

НАСТАВНО - НАУЧНОМ ВЕЋУ  
ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА  
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ  
СТУДЕНТСКИ ТРГ 12  
11000 БЕОГРАД

На седници Наставно-научног већа Физичког факултета у Београду одржаној 25. марта 2015. године одређени смо за чланове комисије за преглед и оцену докторске дисертације под насловом: „**ПРИМЕНА АНАЛИТИЧКОГ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ, ПОЛУЕМПИРИЈСКОГ И МОНТЕ КАРЛО МЕТОДА ЗА КАЛИБРАЦИЈУ ЕФИКАСНОСТИ  $^{60}\text{Co}$  ДЕТЕКТОРА У ГАМА СПЕКТРОМЕТРИЈИ УЗОРАКА ИЗ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ**” коју је Физичком факултету Универзитета у Београду пријавила кандидат Јелена Крнета Николић, дипломирани физичар. Докторска дисертација је предата Физичком факултету 23. марта 2015. године.

Након прочитане дисертације Наставно-научном већу подносимо следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### Биографски подаци о кандидату

Кандидат Крнета Николић (Драгослав) Јелена рођена је 23. 10. 1975. Основне студије је похађала на Физичком факултету Универзитета у Београду, одсек Физика, смер Теоријска и експериментална физика. Дипломски рад одбранила је 12. 7. 2005. године чиме је стекла стручно звање дипломирани физичар. Мастер студије је уписала 2006. године на Физичком факултету, смер Теоријска и експериментална физика. Докторске студије је уписала на Физичком факултету Универзитета у Београду, 2007/2008. године, студијска група Физика језгара и честица.

Запослена је у ИНН „Винча“ од 01.05.2008. као истраживач у Лабораторији за заштиту од зрачења и заштиту животне средине.

Кандидат се бави истраживањима у области контроле радиоактивности у животној и радној средини и калибрације и контроле квалитета инструмената за гамаспектрометрију.

Кандидат је учесник пројеката 141041G: “Заштита од зрачења – теоријски и експериментални физички аспекти“ 2009-2010., III43009: “Напредне технологије за мониторинг и заштиту животне средине од хемијских полутаната и радијационог оптерећења“. 2011-2015., III43007: “ Утицај глобалних климатских промена на животну средину“ 2011-2015.

Кандидат је аутор и коаутор научних радова од којих су 2 поглавља у монографији, 14 научних радова у часопису категорије М-21, 6 радова у часопису категорије М-22, 7 радова у часопису категорије М-23, 18 радова сопштених на скупу међународног значаја штампана у целини, категорије М-33, 14 радова сопштених на скупу међународног значаја штампана у изводу, категорије М-34 и 5 радова сопштених на скупу националног значаја штампана у целини, категорије М-63. Радови су цитирани укупно 167 пута (ISI/Web of science). Кандидат је рецензент у часописима Journal of Environmental Radioactivity (1 рад), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research

A (1 рад), British Journal of Applied Science & Technology (2 рада) и Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology (1 рад).

## **Предмет докторске дисертације**

Предмет изучавања докторске дисертације је примена различитих метода калибрације HPGe детектора, поређење резултата добијених различитим методама, као и побољшање и прилагођавање метода потребама мерења узорака из животне средине у цилиндричној геометрији. За потребе експерименталне калибрације произведени су секундарни референтни материјали, у оквиру аналитичког метода дат је предлог и анализирана је функција за рачунање ефикасности, а такође калибрација је извршена коришћењем програма EFFTRAN, GEANT4 и PHOTON.

## **Садржај и закључци дисертације**

Докторска дисертација је организована у пет поглавља уз увод и биографске и библиографске податке о кандидату. Дисертација има стотину четрдесет и шест страна (од увода до литературе) и садржи тридесет три слике, четрнаест табела и седамдесет и једну референцу.

У **Уводу** је у кратким цртама наведен историјат истраживања у области радиоактивности, гама спектрометрије и развоја детектора, са прегледом литературе везане за тематику рада.

У поглављу **Теоријске основе** дат је преглед теорије везане за гамаспектрометрију, детекторе зрачења и нарочито HPGe детекторе. Укратко су представљени различити приступи калибрацији ефикасности детектора. Ови приступи су експериментални, аналитички, полуемпиријски и Монте Карло приступ. На крају је дефинисан појам коинцидентног сумирања и корекција.

У поглављу **Методе и материјали** детаљно су описане методе калибрације ефикасности детектора које ће бити примењене у раду. Описане методе су експериментална метода, са прављењем секундарних референтних материјала за специфичне потребе мерења узорака из животне средине, аналитичка метода у којој је дат предлог функције зависности ефикасности од висине пуњења узорка и процедура за одређивање ефикасности за непознати узорак на основу две познате калибрационе криве, полуемпиријски метод представљен софтвером за трансфер ефикасности EFFTRAN и Монте Карло метод представљен софтверским пакетом GEANT4 и софтвером за симулацију спектралног одговора детектора PHOTON. За сваку методу је описан поступак примене и дефинисан начин одређивања мерне несигурности резултата.

У поглављу **Резултати и дискусија** наведени су резултати калибрације ефикасности три HPGe детектора за мерење узорака из животне средине у цилиндричној геометрији. Резултати добијени аналитичком, полуемпиријском и Монте Карло методама упоређени су са резултатима добијеним експерименталном методом. У потпоглављу *"Дискусија резултата добијених различитим методама"*, ефикасности добијене свим методама су примењене у мерењу референтних узорака чиме је извршено објективно поређење свих метода, установљене границе применљивости појединих метода и утврђена њихова еквивалентност по резултатима у оквиру тих граница.

У поглављу **Закључак** дат је преглед урађеног испитивања и закључци везани за применљивост метода у реалном мерењу узорака из животне средине, као и предлог побољшања методе или комбинација више метода ради добијања најбољих резултата.

Закључци изведени у овом раду су применљиви у мерењу узорака из животне средине као и у специјалним случајевима када нису доступни специфични референтни материјали за калибрацију, кад су непознати подаци о геометрији детектора или саставу мереног узорка.

У свим научним радовима објављеним на тему калибрације детектора у гама спектрометрији, резултати настали применом једног метода се верификују помоћу резултата добијених применом неког добро испитаног метода или помоћу експерименталних резултата. Евентуално се више метода истог типа међусобно пореде да би се оценила њихова еквивалентност.

У литератури нема примера радова у којима је извршено поређење више метода чији се приступи разликују у принципу. Такође, за мерење се углавном користе тачкасти извори, математички су анализирани извори облика диска, док су примери са цилиндричним геометријама узорака ретки. Коначно, одређивање ефикасности за узорке из животне средине у цилиндричној геометрији нису довољно покривени у литератури ни мерењем ни математичком анализом. Научни допринос ове дисертације је управо у домену примене различитих метода калибрације у реалним ситуацијама и модификације постојећих модела тако да одговарају потребама реалног мерног система.

У оквиру ове дисертације примењено је пет поступака за калибрацију ефикасности три HPGe детектора. Мерења су извршена у Лабораторији за заштиту од зрачења и заштиту животне средине Института за нуклеарне науке Винча. Примењене методе калибрације ефикасности су експериментална, аналитичка, полуемпиријска и две Монте Карло методе. Коефицијенти за корекцију на коинцидентно сумирање су израчунати применом програма EFFTRAN и примењени у методама.

У оквиру експерименталне методе калибрације, најпре су произведени секундарни референтни материјали у геометријама и са матриксама који одговарају узорцима из животне средине. Секундарни референтни материјали су произведени у сарадњи са Лабораторијом за нуклеарну и физику плазме Института за нуклеарне науке Винча. Након тога, израчунате су ефикасности детектора и направљене калибрационе криве.

У оквиру калибрације аналитичким методом, на основу теоријских разматрања, одређена је аналитичка зависност ефикасности од ефективне дубине интеракције и висине пуњења секундарног референтног материјала за исти полупречних геометрије мерења. Ефективна дубина интеракције је одређена на основу мерења тачкастих извора. Ова аналитичка функција, у комбинацији са познатом зависношћу ефикасности од густине узорка, примењена је на добијање ефикасности за једну геометрију коришћењем две друге геометрије чија се ефикасност сматрала познатом. Поступак је примењен и добијене ефикасности су упоређене са експерименталним резултатима. Установљено је да се одступања крећу у распону од 1% до 14% при чему су највећа одступања уочена за нискоенергетски део спектра.

За полуемпиријски метод калибрације употребљен је програм за трансфер ефикасности EFFTRAN. Овим програмом се помоћу референтне ефикасности одређује непозната ефикасност. Да би се добила почетна ефикасност, измерена је ефикасност за тачкасте изворе  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  and  $^{60}\text{Co}$  произвођача LMRI Coffret d'etalons. Програмом је након дефинисања потребних параметара израчуната ефикасности за све испитиване геометрије и матриксе и вредности су упоређене са експериментално добијеним ефикасностима. Одступања ефикасности добијених програмом EFFTRAN од експерименталних вредности крећу се у опсегу од 0,02% до 20% .

За калибрацију Монте Карло методом примењена су два програма, GEANT4 и PHOTON. Оба програма се заснивају на симулацији спектралног одговора детектора на основу података о геометрији детектора и геометрији и хемијском саставу секундарних референтних материјала. У програму PHOTON, неки доприноси спектру су изостављени у корист поједностављења рачунања па су и резултати симулације другачији. GEANT4 је познат по томе што даје веома прецизне и тачне резултате али и по осетљивости на промене у параметрима симулације. У случају испитиваних детектора, симулација GEANT4 програмом је дала резултате који од експерименталних одступају о опсегу од 0,06% до 20%. У случају програма PHOTON, одступања од експериментално добијение ефикасности су се кретала у распону од 0,03% до 20%.

Тачност калибрације је проверена мерењем активности познатих узорака. Активности радионуклида добијене коришћењем различитих метода калибрације су упоређене са референтним вредностима које су добијене од организатора интеркомпарација. Да би се оценила тачност резултата, коришћен се  $u_{test}$  критеријум који је препоручила МААЕ. На основу ових резултата установљене су границе применљивости сваког од метода и утврђена њихова еквиваленција по резултатима у оквиру тих граница. Дате су препоруке за побољшање примене програма EFFTRAN и аналитичке методе, прпоруке за комбиновање метода приликом калибрације и протокол за калибрацију аналитичком функцијом.

На основу истраживања изведених у оквиру докторске дисертације објављена су два рада у врхунским међународним часописима, један рад у међународном часопису и један рад представљен на међународној конференцији, штампан у целини (импакт фактори су наведени за годину у којој је рад објављен).

1. **M<sub>21</sub> импакт фактор 1.316** ISSN: 0168-9002

**J. Nikolić, T. Vidmar, D. Joković, M. Rajačić, D. Todorović, Calculation of HPGe efficiency for environmental samples: comparison of EFFTRAN and GEANT 4**, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A; Coordinating Editor: W. Barletta; Izdavač: Elsevier; link: <http://www.journals.elsevier.com/nuclear-instruments-and-methods-in-physics-research-section-a-accelerators-spectrometers-detectors-and-associated-equipment>; 763 (2014), 347-353.

2. **M<sub>21</sub> импакт фактор 1.488** ISSN: 0952-4746

**J. D. Nikolić, D. Joković, D. Todorović and M. Rajačić, Application of GEANT4 simulation on calibration of HPGe detectors for cylindrical environmental samples**, Journal of Radiological Protection; Izdavač: Institute of Physics Publishing; link: <http://iopscience.iop.org/0952-4746/>, Volume 34, No.2 (2014), N47-N55

3. **M<sub>23</sub> импакт фактор 0.981** ISSN: 0144-8420

**Nikolic Jelena D, Pantelic Gordana K, Zivanovic Milos Z, Rajacic Milica M, Todorovic Dragana J, Comparison of Two Methods for High Purity Germanium Detector Efficiency Calibration for Charcoal Canister Radon Measurement** Radiation Protection Dosimetry (2014) 162 (1-2):47-51

4. **M<sub>33</sub>** ISBN 978-86-6125-101-6

**Jelena Nikolić, Milica Rajačić, Dragana Todorović, Vidmar Tim, Estimation of Uncertainty of HPGe Efficiency Calculated by EFFTRAN Using Virtual Point Detector Model**, Second International Conference on Radiation and Dosimetry in Various Fields of Research RAD2014, Niš, Serbia May 27-30. 2014. pp. 243-246 ISBN 978-86-6125-101-6 Ed. Goran Ristić

На основу претходно изнетих података и имајући у виду досадашњи рад и постигнуте резултате, оригиналност и квалитет резултата, Комисија предлаже Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да кандидату Јелени Крнета Николић, прихвати докторску дисертацију „**ПРИМЕНА АНАЛИТИЧКОГ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ, ПОЛУЕМПИРИЈСКОГ И МОНТЕ КАРЛО МЕТОДА ЗА КАЛИБРАЦИЈУ ЕФИКАСНОСТИ  $^{60}\text{Co}$  ДЕТЕКТОРА У ГАМА СПЕКТРОМЕТРИЈИ УЗОРАКА ИЗ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ**” и одобри јавну одбрану.

**Комисија:**

---

др Јован Пузовић,  
Ванредни професор Физичког факултета

---

др Драгана Тодоровић, Виши научни сарадник  
Института за нуклеарне науке Винча

---

др Марија Димитријевић,  
Ванредни професор Физичког факултета

Прилог. Spisak objavljених радова кандидата

1. **J. Nikolić**, T. Vidmar, D. Joković, M. Rajačić, D. Todorović, **Calculation of HPGe efficiency for environmental samples: comparison of EFFTRAN and GEANT 4**, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 763 (2014), 347-353.
2. **J. D. Nikolić**, D. Joković, D. Todorović and M. Rajačić, **Application of GEANT4 simulation on calibration of HPGe detectors for cylindrical environmental samples**, Journal of Radiological Protection, Volume 34, No.2 (2014), N47-N55
3. **Nikolic Jelena D**, Pantelic Gordana K, Zivanovic Milos Z, Rajacic Milica M, Todorovic Dragana J, **Comparison of Two Methods for High Purity Germanium Detector Efficiency Calibration for Charcoal Canister Radon Measurement** Radiation Protection Dosimetry (2014) 162 (1-2):47-51
4. **J. D. Nikolić**, M. D. Rabasović, D. D. Markushev, **“Buffer-gas influence on multiphoton absorption and dissociation in different gas mixtures”** Optical Materials 30 (2008) 1193-1196
5. M. D. Rabasović, **J. D. Nikolić**, D. D. Markushev, **“Pulsed photoacoustic gas cell design for low pressure studies”** Optical Materials 30 (2008) 1197-12003.
6. M. D. Rabasović, **J. D. Nikolić**, D. D. Markushev, **“Simultaneous determination of the spatial profile of the laser beam and vibrational-to-translational relaxation time by pulsed photoacoustics”** Appl. Phys. B **88**, (2007), 309-315
7. M. D. Rabasović, **J. D. Nikolić**, D. D. Markushev, **“Pulsed photoacoustic system calibration for highly excited molecules: II. Influence of the laser beam profile and the excitation energy decay”** Meas. Sci. Technol. **17**, (2006), 2938-2944
8. Pantelic Gordana K, Eremic-Savkovic Maja M, Zivanovic Milos Z, **Nikolic Jelena D**, Rajacic Milica M, Todorovic Dragana J, **“Uncertainty evaluation in radon concentration measurement using charcoal canister”** Applied Radiation and Isotopes, (2014), vol. 87, str. 452-455
9. O. Masson, A. Baeza, J. Bieringer, K. Brudecki, S. Bucci, M. Cappai, F.P. Carvalho, O. Connan, C. Cosma, A. Dalheimer, D. Didier, G. Depuydt, L.E. De Geer, A. De Vismes, L. Gini, F. Groppi, K. Gudnason, R. Gurriaran, D. Hainz, O. Halldorsson, D. Hammond, O. Hanley, K. Holey, Zs. Homoki, A. Ioannidou, K. Isajenko, M. Jankovic, C. Katzlberger, M. Kettunen, R. Kierepko, R. Kontro, P.J.M. Kwakman, M. Lecomte, L. Leon Vintro, A.-P. Leppanen, B. Lind, G. Lujanienė, P. Mc Ginnity, C. Mc Mahon, H. Mala, S. Manenti, M. Manolopoulou, A. Mattila, A. Mairing, J.W. Mietelski, B. Møller, S.P. Nielsen, **J. Nikolic**, R.M.W. Overwater, S. E. Palsson, C. Papastefanou, I. Penev, M.K. Pham, P.P. Povinec, H. Rameback, M.C. Reis, W. Ringer, A. Rodriguez, P. Rulík, P.R.J. Saey, V. Samsonov, C. Schlosser, G. Sgorbati, B. V. Silobritiene, C. Soderstrom, R. Sogni, L. Solier, M. Sonck, G. Steinhauser, T. Steinkopff, P. Steinmann, S. Stoulos, I. Sykora, D. Todorovic, N. Tooloutalaie, L. Tositti, J. Tschiersch, A. Ugron, E. Vagena, A. Vargas, H. Wershofen, O. Zhukova. **Tracking of Airborne Radionuclides from the Damaged Fukushima Dai-Ichi Nuclear Reactors by European Networks**. Environ. Sci.& Technol., 2011, 45, 7670-7677,
10. M. M. Janković, D. J. Todorović, **J. D. Nikolić**. **Analysis of natural radionuclides in coal, slag and ash in coal-fired power plants in Serbia**. J. Min. Metall. Sect. B-Metall., 47 (2) B (2011) 149–155
11. **Nikolic Jelena D**, Pantelic Gordana K, Todorovic Dragana J, Jankovic Marija M, Eremic-Savkovic Maja, **Monitoring of Aerosol and Fallout Radioactivity in Belgrade After the Fukushima Reactors Accident**, WATER AIR AND SOIL POLLUTION, (2012), vol. 223 br. 8, str. 4823-4829

12. Todorovic Dragana J, Jankovic Marija M, **Nikolic Jelena D**, Kosutic Dusko D, **Radioactivity of mining sites of lead, zinc and phosphate ores in Serbia**, JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND HEALTH PART A-TOXIC/HAZARDOUS SUBSTANCES & ENVIRONMENTAL ENGINEERING, (2012), vol. 47 br. 6, 812-817
13. Todorovic Dragana J, Popovic Dragana L, Ajtic Jelena I, **Nikolic Jelena D**, **Leaves of higher plants as biomonitors of radionuclides (Cs-137, K-40, Pb-210 and Be-7) in urban air**, Environmental Science and Pollution Research, (2013), vol. 20 br. 1, str. 525-532155,
14. G. K. Pantelić, D. J. Todorović, **J. D. Nikolić**, M. M. Rajačić, M. M. Janković, N. B. Sarap, **Measurement of radioactivity in building materials in Serbia**, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry <http://www.springer.com/chemistry/journal/10967>, (2015) DOI 10.1007/s10967-014-3745-2
15. M. M. Rajačić, D. J. Todorović, M. M. Janković, **J. D. Nikolić**, N. B. Sarap, G. K. Pantelić, **<sup>7</sup>Be in atmospheric deposition:determination of seasonal indices**; Journal Radioanalytical Nuclear Chemistry, <http://www.springer.com/chemistry/journal/10967>, (2015) DOI 10.1007/s10967-014-3733-6 IF
16. N. B. Sarap, M. M. Janković, Ž. K. Dolijanović, D. Đ. Kovačević, M. M. Rajačić, **J. D. Nikolić**, D. J. Todorović; **Soil to plant transfer factor for <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs**; Journal Radioanalytical Nuclear Chemistry <http://www.springer.com/chemistry/journal/10967>, (2015)
17. D. Todorović, D. Popović, **J. Nikolić**, J. Ajtić, **Radioactivity monitoring in ground level air in Belgrade urban area**, Radiation Protection Dosimetry, 2010, Vol.142, No. 2-4, pp. 308-313
18. Ajtic Jelena I, Todorovic Dragana J, **Nikolic Jelena D**, Djurdjevic Vladimir S, **A Multi-Year Study of Radioactivity in Surface Air and Its Relation to Climate Variables in Belgrade, Serbia**, NUCLEAR TECHNOLOGY & RADIATION PROTECTION, (2013), vol. 28 br. 4, str. 381-388
19. Zivanovic Milos Z, **Nikolic Jelena D**, Apostol Andrei I, Anagnostakis Marios J, **Analysis of Interferences from Full Energy Peaks in Gamma Spectrometry of Norm and Tenorm Samples**, NUCLEAR TECHNOLOGY & RADIATION PROTECTION, (2012), vol. 27 br. 4, str. 380-387
20. Todorovic Dragana J, Popovic Dragana L, **Nikolic Jelena D**, Ajtic Jelena I, **RADIOACTIVITY MONITORING IN GROUND LEVEL AIR IN BELGRADE URBAN AREA**, RADIATION PROTECTION DOSIMETRY, (2010), vol. 142 br. 2-4, str. 308-313
21. Popovic Dragana L, Todorovic Dragana J, Ajtic Jelena I, **Nikolic Jelena D**, **Active Biomonitoring Of Air Radioactivity In Urban Areas**, NUCLEAR TECHNOLOGY & RADIATION PROTECTION, (2009), vol. 24 br. 2, str. 100-103
22. Ajtic Jelena I, Todorovic Dragana J, Filipovic Anka J, **Nikolic Jelena D**, **Ground Level Air Beryllium-7 And Ozone In Belgrade**, NUCLEAR TECHNOLOGY & RADIATION PROTECTION, (2008), vol. 23 br. 2, str. 65-71
23. Jankovic Marija M, Todorovic Dragana J, **Nikolic Jelena D**, Rajacic Milica M, Pantelic Gordana K, Sarap Natasa B, **Temporal concentration changes of beryllium-7 and lead-210 in ground level air in Serbia**, HEMIJSKA INDUSTRIJA, (2014), vol. 68 br. 1, str. 83-88
24. **Nikolic Jelena D**, Rabasovic Mihailo D, Markushev Dragan D, **Limitations of the generalized coupled two-level model during the multiphoton absorption in different gas mixtures**, ACTA PHYSICA POLONICA A, (2007), vol. 112 br. 5, str. 811-816

25. **Nikolic Jelena D**, Rabasovic Mihailo D, Markushev Dragan D, **Calculation of the highly excited SF6 vibrational state distributions and dissociation yields in different gas mixtures**, ACTA PHYSICA POLONICA A, (2007), vol. 112 br. 5, str. 817-822
26. B. Sarap, M. M. Janković, D. J. Todorović, **J. D. Nikolić** and M. S. Kovačević, **Environmental radioactivity in southern Serbia at locations where depleted uranium was used**, Arhiv za higijenu rada i toksikologiju, (2014), 65, 189-197
27. **J. D. Krneta Nikolić**, D. J. Todorović, M. M. Janković, G. K. Pantelić and M. M. Rajačić, **Quality assurance and quality control in environmental radioactivity monitoring**, Quality Assurance and Safety of Corps & Foods, (2014), Vol.6, No.4,403-409.
28. D. Popovic, D. Todorovic, M. Anicic, M. Tomasevic, **J. Nikolic** i J. Ajtic: **Trace elements and radionuclides in urban air monitores my moss leaves and tree leaves**, AIR QUALITY, Ed. Ashok Kumar, SCIYO, 2010, Rijeka, Croatia, ISBN 978-953-307-131-2, chapter 6, 117 – 142.
29. D. Popović, D. Todorović, V. Spasic Jokic, J. Nikolić, **Contents of Radionuclides in Soils in Serbia: Dose Calculations and Environmental Risk Assessment**, Advances in Environmental Research. Volume 6, Editors Justin A. Daniels, ISBN: 978-1-61728-163-1, 2012 Nova Science Publishers, pp. 91-134.