotop 2017;126:162-164.
- [3] Tucaković I, Coha I, Karanović G. Praktična primjena matematičke kalibracije u gama spektrometriji. U: Radolić V, Poje Sovilj M, Krajcar Bronić I, ur. Zbornik radova Jedanaestog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja s međunarodnim sudjelovanjem; 5.-7. travnja 2017.; Osijek, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2017; 188-193.
- [4] Bronson FL. Validation of the accuracy of the LabSOCS software for mathematical efficiency calibration of Ge detectors for typical laboratory samples. J Radioanal Nucl Chem 2003;255(1):137-141.
- [5] Venkataraman R, Bronson F, Atrashkevich V, Field M, Young BM. Improved detector response characterization method in ISOCS and LabSOCS. J Radioanal Nucl Chem 2005;264(1):213-219.
- [6] Kaminski S, Jakobi A, Wilhelm C. Uncertainty of gamma-ray spectrometry measurement of environmental samples due to uncertainties in matrix composition, density and sample geometry. Appl Radiat Isotop 2014;94:306-313.

MATHEMATICAL EFFICIENCY CALIBRATION OF THE NON-CHARACTERIZED DETECTORS BY LabSOCS SOFTWARE

Ivana Tucaković, Željko Grahek, Delko Barišić
Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
ivana.tucakovic@irb.hr

In the Laboratory for Radioecology (LRE) of the Ruđer Bošković Institute for gamma spectrometric radionuclide determination in the most diverse types of samples, we use the high-purity germanium detectors (HPGe) produced by Canberra, which has also developed a Laboratory SOURCEless Calibration Software (LabSOCS), a tool for determining the efficiency without a standard material source. Mathematical calibration of the efficiency using LabSOCS can greatly facilitate the overall analysis procedure, since for standard calibrations it is often difficult to obtain a satisfactory standard material that would fit sometimes a very specific type of sample to be analysed. However, for calibration with LabSOCS, the detector must be characterized by the manufacturer. Accuracy and precision of mathematical calibrations for measurements on characterized detectors in LRE was previously checked for standard and specific types of samples, and also compared to standard calibrations and calibrations using other software.

The purpose of this paper is to test the possibility and reliability of the mathematical efficiency calibration on older, non-characterized detectors. The results are obtained by mathematical calibrations using the predefined parameters of typical detectors in the software with regard to the size of the germanium crystal. Standard and reverse coaxial detectors were used for the measurements of the standard sand material and intercomparison samples of soil, vegetation and water matrices. Parameters of the standard coaxial detector for the crystal dimensions closest to the detectors used, were selected for the detector modelling to determine the efficiency.

The results show that the mathematical calibrations by using LabSOCS software for non-characterized detectors by selecting predefined detector parameters are satisfyingly reliable for energies above 200 keV, while the deviations of the result below that energy are too large.

The deviations of the results, as expected, are reduced by increasing the energy of the detected gamma ray. For energies above 200 keV for the detectors and matrices used, deviations of the results are generally less than 15 %.

The results obtained also show that deviations are reduced by increasing the amount and the density of the sample. It can be assumed that the reason for that is that the contribution to the reduction of efficiency due to sample geometry prevails over the one of the geometry of the detector. In the same time, since we know the geometry of the sample and measuring vessels well, we can model it more accurately.

REMOVAL/PRECONCENTRATION OF Cs AND Pb IONS BY NATURAL CLINOPTILOLITE AND SYNTHETIC ZEOLITE 4A

Ivana Smičiklas¹, Marijana Nodilo², Ivana Coha², Mihajlo Jović¹, Marija Šljivić-Ivanović¹, Ivana Tucaković², Željko Grahek²

¹Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

²Ruder Bošković Institute, Zagreb, Croatia

ivana.coha@irb.hr

INTRODUCTION

Separation of radionuclides from aqueous media by ion-exchange/sorption using solid materials with high capacity and/or selectivity is a well-established method used for decontamination and analytical purposes. Depending on the specific needs, natural and other economical materials, as well as highly selective synthetic products are in use [1]. Among minerals, zeolites are most widely explored and used as ion-exchange agents for the removal of radionuclides present in the liquid effluents of low and intermediate activity level [2]. This large group of hydrated aluminum silicates is characterized by the three-dimensional structure with cage-like cavities and permanent negative surface charge, particularly beneficial for the separation of cationic radioisotopes such as Cs⁺, Sr²⁺, Co²⁺ [3,4]. While utilization of natural zeolites gains economic benefits, advantages of zeolites obtained by synthetic routes are reflected in their tunable composition and structure. Zeolite properties that affect the removal capacity and the selectivity toward a specific radionuclide are chemical and mineralogical composition, the presence of impurities, specific surface area, surface charge, porosity and the cation exchange capacity [5,6]. Therefore, samples from various natural deposits and the products obtained by synthetic methods, having different physicochemical properties, need to be verified in terms of radionuclide removal potential.

In this study, the capacities of natural clinoptilolite from Zalau deposit and commercial synthetic product of Zvornik Alumina Refinery - Zeolite 4A, were preliminary studied in terms of Cs and Pb separation, in order to evaluate their applicability in decontamination activities and in analytics.

MATERIALS AND METHODS

Two zeolite samples of different origin and physicochemical properties were compared as Cs and Pb removal matrices in equilibrium batch conditions. Natural zeolite (denoted ZZ) was supplied from the Zalau area (Romania), whereas synthetic zeolite (denoted Z4A) was a commercial product from the Zvornik Alumina Refinery (Bosnia and Herzegovina). Both materials were used as is. Solutions of Cs and Pb in a broad range of concentrations were prepared from the nitrate salts of metals and deionized water. The sorbents were mixed with solutions containing dissolved Cs or Pb ions (0.1 g/20 mL) and shaken for 24 h using the overhead laboratory shaker at 120 rpm, in order to assure the equilibrium conditions. Following phase separation by centrifugation at 9000 rpm for 10 minutes (Heraeus Megafuge 16, Thermo Scientific), the residual metal concentrations were determined by Atomic Absorption Spectrometer (AAS) Perkin Elmer 3100. The recoveries of ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb from the samples of tap water from Zagreb and seawater (modelled and real) was additionally investigated using Z4A and radioactive standards provided by Czech Metrological Institute (Czech Republic).

RESULTS

The experimental data on Cs and Pb separation are presented in terms of process efficiency (Figure 1). With the increase in the initial metal concentrations, the percentage of cation removal decreased. The efficiency of the two zeolites was commonly higher in Pb solutions. The removal percentages declined from virtually 100 % to 99.5 % using Z4A and to 50.6 % using ZZ. Furthermore, depending on the initial concentration, Cs removal by ZZ ranged from 95.7 % to 32.3 %, while 97.2-59.2 % removal was achieved by Z4A.

Different affinity and removal capacity of the zeolite samples was also indicated by the forms of the sorption isotherms, representing the distribution of elements between the solid and the liquid phase at equilibrium (Figure 2). The amounts of cations sorbed per 1g of zeolite samples generally increased with the increase in their initial concentration, while the pronounced saturation was observed only in ZZ-Pb system (Figure 2b).

The experimental results were fitted by most widely applied isotherm models, Langmuir and Freundlich (Table 1). The sorption parameters (Q_{max} - maximum sorption capacity, K_L - Langmuir constant, K and $1/n$ - Freundlich constants related to sorption capacity and affinity) are listed in Table 1. According to the calculated parameters, Z4A exhibited both higher affinity and higher capacity for investigated cations, in respect to ZZ.

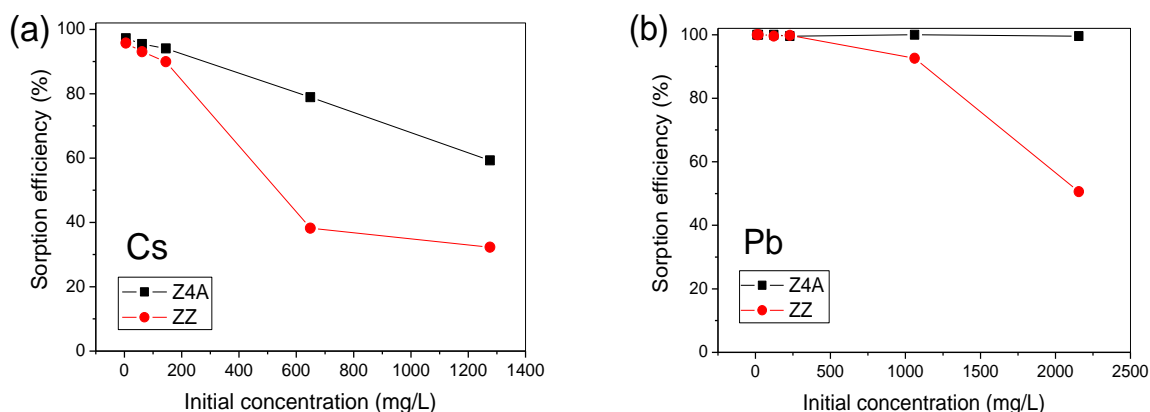


Figure 1. Efficiency of (a) Cs and (b) Pb (b) removal by ZZ and Z4A.

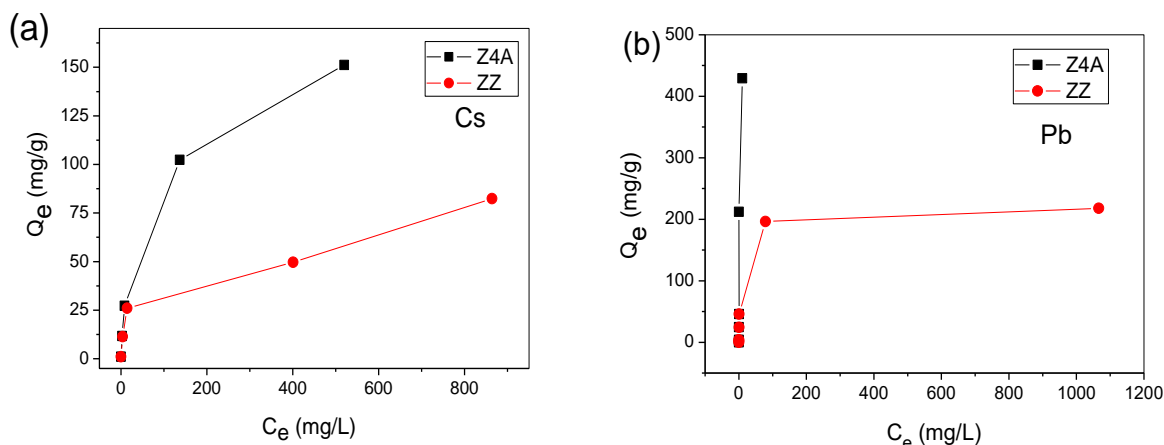


Figure 2. Isotherms of (a) Cs and (b) Pb sorption by ZZ and Z4A.

Table 1. The parameters of Cs and Pb equilibrium sorption by natural (ZZ) and synthetic (Z4A) zeolites calculated by Langmuir and Freundlich isotherm models.

System	Langmuir model $C_e/Q_e = 1/(q_m \cdot K_L) + C_e/q_m$			Freundlich model $\ln Q_e = \ln K_F + 1/n \cdot \ln C_e$		
	Q_{max} (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K ($\text{mg}^{1-1/n} \text{L}^{1/n} \text{g}^{-1}$)	$1/n$	R^2
ZZ-Cs	80.0	0.017	0.925	3.663	0.488	0.967
Z4A-Cs	161.3	0.023	0.990	4.830	0.607	0.911
ZZ-Pb	218.3	0.34	0.999	43.01	0.265	0.927
Z4A-Pb		n.a.		47.62	0.955	1.000

n.a. - not applicable

The results can be linked to the properties of applied zeolites. Namely, Z4A is 100 % crystalline zeolite product (36 % Al_2O_3 , 22 % Na_2O , 42 % SiO_2), with uniform particles size (~4 μm), pore diameter of 4 Å, and the alkaline reaction in water (pH ~ 11) [7]. It was specifically developed as an alternative to phosphate type builders in household detergents, with the key function of extracting calcium and magnesium from water. The presented results indicate that the same product can as well be used for the separation of Cs and Pb cations. It should be noted that alkaline nature of Z4A may contribute to Pb hydrolysis and precipitation, in accordance with high efficacy Pb removal observed in the entire concentration range. On the other hand, natural sample from Zalau is a heterogeneous mixture of minerals, consisting approximately 65 % of clinoptilolite and several other minerals (albite (10-15 %), hydromuscovite (10-15 %), quartz (<5 %) and calcite (<5 %)) [8], which affects its cation removal efficiency.

The effectiveness of Z4A in ^{137}Cs and ^{210}Pb separation from the spiked samples of tap and seawater is presented in Table 2. The amount of extracted ^{210}Pb is the same from both tap and sea water. Contrariwise, the amount of extracted ^{137}Cs is approximately eight times higher in tap water than in sea water. The low capacity for Cs in case of sea water may be explained by the fact that a large amount of other cations (Mg, Ca, Sr) are present in sea water for which Z4A exhibits higher affinity [9].

Table 2. The efficiency of removing ^{137}Cs and ^{210}Pb with Z4A from tap and sea water.

System	Extracted isotope (tap water), %	Extracted isotope (sea water), %
	Z4A : Solution = 2 g/L	
Z4A- ^{137}Cs	85 ± 3	11 ± 3
Z4A- ^{210}Pb	97 ± 2	96 ± 2

The activity of radionuclides on Z4A was determined again after seven months. The results confirmed the stability of the material(system) since the activity of extracted isotopes was unchanged.

CONCLUSION

Comparative study of Cs and Pb removal by ZZ and Z4A confirms general ability of zeolites to sequester cationic pollutants and highlights particularly high capacity of the synthetic product. Although both materials can find use in the prevention of pollution and remediation of contaminated water, higher capacity of Z4A provides less solid waste for further treatment and storage. Furthermore, observed selectivity of Z4A towards radionuclide cations present in the samples of tap water or even seawater, suggests that the further research should be focused on its use in radioanalytical chemistry.

Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Education Science and Technological Development of the Republic of Serbia, Project III43009, and the bilateral project Serbia-Croatia (2016-2017) "Investigation of radionuclide sorption on the artificial and natural sorbent materials with emphasis on the potential analytical applications and/or safe disposal".

REFERENCES

- [1] International Atomic Energy Agency. Application of ion exchange processes for the treatment of radioactive waste and management of spent ion exchangers. TRS No. 408; IAEA: Vienna, Austria, 2002.
- [2] Abdel Rahman RO, Ibrahim HA, Hung YT. Liquid radioactive wastes treatment: A review. *Water* 2011;3:551-565.
- [3] El-Kamash AM. Evaluation of zeolite A for the sorptive removal of Cs⁺ and Sr²⁺ ions from aqueous solutions using batch and fixed bed column operations. *J Hazard Mater* 2008;151:432-445.
- [4] Smičiklas I, Dimović S, Plećaš I. Removal of Cs¹⁺, Sr²⁺ and Co²⁺ from aqueous solutions by adsorption on natural clinoptilolite, *Appl Clay Sci* 2007;35:139-144.
- [5] Dyer A, Mikhail KY. The use of zeolites for the treatment of radioactive waste. *Mineralogical Magazine* 1985;49:203-210.
- [6] Osmanlioglu AE. Treatment of radioactive liquid waste by sorption on natural zeolite in Turkey. *J Hazard Mater* 2006;137:332-335.
- [7] https://aluminazv.ba/uploads/Products/6_Technical_Data_Sheet_SYNTHETIC_ZEOLITE_4A_MS.pdf
- [8] Neagoe S, Pântea O, TrâmbiŃaşu E, Popovici D, Bomboş D, Bacalum F, Matei D, Neagoe C, Jugănaru T, Hotinceanu M. Conditioning of zeolite stone from Zalau. Physical-chemical study, *Analele Universitatii Bucuresti: Chimie*. 2004;I-II:255-262.
- [9] El-Rahman KMA, El-Kamash AM, El-Sourougy MR, Abdel-Moniem NM. Thermodynamic Modeling for the Removal of Cs⁺, Sr²⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ ions from Aqueous Waste Solutions Using Zeolite A. *J Radioanal Nucl Chem* 2006;268(2):221-230.

REMOVAL/ PRECONCENTRATION OF Cs AND Pb IONS BY NATURAL CLINOPTILOLITE AND SYNTHETIC ZEOLITE 4A

Ivana Smičiklas¹, Marijana Nodilo², Ivana Coha², Mihajlo Jović¹, Marija Šljivić-Ivanović¹, Ivana Tucaković², Željko Grahek²

¹Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

²Ruder Bošković Institute, Zagreb, Croatia

ivana.coha@irb.hr

Zeolites are widely explored and used as ion-exchange agents for the removal of radionuclides present in the liquid effluents of low and intermediate activity level.

The aim of the study was to determine sorption properties of natural clinoptilolite-rich zeolite (ZZ) and synthetic zeolite 4A (Z4A), in order to screen and compare their applicability for interventions in accidental pollution by Cs and Pb and for analytical purposes.

The equilibrium sorption data were collected in batch mode, using stable Cs and Pb nitrate salts in a wide range of concentrations. The affinities and the maximum sorption capacities of both materials were higher for Pb ions, whereas Z4A exhibited a higher capacity to remove both cations in respect to ZZ. Additionally, the performance of Z4A in radionuclide separation was tested using tap water and seawater samples spiked with ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb. Recovery of ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb was 84.8 % and 95.6 % from tap water and 10.9 % and 95.6 % from seawater. High-efficiency separation of ²¹⁰Pb from water samples with a quite different background composition can be utilized for analytical purposes, as a fast preconcentration step.

Comparative study of Cs and Pb removal by ZZ and Z4A confirms general ability of zeolites to sequester cationic pollutants and highlights particularly high capacity of the synthetic product. Although both materials can find use in the prevention of pollution and remediation of contaminated water, higher capacity of Z4A provides less solid waste for further treatment and storage. Furthermore, observed selectivity of Z4A towards radionuclide cations present in the samples of tap water or even seawater, suggests that the further research should be focused on its use in radioanalytical chemistry.

RAZVOJ I SIMULACIJA DOZIMETRIJSKE AKVIZICIJSKE ELEKTRONIKE ZA SCINTILACIJSKE DETEKTORE

Luka Pavelić¹, Marija Surić Mihić¹, Igor Lacković², Mladen Hajdinjak³, Ivica Prlić¹

¹Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb

²Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb

³Haj-Kom, Zagreb

lpavelic@imi.hr

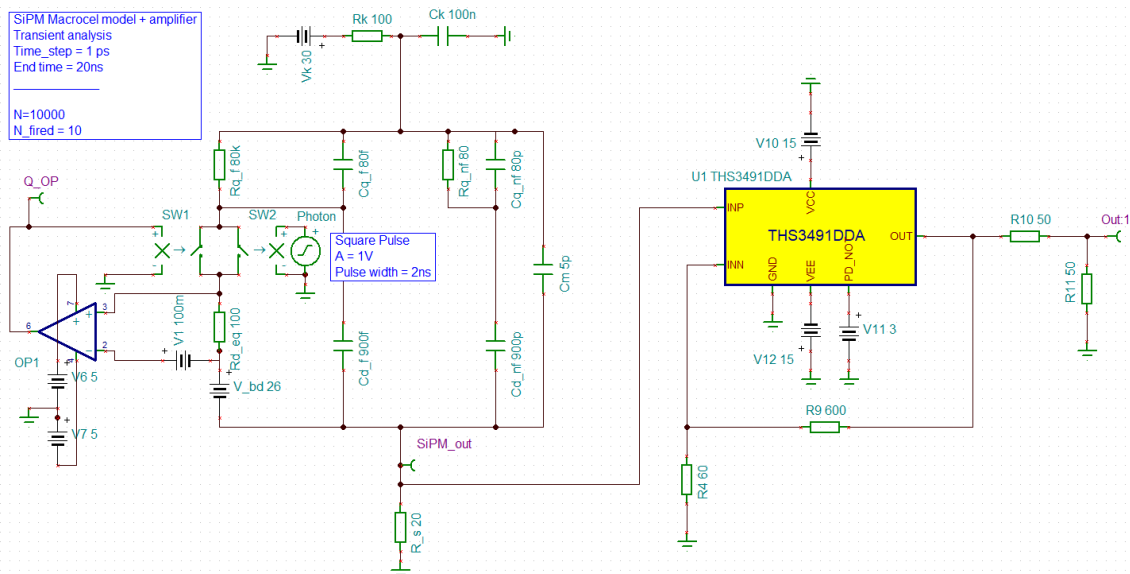
UVOD

Na Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada radimo na razvoju kompaktnog scintilacijskog poluvodičkog detektora kako bismo utvrdili prikladnost i potencijal tehnologije za potrebe dozimetrije ionizirajućeg zračenja. Razvijeni detektor sastoji se od $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ NaI(Tl) scintilacijskog kristala zatvorenog u aluminijsko kućište s prozorom od kvarcnog stakla. UV fotoni koje emitira scintilator detektirani su pomoću silicijskog fotomultiplikatora kojeg čini matrica od 10^4 Geiger-mode lavinskih fotodioda. Impulsi iz detektora prvo moraju biti pojačani, a zatim se mogu prikupiti i analizirati na razne načine. Metode koje uključuju usrednjavanje, brojanje impulsa i konačne brzine uzorkovanja mogu uvesti pogrešku u mjerenje doze i brzine doze, dok mrtvo vrijeme akvizicijske elektronike može uzrokovati preranu saturaciju detektorskog sustava. U okviru istraživanja započeli smo razvoj akvizicijske elektronike koja će nam omogućiti kondicioniranje signala i prikupljanje podataka bez mrtvog vremena.

SIMULACIJE I DIZAJN ELEKTRONIKE

Simulacije elektronike izvedene su u računalnom programu TINA-TI [1] kojeg je razvio Texas Instruments i koji se temelji na SPICE simulatoru. Naš dizajn elektronike sastoji se od brzog pojačala propusnosti oko 1 GHz, dijela za obradu signala i integratorskog modula koji kao izlaz daje impulse, gdje svaki impuls predstavlja kvant prikupljene informacije o dozi.

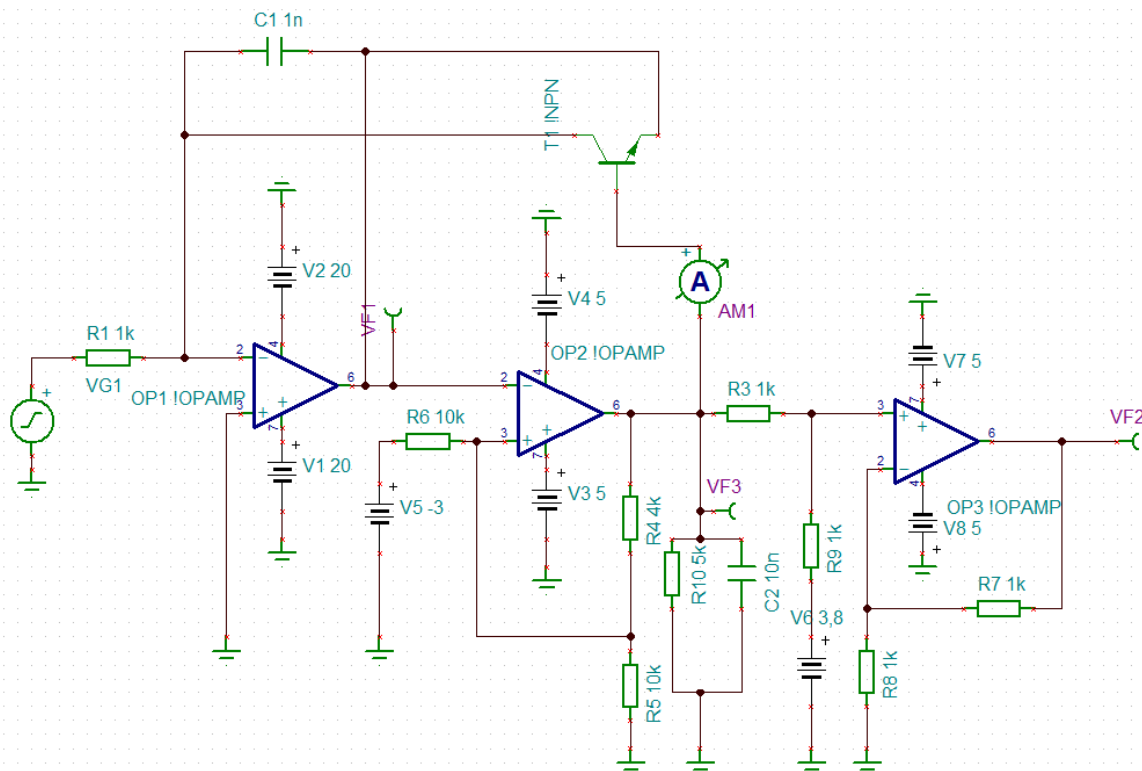
Kako bi dizajnirali pojačalo, upotrijebljen je ekvivalentni model silicijskog fotomultiplikatora [2] koji je prikazan na Slici 1 s lijeve strane. Vrijednosti pojedinih komponenata i napajanja izračunati su iz dokumentacije korištenog fotomultiplikatora [3].



Slika 1. Ekvivalentni model silicijskog fotomultiplikatora i pojačalo.

Na desnoj strani Slike 1 prikazan je dizajn neinvertirajućeg pojačala koji se temelji na Texas Instruments THS3491 operacijskom pojačalu sa strujnom povratnom vezom. Model SPICE pojačala preuzet je s web stranica Texas Instruments-a [4]. Dotično operacijsko pojačalo karakterizirano je širokom propusnošću i dovoljno visokom izlaznom snagom kako bi moglo pogoniti 50Ω opterećenja.

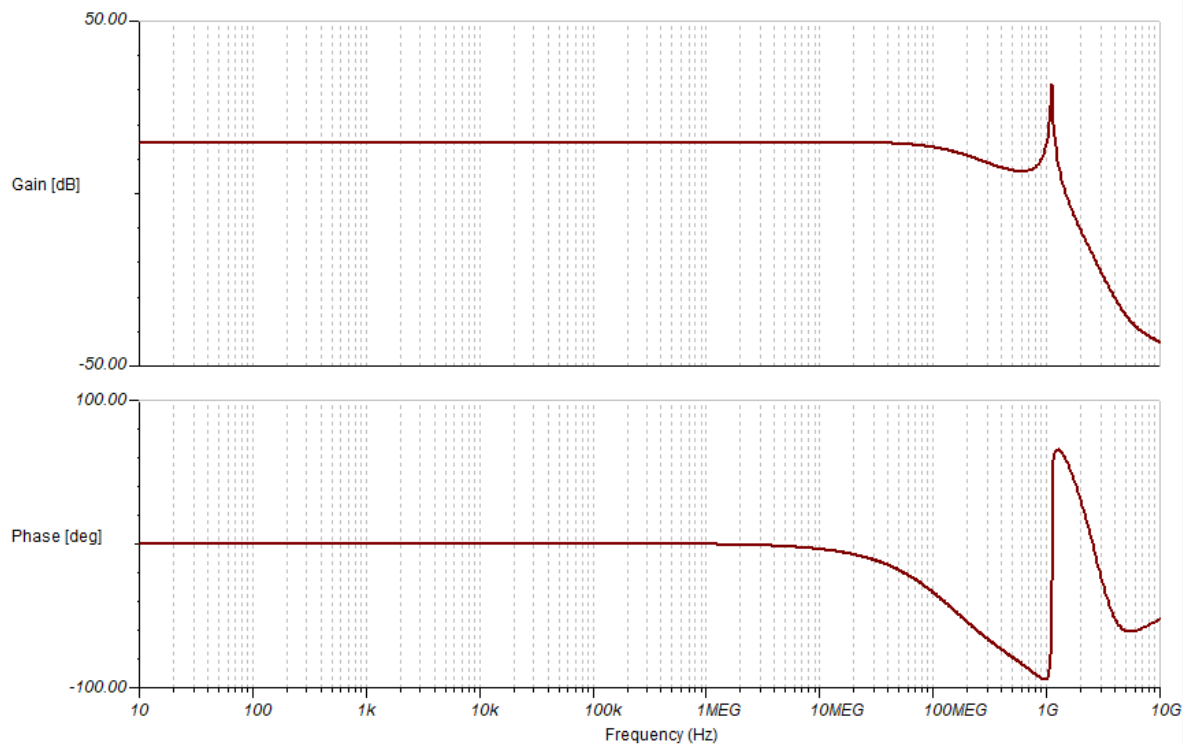
Osim pojačala posebno je dizajniran integratorski modul. Integratorski krug temelji se na operacijskom pojačalu gdje se integracija vrši u kondenzatoru u negativnoj povratnoj vezi. Kondenzator će biti spojen na analogni prekidač kako bi se ispraznio i time započeo novi ciklus integracije. Zbog nedostatka SPICE modela u simulaciji je on zamijenjen tranzistorom što je vidljivo u shemi modula koja je prikazana na Slici 2. Integratorski modul sastoji se od integratorskog kruga, Schmitt okidača i zbrajala. Schmitt okidač zadužen je za uključenje analognog prekidača odnosno tranzistora preko kojeg se prazni kondenzator te prekida prekidač kada se kondenzator isprazni.



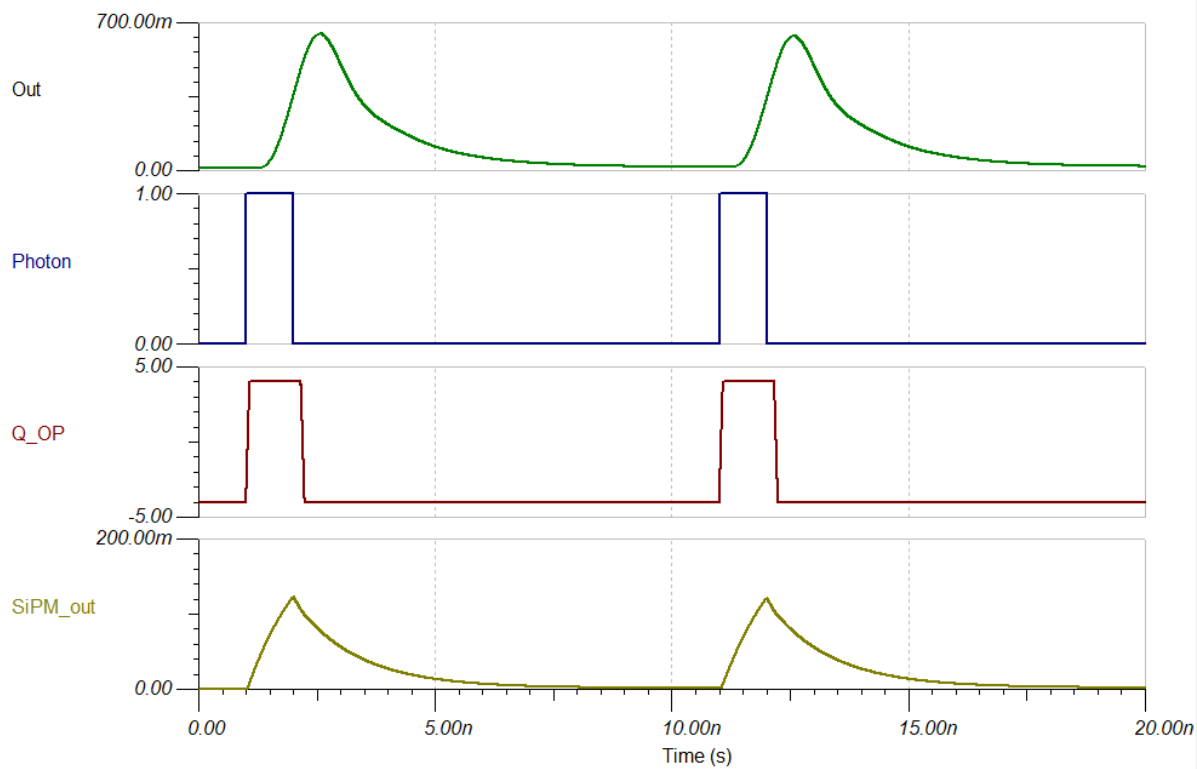
Slika 2. Shema Integratorskog modula.

REZULTATI

Simulacije su uspješno validirale model silicijskog fotomultiplikatora pomoću kojeg je razvijeno široko propusno pojačalo. Bodeov dijagram frekvencijske karakteristike pojačala prikazan je na Slici 3. Slika 4 prikazuje rezultat simulacije gdje nazivi pojedinih krivulja odgovaraju mjernim točkama na shemi (Slika 1). Krivulja „Photon“ signalizira pristizanje fotona, „SiPM_out“ predstavlja izlaz sa silicijskog fotomultiplikatora na shunt otporniku dok „Out“ predstavlja 50Ω terminirani signal na izlazu pojačala.



Slika 3. Bodeov dijagram frekvencijske karakteristike pojačala.

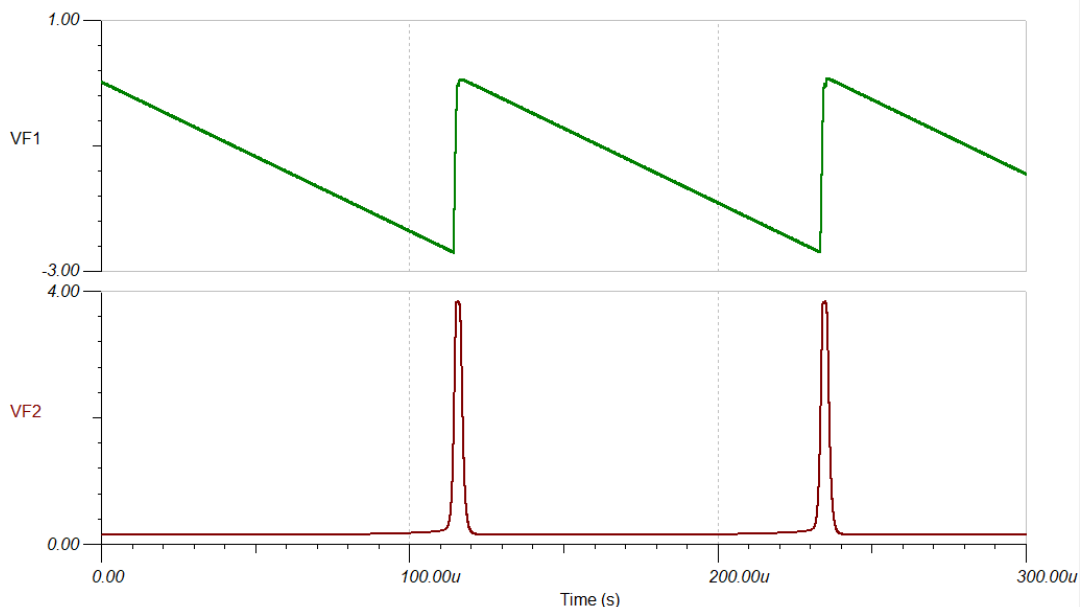


Slika 4. Rezultat simulacije ekvivalentnog modela silicijskog fotomultiplikatora i pojačala.

Slika 5 predstavlja izlaz s integratorskog modula. Na ulaz integratora konstantnom frekvencijom dovode se signali iz fotomultiplikatora koji predstavljaju detekcije ionizirajućeg zračenja. Taj signal integrira se u integratoru gdje krivulja „VF1“ predstavlja napon na integrirajućem kondenzatoru. Kada vrijednost napona na kondenzatoru dosegne dizajniranu vrijednost, kondenzator praznimo i time ponovno pokrećemo novi ciklus integracije. Prilikom završetka svakog ciklusa modul šalje binarni signal prikazan krivuljom „VF2“ kojom signalizira završetak jednog ciklusa. Ukupan broj tih signala proporcionalan je mjerenom doznom ekvivalentu, dok njegova frekvencija odgovara brzini doznog ekvivalenta. Zbog konačnog vremena pražnjenja kondenzatora preko tranzistora mrtvo vrijeme elektronike je i dalje prisutno u postotku D (jednadžba 1) koji može doći do utjecaja za veće brzine doze kada je vrijeme punjenja kondenzatora kraće.

$$D = 100 T_m / (T_{punjenja} + T_{praznjenja}) \quad (1)$$

Ukoliko se u fizičkoj realizaciji tranzistor preko kojega se prazni kondenzator zamijeni brzom analognom sklopkom, vrijeme pražnjenja moglo bi biti smanjeno za red veličine.



Slika 5. Rezultat simulacije integratorskog modula.

ZAKLJUČAK

Kroz rad uspješno je validiran novi ekvivalentni model silicijskog fotomultiplikatora, te razvijena i simulirana elektronika za detektor zračenja, odnosno dozimetar i mjerac brzine doze koji razvijamo na Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada. Simulacije pokazuju da je mrtvo vrijeme elektronike i dalje prisutno, ali u omjeru koji je prihvatljiv i može biti dodatno optimiziran. Kao sljedeći korak u istraživanju potrebno je izraditi elektroniku i napraviti mjerenja.

ZAHVALA

Zahvaljujem na pomoći prof. dr. sc. Ratku Magjareviću i svome mentoru prof. dr. sc. Igoru Lackoviću s Fakulteta elektrotehnike i računarstva, Sveučilišta u Zagrebu koji su svojim stručnim komentarima i vodstvom odigrali ključnu ulogu u procesu savladavanja novih znanja koje sam primijenio u ovome radu.

LITERATURA

- [1] SPICE-based analog simulation program: <http://www.ti.com/tool/TINA-TI> Pristup 1.3.2019.
- [2] Marano D, Bonanno G, Belluso M, Billotta S, Grillo A, Garozzo S, Romeo G, Catalano O, La Rosa G, Sottile G, Impiombato D, Giarrusso S. Improved SPICE electrical model of silicon photomultipliers. Nucl Instrum Methods Phys Res A 2013;726:1-7.
- [3] AdvanSiD NUV-SiPMs datasheet: <http://advansid.com/products/product-detail/asd-rgb-nuv-4s-p> Pristup: 1.3.2019.
- [4] TI THS3491 SPICE model: <http://www.ti.com/product/THS3491/toolssoftware> Pristup: 1.3.2019.

DEVELOPMENT AND SIMULATION OF DOSIMETRIC ACQUISITION ELECTRONICS FOR SCINTILLATION DETECTORS

Luka Pavelić¹, Marija Surić Mihić¹, Igor Lacković², Mladen Hajdinjak³, Ivica Prlić¹

¹Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb

²University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Zagreb

³Haj-Kom, Zagreb

lpavelic@imi.hr

At the Institute for Medical Research and Occupational Health we are developing compact scintillation semiconductor detector to determine suitability and potential of technology for dosimetry needs. UV photons from scintillator are detected using silicon photomultiplier that is composed out of $\sim 10^4$ Geiger-mode avalanche photodiodes. Detector signal analysis could be approached in various ways. Methods that include averaging, pulse counting and finite sampling speeds can introduce error in measurement of dose and dose rate, while dead time of acquisition electronics could lead to premature saturation of detector system. Within this research we started a development of acquisition electronics that would enable us to make signal conditioning and data acquisition without a dead time. Our design consists of fast amplifier with bandwidth in the 1 GHz range, module for signal processing and integration module which outputs binary pulses, where each pulse represents a quant of collected information about the dose. In this work we present working principles and simulations of amplifier and integration module to which signal is brought from electronic equivalent model of detector.

OPTIMIZACIJA DETEKCIJE RADIOAKTIVNOG STRONCIJA ČERENKOVljeVIM BROJENJEM

Martina Ivković, Marijana Nodilo, Željko Grahek, Ivana Coha
Institut Ruđer Bošković, Zagreb
ivana.coha@irb.hr

UVOD

Praćenje sadržaja radionuklida u pojedinim dijelovima okoliša te kontrola emisije radionuklida u okoliš je bitan dio programa sustavnog praćenja stanja okoliša. Između mnogobrojnih radionuklida, posebna pozornost se daje dugoživućem izotopu stroncija, ^{90}Sr (28,9 g), koji značajno doprinosi radioaktivnom onečišćenju okoliša, ali utječe i na ljudsko zdravlje. Stroncij je homolog kalciju te kada dospije u ljudski organizam ugrađuje se najvećim dijelom u kosti. U ljudskom tijelu zajedno sa svojim produktom raspada ^{90}Y proizvodi zračenje koje može uzrokovati rak kostiju, mekog tkiva oko kostiju, leukemiju ili smanjenje krvnih stanica [1]. Sustavno određivanje ^{90}Sr od ključne je važnosti zbog potencijalnog biološkog rizika i opasnosti povezane s radioaktivnim izotopima. Čisti je beta emiter zbog čega je njegovo određivanje komplicirano. Prije same detekcije, potrebno ga je izolirati iz uzorka te odijeliti od ostalih elemenata koji bi mogli smetati prilikom detekcije. Detekcija je moguća korištenjem radiometrijskih tehnika, poput brojenja na proporcionalnom brojaču, tekućinskim scintilacijskim brojenjem ili pomoću Čerenkovljevog efekta. Posljednji navedeni način je moguće koristiti na komercijalno dostupnim tekućinskim scintilacijskim brojačima. Prednost ove tehnike u odnosu na klasično scintilacijsko brojenje je jednostavnija priprema uzoraka; nema potrebe za korištenjem scintilacijskog koktela, što pojeftinjuje postupak, smanjuje količinu organskog otpada, a uzorak ostaje nepromijenjen i može se koristiti za daljnju analizu.

Princip detekcije Čerenkovljevim zračenjem je takav da instrument sadrži dvije fotomultiplikacijske cijevi koje registriraju događaje (fotone) u koincidenciji što se onda detektira kao impuls, koji je mjera radioaktivnog raspada. Da bi do toga došlo, moraju biti zadovoljena dva uvjeta: prilikom raspada radioizotopa, emitirani elektroni na svom putu moraju proizvesti fotone koji imaju veću brzinu od brzine svjetlosti u danom sredstvu (Čerenkovljev efekt); te emitirani elektroni moraju imati dovoljnu energiju da proizvedu foton koji će doseći fotomultiplikacijske cijevi, tj. trebaju prijeći tzv. prag detekcije koji za vodeni medij iznosi 263 keV. Kako srednja energija ^{90}Sr iznosi svega 196 keV, broj elektrona koji mogu proizvesti Čerenkovljev efekt je zanemariv, dok je srednja energija potomka ^{90}Y 927 keV. Stoga, samo će elektroni ^{90}Y moći proizvesti fotone koji će biti registrirani kao impulsi.

Optimizacija uvjeta detekcije bitan je korak u razvoju metoda za određivanje ^{90}Sr u različitim uzorcima. U ovom radu će biti prikazani uvjeti detekcije ^{90}Sr ovisno o vrsti scintilacijske bočice, volumenu uzorka, vrsti otapala te načinu detekcije na tekućinskom scintilacijskom brojaču TriCarb 3180 TR/SL.

MATERIJALI I METODE

Mjerenja su provedena na tekućinskom scintilacijskom brojaču Tri-Carb 3180 TR/SL, PerkinElmer, korištenjem Čerenkovljevog efekta. Navedeni instrument ima dvije opcije brojenja uzoraka, u tzv. *Normal counting mode-u* (NCM) te *Low level counting mode-u* (LLCM). Razlika je što je u drugom slučaju, prilikom brojenja, uključena opcija *time resolved liquid scintillation counting* (TR-LSC), inicijalno proizvedena za povećanje osjetljivosti detekcije prilikom scintilacijskog brojenja. Parametar osjetljivosti detekcije može se iskazati pomoću formule:

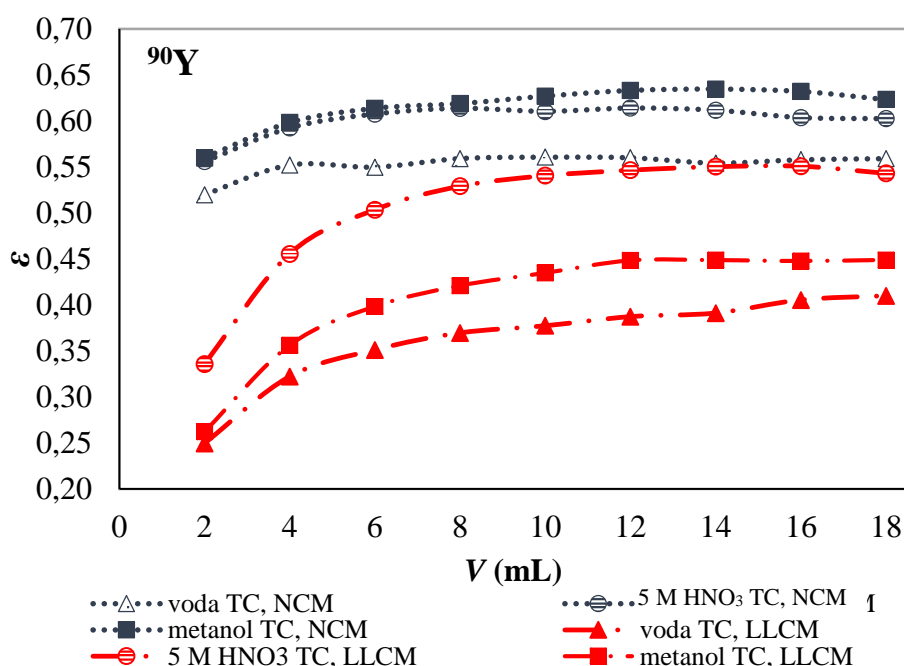
$$FOM = \frac{\varepsilon^2}{OZ} \quad (1)$$

pri čemu je ε efikasnost detekcije u postotcima, a OZ su impulsi po minuti (cpm) osnovnog zračenja.

U svrhu optimiranja uvjeta detekcije korišten je standard ^{90}Sr (Češki metrološki institut). Sve otopine standarda pripravljene su korištenjem kemikalija analitičke čistoće. Uzorci su brojeni u plastičnim i staklenim scintilacijskim bočicama proizvođača PerkinElmer.

REZULTATI

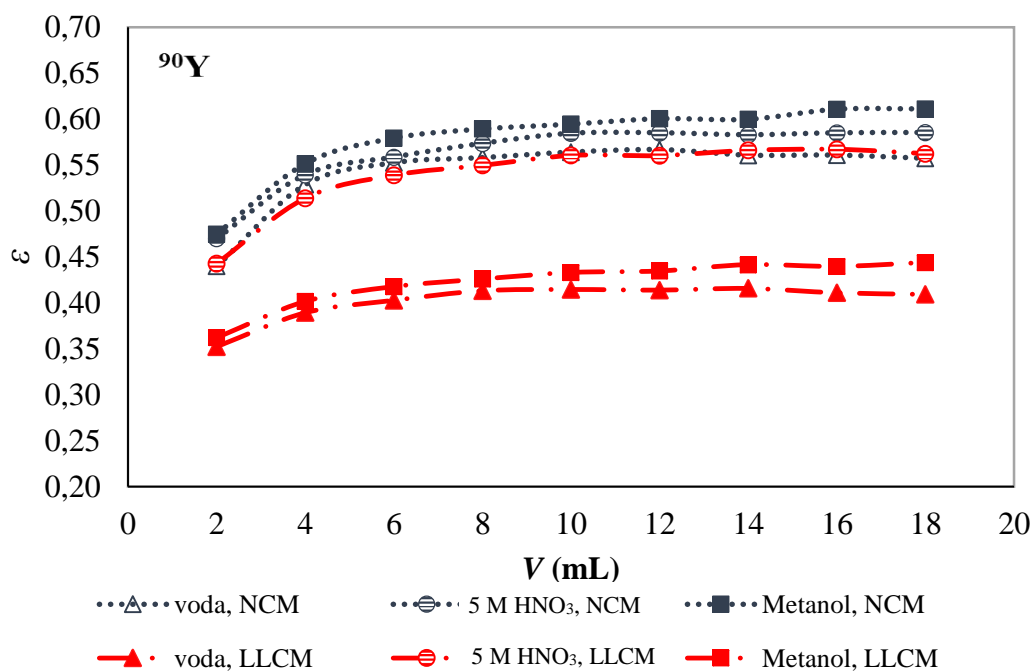
Kako bi se optimizirali uvjeti detekcije $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ Čerenkovljevim brojenjem, napravljeni su eksperimenti pri različitim uvjetima. Radi utvrđivanja ovisnosti efikasnosti detekcije o volumenu uzorka napravljen je set određivanja u staklenim i plastičnim bočicama u vodi, metanolu i 5 M nitratnoj kiselini (Slike 1 i 2).



Slika 1. Ovisnost učinkovitosti detekcije Čerenkovljevim efektom $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ($A = 60$ Bq) o volumenu različitih otapala u staklenim bočicama na Tri-Carb 3180 TR/SL (NCM i LLCM). Vrijeme brojenja je 20 minuta.

Iz rezultata prikazanih na Slikama 1 i 2 vidljivo je kako efikasnost detekcije $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ raste s porastom volumena otopine u bočici do 8 mL, nakon čega je gotovo nepromijenjena, iz čega se može zaključiti kako je optimalan volumen otopine u bočici između 8 i 18 mL. Učinkovitost detekcije je generalno nešto viša u plastičnim bočicama nego staklenima, što je u skladu s literaturom [2]. Razlog tomu je što je indeks refrakcije plastične stijenke niži nego staklene zbog čega će više Čerenkovljevih fotona biti registrirano na detektoru. Ako usporedimo različita otapala, u obje vrste bočice najveća je učinkovitost detekcije u metanolu, brojeno u NCM. Moguće objašnjenje je što metanol ima najmanju gustoću u odnosu na druga korištena sredstva, što rezultira duljim dosegom elektrona te odgovarajućim povećanjem broja emitiranih fotona [3]. S druge strane je efikasnost detekcije u LLCM u 5 M HNO_3 najviša što se izraženo može uočiti u slučaju $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. Razlog je najvjerojatnije zato što je u slučaju brojenja u LLCM-u uključena opcija brojenja s vremenskim razlučivanjem odnosno *time resolved liquid scintillation counting* (TR-LSC) i što nitratni ioni utječu na detekciju [4].

Naime, instrument razlučuje „pravi“ signal u odnosu na signal osnovnog zračenja tako što uz glavni signal detektira u određenom vremenskom razmaku i dodatne signale manjeg intenziteta (*afterpulses*). U slučaju vode i metanola, vjerojatno je više pravih događaja odbačeno, zbog čega je i efikasnost detekcije značajnije smanjena u odnosu na bojanje u NCM-u, dok je u slučaju nitratne kiseline efikasnost neznatno manja. Nitratni ioni u ovom slučaju na neki način gase dodatne signale zbog čega je manje pravih događaja odbačeno.



Slika 2. Ovisnost učinkovitosti detekcije Čerenkovljevim efektom $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (A - 60 Bq) o volumenu različitih otapala u plastičnim bočicama na Tri-Carb 3180 TR/SL (NCM i LLCM). Vrijeme brojenja je 20 minuta.

Tablica 1. Impulsi osnovnog zračenja (OZ), učinkovitost detekcije Čerenkovljevim brojenjem standarda ^{89}Sr odnosno $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ u 16 mL vode, 5 M HNO₃ i metanolu na Tri-Carb 3180 TR/SL.

	Staklene bočice			Plastične bočice		
	H ₂ O	5 M HNO ₃	CH ₃ OH	H ₂ O	5 M HNO ₃	CH ₃ OH
<i>Normal counting mode</i>						
OZ (cpm)	5,9 ± 0,4	6,2 ± 0,6	6,1 ± 0,8	3,0 ± 0,4	3,2 ± 0,3	2,7 ± 0,2
ε (%)	55,80 ± 1,48	60,37 ± 1,48	63,23 ± 1,59	53,88 ± 1,10	58,53 ± 1,30	61,12 ± 2,00
FOM	530	584	653	967	1070	1383
<i>Low level counting mode</i>						
OZ (cpm)	2,0 ± 0,3	2,4 ± 0,4	2,2 ± 0,2	1,77 ± 0,2	2,1 ± 0,3	1,71 ± 0,2
ε (%)	40,55 ± 1,62	55,09 ± 1,75	44,78 ± 1,56	41,33 ± 1,74	56,04 ± 1,68	44,20 ± 1,63
FOM	843	1275	903	965	1495	1142

Iz Tablice 1 je vidljivo da je osnovno zračenje u staklenim bočicama, zbog prisutnosti ^{40}K , značajno više nego u plastičnim bočicama [5], što je izraženo u NCM-u u svim korištenim otapalima. Brojenjem istih uzoraka osnovnog zračenja u LLCM-u osnovno

zračenje je sniženo, što se osobito ističe u slučaju staklenih bočica. Zbog toga je osjetljivost detekcije veća u slučaju brojenja uzoraka u LLCM, što je bitno ukoliko se broje uzorci niske koncentracije aktivnosti ^{90}Sr , kakva je u većini uzoraka iz okoliša. Najveća osjetljivost detekcije dobivena je u otopini 5 M HNO_3 u LLCM-u u plastičnim bočicama.

ZAKLJUČAK

Efikasnost detekcije izotopa ^{90}Sr preko potomka ^{90}Y na tekućem scintilacijskom brojaču pomoću Čerenkovljevog efekta u otopinama volumena između 8 i 18 mL u scintilacijskim bočicama je gotovo nepromijenjena. Brojenjem uzoraka korištenjem tzv. *low level scintillation counting* opcije, moguće je povećati osjetljivost instrumenta, smanjenjem osnovnog zračenja, što je značajno u slučaju staklenih bočica. Najveća osjetljivost instrumenta dobivena je u otopini 5 M HNO_3 u LLCM-u u plastičnim bočicama.

LITERATURA

- [1] Yang S, Guosheng Y, Hirofumi T, Lingling M, Masatoshi Y, Diandou X. A review of measurement methodologies and their applications to environmental ^{90}Sr . *J Environ Radioact* 2018;192:321-333.
- [2] Grahek Ž, Karanović G, Nodilo M. Rapid Determination of $^{89,90}\text{Sr}$ in Wide Range of Activity Concentration by Combination of Yttrium, Strontium Separation and Cherenkov Counting. *J Radioanal Nucl Chem* 2012;292(2):555–569.
- [3] Cocha I, Neufuss S, Grahek Ž, Nemeč M, Nodilo M, John J. The effect of counting conditions on pure beta emitter determination by Cherenkov counting. *J Radional Nucl Chem* 2016;310(2):891-903.
- [4] Al-Masri MS. Cerenkov Counting Technique. *J Radioanal Nucl Chem* 1996;207(1):205–213
- [5] Vaca PF, Manjón G, Garcia-León M. Efficiency calibration of a liquid scintillation counter for ^{90}Y Cherenkov counting. *Nucl Instrum Methods Phys Res A* 1998;406:267–275.

DETECTION OPTIMISATION OF RADIOACTIVE STRONTIUM BY CHERENKOV COUNTING

Martina Ivković, Marijana Nodilo, Željko Grahek, Ivana Coha
Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
ivana.coha@irb.hr

Monitoring the radionuclide content in the environment, along with the control of radionuclide emission, is important part of many routine environmental monitoring programs. Because of its long half-life of 28.9 years, ^{90}Sr can be deposited and accumulated in the environment, therefore potentially effecting human health if transferred into the organism. Deposited ^{90}Sr in the bone skeleton and teeth is included in the metabolism along with Ca and can cause bone cancer or leukaemia.

Determination of ^{90}Sr can be obtained using various radiometric techniques, such as proportional counting, liquid scintillation counting or Cherenkov counting. There are several advantages of using Cherenkov counting over liquid scintillation counting (LSC). The sample is not diluted with any scintillation cocktail and no organic radioactive waste is produced. Since aqueous solution is used directly, the sample remains unchanged and can be recovered for further analysis.

To optimize detection efficiency of $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ by Cherenkov counting several parameters were examined such as the influence of vial type, solvent volume and counting mode. The samples were counted in low level counting mode (LLCM) or normal counting mode (NCM) for 20 min on Tri-Carb 3180 TR/SL instrument in plastic or glass vials. The volume of used solvents (water, methanol and nitric acid) was varied from 2 mL to 18 mL.

Cherenkov detection efficiency of ^{90}Sr via ^{90}Y on Tri-Carb reaches its maximum and almost constant value for sample volumes between 8 and 18 mL. Higher detection efficiency can be achieved using plastic over glass vials. Refractive index, being lower in plastic vials, allows more Cherenkov photons to be detected on photomultiplier tubes (PMT). Comparing solvents, methanol was the best choice for samples counted in normal counting mode. The best results were obtained for samples in 5 M nitric acid in plastic vials, counted in low level counting mode, resulting in the highest sensitivity of Tri-Carb 3180 TR/SL instrument. The use of low level counting mode enables background reduction without significant decrease of detection efficiency in 5 M nitric acid, which is an advantage for determination of low activity concentrations of ^{90}Sr in environmental samples.

ANALYSIS OF ^{210}Pb IN WATER BY CHERENKOV COUNTING

Nataša Todorović¹, Jovana Nikolov¹, Ivana Stojković²

¹University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia

¹University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia
natasa.todorovic@df.uns.ac.rs

INTRODUCTION

^{222}Rn and its progenies as part of the ^{238}U decay series are naturally occurring in the Earth's crust. Since ^{222}Rn is a noble gas, it diffuses through fissures to aquifer layers, where its long-lived decay products ^{210}Pb , ^{210}Bi and ^{210}Po can be dissolved. Due to importance of the water for the human life, its quality has to be controlled. Monitoring of ^{210}Pb in water samples requires methods which are rapid, sensitive and precise.

If a radionuclide emits beta particle that has energy higher than 263 keV, this particle can produce Cherenkov radiation when it passes through water [1]. Determination of ^{210}Pb by Cherenkov counting has the following advantages: samples may be counted directly in aqueous solution or in organic solvents; no floors, fluor cocktails, or other compounds need to be added, and thus the samples to be analyzed remain unadulterated and suitable for subsequent studies or analysis; a larger volume of sample may be counted in a 20-mL counting vial since fluor solution is not needed and there is no interference from other radionuclides that cannot produce Cherenkov photons in aqueous media.

MATERIALS AND METHODS

Radioisotope ^{210}Pb is a low-energy beta emitter with a half-life of 22.23(12) years and with two decay branches, $E_{\beta\max} = 17.0(5)$ keV and $E_{\beta\max} = 63.5(5)$ keV with transition probabilities of 80.2 % and 19.8 %, respectively. The lower-energy beta decay is followed by 46.539 keV gamma transition which mainly leads to the emission of conversion electrons (internal conversion coefficient: $\alpha_T = 17.86$) [2]. Lead-210 decays via mentioned processes to the high-energy beta emitter ^{210}Bi ($T_{1/2} = 5.012(5)$ d, $E_{\beta\max} = 1162.2(8)$ keV), which makes Cherenkov detection possible [3]. Radioactive equilibrium between ^{210}Pb and ^{210}Bi is almost established after more than 50 days, therefore, ^{210}Pb can be detected via its daughter ^{210}Bi that is able to produce Cherenkov radiation.

First steps towards method's establishment assume preparation of calibration samples, their counting and determination of optimal spectral window and detection efficiency as well as detection limit evaluation. If the reference activity of the calibration sample was A [Bq], the detection efficiency ε was calculated as:

$$\varepsilon = \frac{R_c - R_0}{A}, \quad (1)$$

where R_c [s^{-1}] and R_0 [s^{-1}] are the count-rates of calibration sample (reference standard) and the background, respectively. The sample activity concentration A_s [Bq l^{-1}] should be calculated using the following expression:

$$A_s = \frac{R_s - R_0}{V \varepsilon}, \quad (2)$$

where V [l] is the analyzed volume of the water sample and R_s [s^{-1}] is its count-rate.

Detection limit was evaluated via Currie relation as the Minimal Detectable Activity (MDA) parameter [Bq l^{-1}] that is dependent on t_0 [s], the background counting time:

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{R_0 t_0}}{V \varepsilon t_0}. \quad (3)$$

Equipment

A liquid scintillation spectrometer, PerkinElmer's Quantulus 1220TM, was used for Cherenkov radiation detection. Quantulus 1220 is an ultra-low background system that contains both passive and active shielding. High energy cosmic radiation (that varies with the atmospheric pressure and humidity) significantly contributes to background noise during LSC counting. Beside its passive shield made of lead and copper, Quantulus is equipped with an extra detector that is able to identify external radiation and eliminate it, further reducing the background level. This detector (instrument's active shield) is the additional counter that functions in anticoincidence with the pulses detected in the counting chamber. Therefore, ultra-low-level measurements are enabled since high energy cosmic particles and most of other environmental radiation are effectively reduced.

The spectra were acquired and evaluated by WinQ and EASYView software.

Instrument's calibration was carried out with a standard radioactive source (aqueous ²¹⁰Pb solution) of certified activity $A(^{210}\text{Pb}) = 29.55 \text{ Bq ml}^{-1}$ with combined standard uncertainty 1.0 %, reference date 1/10/2013, produced by the Czech Metrology Institute, Inspectorate for Ionizing Radiation.

The type of vial and sample volume also influences the Cherenkov background rate. Low diffusion polyethylene vials (Super PE vial Cat.No. 6008117) were selected since glass vials induce additional counts from decays of ⁴⁰K that is present in glass. Sample's volume was 20 ml during first experiments, which is the vial's maximum capacity. However, increase in the analysed volume proportionally reduces detection limits, i.e. preconcentrates lead content, therefore, the volume of 200 ml of background sample was evaporated to 20 ml in order to test *MDA* behaviour.

RESULTS AND DISCUSSION

Two calibration vials with different activity concentrations were prepared in three probes by adding 20 μl and 1 ml of the certified activity to distilled water in order to obtain the total volume of 20 ml. Standards were allowed 50 days in order to achieve equilibrium between ²¹⁰Pb and ²¹⁴Bi and then measured in several cycles of 100 min. Background samples were 20 ml of distilled water transferred into vial, as well as 200 ml of distilled water evaporated to 20 ml of the final background sample.

System configuration

The counting protocol for Cherenkov spectra analysis on Quantulus 1220 was set up manually. Setup configuration for ²¹⁰Pb measurement is presented in Table 1. The signal trigger is set to L*R, which means that this signal is added to generated sample spectra when both photomultipliers that surround the sample simultaneously detect light. The signal inhibit G ensures that the signals coming from radiation that is simultaneously detected in both guard photomultipliers and sample multipliers are rejected. Photomultiplier signals were amplified and registered into a multichannel spectrum (MCA) [4]. The Cherenkov spectrum in Quantulus memory was collected in SP11, while SP21 and SP22 spectra were used to monitor the guard detector and generated background spectra.

The Cherenkov pulses are high amplitude pulses in general. However, if the coincidence bias is set to high, ²¹⁰Pb spectra are generated in narrow energy region, therefore, better spectral resolution and higher counting sensitivity is gained on coincidence bias set to low. Obtained spectrum of ²¹⁰Pb calibration sample together with the background spectrum, both counted on low coincidence bias are presented in Figure 1.

Table 1. WinQ configuration for Cherenkov radiation detection.

	ADC Input	ADC Trigger	Inhibit	Memory Split
MCA 1	LRSUM	L*R	G	N
MCA 2	LRSUM	L*R	N	G

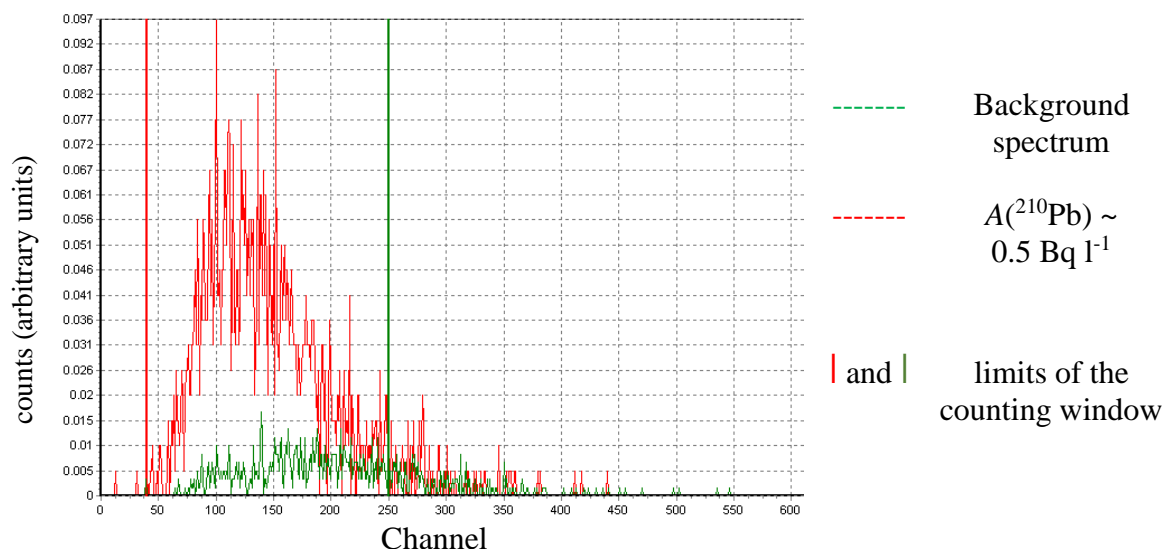


Figure 1. Spectra generated by Cherenkov radiation from $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Bi}$.

Spectral window selection

The optimal window was established on the basis of Figure of Merit (FOM) value (given in Table 2), and it was fixed between the channels 40 – 250. As expected, narrowing the spectral window causes gradual decrease of the background count rate and efficiency. However, even if FOM value continues to increase as the spectral window reduces more than 40-250 channels, its increment becomes less significant compared to the efficiency decrement, which is also relevant factor for the optimal window determination.

Minimal detectable activity

According to expression (3), taking into account the average efficiency for two sets of calibration samples presented in Table 2, $\varepsilon = 15.3(4) \%$, detection limit that can be reached is $MDA = 0.8 \text{ Bq l}^{-1}$ for 1000 min of counting. This value can be further reduced when longer measurement times are considered. Secondly, if the sample volume was increased for 10 times ($V = 0.2 \text{ l}$), i.e., if a sample was evaporated from 200 ml to 20 ml, background count rate would not differ, which means that MDA could be decreased to 0.08 Bq l^{-1} for 1000 min of counting.

In addition to this, one recent research has showed that a mass $> 1 \text{ mg g}^{-1}$ of sodium salicylate added into a counting vial could cause a significant increase in the counting efficiency for ^{210}Bi due to the production of more scintillation light [5]. Samples should be neutralized to pH 6–8 using diluted NaOH solution since solubility of sodium salicylate is poor on lower pH conditions [5]. If a total amount of 0.2 g of sodium salicylate was added into the sets of calibration vials, the average efficiency has increased to $\varepsilon = 42.2(25) \%$, which led to the value $MDA = 0.029 \text{ Bq l}^{-1}$ for 1000 min of counting. Further increase of the added mass of sodium salicylate should increase efficiency and significantly lower obtained MDA , which is a matter of future investigation. These findings clearly demonstrate the potential of this method for the detection of ^{210}Pb content in the areas where its natural levels are increased.

Table 2. Optimal window selection.

Window [channels]	Background R_b [s^{-1}]	Efficiency ε [%]		FOM [s] = $\frac{\varepsilon^2}{R_b [s^{-1}]}$	
		$A =$ 0.502(8) Bq	$A =$ 25.1(4) Bq	$A =$ 0.502(8) Bq	$A =$ 25.1(4) Bq
1-1000	0.0212(10)	16.6(7)	14.57(24)	1.30(13)	1.00(6)
40-350	0.0203(8)	16.5(6)	14.53(24)	1.33(11)	1.04(5)
40-300	0.0190(9)	16.6(6)	14.48(23)	1.44(13)	1.10(6)
40-290	0.0185(10)	16.6(7)	14.45(23)	1.48(15)	1.13(7)
50-290	0.0185(10)	16.5(7)	14.40(23)	1.47(15)	1.12(7)
40-280	0.0182(10)	16.5(7)	14.42(23)	1.49(15)	1.14(7)
30-280	0.0182(10)	16.5(7)	14.44(23)	1.49(15)	1.15(7)
50-280	0.0182(10)	16.4(7)	14.37(23)	1.49(14)	1.14(7)
40-270	0.0173(8)	16.4(6)	14.38(23)	1.56(14)	1.19(7)
50-270	0.0173(8)	16.4(7)	14.40(25)	1.55(14)	1.20(7)
40-260	0.0170(13)	16.3(7)	14.33(23)	1.56(17)	1.21(10)
40-250	0.0160(13)	16.3(7)	14.26(22)	1.66(20)	1.27(11)
40-240	0.0153(8)	16.1(6)	14.16(22)	1.69(16)	1.31(8)

CONCLUSIONS

This paper has demonstrated the possibility of direct ^{210}Pb detection in water samples by LS counter Quantulus via Cherenkov radiation that is being produced by its progeny ^{210}Bi . Manual setup configuration of the instrument as well as optimal spectral window selection has been presented. This method is simple and does not demand expensive equipment for the sample pretreatment, which measurements. Minimal detectable limit could be lowered to acceptable values by increment of the initial sample volume that should be evaporated to 20 mL, prolonging the sample measurement time and adding sodium salicylate in order to increase efficiency detection. Further studies should be directed towards resolving the problem of spectral interference with other naturally occurring radioisotopes.

Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support of the Provincial Secretariat for Higher Education and Scientific Research, Republic of Serbia within the project "Radioactivity in drinking water and cancer incidence in Vojvodina", no. 142-451- 2447/2018-03 and the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia within the projects no. OI171002 and III43002.

REFERENCES

- [1] Ross HH. Measurement of beta-emitting nuclides using Cerenkov radiation. *Anal Chem* 1969;41(10):1260-1265.
- [2] Antohe A, Sahagia M, Luca A, Ioan MR, Ivan C. Measurement of liquid scintillation sources of ^{210}Pb obtained from ^{222}Rn decay. *Appl Radiat Isotop* 2016;109:286-289.
- [3] Arinc A, Johansson LC, Gilligan Chris RD, Pearce A. Standardization of ^{210}Pb by Cerenkov counting. *Appl Radiat Isotop* 2011;69:768-772.

- [4] Manjon G, Absi A, Gomez E, Vaca F, Garcia-Leon M. Efficiency and background in Cerenkov counting affected by color quenching: an optical study. In: Mobius S, Noakes J, Schonhofer F (Eds.), LSC 2001, Advances in Liquid Scintillation Spectrometry, 2002. pp 93-97 by the Arizona Board of Regents on behalf of the University of Arizona.
- [5] Wang Y, Yang Y, Song L, Ma Y, Luo M, Dai X. Effects of sodium salicylate on the determination of Lead-210/Bismuth-210 by Cerenkov counting. Appl Radiat Isotop 2018;139:175-180.

ANALYSIS OF ^{210}Pb IN WATER BY CHERENKOV COUNTING

Nataša Todorović¹, Jovana Nikolov¹, Ivana Stojković²

¹University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia

²University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia

natasa.todorovic@df.uns.ac.rs

Radon-222 and its progenies as part of the ^{238}U decay series are naturally occurring in the Earth's crust. Since ^{222}Rn is a noble gas, it diffuses through fissures to aquifer layers, where its long-lived decay products ^{210}Pb , ^{210}Bi and ^{210}Po can be dissolved. Due to importance of the water for the human life, its quality has to be controlled. Monitoring of ^{210}Pb in water samples requires methods which are rapid, sensitive and precise. The measurement of low-level environmental ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22.3$ y) is important in many fields including health physics, geochronology and environmental science.

If a radionuclide emits beta particle that has energy higher than 263 keV, this particle can produce Cherenkov radiation when it passes through water. The analysis of ^{210}Pb in water by Cherenkov counting is possible only through the detection of the Cherenkov photons produced by the daughter nuclide ^{210}Bi , which reaches secular equilibrium with its parent nuclide. It is obvious that Cherenkov counting cannot compete with liquid scintillation counting as far as highest possible counting efficiency is concerned. However, if the sodium salicylate added into a counting vial (mass > 1 mg g^{-1}), it could cause a significant increase in the counting efficiency for ^{210}Bi due to the production of more scintillation light. Determination of ^{210}Pb by Cherenkov counting has the following advantages: samples may be counted directly in aqueous solution or in organic solvents; no fluor, fluor cocktails, or other compounds need be added, and thus the samples to be analyzed remain unadulterated and suitable for subsequent studies or analysis; a larger volume of sample may be counted in a 20-mL counting vial since fluor solution is not needed and there is no interference from other radionuclides that cannot produce Cherenkov photons in aqueous media.

UPOTREBA ED-XRF METODE U ODABIRU FILTARSKOG MEDIJA ZA UZORKOVANJE LEBDEĆIH ČESTICA U ZRAKU

Silva Žužul, Silvije Davila, Jasmina Rinkovec, Ivan Bešlić
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
szuzul@imi.hr

UVOD

Za uzorkovanje lebdećih čestica iz zraka upotrebljavaju se različite vrste filtarskog medija. Najčešće se koriste filtri od kvarcnih vlakana, membranski filtri ili teflonski filtri. Za gravimetrijsku analizu i određivanje masene koncentracije PM₁₀ i PM_{2,5} frakcije lebdećih čestica u zraku najčešće se upotrebljavaju filtri od kvarcnih vlakana jer imaju odlična mehanička svojstva i najpogodniji su za vaganje. Nedostatak ovih filtara je što u svom sastavu imaju visoke vrijednosti pojedinih metala [1]. Visoke vrijednosti metala u filtarskom mediju utječu na granice detekcije, točnost uzorkovanja i kvalitetu rezultata. U standardnoj metodi za mjerenje olova, kadmija, arsena i nikla u PM₁₀ frakciji lebdećih čestica, HRN EN 14902:2007 analitički zahtjevi za granicom detekcije metode iznose 10 % graničnih i ciljnih vrijednosti i određuju se analizom laboratorijskih slijepih proba. Prema važećim hrvatskim i europskim propisima [2,3], granica detekcije metode za analize metala u PM₁₀ frakciji lebdećih čestica trebala bi biti $\leq 0,6 \text{ ng/m}^3$ za arsen, $\leq 0,5 \text{ ng/m}^3$ za kadmij, $\leq 2 \text{ ng/m}^3$ za nikal i $\leq 50 \text{ ng/m}^3$ za olovo. Ukoliko se uzorkovanje provodi pri nižim koncentracijama metala u zraku i granice detekcije trebale bi biti što niže. Sastav metala u kvarcnim filtrima razlikuje se između serija i pakiranja te je preporuka da se prije početka uzorkovanja provjeri sadržaj metala u svakom pakiranju. Analiza sastava metodama atomske apsorpcijske spektrometrije (AAS) ili spektrometrijom masa uz induktivno spregnutu plazmu (ICP-MS) obuhvaća i razaranje filtarskog medija dušičnom kiselinom i mikrovalovima i analizu tako pripravljene otopine što je za preliminarna ispitivanja i provjeru granica detekcije dugotrajno i neekonomično. Energetsko disperzivna rendgenska fluorescentna spektrometrija (ED-XRF) koristeći Be detektor određuje energiju fotona X-zraka te akumulira podatke u višekanalni analizator. Dobiveni spektar koristi se za izdvajanje informacija o elementnom sastavu uzorka. Spektrometrija ED-XRF upotrebljava se za praćenje kvalitete zraka, odnosno elementnu analizu uzoraka lebdećih čestica sakupljenih na filtrima [4-6]. Za analizu nije potrebna prethodna priprema uzoraka, filter se nakon analize može upotrebljavati za uzorkovanje, a rezultati su dostupni u kratkom roku. Nedostatak metode su visoke instrumentalne granice detekcije za neke metale. U ovom radu ispitana je primjenjivost metode ED-XRF za preliminarno određivanje metala u filtrima prije početka uzorkovanja lebdećih čestica.

MATERIJALI I METODE

Za analizu su upotrijebljeni filtri od kvarcnih vlakana oznake QMA, proizvođača Whatman, pakirani po 25 listova u jednoj kutiji. Dimenzije jednog lista su 203 mm × 254 mm, a za analizu su izrezani okrugli filtri promjera 47 mm. Ukupno je provjeren sastav metala u 18 pakiranja kvarcnih filtara. Za analizu metala metodom ED-XRF iz 5 kutija su izrezana 3 filtra s različita tri lista unutar iste kutije, a iz preostalih 13 kutija je izrezan 1 filter iz svake kutije. Za analizu metala metodom ICP-MS izrezano je 18 filtara iz 18 različitih kutija.

ICP-MS analiza

Sadržaj metala iz filtarskog medija preveden je u otopinu mikrovalnom razgradnjom uz dušičnu kiselinu pri povišenoj temperaturi i tlaku ($T = 240 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 80 \text{ bar}$). Metodom ICP-MS analizirani su sljedeći izotopi: ⁵⁵Mn, ⁵⁶Fe, ⁶⁰Ni, ⁶⁵Cu, ⁶⁶Zn, ⁷⁵As, ¹¹¹Cd, ¹³⁷Ba i ²⁰⁶Pb. Za

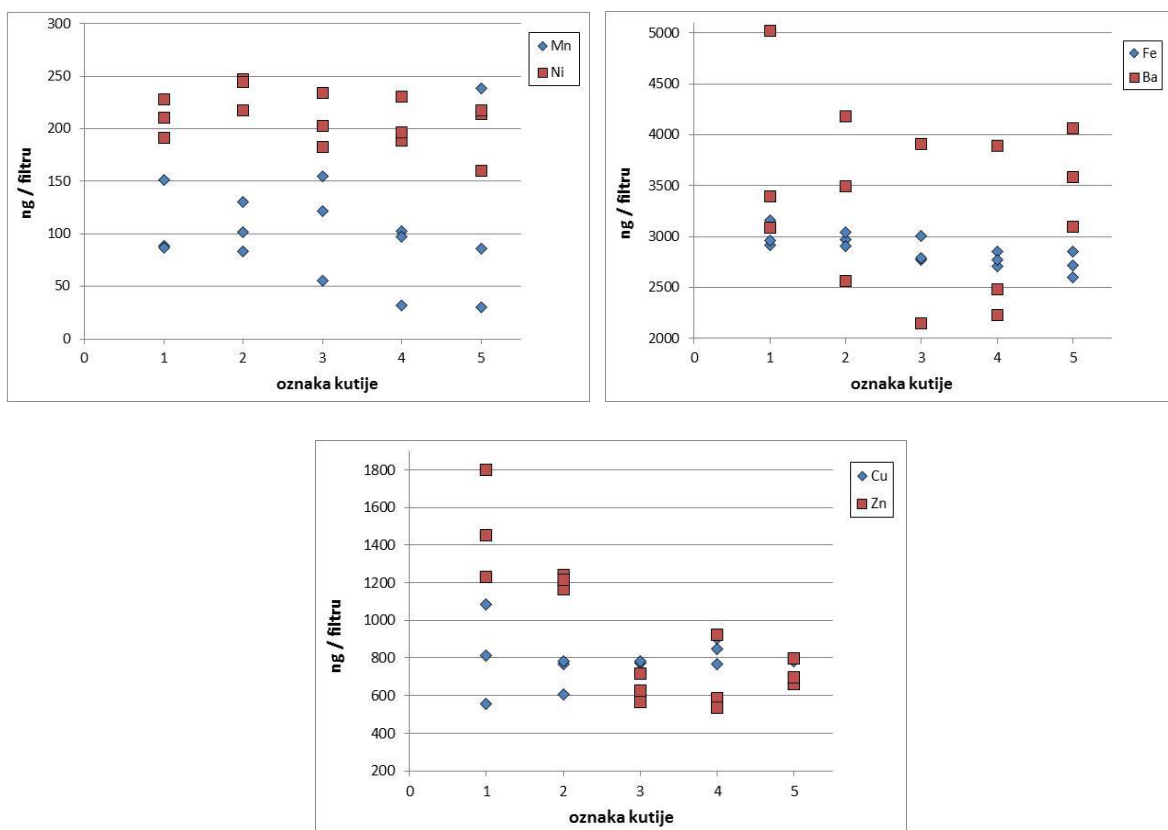
kalibraciju su upotrijebljene standardne certificirane otopine navedenih metala, čistoće za ICP izvore. Analiziran je nulti kalibracijski standard i najmanje 5 kalibracijskih standarda, a kalibracijska krivulja izrađena je upotrebom linearne regresije uz pravac $y = ax + b$. Izotopi ^{45}Sc , ^{74}Ge , ^{103}Rh i ^{209}Bi upotrijebljeni su kao unutarnji standardi. Kontrola kvalitete rezultata provedena je analizom otopine certificiranog referentnog materijala ERM CZ-120.

ED-XRF analiza

Za analizu je upotrijebljen ED-XRF Epsilon 5 opremljen s 10 sekundarnih meta (Al_2O_3 , CeO_2 , CsI , Ag , Mo , Zr , KBr , Ge , Fe , CaF_2). ED-XRF koristi berilijev (Be) detektor te rendgensku cijev snage 100 kV. Vrijeme analize iznosilo je 60 minuta po uzorku. Kalibracija je provedena standardnom kalibracijom korištenjem multielementnih Mylar filtera. Uzorci su analizirani na sastav Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Ba i Pb.

REZULTATI

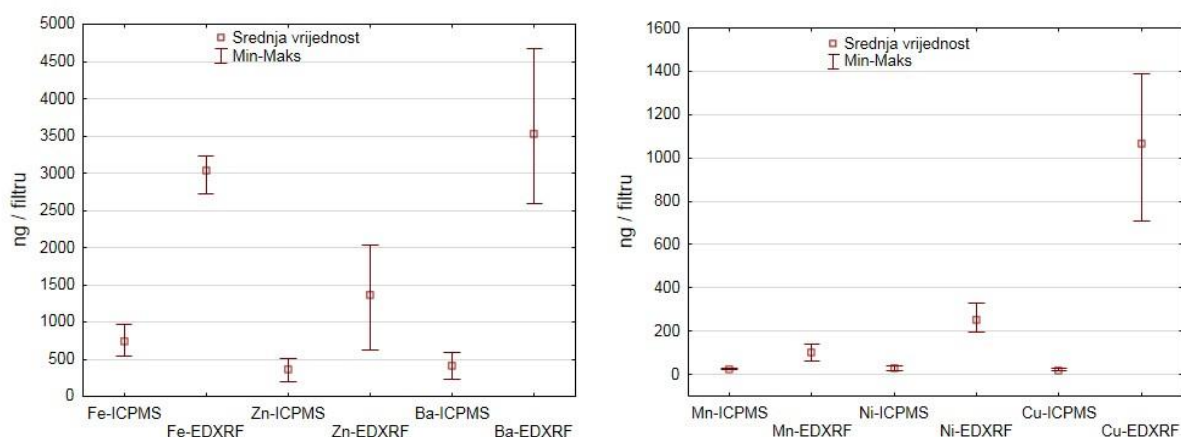
Na Slici 1 prikazani su rezultati analize uzoraka slijepih proba filtara od kvarcnih vlakana analiziranih metodom ED-XRF. Prikazan je sastav mangana, nikla, željeza, barija, bakra i cinka. Rezultati za arsen, kadmij i olovo nisu prikazani jer su ispod instrumentalne granice detekcije.



Slika 1. Usporedba rezultata analize metala metodom ED-XRF na filtrima promjera 47 mm izrezanih iz različitih kutija i s različitih listova unutar iste kutije.

Iz jedne kutije ispitanih filtara može se izrezati 500 komada filtara promjera 47 mm. Rezultati pokazuju da ne postoji značajna razlika u sastavu metala između listova unutar iste kutije. Ispitivanje različitih pakiranja pokazuje da ne postoji ni statistički značajna razlika između različitih kutija za sve ispitivane metale osim za cink.

Na Slici 2 prikazani su rezultati analize željeza, cinka, barija, mangana, nikla i bakra, na filtrima iz 18 različitih pakiranja, analiziranih metodama ICP-MS i ED-XRF. Rezultati analize arsena, kadmija i olova izmjereni metodom ICP-MS prikazani su u Tablici 1.



Slika 2. Sadržaj metala u filtrima promjera 47 mm izmjeren metodama ICP-MS i ED-XRF.

Tablica 1. Sadržaj arsena, kadmija i olova izmjereno metodom ICP-MS.

	Arsen	Kadmij	Olovo
Broj uzoraka	18	18	18
Najniža vrijednost / (ng / filtru)	0,18	0,10	3,31
Najviša vrijednost / (ng / filtru)	0,66	0,47	57,08
Srednja vrijednost / (ng / filtru)	0,42	0,26	7,84
Standardno odstupanje	0,14	0,11	12,40

Rezultati pokazuju da se metodom ED-XRF može kvalitativno analizirati željezo, cink, barij, mangan, nikal i bakar u slijepim probama filtara od kvarcnih vlakana oznake QMA. Dobiveni rezultati imaju znatno veće standardno odstupanje u odnosu na vrijednosti izmjerene metodom ICP-MS, a kvantitativna analiza pokazuje da su vrijednosti izmjerene metodom ED-XRF više od onih dobivenih analizom ICP-MS. Masa mangana, željeza i cinka na filtru je četiri puta viša, nikla i barija devet puta, a najlošije vrijednosti su za bakar gdje su izmjerene vrijednosti šezdeset puta više u odnosu na standardiziranu metodu ICP-MS. Metoda ED-XRF nije dovoljno osjetljiva da bi se mogao analizirati sadržaj arsena, kadmija i olova u slijepim probama, a vrijednosti izmjerene za nikal su također iznad minimalne propisane granice detekcije metode za nikal koja uz protok od 55 m³ po uzorku iznosi 110 ng / filtru.

Daljnja istraživanja na metodi ED-XRF potrebno je usmjeriti na poboljšanje kalibracije čime bi se smanjila mjerna nesigurnost pri niskim vrijednostima analita.

ZAKLJUČAK

Metoda ED-XRF može se upotrebljavati za preliminarnu analizu željeza, cinka, barija, mangana, nikla i bakra u filtrima prije početka uzorkovanja lebdećih čestica. Dobiveni rezultati mogu se upotrijebiti za usporedbu pojedinih serija filtara od kvarcnih vlakana, dok su za točniju kvantitativnu analizu potrebna poboljšanja u kalibraciji metode. Ne postoje značajne razlike u sastavu metala unutar iste kutije, ali značajne razlike su pronađene u sastavu cinka između različitih kutija.

LITERATURA

- [1] Berg T, Royset O, Steinnes E. Blank values of trace elements in aerosol filters determined by ICP-MS. *Atmos Environ* 1993;27A(15):2435-2439.
- [2] Zakon o zaštiti zraka. NN 130/11; 47/14; 61/17; 118/18.
- [3] Uredba o razinama onečišćujućih tvari u zraku. NN 117/12.
- [4] Davila S, Bešlić I, Šega K. Upotreba ED-XRF metode za praćenje kvalitete zraka. U Radolić V, Poje Sovilj M, Krajcar Bronić I, ur. Zbornik radova Jedanaestog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja; 5-7. travnja 2017; Osijek, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2017. str. 244-248.
- [5] Tsai M-Y, Hoek G, Eeftens M et al. Spatial variation of PM elemental composition between and within 20 European study areas – Results of the ESCAPE project. *Environ Int* 2015;84:181-192.
- [6] Chiari M, Yubero E, Calzolari G et al. Comparison of PIXE and XRF analysis of airborne particulate matter samples collected on Teflon and quartz fibre filters. *Nucl Instrum Methods Phys Res B* 2018;417:128-132.

USE OF ED-XRF ANALYSIS IN SELECTION OF FILTERS FOR AIRBORNE PARTICULATE MATTER SAMPLING

Silva Žužul, Silvije Davila, Jasmina Rinkovec, Ivan Bešlić

Institute for medical research and occupational health, Zagreb, Croatia

szuzul@imi.hr

The selection and analysis of filter content is one of the most important steps before sampling airborne particulate matter. High values of some elements in filter media can influence a method's detection limits, accuracy and quality of analytical results. Quartz microfiber filters are usually used in the standard gravimetric measurement method for the determination of the PM₁₀ or PM_{2.5} mass fraction of suspended particulate matter, although these types of filters have a high content of some elements. This paper presents the results of ED-XRF elemental analysis of 18 different samples of quartz microfiber Whatman QMA filters. The differences in elemental composition between different sheets within one packaging were also tested. The results were compared with those obtained by standard ICP-MS method. Results showed no differences in metal composition between different sheets of quartz microfiber filters. Significant difference between packaging was found for zinc. The ED-XRF method can be used for preliminary qualitative analysis of iron, zinc, nickel, copper, barium and manganese in quartz filter blanks. The obtained values were higher than those with the reference ICP-MS method; therefore, more accurate quantitative analysis on such low concentration levels requires further improvements in the calibration of the method.

USPOREDBA ELEMENTNE ANALIZE TRIJU FRAKCIJA LEBDEĆIH ČESTICA ED-XRF SPEKTROMETRIJOM

Silvije Davila, Ivan Bešlić

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
sdavila@imi.hr

UVOD

Mjerna postaja na Institutu za medicinska istraživanje i medicinu rada (IMI) je dio lokalne mreže za praćenje kvalitete zraka Grada Zagreba. Duži niz godina se na postaji prate dnevne koncentracije lebdećih čestica frakcija PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀. Tijekom 2017. godine praćene su dnevne vrijednosti koncentracija lebdećih čestica aerodinamičkog promjera manjeg od 1 μm (PM₁) i 2,5 μm (PM_{2,5}) gravimetrijskom metodom. Mjerenje koncentracija lebdećih čestica aerodinamičkog promjera manjeg od 10 μm (PM₁₀) gravimetrijskom metodom provedeno je na postaji Bijenik u sjevernom dijelu grada Zagreba. Nakon sakupljanja i određivanja masenih koncentracija vršena je analiza utvrđivanja građe tvari u uzorku korištenjem XRF spektrometrije. U radu će biti prikazani rezultati dobiveni XRF spektrometrijom za elemente željezo (Fe), olovo (Pb), bakar (Cu), mangan (Mn) i titanij (Ti).

MATERIJALI I METODE

Na mjernom mjestu lokalne mreže grada Zagreba smještenom na IMI-u u sjevernom dijelu Grada Zagreba, definiranom kao pozadinska gradska lokacija, sakupljani su dnevni uzorci frakcije lebdećih čestica PM₁ i PM_{2,5}, dok su dnevni uzorci frakcije lebdećih čestica PM₁₀ sakupljani na postaji Bijenik. Uzorci svih frakcija na obje lokacije sakupljali su se na filtre od kvarcnih vlakana promjera 47 mm (promjer mrlje uzorka 42 mm) iz ukupnog volumena od 55,2 m³ (protok 2,3 m³ h⁻¹) uporabom referentnih sakupljača (KleinfILTERGERÄT) LVS3 proizvodnje Sven Leckel Ingenieur Büro i Sven Leckel SEQ47/50-CD. Sakupljanje uzoraka trajalo je od podneva do podneva sljedećeg dana uz ručnu izmjenu filtera na Institutu, dok se na postaji Bijenik koristio sekvencijalni sakupljač s kapacitetom od 14 filtra. Određivanja masenih koncentracija uzoraka provedena su sukladno standardu HRN EN 14907:2006 [1]. Filtri bez uzorka, kao i filtri s prikupljenim uzorkom kondicionirani su prije vaganja na konstantnu temperaturu od (20 ± 1) °C i relativnu vlažnost zraka od (50 ± 5) % tijekom 48 sati, vagani, ponovno kondicionirani uz iste uvjete tijekom sljedećih 24 sata te ponovno vagani.

Odvage uzoraka određivane su uporabom analitičke vage MX5 Mettler Toledo s rezolucijom od 10⁻⁶ g uz izmjerenu proširenu mjernu nesigurnost (k = 2) od 9,2 % na razini vrijednosti granične godišnje koncentracije od 25 μg m⁻³.

Određivanje koncentracija željeza, olova, bakra, mangana i titanija iz sakupljenih uzoraka vršeno je upotrebom XRF spektrometrije. Korišten je ED-XRF (energetsko disperzijski XRF) Panalytical Epsilon 5. Vrijeme uzorkovanja na XRF-u za svaki uzorak je bilo 60 minuta, te je korišteno 10 meta (Al₂O₃, CeO₂, CsI, Ag, Mo, Zr, KBr, Ge, Fe, CaF₂). Detektor korišten u XRF je berilijev (Be) detektor sa snagom korištenja od 100 kV.

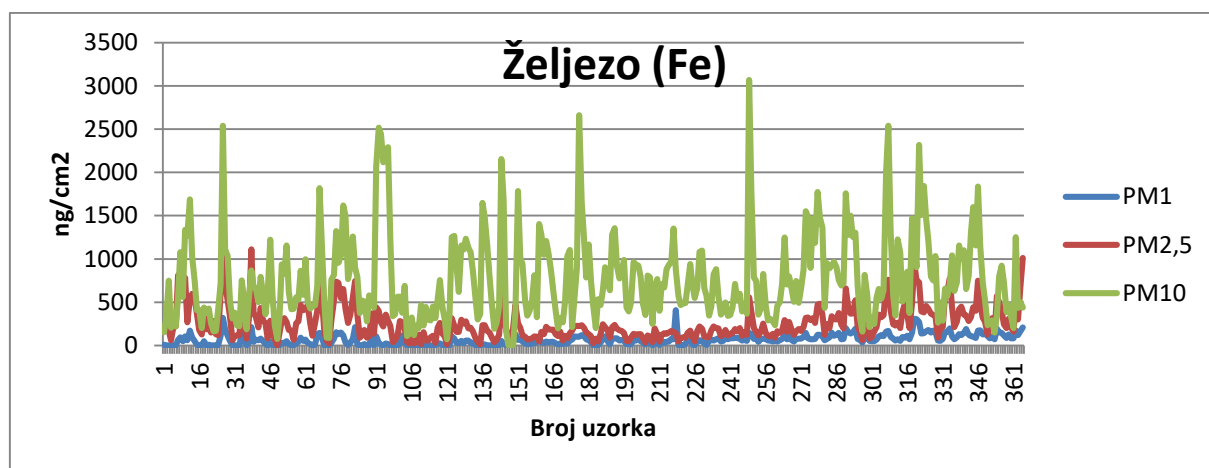
REZULTATI

U Tablici 1 prikazane su srednje godišnje vrijednosti koncentracija onečišćujućih tvari u zraku za 2017. godinu, te najviše izmjerene koncentracije za izmjerene tvari. Rezultati koncentracija prikazane su u jedinicama μg m⁻³.

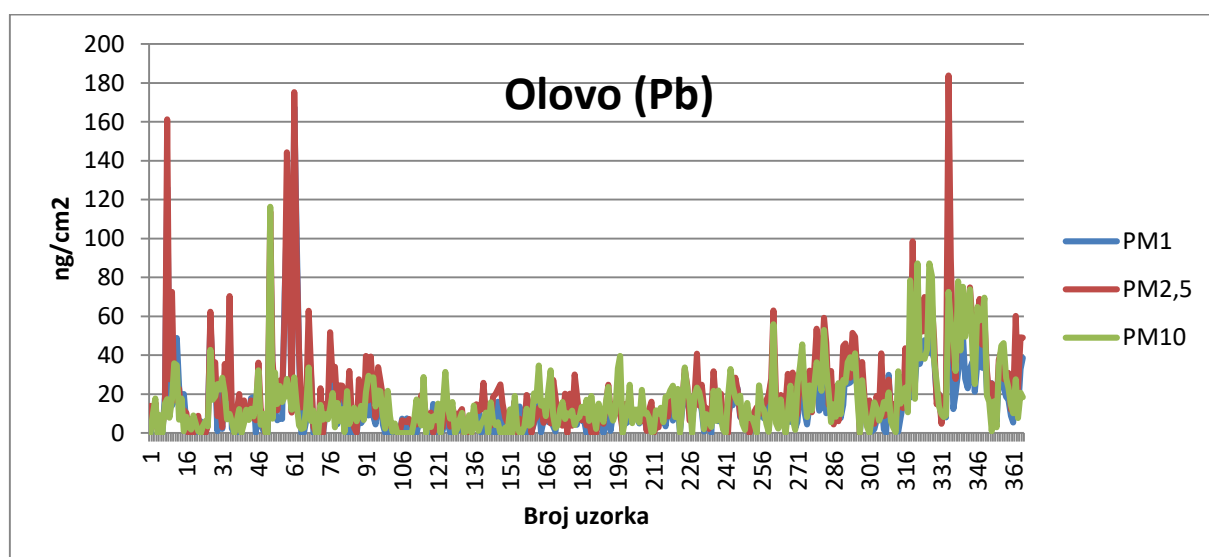
Tablica 1. Godišnja srednja vrijednost, te najveća izmjerena koncentracija onečišćujućih tvari za 2017. godinu po frakcijama

Onečišćujuća tvar	PM1		PM2,5		PM10	
	Max	Godišnja srednja vrijednost	Max	Godišnja srednja vrijednost	Max	Godišnja srednja vrijednost
Željezo (Fe)	0,041	0,0036	0,045	0,0053	0,029	0,0040
Olovo (Pb)	0,025	0,0004	0,045	0,0013	0,013	0,0022
Bakar (Cu)	0,005	0,0006	0,013	0,0016	0,027	0,0048
Mangan (Mn)	0,008	0,0035	0,018	0,0047	0,069	0,0122
Titanij (Ti)	0,101	0,0193	0,003	0,0008	0,004	0,0011

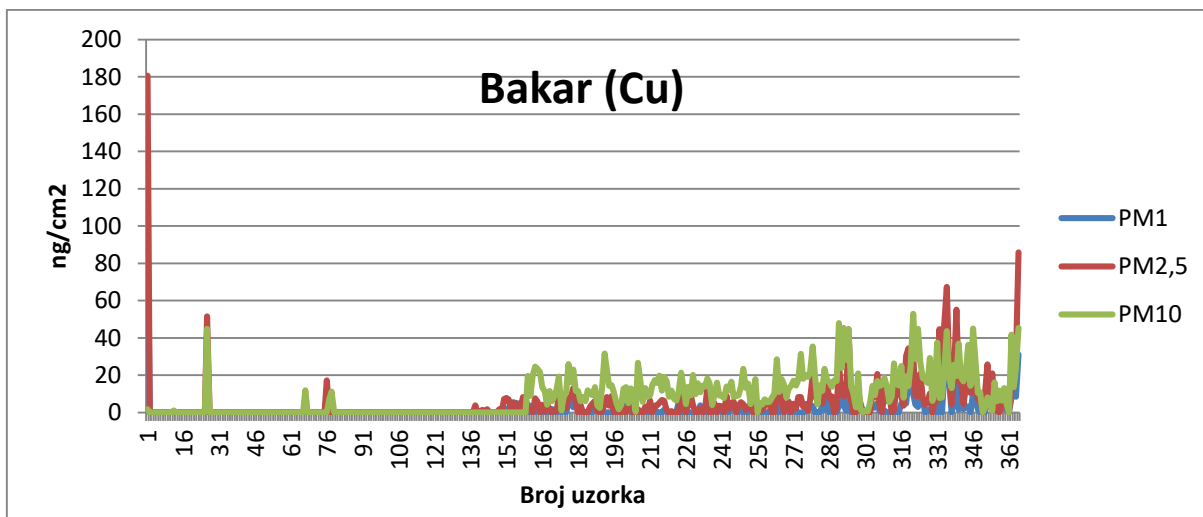
Iz rezultata je vidljivo da granične vrijednosti nisu prekoračene za niti jednu onečišćujuću tvar za koju je definirana godišnja granična vrijednost [2].



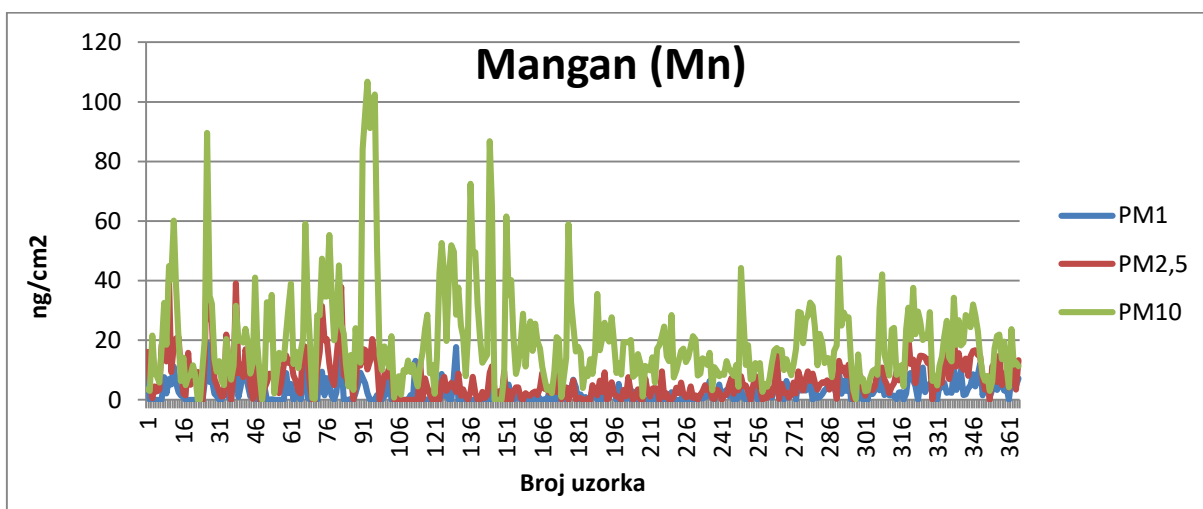
Slika 1. Prikaz koncentracija željeza u lebdećim česticama aerodinamičkog promjera PM1, PM2,5 i PM10 za 2017. godinu



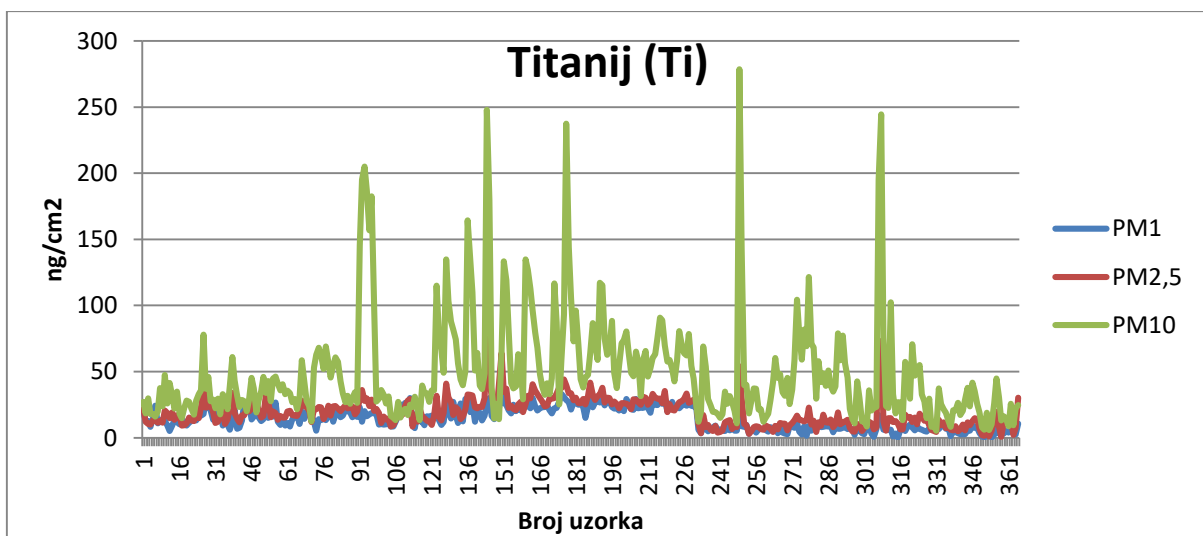
Slika 2. Prikaz koncentracija olova u lebdećim česticama aerodinamičkog promjera PM1, PM2,5 i PM10 za 2017. godinu.



Slika 3. Prikaz koncentracija bakra u lebdećim česticama aerodinamičkog promjera PM1, PM2,5 i PM10 za 2017. godinu



Slika 4. Prikaz koncentracija mangana u lebdećim česticama aerodinamičkog promjera PM1, PM2,5 i PM10 za 2017. godinu.



Slika 5. Prikaz koncentracija titanija u lebdećim česticama aerodinamičkog promjera PM1, PM2,5 i PM10 za 2017. godinu.

Iz grafova koncentracija kod onečišćujućih tvari bakar i olovo vidljive su sezonske oscilacije, dok su kod ostalih onečišćujućih tvari sezonske oscilacije manje izražene. Kod olova porast koncentracija u zimskom periodu vezan je za korištenje pirotehnike i korištenja ugljena u svrhu grijanja. Blagi porast koncentracija mangana je vidljiv u hladnijim mjesecima godine što se može povezati s korištenjem ulja u grijanju. Koncentracija željeza u zraku ima također blagi porast u zimskom periodu u odnosu na ljetni period godine. Razlog tome je povećanje prometa u zimskom periodu godine kao i loženje na kruta goriva u zimskom periodu godine [3,4]. Povećanje koncentracije titanija može biti povezano sa radom elektrane, dok su u frakcijama PM_{2,5} i PM₁ koncentracije titanija povezane s ostacima zemljine kore.

ZAKLJUČAK

Izmjerene vrijednosti koncentracija željeza, olova, bakra, mangana i titanija ne pokazuju povećanje tijekom godine i srednje godišnje vrijednosti su vrlo niske. Izvori onečišćenja zraka su većinom iz goriva za grijanje te za proizvodnju električne energije, dok je izvor onečišćenja zraka za bakar promet. Za većinu elemenata veće su koncentracije u lebdećim česticama frakcija PM₁₀, osim u slučaju olova kod kojeg je u nekoliko slučajeva zabilježena veća koncentracija u lebdećim česticama frakcije PM_{2.5} i PM₁ što ukazuje na jače vezanje olova na manje frakcije lebdećih čestica.

LITERATURA

- [1] HRN EN 14907 2005. Kvaliteta vanjskog zraka – Standardna gravimetrijska metoda za određivanje PM_{2,5} masene frakcije lebdećih čestica (EN 14907:2005).
- [2] Uredba o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku. 2012. NN 130.
- [3] Ojanen C, Pakkanen T, Aurela M, Mäkelä T, Meriläinen J, Hillamo R, Aarnio P, Koskentalo T, Hämeikoski K, Rantanen L, Lappi M. The size distribution of respirable particles, their composition and sources in the Metropolitan of Helsinki, Finland (Hengittävien hiukkasten kokojakauma, koostumus ja lähteet pääkaupunkiseudulla. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja) C 1998:7. Helsinki. (in Finnish).
- [4] Allen JO, Mayo PR, Hughes LS, Salmon LG, Cass GR. Emissions of size-segregated aerosols from on-road vehicles in the Caldecott Tunnel. Environ Sci Technol 2001;35(21):4189-4197.

COMPARISON OF ELEMENT ANALYSIS OF THREE PARTICULATE MATTER FRACTIONS WITH ED-XRF SPECTROMETRY

Silvije Davila, Ivan Bešlić

Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
sdavila@imi.hr

The measuring station at the Institute for Medical Research and Occupational Health (IMROH) is part of the local network for monitoring air quality in Zagreb. For many years at the monitoring station the following daily concentration of particulate matter fractions PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ were collected. During 2017, daily concentrations of particulate matter with an aerodynamic diameter less than 1 micron (PM₁) and less than 2.5 microns (PM_{2.5}) by gravimetric method were monitored. Measurement of daily concentration of particulate matter with an aerodynamic diameter less than 10 microns (PM₁₀) was performed at the Bijenik station in the northern part of Zagreb city. After collecting and determining the mass concentration, analysis of determining the structure of the substance in a sample was carried out using XRF spectrometry. The paper presented the results obtained by XRF spectrometry for the elements iron (Fe), lead (Pb), copper (Cu), manganese (Mn) and titanium (Ti).

The measured values of iron, lead, copper, manganese and titanium concentrations do not show an increase during the year and the mean annual values are very low. Air pollution by these elements is from a transport source for copper and most of the fuel used for heating and production of both thermal and electrical energy. In most elements higher concentrations are in PM₁₀, except in the case of lead in which higher concentrations in several cases is recorded in the PM_{2.5}.

REZULTATI SUDJELOVANJA U MEĐUNARODNOJ USPOREDNOJ STUDIJI ZA BIOGENU KOMPONENTU U TEKUĆIM GORIVIMA

Ines Krajcar Bronić¹, Jasmina Kožar Logar², Romana Krištof^{2,3}, Jovana Nikolov⁴,
Nataša Todorović⁴, Ivana Stojković⁵, Jadranka Barešić¹, Andreja Sironić¹, Damir Borković¹

¹Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska

²Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija

³Zdravstvena fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija

⁴Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija

⁵Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija

krajcar@irb.hr

UVOD

Zahtjev Europske Unije za korištenjem obnovljivih izvora energije (barem 10 % sintetičkog biodizela u matrici dizela iz fosilnih izvora do godine 2020. [1]) inicirao je proizvodnju različitih vrsta dodatnih komponenti iz biogenih materijala, kao i razvoj metoda za točno i pouzdano kvantificiranje udjela biogene komponente u tekućim gorivima. Jedna od brzih, točnih i pouzdanih metoda je određivanje biogene komponente u tekućim gorivima direktnim mjerenjem koncentracije aktivnosti radioaktivnog izotopa ugljika, ¹⁴C, primjenom tekućinske scintilacijske spektrometrije, odnosno korištenja tekućinskih scintilacijskih brojača (LSC, engl. *Liquid Scintillation Counter*). Princip metode se zasniva na različitim aktivnostima ¹⁴C u dvjema komponentama goriva: biogena komponenta odražava aktivnost ¹⁴C suvremene atmosfere, dok u fosilnoj komponenti nema ¹⁴C [2]. Vrlo različite vrste biogenih primjesa u fosilnoj matrici rezultiraju širokim spektrom svojstva gašenja (engl. *quenching*) u smjesama, te gašenje predstavlja glavni problem ove direktne LSC metode. Moguće je primijeniti i druge tehnike određivanja biogene komponente pomoću aktivnosti ¹⁴C (AMS – akceleratoraska masena spektrometrija, LSC uz pripremu benzena ili apsorpcijom CO₂ u apsorpcijsko-scintilacijskom sredstvu) koje nemaju problem gašenja, ali su kompliciranije i skuplje [3,4].

Metoda direktnog određivanja biogene komponente LSC mjerenjem prihvaćena je u svijetu [5-7], a laboratoriji Instituta Ruđer Bošković (IRB) u Zagrebu, Instituta Jožef Stefan (IJS) u Ljubljani i Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu (UNS) razvijaju vlastite metode za određivanje biogene komponente u tekućim gorivima primjenom ¹⁴C metode i mjerenjem LSC brojačem Quantulus 1220 [8-11].

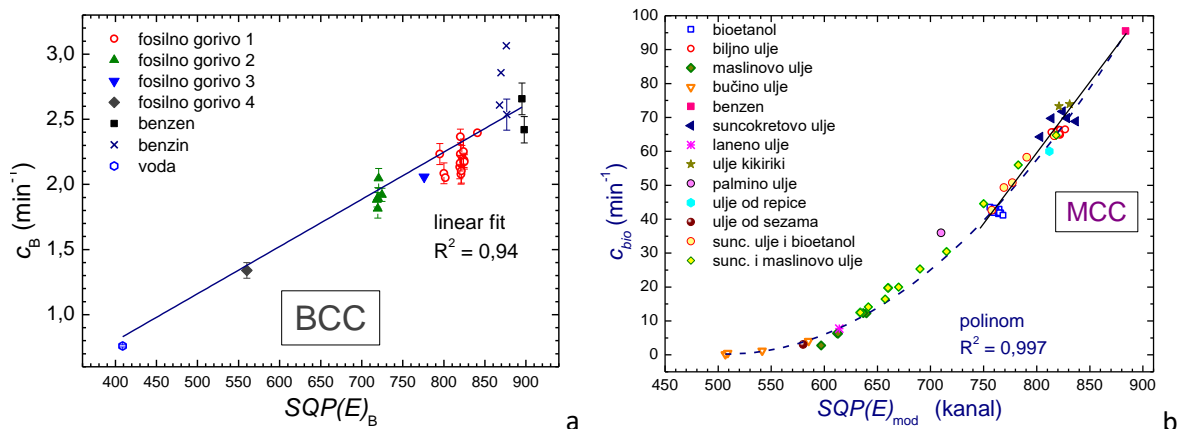
U 2018. godini provedena je međunarodna usporedna studija ILC/2018 „*Content of biocomponent in liquid fuel samples*“ u organizaciji *Institute of Ceramics and Building Materials* (Opole, Poljska). Laboratoriji IRB i IJS su službeno poslali svoje rezultate, a laboratorij UNS-a je svoju metodu provjerio neslužbenim sudjelovanjem. U ovom radu usporedit ćemo rezultate laboratorija IRB, IJS i UNS s očekivanim vrijednostima te procijeniti prednosti i nedostatke metoda razvijenih u ovim laboratorijima. Organizator interkomparacije nije dostavio konačne službene rezultate studije do trenutka pisanja ovog rada, tako da ova preliminarna usporedba ne uključuje uobičajene statističke parametre.

MATERIJALI I METODE

Organizator studije poslao je zainteresiranim laboratorijima 7 uzoraka tekućih goriva za koje je bilo poznato samo to da su dizelski uzorci, a postotak biogene komponente f_{bio} nije bio naveden. Uzorci su se već na prvi pogled razlikovali po boji, od gotovo prozirnog uzorka LL/18/1267 (G u Tablici 1) do tamnožuto obojanog LL/18/0807 (C u Tablici 1), te se očekivalo da će pokazivati različito gašenje i različite efikasnosti mjerenja.

U Laboratoriju za mjerenje niskih radioaktivnosti Instituta Ruđer Bošković (IRB) razvijena je metoda obrade podataka koja se zasniva na kalibracijskim krivuljama za „fosilne“ uzorke koji ne sadrže ^{14}C (BCC – *Background Calibration Curve*) i moderne uzorke (MCC – *Modern Calibration Curve*) (Slika 1). Te krivulje povezuju odbroje i parametar gašenja $SQP(E)^1$. Kao „fosilni“ uzorci koristilo se nekoliko vrsta fosilnih goriva, benzin te benzen bez ^{14}C , kao 100 % biogene tekućine razne vrste ulja za domaćinstvo, bioetanol, benzen priređen iz recentnih biljaka [8]. Metoda ne ovisi o vrsti fosilne matrice ni o vrsti biogene komponente. Granica primjenjivosti metoda je određena parametrom gašenja $SQP(E)$: ako je $SQP(E) < 600$, metoda nije primjenjiva jer je odbroj suvremenog uzorka toliko nizak da se ne može razlikovati od odbroja backgrounda [12,13]. Za područje $600 < SQP(E) < 700$ dobivaju se odstupanja od prave vrijednosti biogene komponente, a kvalitativno se može reći ima li ili ne biogene komponente u danom uzorku, dok je u području $SQP(E) > 700$ metoda primjenjiva i kvantitativno. Za pripremu koktela koristi se 10 mL scintilacijskog koktela UltimaGold F pomiješanog s 10 mL uzorka u staklenim mjernim bočicama (kivetama). Mjerno područje u LSC Quantulus obuhvaća kanale u rasponu 145 – 570, a brojanje se provodi 300 minuta po uzorku, 10 ciklusa po 30 minuta.

Aktivnost ^{14}C triju uzoraka izmjerena je tehnikom akceleratorne masene spektrometrije (AMS) [14,15], a postupak pripreme je prilagođen vrsti uzoraka. Kvarcna cijev sa 4-7 mg uzorka, 500 mg bakrovog(II)-oksida i 100 mg srebrne vune postavljena je na vakuumsku aparaturu, uronjena u tekući dušik, evakuirana do tlaka od 10^{-4} mbar i zataljena. Cijev je preko noći stavljena u peć na $850\text{ }^\circ\text{C}$ čime je ugljik iz goriva preveden u CO_2 . Redukcija CO_2 do grafita je provedena uz cink i željezo kao katalizator. Grafit je prešan u aluminijsku metu te je aktivnost ^{14}C izmjerena u *Center for Applied Isotope Studies University of Georgia* (SAD).



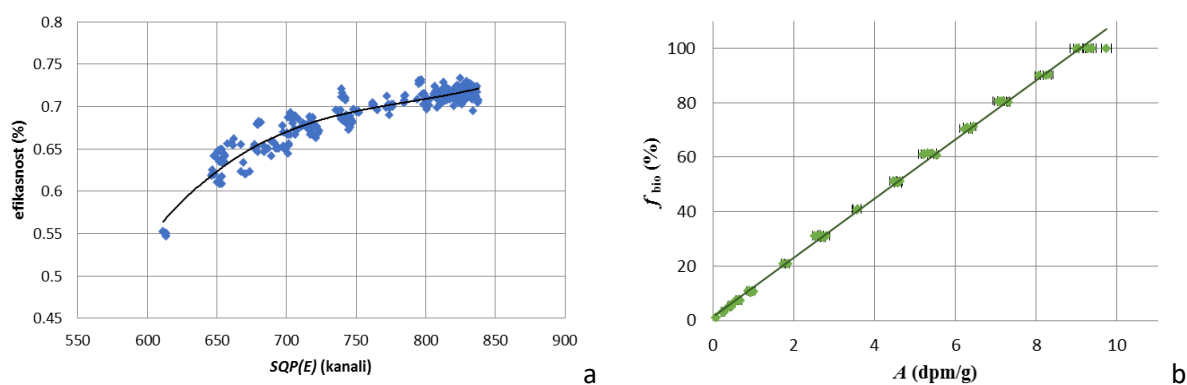
Slika 1. Kalibracijske krivulje za direktnu LSC metodu određivanja biogene komponente u tekućinama (IRB) povezuju odbroje i parametar gašenja $SQP(E)$: a) za uzorke koji ne sadrže ^{14}C (BCC – *Background Calibration Curve*), b) za moderne uzorke, 100 % biogeni (MCC – *Modern Calibration Curve*).

Na Institutu Jožef Stefan (*Laboratorij za tekočinskoscintilacijsko spektrometrijo Odseka za fiziko niskih in srednjih energij*, IJS) su postupci kalibracije brojača i obrade mjernih podataka prilagođeni svojstvima uzoraka. Dvostupanjska metoda [9,10] uključuje 1) određivanje mjerne efikasnosti, koja omogućuje izračunavanje aktivnosti ^{14}C u uzorku, i 2) upotrebu kalibracijske krivulje, koja preslikava aktivnost uzorka u udio biogene komponente. Obojanost uzorka i stupanj gašenja (vrijednost $SQP(E)$) određuju koji postupak kalibracija i obrade mjernih podataka će se primijeniti.

¹ $SQP(E)$ – *Standard Quench Parameter*, parametar gašenja u LSC Quantulus 1220 predstavlja kanal koji dijeli spektar internog standarda ^{152}Eu u omjeru 99:1

Uzorci s vrijednošću $SQP(E) > 700$ mjere se standardnim protokolom za beta izvore viših energija u fiksnom prozoru kanala (150 – 400). Mjerna efikasnost izračunata je prema prilagođenoj krivulji, koja je dobivena mjerenjem komercijalno dostupnog seta od 8 uzoraka (PerkinElmer) različitog stupnja gašenja u istom mjernom području (kanali 150 – 400).

Uzorci s vrijednošću $SQP(E)$ između 550 i 750 mjere se prilagođenim protokolom mjerenja i analiza spektara obavljena je u promjenjivom mjernom prozoru [9,10]. Kao prvi stupanj koristi se krivulja gašenja (Slika 2a), koja je dobivena na osnovi mjerenja različitih biodizela pripremljenih iz 8 različitih rafiniranih i nerafiniranih biljnih ulja i otpadnog jestivog ulja, koji se u svijetu često koriste za proizvodnju biogoriva ili su potencijalni kandidati za proizvodnju biogoriva u Sloveniji. Za izračun u drugom stupnju koristi se odgovarajuća kalibracijska krivulja, koja aktivnost ^{14}C u uzorku pretvara u udio biogene komponente (Slika 2b). Uzorci (10 mL) su u staklenim bočicama pomiješani s 10 mL scintilacijskog koktela Ultima Gold F, a mjerenje je provedeno u trajanju 1000 minuta u 5 ciklusa.



Slika 2. Krivulja gašenja (a) i kalibracijska krivulja (b) u laboratoriju IJS-a.

Uzorci koji pokazuju vrijednost $SQP(E)$ ispod 600 pripremaju se spaljivanjem te se dobiveni CO_2 apsorbira do zasićenja u 10 mL apsorpcijskog sredstva (*CarbonTrap*) uz dodatak 10 mL scintilacijskog koktela *CarbonCount*. Mjerenje se također provodi u trajanju od 1000 min (5 ciklusa po 200 minuta).

Pri rutinskim mjerenjima određuje se efikasnost mjerenja pomoću parametra $SQP(E)$. Radi kontrole rezultata za potrebe ove interkomparacije korišten je i tzv. standardni dodatak: već izmjerenim uzorcima dodana je poznata aktivnost ^{14}C (9754 ± 253 dpm/g u 50 μL) te je ponovno određena efikasnost.

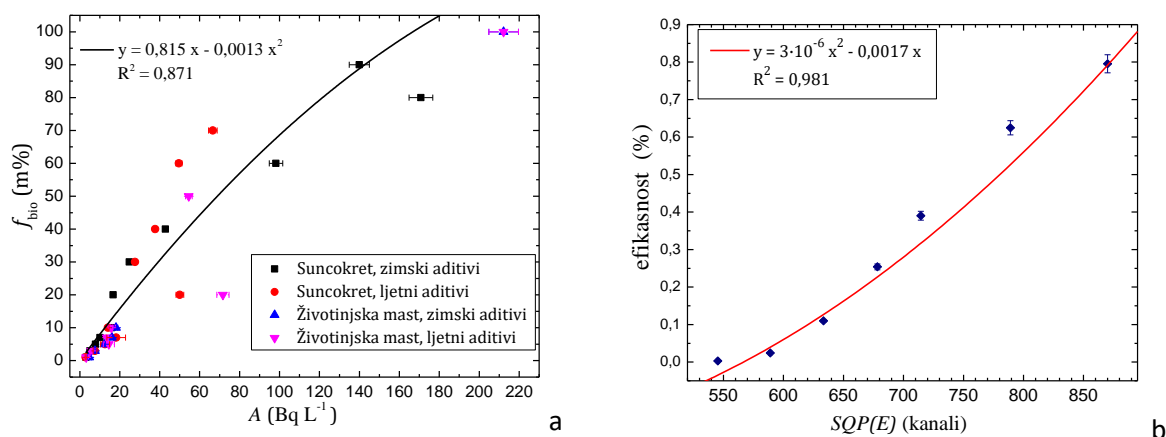
U Laboratoriju za ispitivanje radioaktivnosti uzoraka i doze jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja Departmana za fiziku PMF-a Univerziteta u Novom Sadu (UNS) prilagođena je i optimizirana jednostupanjska i dvostupanjska metoda određivanja udjela biogene komponente [9,11]. Jednostupanjska metoda primjenjiva je isključivo na uzorke s jednakim komponentama kao što su i kalibracijski uzorci jer se udio biogene komponente određuje jednoznačno na osnovu odbroja uzorka, a eventualno gašenje uzoraka se ne uzima u obzir. Budući da uzorci iz interkomparacije ne sadrže nužno iste vrste komponenata kao kalibracijski uzorci, ta metoda u ovom slučaju nije primijenjena.

Dvostupanjska metoda prvo određuje nivo gašenja ($SQP(E)$) u nepoznatom uzorku, na osnovu čega se definira efikasnost detekcije ^{14}C upotrebom kalibracijske krivulje ovisnosti efikasnosti o $SQP(E)$ koja je dobivena pomoću uzoraka biogenih goriva na bazi suncokretova ulja i životinjske masti. Kalibracijska krivulja definira i granicu primjenjivosti metode: za vrijednosti $SQP(E) < 620$ gašenje je prejako te se ne mogu detektirati signali biogene komponente. Drugi korak je računanje koncentracije aktivnosti ^{14}C u uzorku (A) na osnovu odbroja ispitivanog uzorka i dobivene efikasnosti detekcije primjenom krivulje ovisnosti udjela biogene komponente o koncentraciji aktivnosti (Slika 3a), koja je također dobivena

mjerenjem kalibracijskih uzoraka poznatog udjela biogene komponente. Međutim, na ovaj način određena efikasnost može se razlikovati od stvarne efikasnosti za ispitivane uzorke budući da se kemijski sastav kalibracijskih i ispitivanih uzoraka može razlikovati.

Dvostupanjska metoda je stoga unaprijeđena određivanjem efikasnosti detekcije metodom internog standarda [16]. Svaki uzorak iz serije za interkomparaciju je označen poznatom aktivnošću ^{14}C (91900 dpm) te je određena krivulja efikasnosti u ovisnosti o parametru $SQP(E)$, karakteristična za dani niz uzoraka (Slika 3b). Iako je raspon $SQP(E)$ vrijednosti velik, svi ispitivani uzorci leže na krivulji. Dakle, prvi korak u dvostupanjskoj metodi je modificiran kako bi se dobile precizne efikasnosti detekcije, nakon čega se u drugom koraku primjenjuje ovisnost f_{bio} vs. A (Slika 3a). Ovom modifikacijom dobivaju se realistične mjerne efikasnosti i točniji rezultati, a proširuje se i područje primjenjivosti LSC metode na vrijednosti $SQP(E) > 568$.

Mjerno područje u LSC Quantulus obuhvaća kanale u rasponu 150 – 550 u snimljenom beta spektru. Za kalibraciju su korištene smjese FAME (*Fatty Acid Methyl Esters*) dobivene iz suncokretova ulja i iz životinjske masti s komercijalnim fosilnim gorivima s ljetnim i zimskim aditivima. *Background* iznosi 1,034 cpm, što je usrednjena vrijednost mjerenja različitih tipova fosilnih goriva. Uzorci su pripremljeni u polietilenskim bočicama, 10 mL uzorka pomiješano je s 10 mL scintilacijskog koktela Ultima Gold F, te je mjerenje provedeno u trajanju 1000 minuta u 3 ciklusa.



Slika 3. a) Ovisnost udjela biogene komponente f_{bio} o aktivnosti kalibracijskih uzoraka na UNS. b) Metoda internog standarda – ovisnost efikasnosti o parametru $SQP(E)$ za uzorke iz interkomparacije označene poznatom aktivnošću ^{14}C .

REZULTATI

U Tablici 1 prikazane su izmjerene vrijednosti udjela biogene komponente f_{bio} (u %) u sedam uzoraka iz međulaboratorijske usporedbe ILC/2018 zajedno s očekivanim vrijednostima koje je (neslužbeno) dao organizator. Svaki laboratorij je koristio vlastitu direktnu metodu određivanja udjela biogene komponente mjerenjem u tekućinskom scintilacijskom brojaču, kao što je opisano u prošlom poglavlju. Budući da su uzorci bili različitih boja, pokazali su i različite vrijednosti parametra gašenja $SQP(E)$. U Tablici 1 dane su vrijednosti $SQP(E)$ izmjerene u laboratoriju IRB-a, a slične vrijednosti izmjerene su i u laboratorijima IJS-a i UNS-a. Prema očekivanju, najviše vrijednosti $SQP(E)$ izmjerene su za gotovo proziran uzorak G, a najniže za najtamniji uzorak C. U sva tri laboratorija vrijednost $SQP(E)$ za uzorak C bila je ispod granica primjenjivosti metoda te se nisu mogli javiti rezultati mjerenja direktnom metodom LSC. Udio biogene komponente u tom uzorku određen je metodom AMS u laboratoriju IRB-a, odnosno apsorpcijom CO_2 u laboratoriju IJS-a. Svi rezultati, bez obzira na metodu kojom su određeni, prikazani su i na Slici 4.

Tablica 1. Izmjereni udjeli biogene komponente, f_{bio} , i očekivana vrijednost $f_{\text{bio-exp}}$ za uzorke iz međunarodne međulaboratorijske usporedbe ILC/2018. Proširene mjerne nesigurnosti su dane s faktorom pokrivanja $k = 2$. Rezultati koji su javljeni organizatorima dani su podebljanim brojkama, a svi su određeni direktnom LSC metodom osim za uzorak C na IJS-u. Dodatno je laboratorij IRB-a tri uzorka izmjerio metodom AMS. Za laboratorij UNS-a dane su vrijednosti f_{bio} određene dvostupanjskom metodom uz kalibraciju modernim biogenim uzorcima i uz interni standard. Vrijednosti parametra $SQP(E)$ određene na IRB-u dane su za ilustraciju.

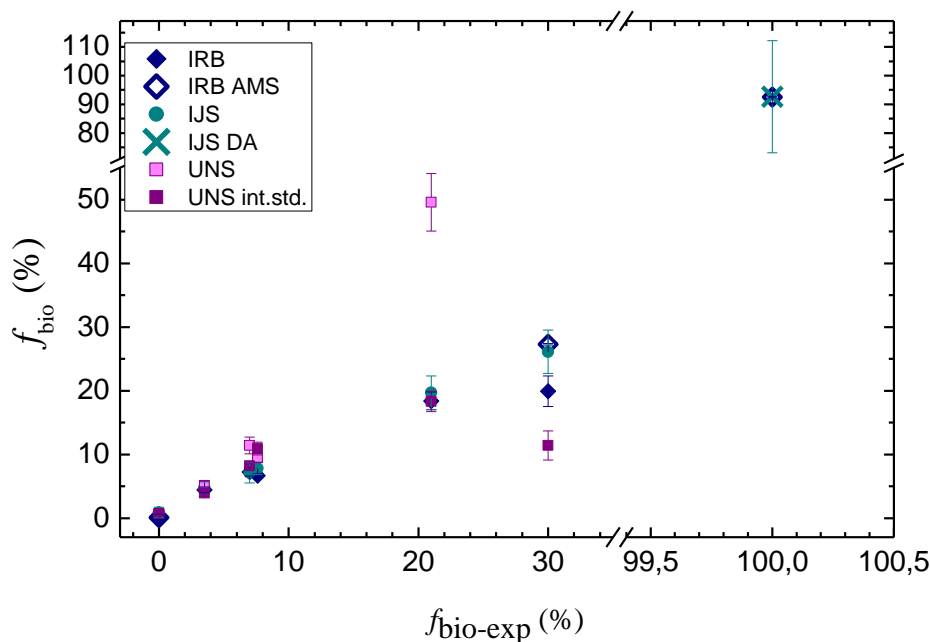
Oznaka uzorka i $SQP(E)_{\text{IRB}}$	Naziv uzorka	očekivana vrijednost $f_{\text{bio-exp}}$ [%]	Rezultat IRB $f_{\text{bio-IRB}}$ [%]	Rezultat IJS $f_{\text{bio-IJS}}$ [%]	Rezultat UNS $f_{\text{bio-UNS}}$ [%]
A 804	LL/18/0805	0,0	0,34 ± 0,25 0,09 ± 0,01 ^a	0,87 ± 0,81	0,70 ± 0,28 ^c 0,64 ± 0,20 ^d
B 724	LL/18/0806	7,0	7,23 ± 0,60	7,09 ± 1,59	11,4 ± 1,3 ^c 8,2 ± 0,4 ^d
C 581	LL/18/0807	100,0	-- 92,58 ± 0,25 ^a	-- 92,6 ± 19,5^b	-- --
D 758	LL/18/1264	3,5	4,44 ± 0,43	4,69 ± 0,98	5,1 ± 0,7 ^c 3,94 ± 0,24 ^d
E 609	LL/18/1265	30,0	19,9 ± 2,4 27,3 ± 0,1 ^a	26,07 ± 3,40	-- 11,4 ± 2,3 ^d
F 648	LL/18/1266	21,0	18,4 ± 1,4	19,71 ± 2,63	49,6 ± 4,5 ^c 18,3 ± 1,6 ^d
G 872	LL/18/1267	7,6	6,64 ± 0,30	7,79 ± 0,93	9,5 ± 0,8 ^c 10,9 ± 1,0 ^d

a – AMS

b – apsorpcija CO₂

c – dvostupanjska metoda, kalibracija biogenim uljima

d – dvostupanjska metoda s internim standardom, Slika 3b



Slika 4. Usporedba svih rezultata udjela biogene komponente f_{bio} s očekivanim vrijednostima $f_{\text{bio-exp}}$. Napomena: Obratiti pozornost na prekid skale na osima.

DISKUSIJA

Nijedan od tri laboratorija nije javio rezultat određen direktnom LSC metodom za uzorak C budući da je on pokazao jako gašenje i vrijednost parametra $SQP(E)$ bila je ispod granice primjenjivosti metode u sva tri laboratorija. U laboratoriju IRB-a izmjeren je udio biogene komponente tehnikom AMS, a u laboratoriju IJS-a korištena je tehnika apsorpcije CO_2 . Te dvije tehnike dale su identičan rezultat (Tablica 1), uz različite mjerne nesigurnosti koje su posljedica primijenjenih tehnika.

Za uzorak E izmjerena je vrijednost $SQP(E)$ vrlo blizu granice primjenjivosti metode na IRB-u, ali u području gdje se mogu očekivati veća odstupanja od prave vrijednosti [13], dakle, kvalitativno je određena prisutnost biogene komponente, ali kvantitativno rezultat odstupa od očekivanja vrijednosti. Rezultati f_{bio} dobiveni tehnikom AMS za uzorak E, kao i za uzorak C, bliski su očekivanim vrijednostima kao i vrijednostima f_{bio} određenima u laboratoriju IJS-a.

Ostali rezultati f_{bio} u laboratoriju IRB-a ne odstupaju od očekivanih vrijednosti čime je potvrđeno da metoda obrade mjernih rezultata primjenom kalibracijskih krivulja BCC i MCC (Slika 1) daje jednako dobre rezultate kao i drugačije tehnike u laboratorijima IJS-a i UNS-a. Osim što je potvrđena granica neprimjenjivosti metode za vrijednosti parametra $SQP(E) < 600$, potvrđeno je da za vrijednosti $SQP(E)$ iznad te granice pa do $SQP(E) \sim 650$ metoda daje kvalitativno prihvatljive rezultate, ali ne i dovoljno točne, dok su za $SQP(E) > 700$ rezultati za f_{bio} i kvantitativno prihvatljivi.

Prihvatljivi rezultati laboratorija IJS-a za sve uzorke (Tablica 1) potvrdili su da je pristup različitim postupcima pripreme, kalibracije i obrade mjernih podataka zasnovan na vrijednosti parametra $SQP(E)$ opravdan i razuman. Naime, ovi uzorci su pokrivali širok spektar gašenja od najmanjeg (najviša vrijednost $SQP(E)$, uzorak G), pri kojem se mogla koristiti metoda sa standardnim protokolom za visokoenergijske beta izvore, do uzorka C s najvećim gašenjem (najniži $SQP(E)$) pri kojem se primijenila metoda apsorpcije CO_2 . Problem niskih vrijednosti $SQP(E)$ mogao bi se ublažiti ili riješiti miješanjem jako gašenih uzoraka s otapalom visoke vrijednosti $SQP(E)$ i poznate aktivnosti ^{14}C . Pokusi s jako gašenim uzorcima na IJS ukazuju na to da bi ovakvo razrijeđenje omogućilo primjenu direktne metode LSC čak i za takve uzorke. Testovi miješanja dviju organskih biogenih tekućina različitih vrijednosti $SQP(E)$ (suncokretovo ulje i bioetanol, suncokretovo i maslinovo ulje) kao i miješanja biogenih i „fosilnih“ tekućina provedeni u laboratoriju IRB-a pokazali su da biogene smjese i dalje leže na kalibracijskoj krivulji MCC (Slika 1b), odnosno da se u smjesama može odrediti f_{bio} sa zadovoljavajućom točnošću [8].

Rezultati laboratorija IJS-a su usporedivi s očekivanom vrijednošću kao i rezultatima drugih laboratorija. Međutim, relativno visoke mjerne nesigurnosti uz rezultat koji je blizak očekivanoj (pravoj) vrijednosti ukazuju na precijenjenu mjernu nesigurnost te na potrebu ponovne procjene različitih doprinosa ukupnoj mjernoj nesigurnosti što će se i provjeriti u okviru dodatnih validacijskih mjerenja metode koja je već akreditirana prema standardu ISO 17025. Time će se i poboljšati granice detekcije pojedinih pristupa.

Rezultat UNS-a određen primjenom standardne dvostupanjske metode za uzorak F, koji pokazuje jako gašenje, $SQP(E)_{UNS} = 634$, dakle blizu donje granice $SQP(E)$ primjenjivosti metode, nema zadovoljavajuću točnost. Točnost i preciznost su zadovoljavajuće ukoliko je vrijednost $SQP(E)$ za oko 50 (kanala) iznad vrijednosti $SQP(E)$ koja određuje donju granicu primjenjivosti metode. Primjenom modificirane dvostupanjske metode, znatno su poboljšane točnost i preciznost rezultata (uzorak F). Metodom internog standarda snižena je donja granica $SQP(E)$ primjenjivosti metode, što je omogućilo određivanje prisutnosti biogene komponente i u jače gašenom uzorku E ($SQP(E)_{UNS} = 592$) iako rezultat za f_{bio} nema zadovoljavajuću točnost. Međutim, ovakav pristup (interni standard) onemogućava ponovno mjerenje uzoraka, komplicira metodu mjerenja i zahtijeva dodatno brojačko vrijeme.

Zanimljivo je i da je u uzorku A sa 0% biogene komponente na UNS-u izmjeren odbroj iznad srednje vrijednosti backgrounda, te je određeno da uzorak sadrži 0,7 % biogene komponente. Ovaj rezultat je posljedica odabira vrijednosti backgrounda kao srednje vrijednosti odbroja različitih vrsta fosilnih goriva (nafte, petrol-etera, destilirane vode, benzina, dizela bez aditiva, dizela s koktelom ljetnih aditiva, dizela s koktelom zimskih aditiva, itd.). Iz ovoga se može zaključiti da je u sastavu uzorka A vrsta fosilnog goriva s nešto višim odbrojem od prosječne vrijednosti backgrounda izmjerene u laboratoriju UNS-a.

I ostala dva laboratorija odredila su određeni postotak f_{bio} u uzorku A za kojeg se očekuje da je fosilni uzorak (najbliži toj vrijednosti je rezultat dobiven tehnikom AMS). To ukazuje na vjerojatno prenizak odbroj backgrounda fosilnog goriva korišten u izračunima.

Za detaljniju statističku analizu točnosti i preciznosti prikazanih rezultata f_{bio} u dizelskim gorivima iz interkomparacije ILC/2018 treba pričekati službene rezultate ovog ispitivanja.

ZAKLJUČAK

Iako se u nekim detaljima metode određivanja udjela biogene komponente u tekućim gorivima direktnim mjerenjem u LSC primijenjene na tri institucije međusobno razlikuju, preliminarni rezultati ove interkomparacije pokazuju da su sve tri metode pogodne za tu svrhu, uz poštivanje granica primjenjivosti koje su određene gašenjem zbog obojanih uzoraka. Kod uzorka s najvećim gašenjem, koji je uzrokovao probleme u sva tri laboratorija, pokazala se potreba primjene drugih tehnika u kojima se uzorak kemijski obrađuje, tj. spaljuje (AMS, apsorpcija CO₂). Međutim, takvi uzorci su rijetki na tržištu pa se ne treba pribojavati neprimjenjivosti direktnih LSC metoda koje su implementirane u ova tri laboratorija. Laboratoriji koji imaju razvijene neke druge tehnike mjerenja aktivnosti ¹⁴C mogu odrediti biogenu komponentu i primjenom tih tehnika, koje su znatno složenije i skuplje.

Zahvala

Rad je izrađen uz financijsku potporu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije putem projekata br. III43002 i OI171002.

LITERATURA

- [1] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources and Amending and Subsequently Repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, 2009.
- [2] ASTM, ASTM D6866-12 Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis, 2012.
- [3] Varga T, Major I, Janovics R, Kurucz J, Veres M, Jull AJT, Peter M, Molnar M. High-precision biogenic fraction analyses of liquid fuels by ¹⁴C AMS at Hekal. Radiocarbon 2018;60/5:1317-1325.
- [4] Haverly MR, Fenwick SR, Patterson FPK, Slade DA. Biobased carbon content quantification through AMS radiocarbon analysis of liquid fuels. Fuel 2019;237:1108-1111.
- [5] Dijs I, van der Windt E, Kaihola L, van der Borg K. Quantitative determination by ¹⁴C analysis of the biological component in fuels. Radiocarbon 2006;48:315-23.
- [6] Idoeta R, Perez E, Herranz, Legarda F. Characteristic parameters in the measurement of ¹⁴C of biobased diesel fuels by liquid scintillation. Appl Radiat isotop 2014;93:110-113.
- [7] Doll CG, Wright CW, Morley AM, Wright BW. Analysis of fuel using the Direct LSC method determination of bio-originated fuel in the presence of quenching. Appl Radiat isotop 2017, 122:215-221.

- [8] Krajcar Bronić I, Barešić J, Horvatinčić N, Sironić A. Determination of biogenic component in liquid fuels by the ^{14}C direct LSC method by using quenching properties of modern liquids for calibration. *Radiat Phys Chem* 2017;137:248–253.
- [9] Krištof R. Quantification of biocomponents in fuels by ^{14}C . Dissertation, University of Nova Gorica Graduate School. 2015.
- [10] Krištof R, Kožar Logar J. Direct LSC method for measurements of biofuels in fuel. *Talanta* 2013;111:183–8.
- [11] Stojković I, Nikolov J, Tomić M, Mičić M, Todorović N. Biogenic fraction determination in fuels – Optimal parameters survey. *Fuel* 2017;191:330-338.
- [12] Krajcar Bronić I, Barešić J, Horvatinčić N, Krištof R, Kožar-Logar J. Nova tehnika određivanja udjela biogene komponente u tekućim gorivima metodom ^{14}C . U: Petrincec B, Bituh T, Milić M, Kopjar N, ur. Zbornik radova Desetog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja; 15-17. travnja 2015., Šibenik; Zagreb, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2015. str. 360-365.
- [13] Nikolov J, Krajcar Bronić I, Stojković I, Todorović N, Barešić J, Krmpotić M, Tomić M. Comparison of two different methods for determination of biogenic fraction in liquid fuels. U: Radolić V, Poje Sovilj M, Krajcar Bronić, I, ur. Zbornik radova Jedanaestog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja; 5-7. travnja 2017., Osijek; Zagreb, Hrvatska: 2017. str. 206-211.
- [14] Krajcar Bronić I, Horvatinčić N, Sironić A, Obelić B, Barešić J, Felja I. A new graphite preparation line for AMS ^{14}C dating in the Zagreb radiocarbon laboratory. *Nucl Instrum Meth B* 2010;268:943–946.
- [15] Sironić A, Krajcar Bronić I, Horvatinčić N, Barešić J, Obelić B, Felja I. Status report on the Zagreb Radiocarbon Laboratory – AMS and LSC results of VIRI intercomparison samples. *Nucl Instrum Meth B* 2013;294:185–188.
- [16] Varlam C, Ionita G, Stefanescu I, Steflea D. Comparative study between external standard method and internal standard method for low-level tritium measurements. In: *International Conference Nuclear Energy in Central Europe 2001, Slovenia*. 2001.

RESULTS OF PARTICIPATION IN THE INTERNATIONAL INTERCOMPARISON STUDY FOR BIOGENIC COMPONENT IN LIQUID FUELS

Ines Krajcar Bronić¹, Jasmina Kožar Logar², Romana Krištof^{2,3}, Jovana Nikolov⁴, Nataša Todorović⁴, Ivana Stojković⁵, Jadranka Barešić¹, Andreja Sironić¹, Damir Borković¹

¹Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

²Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia

³Faculty of Health Sciences, University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia

⁴University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia

⁵University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia

krajcar@irb.hr

Direct method by measurement ^{14}C activity of liquid fuel samples in liquid scintillation counter (the „direct LSC method“) has been recognized as a powerful and reliable method of determination of biogenic component in liquid fuels (f_{bio}). Laboratories of the Ruđer Bošković Institute (RBI) in Zagreb, Croatia, the Jožef Stefan Institute (JSI) in Ljubljana, Slovenia, and at the Faculty of Science of the University of Novi Sad (UNS), in Novi Sad, Serbia, have been implemented and optimized slightly different methods. The 3 laboratories participated in the international intercomparison study ILC/2018 „Content of biocomponent in liquid fuel samples“, which was organized in 2018 by the Institute of Ceramics and Building Materials (Opole, Poland). Here we present the f_{bio} results obtained by these 3 laboratories and compare the results with the expected $f_{\text{bio-exp}}$ values since at the moment of preparing this work the official results of the study have not been available.

Laboratories obtained 7 samples of different colours and only the basic composition (diesel type of fuel) was known. The results for samples with the $SQP(E)$ values well above the limits of applicability of the direct LSC method were satisfying in all three laboratories. Qualitatively acceptable, but quantitatively unacceptable results, were obtained for a sample in the $SQP(E)$ region of limited applicability. For one of the samples the quenching was high, and the quenching parameter $SQP(E)$ was below the limits of applicability of the direct LSC method in all 3 laboratories.

The obtained results will be used for further validation and optimization of the developed direct LSC methods, especially for reconsidering the uncertainty budget and the background level.

Although there are some differences in details of the applied direct LSC methods in the laboratories of RBI, JSI and UNS, the presented intercomparison results show that all the methods are suitable for determination of the f_{bio} in liquid fuels, providing the correctly defined limits of applicability for highly quenched samples. Laboratories that have possibility of applying a different ^{14}C measurement technique can satisfactorily determine f_{bio} also in highly quenched samples, but these techniques are more complicated and more expensive.

INTERLABORATORIJSKE USPOREDBE AKTIVNOSTI ORGANSKI VEZANOG TRICIJA (OBT)

Andreja Sironić¹, Ines Krajcar Bronić¹, Jasmina Kožar Logar², Romana Krištof^{2,3}

¹Institut Ruđer Bošković, Zagreb

²Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija

³Zdravstvena fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija

asironic@irb.hr

UVOD

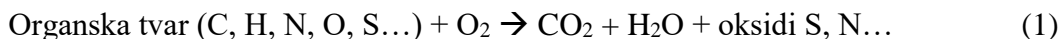
Iako analize organski vezanog tricija (engl. *organically bound tritium*, OBT) u biološkim uzorcima iz okoliša sve više dobivaju na važnosti, mehanizmi unosa tricija u biološki materijal još uvijek nisu dovoljno poznati [1]. Tricij se veže u organski materijal putem plinovitih ili tekućih ispusta, te nadalje unosom hrane. OBT postoji u obliku izmjenjivog (engl. *exchangeable* E-OBT) i neizmjenjivog, čvrsto vezanog u molekulu (engl. *non-exchangeable*, NE-OBT). E-OBT je vodikovim vezama vezan za kisikove, sumporove ili dušikove atome u organskoj molekuli i brzo se može izmijeniti s vodikom/tricijem u slobodnim molekulama vode te mu je koncentracija promjenjiva, dok koncentracija NE-OBT u organskoj tvari ima postojanu vrijednost [1-3]. Mjerenje koncentracije OBT u biološkom materijalu nadograđuje mjerenja koncentracije aktivnosti tricija u vodama u okolišu jer pokazuje znatno dulje vrijeme zadržavanja od tricirane vode, a što u konačnici ima utjecaj na procjenu primljene doze [4]. Doza primljena unosom OBT-a može biti dva puta veća od one primljene putem tricirane vode ili plinovitog ispusta tricija [3,4]. Dugo zadržavanje tricija u OBT-u može biti dobar alat za monitoring ispusta iz nuklearnih elektrana [5,6]. Drugi potencijalni izvori OBT-a su tricirane molekule koje se koriste za istraživanje u medicini i dijagnostici te luminiscentne boje (za prometnice, tunele, zrakoplovne piste, svjetleće brojeve i kazaljke na satovima i priborima za mjerenje) [2]. Budući da je istraživanje OBT-a još u povojima, potrebno je, osim implementacije i validacije tehnika određivanja aktivnosti OBT-a, provesti i interlaboratorijske usporedbe [7].

2017. godine bila je organizirana 4. interkomparacija za OBT na uzorku osušene trave. Trava je uzorkovana u okolici Nuklearne elektrane Cernavoda u Rumunjskoj, osušena je i homogenizirana, te samljevena. 2018. godine organizirana je 5. interkomparacija na uzorku ribe (*Micropterus salmoides*) iz okolice Nuklearne elektrane Chalk River u Kanadi. Riba je liofilizirana, samljevena i homogenizirana. U oba slučaja se nije diskriminiralo između frakcija E-OBT i NE-OBT, odnosno, nije trebalo posebno provoditi pretpripremu uzorka. Zahtjev je bio da svaki laboratorij pripremu uzorka i mjerenje ponovi pet puta.

Oba uzorka analizirana su na Institutu Jožef Stefan (IJS), Slovenija i na Institutu Ruđer Bošković (IRB), Hrvatska. Metodu analize OBT-a u Laboratoriju za mjerenje niskih radioaktivnosti IRB-a tek treba optimizirati i validirati te su ove interkomparacije svojevrsni pokazatelj napretka. Laboratorij za tekočinskoscintilacijsko spektrometriju na Odjelu za fiziku niskih i srednjih energija F-2 (LSC laboratorij IJS) priprema metodu OBT-a za akreditaciju prema ISO 17025 standardu. Cilj ovog rada je usporediti dobivene rezultate s usuglašenim vrijednostima u svrhu utvrđivanja sposobnosti laboratorija za određivanje koncentracije aktivnosti OBT-a (A(OBT)) u biološkom materijalu.

MATERIJALI I METODE

Prema preporuci organizatora uzorci trave i ribe nisu bili posebno pripremani prije analize, te se pristupilo spaljivanju uzorka pri čemu se sakupljao produkt, voda. A(OBT) se određuje u vodi koja je produkt reakcije spaljivanja organske tvari prema kemijskoj reakciji:



Na IJS-u se uzorak priprema prema postupku [8]. Uzorak se spaljuje u tzv. Parr-ovoj bombi (Parr 1121 *large capacity oxygen vessel*). Spaljivanje se ponavlja nekoliko puta dok konačna masa dobivene vode ne dosegne 8 g. Za određivanje mase uzorka potrebne za spaljivanje mora se uzeti u obzir kalorična vrijednost uzorka (kCal), postotak vodika u uzorku i masa dobivene vode. Dobivena voda se neutralizira pomoću Na₂O₂ (dodatkom do najviše 0,25 g na ~8 g vode) te se uklanjaju moguće otopljene organske molekule dodatkom KMnO₄ prema ISO 9698 [9]. Pri tome uzorak postaje intenzivno ljubičaste boje. Kako obojenje gasi signal uzorka u brojaču (što se očituje u parametru gašenja, engl. *Standard Quenching Parameter, SQP(E)*), potrebno je uzorak pročistiti. Destilacija je zamijenjena vakuumskom liofilizacijom (*freeze-drying*) pri maksimalnom tlaku od 10⁻⁶ bar.

Prema uputi organizatora interkomparacija pripremljeni su uzorci trave i ribe u pet ponavljanja. Za svaku pripremu trave upotrijebljeno je po 20 g uzorka, podijeljenog na dva jednaka dijela od po 10 g, a u slučaju uzorka ribe početne mase i broj spaljivanja bili su različiti za svaku pripremu. Ukupnog uzorka je bilo premalo da se dobije po 8 g vode u pet priprema te su neke pripreme odrađene s manjom masom vode. U tom slučaju su se uzorci vode nadopunjavali vodom bez tricija do 8 g.

Na IRB-u se koristi vakuumaska aparatura na kojoj se rutinski priprema CO₂ za analizu aktivnosti ¹⁴C organskih uzorka. Uzorak se stavlja u kvarcne cijevi koje se izvana zagrijavaju plamenicima kroz koje se prvo propušta struja dušika (piroliza, iz uzorka se destiliraju smole), a zatim struja kisika za potpunu oksidaciju preostalog piroliziranog materijala. Na izlazu iz kvarcne cijevi dovodi se dodatna struja kisika uz zagrijavanje u peći na 600 °C za oksidaciju destiliranih smola i plinova i nakon pirolize i nakon oksidacije piroliziranog materijala. Voda se sakuplja nakon peći u klopici uronjenoj u etanol ohlađen na -80 °C. Dobiveni CO₂ se sakuplja u sljedećoj klopici uronjenoj u tekući dušik. Prilikom reakcije u struji dušika/kisika, može se dogoditi da se pare smola iz uzorka koje nisu potpuno oksidirane u peći zadrže u klopici za vodu što daje obojanu vodu. U takvom slučaju se u vodu dodaje KMnO₄ da se oksidiraju preostale organske molekule te se voda destilira. Kako bi se izbjeglo obojenje vode, uzorak se može prethodno karbonizirati u zasebnoj peći, zagrijavanjem na 600 °C, 15 min uz evakuaciju, nakon čega se oksidira u opisanoj vakuumskoj aparaturi za dobivanje CO₂.

Iz uzorka trave je voda za OBT analizu pripremljena pet puta. Jedna od priprema je uključivala oksidaciju karboniziranog alikvota uzorka trave od 20 g. Dobiveno je 1,6 g vode. Ostale pripreme su rađene na nekarboniziranom materijalu i tada je odvajana frakcija vode dobivena reakcijom u struji dušika od one dobivene reakcijom u struji kisika. Prva frakcija vode je uvijek bila obojana, dok je druga frakcija bila obojana samo u jednoj od tri provedene pripreme. U prosjeku je od 20 g alikvota trave dobiveno 5,5 ml vode prve frakcije i 2 ml druge frakcije. Uzorci voda su nadopunjeni do 8 ml vodom koja ne sadrži tricij. Uzorak ribe je pripremljen u pet navrata. Budući da je prilikom pripreme trave volumen pojedinih frakcija voda zahtijevao relativno veliku nadopunu, odlučeno je da se ove frakcije ne mjere odvojeno. Od u prosjeku 10 g ribe dobiveno je ~6 g vode, uglavnom žuto obojene, koja je tretirana KMnO₄ i destilirana.

U vodu dobivenu spaljivanjem dodaje se scintilacijski koktel te se koncentracija aktivnosti ³H mjeri brojanjem tekućinskim scintilacijskim brojačem (engl. *Liquid Scintillation Counter, LSC*). Oba laboratorija koriste LSC uređaj Ultra-low-level LSC Quantulus 1220 Wallac Oy (PerkinElmer) za određivanje koncentracije aktivnosti ³H.

Na IJS se mjerenja odvijaju u pet ciklusa po 200 minuta, s ukupnim vremenom 1000 minuta po uzorku. Za izračun se koristi spektar u fiksnoj prozoru između kanala 5 i 200. Temperatura u mjernoj komori LSC-a je konstantna i iznosi 18 °C. Krajnji rezultat je srednja vrijednost dvaju mjerenja. U jednom izračunu se za efikasnost brojača koristi odnos broja odbroja i broja raspada u uzorku poznate aktivnosti (27,9 %), a u drugom se efikasnost

određuje preko krivulje gašenja i izmjerene vrijednosti $SQP(E)$ (dobivene vrijednosti kreću se između 27,7 i 28,3 %).

Mjerenje koncentracije aktivnosti na IRB-u se uobičajeno provodi u 8 ciklusa po 50 minuta, odnosno 400 minuta po uzorku. Uz nepoznate uzorke uvijek se priprema i voda bez tricija (*background*) i referentni standard poznate aktivnosti. Optimizacijom mjernih uvjeta određen je raspon kanala 25 – 253 kao područje najboljih mjernih karakteristika [10] u kojem se nalazi 92 % tricijeva spektra i 82 % spektra *backgrounda*, a efikasnost mjerenja je 23,6 %.

U oba laboratorija se koriste plastične (HDPE – *High Density Polyethylene Vial*) mjerne bočice (kivete) od 20 ml, uz omjer uzorka i scintilacijskog koktela 8 ml :12 ml. Na IJS je korišten scintilacijski koktel HiSafe3, a na IRB-u UltimaGold LLT.

Statistički parametri koji su korišteni za ocjenjivanje prihvatljivosti rezultata su z i ζ (zeta) definirani kao:

$$z = \frac{(x_i - x_{pt})}{\sigma(x_{pt})} \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{(x_i - x_{pt})}{\sqrt{u^2(x_i) + u^2(x_{pt})}} \quad (3)$$

gdje je x_i izmjerena vrijednost laboratorija, x_{pt} usuglašena vrijednost, $\sigma(x_{pt})$ standardna devijacija postavljena od strane organizatora, $u(x_i)$ izmjerena mjerna nesigurnost laboratorija, a $u(x_{pt})$ izmjerena mjerna nesigurnost organizatora koja je u ovom slučaju izjednačena s $\sigma(x_{pt})$. Parametri z i ζ pokazuju zadovoljavajuće rezultate ako im je apsolutna vrijednost manja od 2, ako je između 2 i 3, rezultat je upozoravajući, a ako je veća od 3, rezultat nije prihvatljiv.

REZULTATI I DISKUSIJA

Prema preporuci organizatora, aktivnost je izražena kao aktivnost tricija u vodi dobivenoj spaljivanjem u Bq/l vode te prema masi suhog uzorka u Bq/kg (uz postotak vodika od $(5,67 \pm 0,01)$ % za uzorak trave i $(7,66 \pm 0,01)$ % za uzorak ribe, za laboratorije koji nisu sami mjerili udio vodika) uz faktor pokrivanja $k = 2$. U Tablici 1 je dan pregled dodijeljenih vrijednosti i izmjerenih vrijednosti na IJS i IRB-u te su navedeni z i ζ statistički parametri.

Sve izvještene vrijednosti oba laboratorija su ispod dodijeljenih vrijednosti organizatora. Nesigurnosti Laboratorija IJS su u svakom pojedinom slučaju manje od nesigurnosti Laboratorija IRB, što se dodatno može pripisati i različitoj duljini mjerenja te različitom načinu izračuna. Također Laboratorij IJS daje kao rezultat srednju vrijednost dvaju mjerenja što dodatno smanjuje mjernu nesigurnost.

U obje interkomparacije oba parametra z i ζ imaju zadovoljavajuće vrijednosti za laboratorij IJS-a, pokazujući dosljednost, preciznost i točnost primijenjene metode. Izvještene vrijednosti se od dodijeljenih vrijednosti razlikuju od 1,8 % do 4,8 %. Laboratorij IJS se u slučaju uzorka trave uvrstio među prvih 10 laboratorija (od 25), a u slučaju ribe među prvih 5 laboratorija (od 24) čije su vrijednosti najbliže dodijeljenim vrijednostima.

Izvještene vrijednosti za uzorak trave Laboratorija IRB se od usuglašanih vrijednosti razlikuju između 8 % i 10 %. Vrijednost parametara z je upozoravajuća, odnosno neprihvatljiva (žuto i ružičasto obojena polja u Tablici 1). Zamjerka je također bila i relativno velika mjerna nesigurnost što je posljedica prevelike nadopune vodom bez tricija, budući da su se zasebno analizirale frakcije vode dobivene pirolizom, spaljivanjem te karbonizacijom pa spaljivanjem. To je ispravljeno u sljedećoj interkomparaciji prilikom analize uzorka ribe gdje su spojene pojedine frakcije voda, te se uopće nije koristila tehnika karbonizacije pa spaljivanja. To je rezultiralo prihvatljivom mjernom nesigurnošću i zadovoljavajućim apsolutnim vrijednostima oba statistička parametra ispod 1.

Tablica 1 Dodijeljene vrijednosti koncentracije aktivnosti tricija kao OBT-a u uzorku trave (4. međunarodna interkomparacija) i ribe (5. međunarodna interkomparacija) i rezultati mjerenja na IJS i IRB-u, uz statističke parametre z i ζ . Nesigurnost za dodijeljenu vrijednost je izražena uz faktor pokrivanja $k = 1$, a za izmjerene vrijednosti uz $k = 2$.

Naziv uzorka		#4 Trava-Rumunjska		#5 Riba-Kanada	
		A (Bq/l) vode	A (Bq/kg) uzorka	A (Bq/l) vode	A (Bq/kg) uzorka
Dodijeljena vrijednost		479 ± 15	247 ± 8	32,8 ± 3,7	22,6 ± 5,5
IJS	Izmjerena vrijednost	466,7 ± 7,9	235,2 ± 4,0	32,2 ± 0,9	21,9 ± 0,6
	z	-0,8	-1,5	-0,2	-0,1
	ζ	-0,8	-1,4	-0,2	-0,1
IRB	Izmjerena vrijednost	435 ± 90	222 ± 46	30,1 ± 1,2	20,8 ± 0,9
	z	-2,9	-3,1	-0,7	-0,3
	ζ	-0,9	-1,0	-0,7	-0,3

Kako na RBI postoji mogućnost sakupljanja CO₂ iz organskih uzoraka za određivanje aktivnosti ¹⁴C, u svim analizama se sakupljeni CO₂ koristio za pripremu apsorpcijsko-scintilacijskog koktela i mjerila aktivnost ¹⁴C [11]. Izmjerena je aktivnost ¹⁴C od (174 ± 4) pMC (*percent Modern Carbon*, 100 pMC = 226 Bq/kgC), odnosno (393 ± 10) Bq/kgC u uzorku trave te (117 ± 2) pMC, odnosno (264 ± 6) Bq/kgC u uzorku ribe.

Laboratorij IJS namjerava metodu za određivanje OBT-a nadograditi sakupljanjem nastalog CO₂ tako da će moći određivati i aktivnost ¹⁴C. Tada će metode oba laboratorija biti komplementarne.

ZAKLJUČAK

Rezultati analize OBT-a u uzorcima trave i ribe iz 4. i 5. međunarodne interkomparacije od strane Instituta Jožef Stefan pokazuju zadovoljavajuću preciznost i točnost analize. Na Institutu Ruđer Bošković metoda je prošla proces razvoja te je trenutno u fazi validacije. Dok su rezultati 4. interkomparacije bili upozoravajući ili neprihvatljivi zbog prevelike mjerne nesigurnosti, 5. interkomparacija je dala zadovoljavajući rezultat nakon provedene prilagodbe procedure sakupljanja vode iz uzorka nakon spaljivanja.

Zahvala

Zahvaljujemo dr. sc. Jadranki Barešić i Aniti Rajtarić na sugestijama i pomoći prilikom prilagodbe procedure dobivanja i pročišćavanja vode iz uzoraka te Damiru Borkoviću na obradi rezultata iz brojača. Zahvaljujemo Poloni Gerjol i Diani Marguč na pomoći tijekom pripreme uzoraka.

LITERATURA

- [1] Kim SB, Baglan N, Davis PA. Current understanding of organically bound tritium (OBT) in the environment. *J Environ Radioact* 2013;126:83-91.
- [2] Eyrolle F, Lepage H, Copard Y, Ducros L, Claval D, Saey L, Cossonnet C, Giner F, Mourier D. A brief history of origins and contents of Organically Bound Tritium (OBT) and ^{14}C in the sediments of the Rhône watershed. *Sci Tot Environ* 2018;643:40-51.
- [3] Melintescu A, Galeriu D. Uncertainty of current understanding regarding OBT formation in plants. *J Environ Radioact* 2017;167:134-147.
- [4] Trivedi A. Daily tritium intakes by people living near a heavy-water research reactor facility: dosimetric significance. AECL (Series). Radiation Biology and Health Physics Branch, Chalk River Laboratories, Chalk River, Ontario, 1987.
- [5] Janovics R, Bihari A, Papp L, Dezsö Z, Major Z, Sárkány KE, Bujtás T, Veres M, Palcsu P. Monitoring of tritium, ^{60}Co and ^{137}Cs in the vicinity of the warm water outlet of The Paks Nuclear Power Plant, Hungary. *J Environ Radioact* 2014;128:20-26.
- [6] Krištof R, Košenina S, Zorko B, Kožar Logar J. Tritium in organic matter around Krško Nuclear Power Plant. *J Radioanal Nucl Chem* 2017;318(2):675-679.
- [7] Kim SB, Olfert J, Baglan N, St-Amant N, Carter B, Clark I, Bucur C. Canadian inter-laboratory organically bound tritium (OBT) analysis exercise. *J Environ Radioact* 2015;150:236-241.
- [8] Vagner I, Varlam C, Faurescu I, Faurescu D. Organically bound tritium level in vegetation at ICIT tritium removal facility. *J Radioanal Nucl Chem* 2015;303:2559–2563.
- [9] ISO (2010) ISO 9698 Water quality - Determination of tritium activity concentration - Liquid scintillation counting method. 1–24.
- [10] Obelić B, Krajcar Bronić I, Horvatinčić N, Barešić J. Comparison of different methods of environmental radioactivity measurements at Zagreb Radiocarbon and Tritium Laboratory. In: Proceedings of the 11th IRPA Congress, Madrid, 2004, IRPA 11 Full Papers, ISBN 84-87078-05-2. IRPA, 2004. 6c21-1-7.
- [11] Krajcar Bronić, I, Horvatinčić, N, Barešić, J, Obelić, B. Measurement of ^{14}C activity by liquid scintillation counting. *Appl Radiat Isotopes* 2009;67(5):800-804.

ORGANICALLY BOUND TRITIUM (OBT) INTERLABORATORY COMPARISON RESULTS

Andreja Sironić¹, Ines Krajcar Bronić¹, Jasmina Kožar Logar², Romana Krištof^{2,3}

¹Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

²Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia

³Faculty of Health Sciences, University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia

asironic@irb.hr

Samples from two international interlaboratory exercises on activity of organically bound tritium (OBT) in biological material were analysed by laboratories at the Jožef Stefan Institute (JSI) in Ljubljana and at the Ruđer Bošković Institute (RBI) in Zagreb.

In the 4th International OBT exercise a sample of dried grass from a vicinity of the Nuclear Power Plant Cernavoda, Romania, was distributed among the participants of the OBT group of interested laboratories. In the 5th International OBT exercise a dried fish from vicinity of Chalk River Nuclear Power Plant, Canada, was distributed and the results were obtained from 24 laboratories. The JSI Laboratory runs OBT analyses on regular basis. For the RBI Laboratory the 4th exercise served as guidance for adaption of the sample preparation procedure and the 5th one served as a confirmation on suitability of sample preparation procedure for OBT.

The activity of OBT in a sample is measured in water produced by oxidation of organic material and can be expressed as Bq/l of combustion water. It can also be calculated as Bq/kg of dried material by using hydrogen percentage. The consensus values provided by the organizers were: (479 ± 15) Bq/l of combustion water, (247 ± 8) Bq/kg of dried sample and (5.67 ± 0.01) % of hydrogen for grass sample, and (32.8 ± 3.7) Bq/l combustion water, (22.6 ± 5.5) Bq/kg of dried sample and (7.66 ± 0.01) % of hydrogen for the fish sample.

The results from the JSI and RBI laboratories were evaluated by z -score and ζ statistical tests. The JSI laboratory provided satisfactory results in both exercises, while the RBI laboratory had questionable (z -score) and non-acceptable (ζ value) results in the 4th exercise, while both values were acceptable in the 5th exercise. The main reason for the poor performance on the 4th exercise was identified as a large reported uncertainty, mainly due to variation in the preparation procedures while searching for the optimal conditions and to large dilution factors during measurement in LSC. Based on the experience gained in the 4th intercomparison exercise, the sample preparation procedure at RBI was adapted and optimized, and the results of the 5th exercise were satisfactory.

USPOREDBA KARAKTERISTIKA RAZLIČITIH SCINTILACIJSKIH KOKTELA I KIVETA ZA MJERENJE KONCENTRACIJE AKTIVNOSTI ^3H

Ines Krajcar Bronić, Jadranka Barešić
Institut Ruđer Bošković, Zagreb
krajcar@irb.hr

UVOD

Za određivanje koncentracije aktivnosti ^3H u vodama metodom tekućinske scintilacijske spektrometrije korištenjem tekućinskog scintilacijskog brojača (LSC, engl. *Liquid scintillation counter*) koriste se scintilacijski kokteli koji često sadržavaju spojeve štetne za okoliš (npr., NPE - *nonylphenolethoxylates*). Njihova upotreba će uskoro biti zabranjena (2021. godine) u Europskoj Uniji [1], a zamijenit će ih biorazgradivi scintilacijski kokteli. Poželjno je da novi kokteli imaju barem jednaka svojstva kao trenutno najbolji kokteli u upotrebi. U ovom radu prikazuje se usporedbu mjernih karakteristika koktela Ultima Gold LLT, GoldStar LT² te ProSafe LT+ iz dvije vrsta ambalaže. Sa svakim koktelom je pripremljeno nekoliko uzoraka različitih koncentracije aktivnosti ^3H u rasponu od 0 Bq/L do 600 Bq/L. Usporedili smo i nekoliko vrsta kiveta raznih proizvođača.

MATERIJALI I METODE

Za određivanje koncentracije aktivnosti tricija u vodama najčešće se koriste polietilenske (PE) kivete (mjerne bočice) volumena 20 mL budući da staklene kivete daju, uz korištenje istog scintilacijskog koktela i jednaki omjer uzorak:koktel, viši broj odbroja za uzorak bez tricija (*background*), što vodi do niže efikasnosti i više granice detekcije. Scintilacijski kokteli Ultima Gold LLT, Ultima Gold uLLT, OptiPhase HiSafe 2 i OptiPhase HiSafe 3 se najčešće koriste za određivanje koncentracije aktivnosti tricija zbog niskog odbroja backgrounda. Među njima najbolje karakteristike daje Ultima Gold LLT [2,3] u PE mjernim bočicama. Kemijski sastav scintilacijskih koktela često je poznat samo iz dokumenta *Material Safety Data Sheet* koje proizvođači daju uz svoje proizvode, ali u njima nisu navedeni precizni podaci o sastavu koktela. Također, sastav koktela se s vremenom može mijenjati [4,5].

Ultima Gold LLT (UGLLT) proizvođača Perkin Elmer [6] je biorazgradiv scintilacijski koktel iz grupe „sigurnijih“ („*Safer*“) koktela, koji sadrži DIPN (*Diisopropyl naphthalene isomers*) kao otapalo u koncentraciji 40-60 %. DIPN su otrovni za okoliš, pogotovo za vodnu faunu (ribe), te se UGLLT mora zbrinjavati na propisani način. Pogodan je za mjerenje koncentracije aktivnosti tricija u raznim vodama bez potrebe destilacije vodenih uzoraka, daje nizak odbroj *backgrounda* te mjernu efikasnost od oko 30 %. U Laboratoriju za mjerenje niskih radioaktivnosti Instituta Ruđer Bošković taj se scintilacijski koktel redovno koristi u metodi određivanja koncentracije aktivnosti tricija u vodenim uzorcima, s elektrolitičkim obogaćenjem ili direktno.

Gold Star LT² (GS) proizvođača Meridian Biotechnologies [7] sadrži NPE te se smatra tvari visokog rizika (*Substances of Very High Concern*), zahtijeva posebne mjere odlaganja, ne smije se ni u kom slučaju izliti u kanalizacijsku mrežu jer je otrovan za život u vodi s dugotrajnim posljedicama.

ProSafe LT+ (PS) je biorazgradiv scintilacijski koktel [8] proizvođača Meridian Biotechnologies. Budući da ne sadrži NPE, smatra se sigurnom tvari i ne zahtijeva posebne uvjete odlaganja, ako je to u skladu s nacionalnom regulativom.

Istraživanja su provedena u 3 faze s različitim scintilacijskim koktelima.

Test 1: Uspoređene su karakteristike scintilacijskih koktela UGLLT i ProSafe LT+, koji je dostavljen u aluminijskoj ambalaži (oznaka PS-Al) u svibnju 2018. godine. Pripremljeno je po 6 uzoraka sa svakim koktelom, a koncentracije aktivnosti ^3H bile su u rasponu od 0 Bq/L do 600 Bq/L. Koristili smo plastične kivete visoke gustoće (HDPE, *High density polyethylene vials*) ZINSSER POLYVIALS® volumena 20 mL. Omjer uzorka i koktela bio je 8 mL:12 mL.

Test 2: Uspoređene su karakteristike scintilacijskih koktela UGLLT, ProSafe LT+, koji je dostavljen u staklenoj ambalaži (oznaka PS-glass/1) i Gold Star LT² (GS/1, dostavljeni u srpnju 2018.), a ponovljen je test s koktelom PS-Al, kako bi provjerilo je li došlo do promjena mjernih karakteristika. Priprema uzoraka bila je ista kao u prethodnom testu 1.

Test 3: Uspoređene su karakteristike nove pošiljke koktela ProSafe LT+ (PS-glass/2) i Gold Star LT² (GS/2) koja je dostavljena u siječnju 2019. (proizvođač je napomenuo da su moguće manje promjene u sastavu koktela) s koktelom UGLLT. Priređena su 4 uzorka voda različitih koncentracija aktivnosti ^3H , a kivete i omjer uzorka i koktela bili su iste kao u prethodnim testovima.

Usporedili smo i nekoliko vrsta kiveta raznih proizvođača: dvije različite serije PE kiveta proizvođača PerkinElmer (*Low diffusion PE vial*, cat. no. 6000477), dvije različite serije PE kiveta proizvođača Zinsser Analytic (ZA) (Polyvials 20 ml, natural, HDPE, ZINSSER POLYVIALS® cat.no 3071401), te anti-statičke kivete PV1AS-HDPE proizvođača Meridian Biotechnologies. Za pripremu uzoraka korišten je koktel UGLLT, a za testove s kivetama PV1AS-HDPE korišteni su i scintilacijski kokteli PS-glass/2 i GS/2.

Za mjerenje koncentracije aktivnosti tricija koristio se tekućinski scintilacijski brojač LSC Quantulus 1220. Primijenjen je uobičajen laboratorijski postupak direktnog mjerenja bez elektrolitičkog obogaćenja, trajanje mjerenja 300 minuta (6 ciklusa od 50 minuta). Za kontrolu mjerenja LSC-om korišten je software WinQ, a za obradu mjernih podataka Easy View. Kod obrade dobivenih spektara koristio se tzv. optimizirani tricijev „prozor“ između kanala višekanalnog analizatora od 25 do 253 [9,10].

U testovima smo uspoređivali parametre karakteristične za primijenjenu mjernu tehniku. Jedan od najvažnijih parametara je odbroj backgrounda u danom „prozoru“ (B , izražen kao broj odbroja u minuti, [min^{-1}]). Parametar gašenja (engl. *Standard Quenching Parameter*, $SQP(E)$) u LSC Quantulus predstavlja kanal koji dijeli spektar internog standarda ^{152}Eu u omjeru 99:1. Faktor dobrote (FOM , engl. *Figure of Merit*) izračunat je kao omjer kvadrata neto odbroja standarda (S) i odbroja backgrounda (B), te je izražen u [min^{-1}].

$$FOM = (S - B)^2 / B \quad (1)$$

Kalibracijski faktor (CF , engl. *Calibration Factor*) je izračunat kao omjer poznate koncentracije aktivnosti referentnog standarda i broja odbroja tog standarda, te je izražen u jedinicama [$\text{Bq/l}/\text{min}^{-1}$]. Mjerna efikasnost E [%] izračunata je kao omjer izmjerenih odbroja i prave aktivnosti referentnog standarda. Granica detekcije (DL , engl. *Detection Limit*) izračunata je prema sljedećem izrazu [1]:

$$DL = [2.71 + 4.65 \sqrt{(B t)}] / (t E V) \quad [\text{Bq/l}] \quad (2)$$

gdje je B broj odbroja backgrounda, t je vrijeme mjerenja [min], E je efikasnost, V je volumen uzorka (8 mL).

REZULTATI I DISKUSIJA

Usporedba promatranih parametara za testove 1, 2 i 3 prikazana je u Tablici 1. Prikazane vrijednosti parametra $SQP(E)$ u Tablici 1 predstavljaju srednju vrijednost svih uzoraka pripremljenih s danim scintilacijskim koktelom u danom testu.

Odbroj backgrounda B je gotovo jednak za koktele UGLLT, GS i PS-glass, a PS-glass/2 ima najbolju (najnižu) vrijednost. Koktel PS-Al ima viši odbroj backgrounda, zbog vrha opaženog na nižim kanalima unutar tricijeva prozora (Slika 1). Kalibracijski faktor CF ima

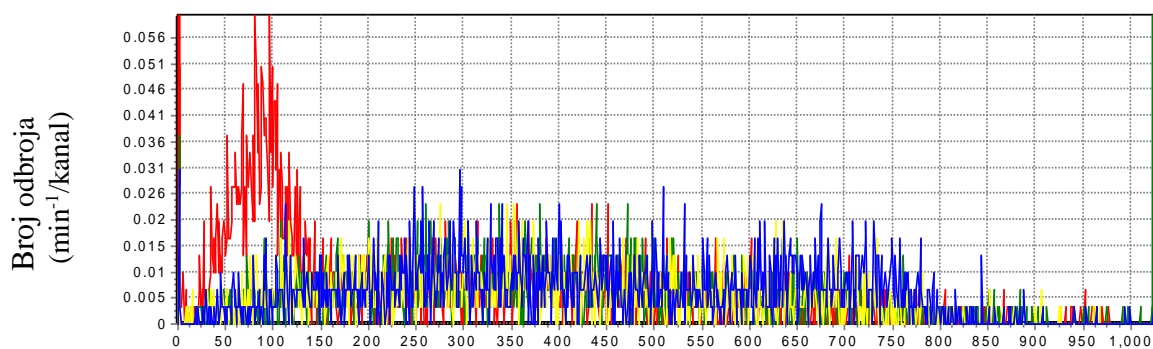
najnižu (najbolju) vrijednost za UGLLT u svim testovima i za GS/1, dok druga pošiljka GS/2 ima nešto višu (lošiju) vrijednost koja je usporediva s vrijednostima za sve koktele PS. Slično se opaža i za vrijednost $SQP(E)$ – svi UGLLT testovi i GS/1 imaju više (bolje) vrijednosti od GS/2 i svih PS koktela, kao i za granicu detekcije DL . Najlošija (najviša) granica detekcije dobivena je za PS-Al koktel, zbog već spomenutog vrha unutar tricijeva prozora. Faktor dobrote FOM treba imati što višu vrijednost, te se po “dobroti” izdvajaju svi UGLLT testovi i GS/1, slijede PS-glass/1 i PS-glass/2 te GS/2, dok je prema očekivanju najlošiji koktel PS-Al. Usporedimo li efikasnosti E , ponovno se izdvajaju UGLLT i GS/1 s najvišom efikasnošću ($\approx 23\%$), slijede PS-glass kokteli ($\approx 19\%$) te GS/2 i PS-Al. Iako je pošiljka koktela GS/1 u testu 2 dala rezultate usporedive s koktelom UGLLT (Tablica 1), nova pošiljka GS/2 pokazuje lošije karakteristike. Dvije pošiljke koktela PS ne pokazuju značajnije razlike.

Pregled koktela ProSafe LT+ iz aluminijske bočice pokazao je da je koktel žućkaste boje i da se opažaju sitni mjehurići masnoće, što je proizvođač koktela objasnio premazom unutrašnje strane bočice, iako su od proizvođača ambalaže tražili da ne primjenjuju bilo kakav premaz. Ponovljeni test istog koktela PS-Al daje u svim kategorijama lošije rezultate u testu 2 nego u testu 1, što je posljedica otapanja sloja premaza unutrašnjosti aluminijske bočice.

Izmjerene koncentracije aktivnosti „nepoznatih“ uzoraka u svakom testu ne pokazuju značajne razlike ako se koriste vrijednosti B i CF za korišteni scintilacijski koktel.

Tablica 1. Usporedba karakterističnih parametara za različite scintilacijske koktele. UGLLT – Perkin Elmer Ultima Gold LLT; GS – Meridian Technologies GoldStar LT²; PS – Meridian Technologies ProSafe LT+. Omjer uzorak: koktel 8 mL:12 mL, kivete ZINSSER POLYVIALS – HDPE, trajanje mjerenja 300 minuta, tricijev prozor 25-253.

scintilacijski koktel	B (min^{-1})	CF ($\text{Bq/L}/\text{min}^{-1}$)	$SQP(E)$ (kanal)	DL (Bq/L)	FOM (min^{-1})	E (%)
UGLLT test 1	$1,164 \pm 0,054$	9,0	776,3	1,63	6504	23,2
UGLLT test 2	$1,239 \pm 0,065$	8,8	776,3	1,64	6303	23,7
UGLLT test 3	$1,131 \pm 0,057$	8,8	776,1	1,56	6432	23,6
GS/1	$1,198 \pm 0,064$	9,1	777,1	1,66	6122	23,0
GS/2	$1,223 \pm 0,059$	11,8	745,8	2,16	3355	17,7
PS-glass/1	$1,151 \pm 0,062$	10,9	756,3	1,95	4428	19,1
PS-glass/2	$1,021 \pm 0,054$	11,3	751,3	1,90	4368	18,5
PS-Al test 1	$3,34 \pm 0,10$	11,0	757,8	2,73	1523	19,0
PS-Al test 2	$3,06 \pm 0,10$	12,8	740,4	3,72	1195	16,2



Slika 1. Spektri backgrounda (voda bez tricija) pripremljenog s 4 ispitivana koktela UGLLT, GS/1, PS-glass/1 i PS-Al, omjer uzorak:koktel 8 mL:12 mL. Optimizirani tricijev prozor: 25-253 kanala. Ističe se vrh za koktel PS-Al (crveni spektar) u dijelu tricijeva prozora.

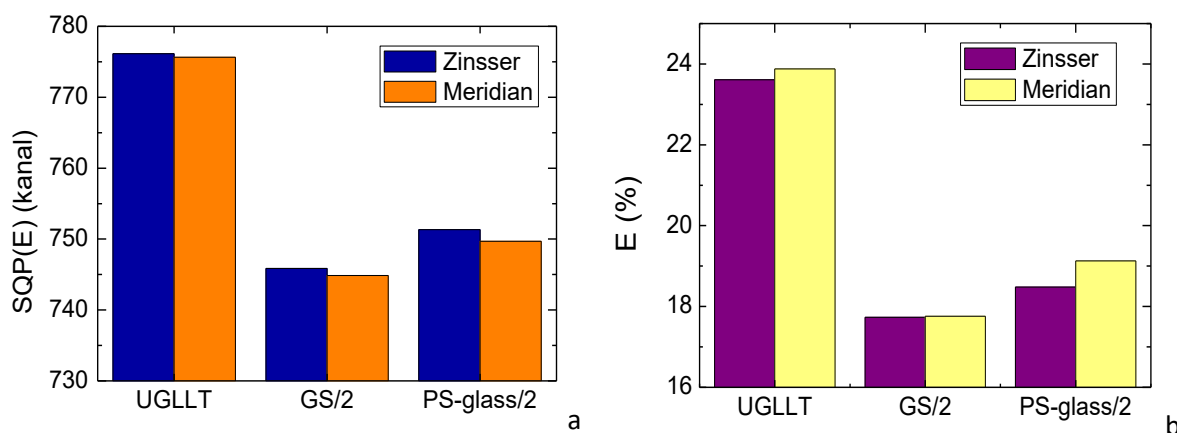
U Tablici 2 prikazana je usporedba istih parametara za različite kivete. Korištene su kivete PerkinElmer, serija 1 iz 2015. godine i serija 2 iz 2018. godine; Zinsser POLYVIALS®, serija 1 – izložbeni primjerci ustupljeni za testiranja, serija 2 – nove kivete iz 2018. godine, korištene u testu 2, serija 3 – iste kivete iz 2018. godine, korištene u testu 3. U svim slučajevima korišten je scintilacijski koktel Ultima Gold LLT u omjeru uzorak:koktel 8 mL:12 mL. Mjerenje je provedeno u trajanju 300 minuta (6 ciklusa po 50 minuta).

Tablica 2. Usporedba kiveta: PerkinElmer *Low diffusion PE vial*, cat. no. 6000477, Zinsser POLYVIALS® cat.no 3071401, Meridian anti-statičke kivete PV1AS-HDPE. Omjer uzorak: koktel 8 mL:12 mL, scintilacijski koktel UGLLT. Oznake 1, 2 i 3 objašnjene u tekstu.

Vrsta kivete	B (min^{-1})	CF ($\text{Bq/L}/\text{min}^{-1}$)	$SQP(E)$ (kanal)	DL (Bq/L)	FOM (min^{-1})	E (%)
PerkinElmer – 1	$1,112 \pm 0,047$	8,88	776	1,20	7768	23,5
PerkinElmer – 2	$1,221 \pm 0,064$	8,55	780	1,21	7614	24,4
Zinsser – 1	$1,231 \pm 0,053$	9,12	779	1,29	6662	22,9
Zinsser – 2	$1,207 \pm 0,070$	8,26	787	1,16	8250	25,2
Zinsser – 3	$1,131 \pm 0,057$	8,83	776	1,56	6432	23,6
Meridian	$1,059 \pm 0,055$	8,73	776	1,49	7028	23,9

Svi parametri imaju gotovo jednake vrijednosti za sve ispitivane kivete, a međusobna odstupanja se mogu objasniti statističkim varijacijama između pojedinih mjerenja. Prilikom izbora kiveta njihove mjerne karakteristike nisu kritične, već treba uzeti u obzir i druge čimbenike, npr. cijenu kiveta.

Dodatno smo usporedili tri različita koktela (UGLLT, GS/2 i PS-glass/2) u anti-statičkim kivetama PV1AS-HDPE (Meridian) i u kivetama Zinsser POLYVIALS® cat.no 3071401. Najbolje karakteristike dobivene su za scintilacijski koktel UGLLT u obje vrste kiveta, dok su ostala dva koktela ponovno dala lošije rezultate, ali usporedive u različitim kivetama. Na Slici 2 prikazana je usporedba $SQP(E)$ vrijednosti i efikasnosti mjerenja za dvije vrste kiveta i tri scintilacijska koktela. Kao što je primijećeno ranije usporedbom koktela u testovima 2 i 3, nova pošiljka koktela GS/2 pokazuje znatno lošije karakteristike od koktela UGLLT i lošije od koktela PS-glass/2.



Slika 2. $SQP(E)$ vrijednosti (a) i efikasnosti E (b) za dvije vrste kiveta (Zinsser POLYVIALS® cat.no 3071401 i Meridian anti-statičke kivete PV1AS-HDPE), sa tri vrste scintilacijskih koktela (UGLLT, GS/2, PS-glass/2).

ZAKLJUČAK

Scintilacijski koktel UltimaGold LLT (PerkinElmer) pokazao je u svim ispitivanjima najbolje karakteristike. Scintilacijski koktel GoldStar LT² (Meridian Technologies) iz prve pošiljke pokazao je slične karakteristike kao i UGLLT, ali koktel iz druge pošiljke (GS/2) pokazuje lošija svojstva, najvjerojatnije zbog promjene sastava koktela. Koktel GS sadrži štetne spojeve NPE, koji će uskoro biti zabranjeni za upotrebu, te će se sastav ovog koktela sigurno mijenjati.

ProSafe LT+ (Meridian Technologies) koktel je također dobar scintilacijski koktel, iako daje nešto višu granicu detekcije *DL* i nižu efikasnost nego UGLLT. Pri tome treba paziti da je koktel dostavljen u staklenoj ambalaži. ProSafe LT+ iz aluminijske ambalaže nije pogodan za primjenu jer ima znatno slabije karakteristike, koje se s vremenom pogoršavaju.

Sve tri vrste ispitivanih PE kiveteta (PerkinElmer, Zinsser Analytic i Meridian Technologies) pokazuju jednaka svojstva ako se koristi isti scintilacijski koktel, pa pri odabiru kiveteta treba voditi računa i o cijeni proizvoda.

Zahvala

Zahvaljujemo Meridian Technologies na ustupljenim scintilacijskim koktelima i kivetama te dodatnim informacijama o njihovim proizvodima. Autorice zahvaljuju suradnicima Laboratorija za mjerenja niskih radioaktivnosti na pomoći.

LITERATURA

- [1] Directive 2003/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 June 2003. Official Journal of the European Union 2003;L178:24-26.
- [2] Stojković I, Todorović N, Nikolov J, Krajcar Bronić I, Barešić J, Kozmidis Luburić. Methodology of tritium determination in aqueous samples by Liquid Scintillation Counting techniques, In: Tritium - Advances in research and applications, Janković, MM, (Ed.), New York, NOVA Science Publishers, 2018, p. 99-156.
- [3] Jakonić I, Todorović N, Nikolov J, Krajcar Bronić I, Tenjović B, Vesković M. Optimization of low-level LS counter Quantulus 1220 for tritium determination in water samples. Radiat Phys Chem 2014;98:69–76.
- [4] Komosa A, Šlepecka K. Effect of liquid scintillating cocktail volume on ³H and ¹⁴C measurement parameters using a Quantulus spectrometer. Nukleonika 2010;55:155-161.
- [5] PerkinElmer, www.perkinelmer.com, pristup 15. 3. 2019.
- [6] <http://www.perkinelmer.com/product/ultima-gold-llt-1-liter-6013371> pristup 15.3.2019.
- [7] <https://www.meridian-biotech.com/gold-star-lt2> . pristup 15. 3. 2019.
- [8] <https://www.meridian-biotech.com/newpage> . pristup 15. 3. 2019.
- [9] Obelić B, Krajcar Bronić I, Horvatinčić N, Barešić J. Comparison of different methods of environmental radioactivity measurements at Zagreb Radiocarbon and Tritium Laboratory. In: Proceedings of the 11th IRPA Congress, Madrid, 2004, IRPA 11 Full Papers, ISBN 84-87078-05-2, IRPA, 2004, 6c21-1-7.
- [10] Barešić J, Krajcar Bronić I, Horvatinčić N, Obelić B, Sironić A, Kožar-Logar J. Tritium Activity Measurement of Water Samples using Liquid Scintillation Counter and Electrolytical Enrichment. Proceedings of the Eight Symp. of the Croatian Radiation Protection Association: 13-15 April 2011; Krk (Croatia). Zagreb: HDZZ, 2011, p. 461-7.

COMPARISON OF SCINTILLATION COCKTAILS AND VIALS FOR DETERMINATION OF ^3H ACTIVITY CONCENTRATION

Ines Krajcar Bronić, Jadranka Barešić
Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
krajcar@irb.hr

For determination of tritium (^3H) activity concentration by liquid scintillation spectrometry method, various scintillation cocktails are mixed with water samples to enable counting tritium decays in liquid scintillation counter. Some scintillation cocktails contain dangerous chemicals, such as NPE (*nonylphenolethoxylates*) that is harmful for biota in aqueous systems. Use of NPE will be soon forbidden and scintillation cocktails should be biodegradable. At the same time, it is required that the new biodegradable scintillation cocktails retain at least the same counting properties as the best cocktails today.

We performed several tests with different scintillation cocktails: Ultima Gold LLT, (UGLLT, by PerkinElmer, “Safer” cocktails that contains DIPN - *Diisopropyl naphthalene isomers* that may be harmful for aquatic biota, suitable for measurement of ^3H activity concentration in various types of water, having low background and efficiency of 30 %), Gold Star LT² (GS, by Meridian Biotechnologies, contains NPE and is considered as a *Substances of Very High Concern*, harmful for biota in water systems), and ProSafe LT+ (PS, by Meridian Biotechnologies, biodegradable) from two different containers (aluminium and glass). For each test we prepared several samples having ^3H activity concentration from 0 Bq/L (tritium-free water, i.e., background) to 600 Bq/L. The ratio sample:cocktail was always 8 mL:12 mL, measurements were performed by LSC Quantulus 1220 for 300 minutes (6 cycles of 50 minutes), and for evaluation of measured spectra the optimized tritium window, channel in the range 25 – 253, was used. The following parameters were compared: background count rate B , calibration factor CF , Standard Quench Parameter $SQP(E)$, detection limit DL , figure of merit FOM and measurement efficiency E .

Scintillation cocktail UltimaGold LLT showed in all test best characteristics. Scintillation cocktail GoldStar LT² (Meridian Technologies) from the first batch showed similarly good performances, while the second batch (GS/2) showed worse performances, most probably due to some changes in the chemical composition.

ProSafe LT+ (Meridian Technologies) is also a good scintillation cocktail, although having slightly higher detection limit and lower efficiency. However, this cocktail should be packed in glass bottles. An attempt to use aluminium container was not successful and PS from the aluminium container showed the worst performances among the tested scintillation cocktails.

Three types of high density polyethylene vials were also tested (PerkinElmer, Zinsser Analytic and Meridian Technologies) and all showed the same performances if the same scintillation cocktail was used. Therefore, the choice of vials for routine application would depend also on their cost.

NEIONIZIRAJUĆA ZRAČENJA

NON-IONIZING RADIATION

REVIEW OF DETERMINISTIC-STOCHASTIC PROCEDURES IN ELECTROMAGNETIC-THERMAL DOSIMETRY OF THE REALISTIC HUMAN HEAD MODEL EXPOSED TO NON-IONIZING RADIATION

Dragan Poljak¹, Mario Cvetković¹, Anna Šušnjara¹, Hrvoje Dodig²

¹University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, Split, Croatia

²University of Split, Faculty of Maritime Studies, Split, Croatia

dpoljak@fesb.hr

INTRODUCTION

Human exposure to high frequency (HF) electromagnetic fields requires the calculation of specific absorption rate (SAR) and resultant temperature increase in a tissue. As measurements on humans are not possible, human exposure assessment is carried out via realistic computational models, e.g. [1-3], mostly based on the widely used the Finite Difference Time Domain (FDTD) methods. Recently, more accurate techniques, but also more demanding techniques, such as Finite Element Method (FEM), Boundary Element Method (BEM), Method of Moments (MoM) and hybrid FEM/BEM approaches have been applied in electromagnetic-thermal dosimetry [3]. However, all computational models used in electromagnetic-thermal dosimetry suffer from serious drawbacks regarding uncertainties in input data propagated to the response of interest such as SAR, or temperature increase due to HF exposures. In last few years some deterministic models are accompanied with stochastic analysis to partly overcome these difficulties. In addition, instead of using a robust Monte Carlo Method (MCM), with rather slow convergence rate, the implementation of Stochastic Collocation Method (SCM) has been reported in some publications, e.g. [4], due to its nonintrusive nature and the polynomial representation of the stochastic output, thus significantly reducing the number of simulations [5].

This paper reviews some SCM applications in electromagnetic thermal-dosimetry previously reported by the authors. Thus, the realistic model of the brain, eye and three-compartment human head model consisting of brain, skull and scalp exposed to a plane wave are considered and corresponding dosimetric quantities of interest are determined. Incident plane wave is treated as an exterior scattering problem formulated by the Stratton-Chu equation, while the interior domain is governed by the vector Helmholtz equation [6]. The related temperature rise is obtained by solving the Pennes' bioheat transfer equation. The governing dosimetry equations are solved by the hybrid finite element/boundary element method (FEM/BEM) while the temperature distribution in the head is obtained by solving the bioheat equation via FEM [6,7]. Homogeneous brain model is based on the coupled surface integral equations numerically solved via Method of Moments (MoM) [6,7].

DETERMINISTIC AND STOCHASTIC MODELING

The principal task of HF dosimetry is to quantify thermal effect which is expressed by SAR defined as the rate of electromagnetic energy W absorbed by the unit body mass m :

$$SAR = \frac{dP}{dm} = \frac{\sigma}{2\rho} |E|^2 \quad (1)$$

where P is the dissipated power, E is the peak value of the internal electric field, ρ is the tissue density and σ is the tissue conductivity. This internal field is obtained by solving corresponding Helmholtz equation as reported elsewhere, e.g. in [6,7].

Once the *SAR* distribution is determined, the related temperature increase can be obtained by solving the steady-state bio-heat equation [6]:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \rho_b c_b w (T_a - T) + Q_m + Q_{EM} = 0 \quad (2)$$

where k is the heat conduction, ρ_b is the blood mass density, c_b is the specific heat capacity of blood, w is the perfusion rate, T_a is the arterial temperature, Q_m is the tissue dependent heat source due to metabolic processes, while the last term given by:

$$Q_{EM} = \rho \cdot SAR \quad (3)$$

represents the volumetric heat source due to external field.

The mathematical details pertaining to the FEM solution of bioheat transfer equation (2) can be found elsewhere, e.g. in [9].

Provided the deterministic modelling is completed one may proceed with the stochastic analysis. The SCM is based on the polynomial approximation of the output of interest Y for d random parameters [4,8]. The deterministic output is computed at N predetermined input points. Input parameters are modelled as random variables represented by vector $\mathbf{X} = [x_1 \dots x_d]$. A certain probability density function (*pdf*) is assigned to each random variable. The stochastic output \hat{Y} is written as follows [4]:

$$\hat{Y}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^N L_i(\mathbf{X}) \cdot Y^{(i)} \quad (4)$$

where $L_i(\mathbf{X})$ are basis functions (Lagrange polynomials) and $Y^{(i)}$ is the output realization for the i -th input point $\mathbf{X}^{(i)} = [x_1^{(i)}, \dots, x_d^{(i)}]$.

Now the stochastic moments can be readily derived following their definitions from statistics. Taking into account the properties of Lagrange polynomials the expectation (mean) of $\hat{Y}(\mathbf{X})$ is computed as:

$$\mu \left[\hat{Y}(\mathbf{X}) \right] = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{Y}(\mathbf{X}) p(\mathbf{X}) d\mathbf{X} = \sum_{i=1}^N \int_{-\infty}^{+\infty} L_i(\mathbf{X}) \cdot Y^{(i)} p(\mathbf{X}) d\mathbf{X} = \sum_{i=1}^N Y^{(i)} \cdot w_i \quad (5)$$

where $p(\mathbf{X})$ represents the joint probability density function of random variables \mathbf{X} , while the weights w_i are precomputed from the integral:

$$w_i = \int_{-\infty}^{+\infty} L_i(\mathbf{X}) p(\mathbf{X}) d\mathbf{X} \quad (6)$$

Accordingly, the variance is given by:

$$V \left[\hat{Y}(\mathbf{X}) \right] = \sum_{i=1}^N \left[Y^{(i)} - \mu Y(\mathbf{X}) \right]^2 \cdot w_i \quad (7)$$

Higher (random) dimensions require multivariate interpolants in (4), often by using the tensor product in each random dimension. More mathematical details on SCM applications can be found elsewhere, e.g. in [4].

COMPUTATIONAL EXAMPLES

First example deals with SAR induced in the brain at $f = 900$ MHz and $f = 1800$ MHz, respectively, for the case of vertical polarization. The power density of the incident plane wave is $P = 5$ mW/cm². The brain parameters of interest are available in [7].

Figure 1 shows the SC convergence with 3, 5 and 7 points for the SAR values using 5 different random variables. The dimensions of the average adult human brain are: width 131.8 mm, length 161.1 mm, height 139 mm, with relative permittivity and conductivity of the brain: $\epsilon_r = 45.805$ and $\sigma = 0.766$ S/m, respectively. Each RV $_k$ ($k = 1, \dots, 5$) is assumed to be uniformly distributed around deterministic values with variation of 5.77 % [10].

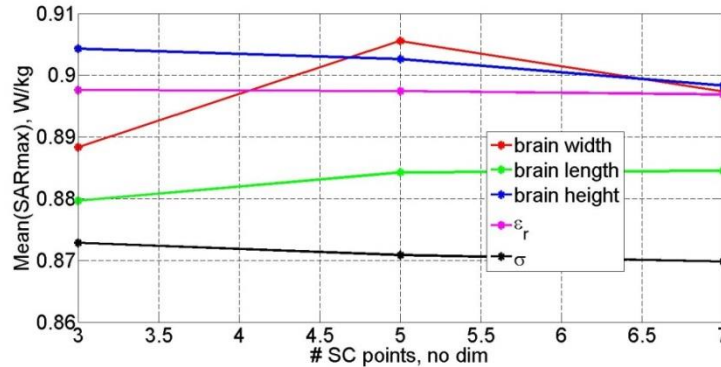


Figure 1. Mean of maximum SAR

Although the output (maximum SAR) is highly nonlinear, SC provides an assessment of the 1st statistical moment with 5 simulations only.

Next example is related to the eye exposed to plane wave with power density of 10 W/m² obtained by the use of hybrid BEM/FEM. The eye parameters are available elsewhere, e.g. in [11]. Figure 2 depicts the 1st order sensitivity of the model to a corresponding random variable for the SAR assessment.

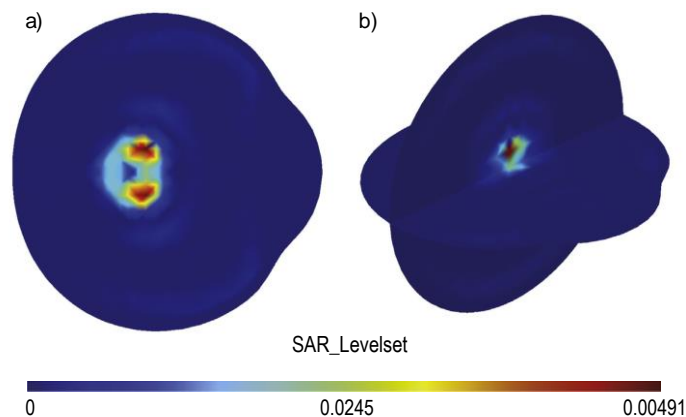


Figure 2. SAR variance inside the eye due to plane wave with ($P_d = 10$ W/m², $f = 6$ GHz) and SCM approximation order $n = 2$: a) z-plane; b) x-plane and y-plane.

Conductivity of the vitreous body is 0.7 S/m at $f = 6$ GHz and is assumed to be uniformly distributed around interval 0.7 S/m \pm 0.6 S/m. As depicted in Figure 2, higher levels of SAR variance are concentrated inside the vitreous body.

The last example deals with the head model consisting of brain, skull and scalp tissues illuminated by a plane wave at 900 MHz. Incident plane wave is treated as an unbounded scattering problem formulated in terms of the Stratton-Chu equation while the interior domain

is represented by the vector Helmholtz equation. The solution is carried out via the hybrid FEM/BEM approach. The corresponding temperature distribution is obtained by solving the Pennes' equation via FEM. The stochastic model of three compartment head model has been documented elsewhere, e.g. in [8]. The tissues' permittivities, conductivities and thermal parameters are modelled as random variables (RVs) resulting in 6-dimensional stochastic problem which is treated by SCM based on the sparse grid multidimensional interpolation with 389 deterministic simulations. The results are depicted in Figures 3 and 4.

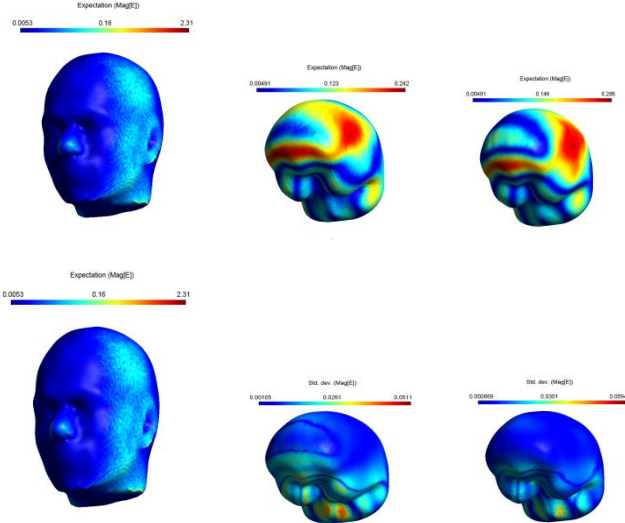


Figure 3. The stochastic mean (top) and variance (bottom) for the induced electric field on the surface of the scalp, skull and brain with RVs (permittivity and conductivity of tissues) varied 20 % from the nominal value.

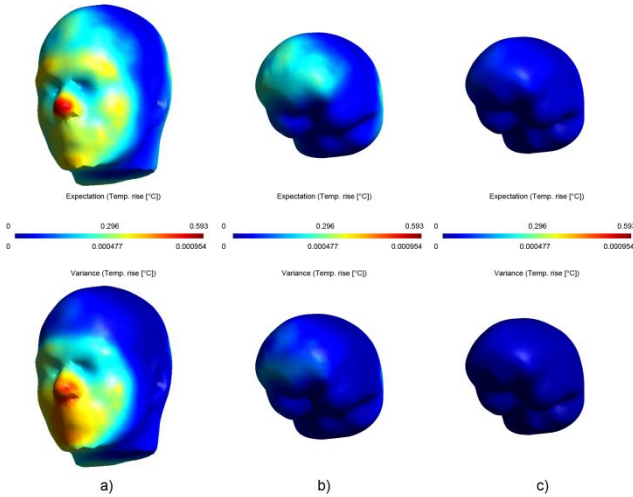


Figure 4. The stochastic mean (top) and variance (bottom) for the temperature increase on the surface of the scalp, skull and brain with RVs (thermal conductivity and volumetric perfusion blood rate of tissues) varied 20 % from the nominal value.

Values for permittivities, conductivities, thermal conductivities and the volumetric perfusion blood rate, respectively, of the three head tissues could be found elsewhere, e.g. in [8].

CLOSURE

The present paper outlines some SCM applications in dosimetry previously reported by the authors. The realistic eye, brain and head model consisting of brain, skull and scalp exposed to a plane wave are analysed and the related SAR and temperature increases are determined. Incident plane wave is treated as an exterior scattering problem formulated by the Stratton-Chu equation, and the interior domain is governed by the vector Helmholtz equation. The corresponding temperature rise is obtained by solving the Pennes' bioheat transfer equation. The governing dosimetry equations are solved by means of the hybrid finite element/boundary element method (FEM/BEM) while the temperature distribution in the head is obtained by solving the bioheat equation via FEM. The homogeneous brain model based on the coupled surface integral equations is treated via Method of Moments (MoM). Some illustrative computational examples are presented in the paper.

REFERENCES

- [1] Poljak D. Electromagnetic Fields: Environmental Exposure. In: Encyclopedia of Environmental Health. Nriagu J (Ed.). Burlington: Elsevier, 2011. pp. 259-268.
- [2] Hand JW. Modeling the interaction of electromagnetic fields (10 MHz – 10 GHz) with the human body: methods and applications. *Phys Med Biol* 2008;5(16):243-286.
- [3] Poljak D, Cvetković M, Bottauscio O, Hirata A, Laakso I, Neufeld E, Reboux S, Warren C, Giannopolous A, Costen F. On the use of Conformal Models and Methods in Dosimetry for Non-Uniform Field Exposure, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 60 (2018) , 2; 328-337.
- [4] Poljak D, Šesnić S, Cvetković M, Šušnjara A, Dodig H, Lallechere S, Drissi, Khalil El Khamlichi. Stochastic Collocation Applications in Computational Electromagnetics. *Mathematical problems in engineering*, volume 2018, Article ID 1917439, 13 pages, <https://doi.org/10.1155/2018/1917439>
- [5] Xiu D. Fast Numerical Methods for Stochastic Computations: A Review. *Commun Comput Phys* 2009;5:242-272.
- [6] Poljak D, Cvetković M, Dodig H, Peratta A. Advanced electromagnetic-thermal dosimetry methods for the human exposure to high frequency electromagnetic fields. *Proceedings of the 10th Symposium of Croatian Radiation Protection Association*, 2015. 331-337.
- [7] Poljak D, Dodig H, Cvetković M, Lallechere S, Drissi K, Bonnet P. Deterministic-stochastic boundary element modeling of the brain and eye exposed to high-frequency radiation. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements* 2017;5:250-259.
- [8] Susnjara A, Cvetković M, Dodig H, Poljak D. Stochastic Sensitivity Analysis for Dosimetry of Head Tissues for the Three Compartment Head Model. 3rd International Conference on Smart and Sustainable Technologies SpliTECH 2018, Split, Croatia, 2018.
- [9] Poljak D, Drissi K. *Computational Methods in Electromagnetic Compatibility: Antenna Theory Approach versus Transmission line Models*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2018.
- [10] Cvetkovic M, Lallechere S, El Khamlichi Drissi K, Bonnet P, Poljak D. Stochastic Sensitivity in Homogeneous Electromagnetic-Thermal Model of Human Brain, *Workshop on Uncertainty Modeling for ElectroMagnetic Applications UMEMA2015*, Clermont-Ferrand, France, 2015.
- [11] Cvetković M, Poljak D, Hirata A. The electromagnetic-thermal dosimetry for the homogeneous human brain model. *Engineering analysis with boundary elements* 2016;63:61-73.

REVIEW OF DETERMINISTIC-STOCHASTIC PROCEDURES IN ELECTROMAGNETIC-THERMAL DOSIMETRY OF THE REALISTIC HUMAN HEAD MODEL EXPOSED TO NON-IONIZING RADIATION

Dragan Poljak¹, Mario Cvetković¹, Anna Šušnjara¹ and Hrvoje Dodig²

¹University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, Split, Croatia

²University of Split, Faculty of Maritime Studies, Split, Croatia

dpoljak@fesb.hr

Computational models used in electromagnetic-thermal dosimetry suffer from drawbacks pertaining to the uncertainties in input data set resulting in the uncertainty propagation to the response of interest such as Specific Absorption Rate (SAR), or temperature increase due to the human exposure to non-ionizing radiation. Recently, deterministic-stochastic modelling is used to overcome these difficulties. Contrary to the traditional use of a robust Monte Carlo Method (MCM), with rather slow convergence rate, the Stochastic Collocation method (SCM) has been recently used due to its nonintrusive nature and the polynomial representation of the stochastic output, thus appreciably reducing the number of simulations.

The present paper outlines some SCM applications in dosimetry previously reported by the authors. Thus, the realistic eye, brain and head model consisting of brain, skull and scalp exposed to a plane wave is considered and the related SAR induced in the head is determined as the dosimetry quantity of interest. Incident plane wave is treated as an exterior scattering problem formulated by the Stratton-Chu equation, and the interior domain is governed by the vector Helmholtz equation. Homogeneous brain model is formulated in terms of the coupled surface integral equations, numerically solved via Method of Moments (MoM). The corresponding temperature rise is obtained by solving the Pennes' bioheat transfer equation. The governing equations of electromagnetic dosimetry are solved via the hybrid finite element/boundary element method (FEM/BEM) while the temperature distribution in the head is obtained by solving the bioheat equation via FEM.

ON THE MEASUREMENT AND CALCULATION OF THE LOW FREQUENCY ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS GENERATED BY 110 kV POWER LINE

Marin Galic¹, Dragan Poljak²

¹Environmental Measurement Center LTD, Zagreb, Croatia

²University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, Split, Croatia

mgalic@cmo.hr

INTRODUCTION

People nowadays are mostly concerned about the high frequency electromagnetic (EM) fields exposure and its impact on the human health. As some facts are usually taken for granted, the exposure to electric and magnetic fields at $f = 50$ Hz are maybe questioned to a lesser extent.

Low frequency EM fields may have different biological effects on human organism if certain field levels are exceeded. Those effects could be: heart dysfunction, central nerve system irritation, differences in DNA synthesis, distortion in melatonin production, as well as changes in calcium metabolism. Though the clear link between the low frequency EM fields exposure and carcinogenicity has not been established yet, some indications do exist. Consequently, the low frequency EM fields are classified as a possibly carcinogenic by a World Health Organization [1-2].

The present paper deals with a comparison between measurement and calculation of electric field strength and magnetic field flux density generated by 110 kilovolts power line. The results obtained via the field measurement calculation, respectively, are compared against the maximum allowed field levels defined by the actual Croatian legislative. The measurements are undertaken using the Narda EHP-50D instrument while the calculations are carried out analytically by means of the free space model (the field reflections from the air-earth are neglected). Both, the measurements and the calculations are performed in 8 points at three different heights above the ground (0.5 m, 1 m and 1.5 m).

MATERIALS AND METHODS

The measurement and estimation of electric and magnetic field strength are carried out by following the Croatian Standard HR EN 62110 [3]. The obtained results are compared to the maximum allowed field levels defined by the actual Croatian legislative [4]. Chosen power line consists of 3 conductors with the nominal voltage of 110 kV. The power line of interest is located over the grassy surface at the heights of 12 m, 14 m and 16 m, respectively.



Figure 1. Actual 110 kV power line

Approximately 50 meters from the power line of interest, another power line with the same characteristics has been installed.

The measurements and estimations of EM field levels are taken in 8 points positioning the probe at three different heights above the ground at each point (0.5 m, 1 m and 1.5 m). All chosen points are classified as a public area². To take into account the conductivity of the ground, an image charge equivalent to $-\lambda$ at height $-h$ is used, as depicted in Figure 2.

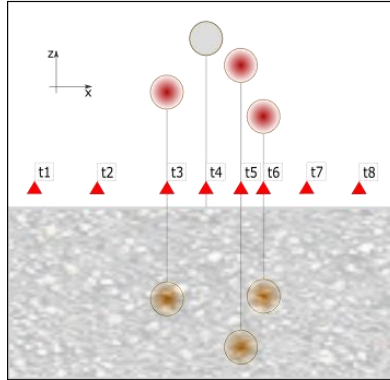


Figure 2. Position of measurement and estimation points in accordance to power lines and their images

The measurement is performed using the Narda EHP-50D field strength analyzer [5] settled up on the non-conductive tripod. Narda EHP-50D allows the dual mode measurement, i.e. both, electric field and magnetic fields are being measured at the same time (Figure 3).

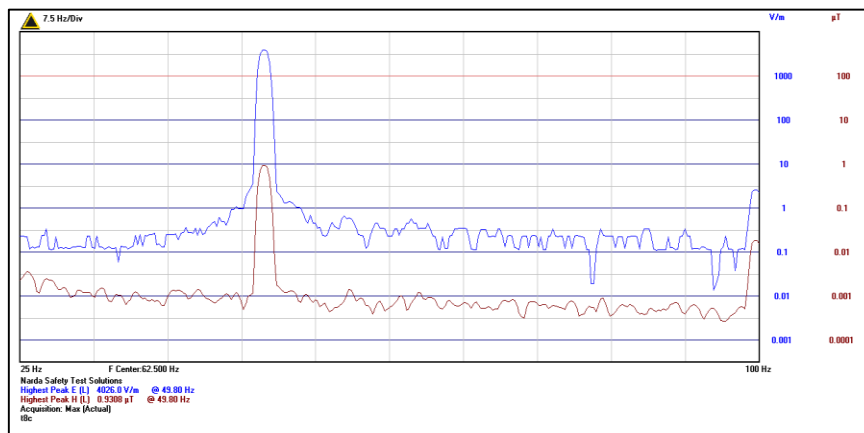


Figure 3. Electric (upper line) and magnetic (lower line) field spectrum

The mathematical model [3] is outlined below, for the sake of completeness. The electric field strength is given by:

$$E_1 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{R_1} \quad (1)$$

and

$$E_2 = \frac{-\lambda}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{R_2} \quad (2)$$

² In Croatian Legislative, the public area is defined as an area where people can freely move with no any limitations (streets, meadow, bus station, forest, park, etc.).

where:

E_1 is the electric field produced by the conductor,

E_2 is the electric field produced by the conductor's image,

λ is linear charge density (C/m),

ϵ_0 is permittivity of the vacuum ($8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m),

R_1 is the distance between the conductor and measurement point and

R_2 is the distance between the linear charge $-\lambda$ (conductor's image) and observed point.

Field vectors E_1 and E_2 are decomposed to orthogonal components x and z so the total field strength E is given by:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_z^2} \quad (3)$$

Potential U at the conductor surface is given by:

$$U = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{2h}{a}\right) \quad (4)$$

where a is the radius of the conductor and h is the conductor height above the ground.

Since the Power line is composed of multiple conductors, (4) becomes a matrix:

$$[P] \cdot [\lambda] = [U] \quad (5)$$

where $[P]$ presents the potential coefficients given by:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{2h_i}{a_i}\right), \text{ for } i = 1 \text{ to } n \quad (6)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}}\right), \text{ for } i \neq j \quad (7)$$

where n is the number of conductors, D_{ij} is the distance between the conductor i and the image of conductor j while d_{ij} presents the distance between the conductors i and j .

Therefore, the total field components are:

$$E_x = \sum_{i=1}^n E_{xi} \quad (8)$$

and

$$E_z = \sum_{i=1}^n E_{zi} \quad (9)$$

RESULTS

The measurement has been carried out at three heights above the ground at each point. The measured values are presented in Figure 4 and Table 1.

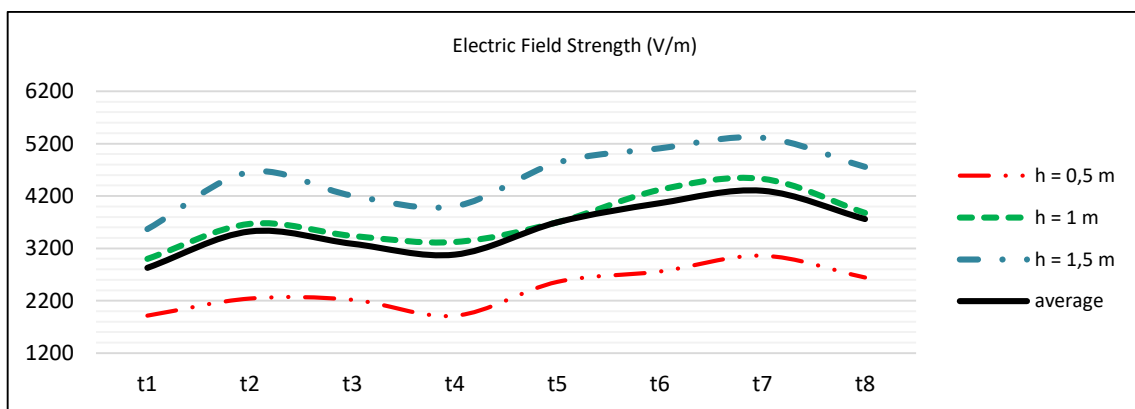


Figure 4. Measured electric field levels

The calculation has been undertaken at the height of 1 m above the ground at each point. The obtained results are presented in Figure 5 and Table 1.

The obtained measured and calculated results are compared to the maximum allowed field levels defined by the actual Croatian legislative.

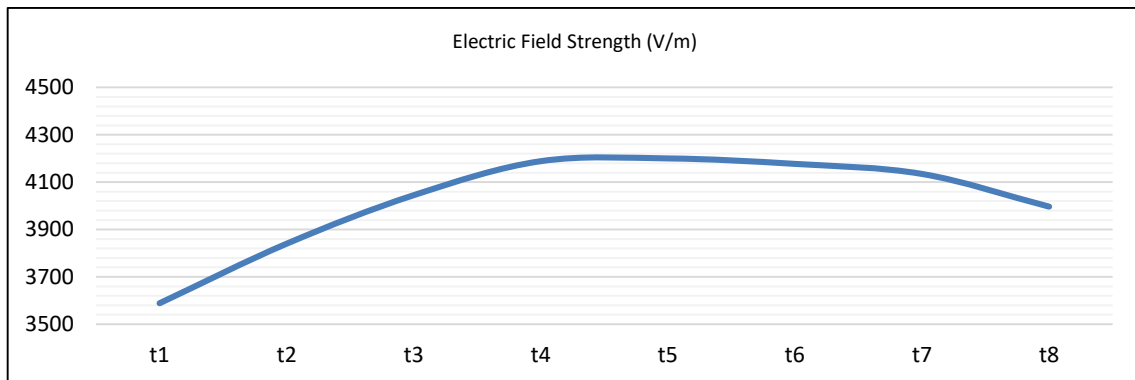


Figure 5. Estimated electric field levels at the height of 1 m above the ground

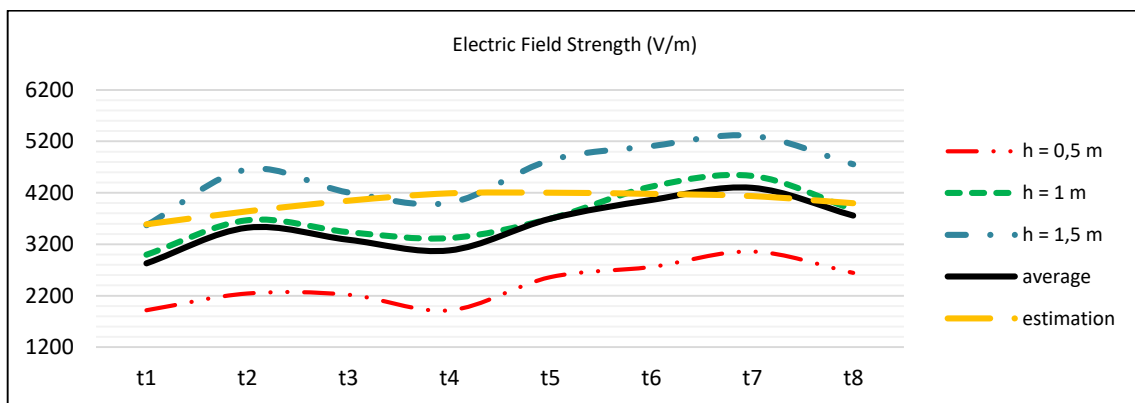


Figure 6. Comparison of measured and estimated results

Table 1. Measurement and estimation results in relation to maximum allowed field levels defined in [2]

Point	Measurement (V/m)	Relation to legislative (%)	Calculation (V/m)	Relation to legislative (%)
t1	2828	57 %	3588	72 %
t2	3522	70 %	3840	77 %
t3	3288	66 %	4045	81 %
t4	3081	62 %	4189	84 %
t5	3698	74 %	4201	84 %
t6	4063	81 %	4178	84 %
t7	4299	86 %	4135	83 %
t8	3759	75 %	3997	80 %

CONCLUSION

The paper deals with the measurement and calculation estimation of the electric field values generated by 110 kV power line. The obtained results are compared to exposure limits.

The considered power line consists of three conductors positioned at 12 m, 14 m and 16 m above the ground. Both, the measurement and calculation are carried out according to Croatian Standard HR RN 62110 and Croatian Legislative in 8 points at the heights of 0.5 m, 1 m, and 1.5 m above the ground at each point. The measured results yield the levels of the electric fields between 2.8 kV/m and 4.3 kV/m. In comparison to defined limits, the exposure levels go between 57 % and 86 %. The calculated results show the electric field level between 3.6 kV/m and 4.2 kV/m, which is 72 % and 84 %, respectively, in comparison to maximum allowed field strength. It is important to notice that chosen points are classified as a public area. If this power line would be passing above the area classified as the area of increased sensitivity (such are children playground, house backyard, etc.), the exposure levels would exceed the defined limits in every point.

REFERENCES

- [1] Poljak D. Electromagnetic Field Theory with Applications in Engineering, Školska knjiga, Zagreb. 2014, pages: 454 – 464.
- [2] Poljak D. Exposure of People to Non-ionisation Radiation. Kigen, Zagreb. 2006., pages: 1 – 21 and 59.
- [3] European Standard, Electric and magnetic field levels generated by AC power systems - Measurement procedures with regard to public exposure (IEC 62110:2009, in Croatian), February 2012.
- [4] Croatian Ministry of Health, Legislation for Electromagnetics Field Protection (In Croatian, NN 146/2014), December 10, 2014.
- [5] Narda EHP-50D, https://www.atecorp.com/ATECorp/media/pdfs/data-sheets/Narda_EHP-50D_Manual.pdf, February 2019.

ON THE MEASUREMENT AND CALCULATION OF THE LOW FREQUENCY ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS GENERATED BY 110 KV POWER LINE

Marin Galic¹, Dragan Poljak²

¹Environmental Measurement Center LTD, Zagreb, Croatia

²University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, Split, Croatia

mgalic@cmo.hr

The paper deals with the measurement and calculation estimation of the electric field values generated by 110 kV power line. The obtained results are compared to exposure limits.

The considered power line consists of three conductors positioned at 12 m, 14 m and 16 m above the ground. Both, the measurement and calculation are carried out according to Croatian Standard HR RN 62110 and Croatian Legislative in 8 points at the heights of 0.5 m, 1 m, and 1.5 m above the ground at each point. The measured results yield the levels of the electric fields between 2.8 kV/m and 4.3 kV/m. In comparison to defined limits, the exposure levels go between 57 % and 86 %. The calculated results show the electric field level between 3.6 kV/m and 4.2 kV/m, which is 72 % and 84 % respectively in comparison to maximum allowed field strength. It is important to notice that chosen points are classified as a public area. If this power line would be passing above the area classified as the area of increased sensitivity (such are children playground, house backyard, etc.), the exposure levels would exceed the defined limits in every point.

INDEKS AUTORA / AUTHOR INDEX

Adrović F,	141	Jovanović P,	277, 289
Avdić M,	227, 231, 309	Jović M,	326
Babić D,	57, 247, 309	Jurić A,	121
Barešić J,	257 , 355, 370	Jurković S,	86, 173
Barišić D,	221, 320	Justić M,	83 , 97, 152
Benković V,	110, 127	Karanović G,	251
Bernat R,	64	Kasić A,	141
Bešlić I,	346, 350	Kasumović A,	141
Bituh T,	263	Kašuba V,	110
Bjelobrč I,	179	Knapp A,	9
Borković D,	257, 355	Knežević J,	26
Borojević N,	127	Knežević Ž,	47, 188, 207
Božnar M Z,	41	Kopjar N,	110, 121, 127
Branica G,	217	Kovač Z,	257
Brčić Karačonji I,	121	Kovačić M,	231
Breznik B,	41 , 251	Kožar Logar J,	355, 364
Brkić H,	194	Krajcar Bronić I,	47 , 257, 355 , 364, 370
Buinac A,	168 , 179	Kralik I,	53, 179 , 194
Bujtás T,	3	Krča S,	57
Chukova Yu P,	32	Krištof R,	355, 364
Coha I,	251, 301, 314, 326, 336	Krneta Nikolić J,	242, 271
Cvetković M,	379	Kusak J,	227
Čeliković I,	271	Lacković I,	331
Davila S,	346, 350	Lauc T,	194
Dodig H,	379	Leder N I,	163, 207
Dolanski Babić S,	103	Levanat I,	9
Dundara Debeljuh D,	173	Majer M,	133, 188
Faj D,	179, 194	Manestar V,	168
Franić Z,	20 , 217, 227	Marčina N,	127
Franulović I,	231	Marjanović K,	247
Gajski G,	116	Marković N,	156
Galić M,	385	Marović G,	147, 217, 227 , 236, 263
Gerić M,	116	Medvedec M,	68 , 74
Giroto N,	173	Meštrović T,	247
Grahek Ž,	251, 314, 320, 326, 336	Mihaljević B,	26
Grbac-Ivanković S,	173	Mijatović I,	257
Hajdinjak M,	331	Miklavčič I,	247, 283
Hansman J,	314	Mikolić A,	121
Heđi A,	247	Milić M,	110 , 116 , 127
Hjellström M,	156	Milković Đ,	116
Horvat Knežević A,	110, 127	Miljanić S,	15 , 47, 188
Hršak H,	103	Mišak N,	64
Huber Dj,	227	Mlakar P,	41
Isaksson M,	156	Modrić Ž,	127
Ivković M,	336	Mrđa D,	314
Janković M.M.,	242	Nikolov J,	295 , 301, 314, 341, 355

Nodilo M,	116, 326, 336	Slavica M,	53
Obajdin N,	86	Smičiklas I,	326
Omahen G,	277	Smilović Radojčić Đ,	86
Oršolić N,	127	Stanić D,	283
Pantelić G,	271	Stanić G,	314
Parlov J,	257	Stojković I,	295, 341, 355
Pavelić L,	83, 331	Surić Mihić M, ... 83, 92 , 97, 147 , 152, 331	
Pavičić-Hamer D,	221	Šaponja-Milutinović D,	9
Pavić Grego A,	92	Šegedin N,	103
Pavlačić A,	301	Šimić M,	26
Pavlin M,	41	Šiško J,	92, 152
Pehnc G,	236	Šljivić-Ivanović M,	326
Pejaković Hlede J,	133	Šošarić M,	247, 309
Petrányi J,	3	Štimac D,	179
Petrinec B,	147, 236, 247, 263, 309	Šušnjara A,	379
Petroci Lj,	231	Šuto S,	26
Poje Sovilj M,	57, 283, 301	Švabić Kolacio M,	86
Poljak D,	379 , 385	Tartaro Bujak I,	26
Popić J,	53 , 163 , 179, 194, 207	Todorović D J,	242
Posedel D,	179, 194	Todorović N,	295, 301, 314, 341 , 355
Pribanić I,	173	Tucaković I,	221, 251, 301, 314, 320 , 326
Prlić I,	83, 97, 331	Vavro H,	179, 194
Radolić V,	57 , 283 , 301	Vidjak V,	163, 207
Rajačić M M,	242	Vilić M,	133
Rajlić D,	86	Vince S,	133
Ramić S,	110	Vojnić Kortmiš M,	64
Ranogajec-Komor M,	47, 116	Volčanšek A,	251
Reljić S,	227	Vraničar A,	295, 314
Rinkovec J,	236, 346	Vrtarić R,	179
Rozgaj R,	110	Vukanac I,	271
Rupić I,	194	Zauner B,	97
Ružić K,	168, 179	Živanović M,	271
Sarap N B,	242	Žunec S,	121
Senčar J,	147, 227, 23624	Žura Žaja I,	133
Serec K,	103	Žužul S,	346
Sironić A,	257, 355, 364		
Skoko B,	263		

Organizator i suorganizatori



Hrvatsko društvo za zaštitu od zračenja



Institut Ruđer Bošković, Zagreb



Institut za
medicinska
istraživanja
i medicinu
rada

Institute
for Medical
Research and
Occupational
Health

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb



Hrvatsko društvo za biomedicinsko inženjerstvo i medicinsku fiziku

Pokrovitelji



Grad Varaždin



REPUBLIKA HRVATSKA
Ministarstvo
zdravstva



REPUBLIKA HRVATSKA

MINISTARSTVO
GOSPODARSTVA,
PODUZETNIŠTVA
I OBRTA

Sponzori i izlagači



Fond za financiranje razgradnje i zbrinjavanja radioaktivnog otpada i istrošenoga nuklearnog goriva Nuklearne elektrane Krško

Gašpar

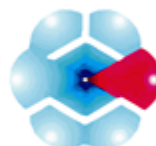
d.o.o.

Medicinska oprema i servis



Canberra

Packard



CENTRAL EUROPE GMBH



LKB

Excellence in Routine and Science

ORTEC[®]

Germanium Detectors

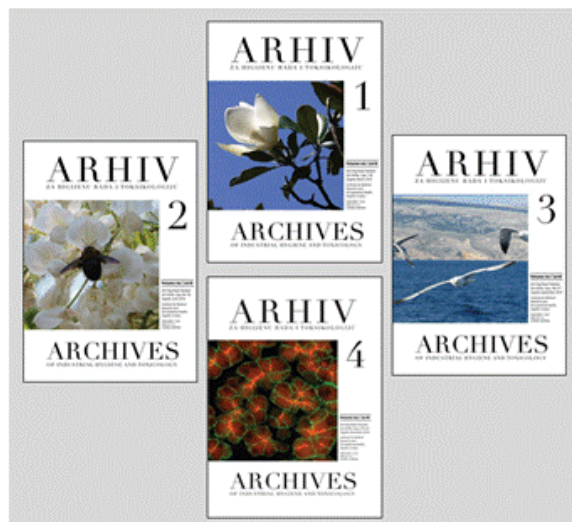


Micro-Detective

Ultra-Light, High-Fidelity Hand-Held Radioisotope Identifier



Arhiv za higijenu rada i toksikologiju
Archives of Industrial Hygiene and Toxicology
Arh Hig Rada Toksikol
ISSN 0004-1254 (Tisak); ISSN 1848-6312 (Online)



ZNANSTVENA PODRUČJA

medicina rada i zdravlje – toksikologija – zdravstvena ekologija – kemija – biokemija –
biologija – farmakologija – psihologija

SLUŽBENI ČASOPIS

Hrvatskog društva za medicinu rada Hrvatskog liječničkog zbora
Hrvatskog toksikološkog društva
Slovenskog toksikološkog društva
Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja
Hrvatskog udruženja za zaštitu zraka

Čimbenik odjeka /Impact Factor (2017): 1,117
5-godišnji čimbenik odjeka (2017): 1,335

Indeksiran u:

Web of Science - Science Citation Index Expanded, Medline/PubMed, Scopus
AGRICOLA, AGRIS, BIOSIS Previews, CABI Chemical Abstracts Service,
DOAJ, EBSCO, Ergonomics Abstracts, FSTA, INIS, ProQuest, Publons, SCImago, TEMA

Izdavač:

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada
Ksaverska cesta 2, HR-10001 Zagreb, Hrvatska

Kontakt:

E mail: arhiv@imi.hr
Tel. (+385 1)4682517, Fax: (+385 1)4673303

Rukopisi su u cijelosti dostupni na web-stranicama

<http://www.degruyter.com/view/j/aiht>
<http://hrcak.srce.hr/aiht>