

## ANALIZA VISOKE KONCENTRACIJE RADONA U JEDNOJ KUĆI U RUDARSKOM PODRUČJU KOMPLEKSA „TREPČA“

Ljiljana GULAN<sup>1</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>2</sup>, Dušica SPASIĆ<sup>1</sup>,  
Jelena ŽIVKOVIĆ RADOVANOVIĆ<sup>1</sup>, Biljana VUČKOVIĆ<sup>1</sup>,  
Jan HANSMAN<sup>2</sup> i Robert LAKATOŠ<sup>3</sup>

1) Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici,  
Prirodno-matematički fakultet, Lole Ribara 29, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija,

[ljiljana.gulan@pr.ac.rs](mailto:ljiljana.gulan@pr.ac.rs), [ducica.spasic@pr.ac.rs](mailto:ducica.spasic@pr.ac.rs),

[jelena.zivkovic.radovanovic@pr.ac.rs](mailto:jelena.zivkovic.radovanovic@pr.ac.rs), [biljana.vuckovic@pr.ac.rs](mailto:biljana.vuckovic@pr.ac.rs)

2) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja

Obradovića 4, 21000 Novi Sad, Srbija, [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs),

[jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs)

3) Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića  
6, 21000 Novi Sad, Srbija, [laki@uns.ac.rs](mailto:laki@uns.ac.rs)

### SADRŽAJ

Visoke koncentracije radona zabeležene su u jednoj kući u naselju Rudare u blizini rudarskog kompleksa "Trepča". Ugljeni kanisteri izlagani po 48 sati u julu, novembru i decembru 2019 pokazali su vrednosti koncentracije radona:  $16273 \pm 162$ ,  $962 \pm 17$ ,  $144 \pm 7$  Bq/m<sup>3</sup>, respektivno. Istovremeno sa ugljenim kanisterima koncentracija radona merena je aktivnom metodom (RAD7 uređajem) u novembru (u ciklusu 11x1h), i vrednosti su opadale od  $2764 \pm 212$  do  $1449 \pm 104$  Bq/m<sup>3</sup>. Specifične aktivnosti radionuklida <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K, <sup>238</sup>U i <sup>235</sup>U u zemljištu u blizini kuće iznosile su:  $65,3 \pm 1,5$ ,  $116,0 \pm 2,2$ ,  $890 \pm 40$ ,  $113 \pm 5$ ,  $9,0 \pm 0,4$  Bq/kg, respektivno, i veće su od istih u kamenu koji je korišćen za izgradnju kuće. Vrednost jačine gama doze u blizini unutrašnjih zidova kretala se od  $0,33$ - $0,35$  μSv/h. Ovi rezultati su korišćeni za procenu geogenog potencijala radona na osnovu određenog granulometrijskog sastava zemljišta. Područje kompleksa "Trepča" u geomorfološkom smislu čine uglavnom stene magmatskog porekla, u geotektonskom i seizmičkom smislu ga odlikuje duboki rased i klasifikovano je kao umereno trusno područje. Stoga, dalje istraživanje treba usmeriti na veći broj objekata u rudarskom području i identifikaciju regiona sa visokim koncentracijama radona koje prevazilaze nacionalni referentni nivo za radon od 300 Bq/m<sup>3</sup>.

### 1. Uvod

Prisustvo urana i radijuma u stenama ispod objekata je važna odrednica kada je u pitanju radonski potencijal. Kako permeabilnost tla kontroliše brzinu kojom se radon transportuje sa velikih dubina na površinu, bilo koja šupljina koja postoji pod zemljom ima potencijal da akumulira povišene nivoe radona. Objekti izgrađeni na površini zemlje imaju potencijal da uvlače zemni gas, koji može sadržati visoke koncentracije radona. Ovaj fenomen je obično rezultat pritiska u objektima izazvanim tzv. "efektom dimnjaka" (podizanje toplog vazduha) i uglavnom predstavlja problem u hladnoj i umerenoj klimi. Da li će se zemni gas sa visokim koncentracijama radona akumulirati u zgradama zavisi od konstrukcije i načina korišćenja objekata.

Povišeni nivoi radona se mogu pripisati lokalnoj geologiji, ali mogu biti i rezultat rudarske aktivnosti i visoke propustljivosti koja je veštački indukovana [1]. U oblastima rudarske aktivnosti generišu se značajne promene u stenskoj masi. Takođe, važan

element koji utiče na migraciju radona je lokalna tektonika. Migracija radona izazvana je vađenjem rude i površinskim sleganjem, kao i nastalim tektonskim diskontinuitetima duž zona raseda izazvanim miniranjem i podrhtavanjem tla [2]. Ovi procesi dovode do visokih nivoa radona u zemnom gasu i često su rezultat povećane propustljivosti u zonama sleganja. Procesu izazvani rudarstvom donose značajnu fragmentaciju u slojevima stena, što može dovesti do povećanja aktivnih puteva migracije radona u stenskim masama i do ekshalacije radona u atmosferu ili objekte.

Iako udeo objekata sa nivoima radona koji prevazilaze referentne nivoe nizak u mnogim oblastima, u pojedinim oblastima ukupan broj kuća koje su “pogođene” može biti visok ako se uzme u obzir gustina stanovništva. Rudarska područja su obično gusto naseljena i stanovništvo je potencijalno izloženo povišenim vrednostima radona i njegovih potomaka. Monitoring radona u takvim naseljima treba izvesti u što većem broju objekata i zbog činjenice da više faktora istovremeno omogućavaju migraciju radona. Pored toga, odlagališta iz rudnika i skladištenje otpadnog materijala nakon prerade se uglavnom obavlja na površini u blizini naselja, a monitoring sadržaja prirodnih radioaktivnih materijala (NORM) i tehnološki izmenjene prirodne radioaktivnosti (TENORM) se retko sprovodi.

Cilj ovog rada je da se ukaže na potrebu monitoringa radona u blizini rudarskog kompleksa “Trepča”, zbog visoke vrednosti radona izmerene u jednoj kući u naselju Rudare, i da se daljim merenjima izvrši identifikacija područja koja su sklona radonu.

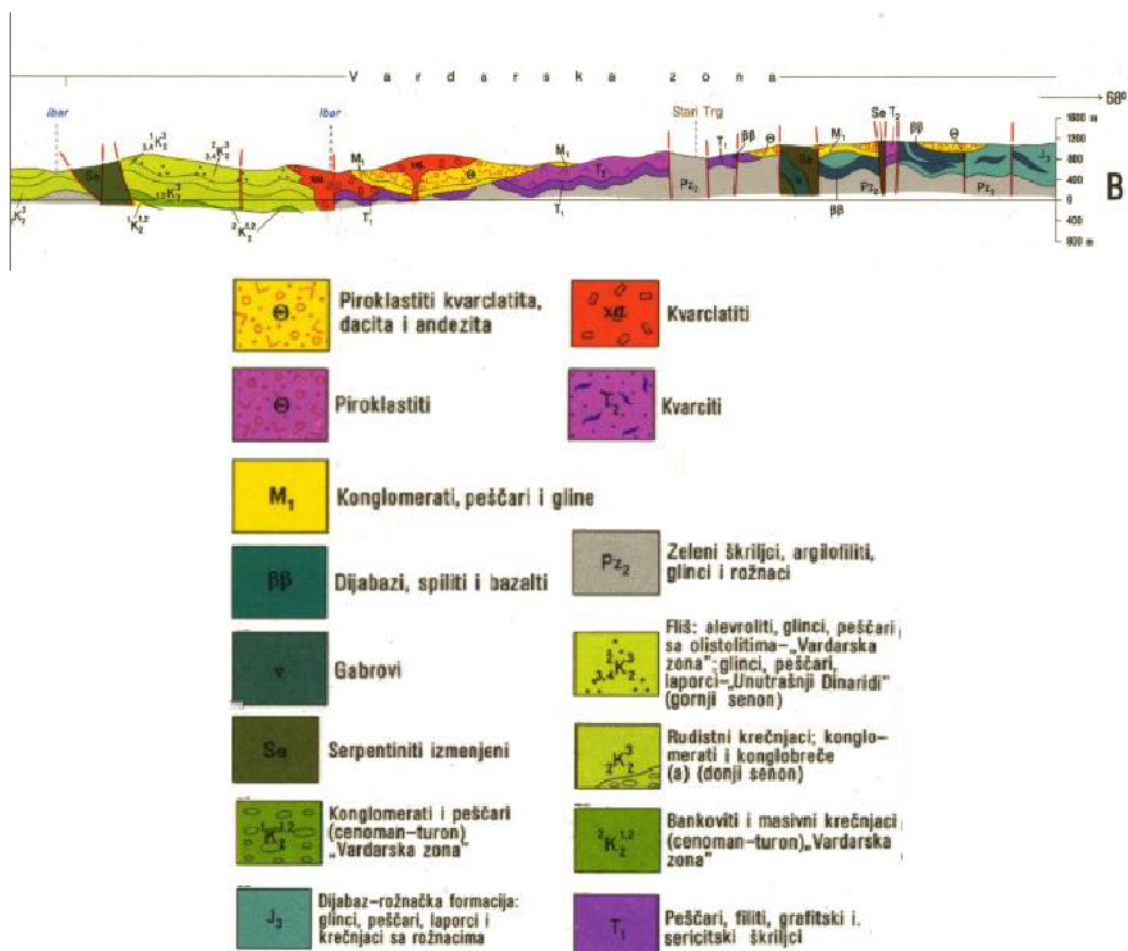
## **2. Ispitivano područje, materijal i metode**

### **2.1 Geologija područja**

Kosovskomitrovički region pripada zoni tercijarnog magmatizma. Geološke strukture formirane su od ordovicijuma-silura do kvartara. Najzastupljenije stene severoistočno od Kosovske Mitrovice su paleozojski kristalasti škriljci, jurske ultrabazične stene (serpentiniti i peridotiti), veće mase dijabaza. Vulkanske stene, daciti, andeziti, latiti i kvarclatiti praćeni velikim masama piroklastita produkt su intenzivne vulkanske aktivnosti; izlivi su pratili intruziju granitnih stena i velike rasede duž doline Ibra, jugozapadno od Kopaonika, na Rogozni i oko Trepče [3]. Za proboje ovih stena vezana su bogata rudna ležišta olova, cinka i drugih metala i nemetala. Rudnik “Trepča” počeo je sa radom 1930. godine, sa prekidom u 1999. godini. Iako je bilo najvažnije rudarsko područje Evrope, danas veći deo kompleksa nije operativan. U neposrednoj je blizini i rudnik Stari trg u kojem se vrše miniranja po informacijama dobijenim od meštana na terenu.

### **2.2 Metode merenja**

Za merenje koncentracije radona u kući korišćena je pasivna metoda adsorpcije na aktivnom uglju. Ugljeni kanisteri su bili izlagani u dnevnoj sobi prizemne kuće u naselju Rudare u trajanju od 48 h u julu, novembru i decembru 2019. Relativno visok intenzitet gama linija radonovih potomaka  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  omogućava indirektno određivanje koncentracije radona u zatvorenom prostoru najmanje tri sata nakon prestanka izlaganja, kako bi se omogućila sekularna ravnoteža na aktivnom uglju. Gama-spektrometrijska merenja su izvršena na HPGe detektoru visoke rezolucije i NaI(Tl) scintilacionom spektrometru.



Slika 1. Geološki profil sa vertikalnim presekom stena naselja Rudare i okoline [3].

Pored pasivnih merenja u novembru 2019. uporedo su vršena i direktna merenja koncentracije radona u vazduhu zatvorene prostorije pomoću aktivnog monitora radona RAD7 (proizvođača DURRIDGE) sa polusfernom aktivnom komorom zapremine 0,75 litara. Alfa-spektrometrijska metoda pogodna je za razdvajanje radonovih i toronovih potomaka zbog različitih energija emitovanih alfa čestica, kao i za odvajanje "starog" od "novog" radona. Dotok svežeg vazduha obezbeđen je automatskom pumpom sa stalnim protokom i vazduh u početku prolazi kroz odvlaživač, a na samom ulazu u detektor nalazi se filter koji uklanja potomke radona i torona. Merenja radona RAD7 uređajem izvršena su u ciklusima od po 1 h u periodu od 11 h.

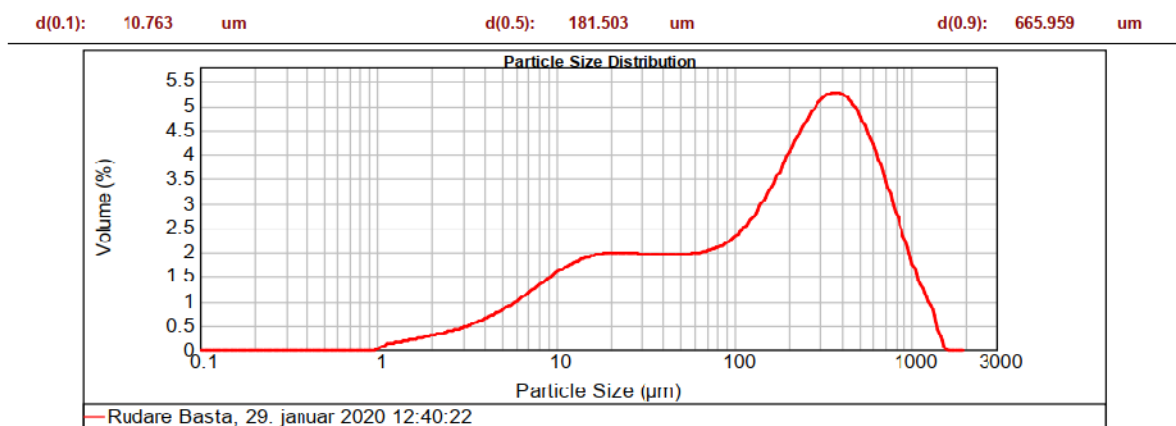
Da bi se procenio radonski potencijal izmerena je koncentracija radona u zemljištu u neposrednoj blizini kuće aktivnim monitorom RAD7 sa čeličnom sondom pobodenom u zemljište do dubine od 80 cm. Sa date lokacije uzeti su uzorci zemljišta, kao i kamena koji je verovatno korišćen u izgradnji kuće za gamaspektrometrijsku analizu sadržaja radionuklida. Ovi uzorci su sušeni do konstantne mase, usitnjeni homogeno pakovani u plastične cilindrične posude koje su hermetički zatvarane i takve ostavljene 40 dana da bi se uspostavila sekularna radioaktivna ravnoteža između  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{226}\text{Ra}$ . Gama spektrometrijska merenja izvršena su HPGe detektorom tipa ORTEC GMX, rezolucije 1,9 keV i nominalne efikasnosti 32 %. Pasivna zaštita oko detektora je napravljena od olova debljine 12 cm. Gama spektri su prikupljeni i analizirani pomoću Canberra Genie 2000 softvera. Sve merne nesigurnosti su date na nivou poverenja od 95 %. Za procenu

koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{235}\text{U}$  korišćeni su najintenzivniji gama prelazi. Za određivanje koncentracije aktivnosti urana  $^{238}\text{U}$  korišćene su linije neposrednog potomka  $^{234}\text{Th}$ . Analiza granulometrijskog sastava zemljišta izvršena je metodom laserske difrakcije na uređaju Malvern Mastersizer 2000 za analizu veličine čestica u opsegu od  $0.02\ \mu\text{m}$  do  $2000\ \mu\text{m}$ . Za klasifikaciju veličine zrna korišćene su sledeće frakcije: krupnozrni pesak ( $500\text{-}2000\ \mu\text{m}$ ), srednji pesak ( $250\text{-}500\ \mu\text{m}$ ), fini pesak ( $62.5\text{-}250\ \mu\text{m}$ ), silt ( $3.9\text{-}62.5\ \mu\text{m}$ ) i glina ( $<3.9\ \mu\text{m}$ ).

### 3. Rezultati i diskusija

Izmerene vrednosti koncentracije aktivnosti radona ugljenim kanisterima su iznosile:  $16273\pm 162\ \text{Bq/m}^3$ ,  $962\pm 17\ \text{Bq/m}^3$ ,  $144\pm 7\ \text{Bq/m}^3$  u julu, novembru i decembru 2019, respektivno. Aktivna merenja koncentracije radona uređajem RAD7 (u ciklusima po 1 h u toku noći) pokazala su trend opadanja koncentracije od  $2764\pm 212\ \text{Bq/m}^3$  do  $1449\pm 104\ \text{Bq/m}^3$ . Merenja pokazuju značajne varijacije koncentracije radona koje nisu u skladu sa sezonskim varijacijama.

Specifične aktivnosti radionuklida u dva uzorka zemljišta uzeta u blizini kuće su iznad uobičajenih vrednosti za područje Kosova i Metohije ( $33\ \text{Bq/kg}$  za  $^{226}\text{Ra}$ ,  $35\ \text{Bq/kg}$  za  $^{232}\text{Th}$  i  $620\ \text{Bq/kg}$  za  $^{40}\text{K}$ ) [4], a takođe i više od vrednosti izmerenih u uzetim uzorcima kamena od kojeg su izrađeni zidovi ispitane kuće (Tabela 1). Ono što je takođe uočeno je pomeranje raspodele veličine zrna zemljišta ka krupnijoj frakciji na osnovu čega se može proceniti veća permeabilnost zemljišta i veći geogeni potencijal. Međutim u zemljištu nisu izmerene povišene koncentracije radona ( $7,5\pm 1,3\ \text{kBq/m}^3$  što se smatra niskom vrednošću  $< 10\ \text{kBq/m}^3$ ), i po metodi procene geogenog radonskog potencijala na osnovu udela niskozrne frakcije ( $< 65\ \mu\text{m}$ ) – u ovom slučaju  $32,37\ \%$  i izmerene koncentracije radona u zemnom gasu [5] indeks radonskog rizika je mali.



**Slika 2. Raspodela veličine čestica u uzorku zemljišta iz bašte pored kuće – selo Rudare.**

Vrednost jačine gama doze u blizini unutrašnjih zidova prostorije kretala se  $0,33 - 0,35\ \mu\text{Sv/h}$ .

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da su koncentracije radona znatno veće od nacionalnog referentnog nivoa, a vrednosti aktivnosti radionuklida u zemljištu 2 puta veće od svetskog proseka ( $33\ \text{Bq/kg}$  za  $^{238}\text{U}$ ,  $32\ \text{Bq/kg}$  za  $^{226}\text{Ra}$ ,  $45\ \text{Bq/kg}$  za  $^{232}\text{Th}$  i  $412\ \text{Bq/kg}$  za  $^{40}\text{K}$ ) [6]. To može ukazivati na područje sklono radonu.

**Tabela 1. Specifične aktivnosti radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{235}\text{U}$  u uzorcima zemljišta i kamenu.**

Radionuklid/uzorak	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{238}\text{U}$	$^{235}\text{U}$
	(Bq/kg)				
<b>Zemljište 1</b>	65,3±1,5	116,0±2,2	890±40	113±5	9,0±0,4
<b>Zemljište 2</b>	50,3±1,0	79,4±2,8	736±10	106±6	6,0±0,3
<b>Kamen</b>	40,9±1,0	75,6±1,7	642±28	73±4	5,9±0,3

Pored toga, rudarske aktivnosti mogu izazvati fluktuacije koncentracije radona, i visoke vrednosti u obližnjim kućama usled naglog dotoka radona kroz pukotine. S druge strane, visoka vrednost radona u letnjem periodu može se objasniti naglim izlaženjem radona iz zemljišta, usled geodinamičkih procesa u zemljinoj kori i na površini. Naime, 26.11.2019, dogodio se jak zemljotres u Albaniji magnitude  $M_L=6,4$  (200 km od Kosovske Mitrovice), oko 13 dana nakon izvršenih merenja radona. Postojanje zone dubokog raseda i seizmotektonske zone u okolini Kosovske Mitrovice dozvoljava transport radona kroz pukotine zbog gradijenta pritiska usled predseizmičkog naprezanja. Pojave zemljotresa kojima su prethodile visoke koncentracije radona, i zatim nagli pad pred potres zabeležene su u drugim studijama označavajući radon za pekursor zemljotresa [7-9].

#### 4. Zaključak

Visoke koncentracije radona koje prevazilaze nacionalni referentni nivo za radon od  $300 \text{ Bq/m}^3$  izmerene su u jednoj kući u blizini rudarskog kompleksa "Trepča". Prema neobjavljenom malom broju podataka, postoje i drugi objekti u kojima je stanovništvo potencijalno izloženo povišenim vrednostima radona. Na osnovu predstavljenih rezultata postoji potreba monitoringa radona u većem broju objekata, jer vrednosti koncentracije radona i aktivnosti radionuklida u zemljištu ukazuju da pored lokalne geologije, postoji niz drugih faktora koji determinišu nivo radona u objektima. Pored toga, zbog gradijenta pritiska usled predseizmičkog naprezanja zabeležene visoke koncentracije radona u danima koji su prethodili pojavi zemljotresa u regionu, pokazale su da radon može biti koristan prediktor u geotektonskim istraživanjima.

#### 5. Zahvalnica

Rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije Ugovorima br. 451-03-9/2021-14/200123 i br. 451-03-9/2021-14/200125.

#### 6. Literatura

- [1] M. Wysocka. Radon problems in mining and post-mining areas in the Upper Silesia region, Poland. *Nukleonika* 61(3), 2016, 307-313.
- [2] R. Hejmanowski, W. T. Witkowski. Suitability assessment of artificial neural network to approximate surface subsidence due to rock mass drainage. *J. Sustain. Mineral.* 14(2), 2015, 101-107.
- [3] Geološki Atlas Srbije. Ministarstvo za zaštitu prirodnih bogatstava i životne sredine Republike Srbije. Bares, Beograd, 2002.
- [4] Gulan Ljiljana, Merenje radionuklida u tlu i radona u zatvorenim prostorijama na Kosovu i Metohiji, *Doktorska disertacija*, (2014), Kragujevac 2014.

- [5] I. Barnet, P. Pacherova, M.N., 2008. Radon in geological environment—Czech experience Czech Geological Survey Special Papers, No. 19. Prague.
- [6] UNSCEAR, 2008. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. *Annex B: Exposure of the public and workers from various sources of radiation*. New York: United Nations.
- [7] A. Gregorič, B. Zmažek, S. Dzeroski, D. Torkar, J. Vaupotič. Radon as an Earthquake Precursor - Methods for Detecting Anomalies, Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning, Chapter 9. 2012.
- [8] Y. Hwa Oh, G.A. Kim. Radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor. *Sci Rep* 5, 2015,13084.
- [9] J.W. Kim, H.Y. Joo, R. Kim, J.H. Moon. Investigation of the relationship between earthquakes and indoor radon concentrations at a building in Gyeongju, Korea. *Nuclear Engineering and Technology*, 50 (3), 2018, 512-518.

**ANALYSIS OF HIGH RADON CONCENTRATION IN ONE HOUSE IN THE MINING AREA OF THE "TREPČA" COMPLEX**

**Ljiljana GULAN<sup>1</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>2</sup>, Dušica SPASIĆ<sup>1</sup>,  
Jelena ŽIVKOVIĆ RADOVANOVIĆ<sup>1</sup>, Biljana VUČKOVIĆ<sup>1</sup>,  
Jan HANSMAN<sup>2</sup> and Robert LAKATOŠ<sup>3</sup>**

1) *Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Prirodno-matematički fakultet, Lole Ribara 29, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija,*

*[ljiljana.gulan@pr.ac.rs](mailto:ljiljana.gulan@pr.ac.rs), [dusica.spasic@pr.ac.rs](mailto:dusica.spasic@pr.ac.rs),*

*[jelena.zivkovic.radovanovic@pr.ac.rs](mailto:jelena.zivkovic.radovanovic@pr.ac.rs), [biljana.vuckovic@pr.ac.rs](mailto:biljana.vuckovic@pr.ac.rs)*

2) *Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja*

*Obradovića 4, 21000 Novi Sad, Srbija, [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs),*

*[jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs)*

3) *Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, [laki@uns.ac.rs](mailto:laki@uns.ac.rs)*

**ABSTRACT**

High radon concentrations were recorded in one house of the settlement Rudare near the ore complex "Trepča". Charcoal canisters exposed for 48 hours in July, November and December 2019 showed values of radon concentration:  $16273 \pm 162$ ,  $962 \pm 17$ ,  $144 \pm 7$  Bq/m<sup>3</sup>, respectively. Simultaneously with the charcoal canisters, the radon concentration was measured by the active method (RAD7 device) in November (in the 11x1h cycle), and the values decreased from  $2764 \pm 212$  to  $1449 \pm 104$  Bq/m<sup>3</sup>. The specific activities of the radionuclides <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K, <sup>238</sup>U and <sup>235</sup>U in the soil near the house were:  $65.3 \pm 1.5$ ,  $116.0 \pm 2.2$ ,  $890 \pm 40$ ,  $113 \pm 5$ ,  $9.0 \pm 0$ , 4 Bq/kg, respectively, and are greater than those in the stone used for build the house. The value of gamma dose rates near the inner walls ranged from 0.33-0.35 μSv/h. These results were used to estimate the geogenic potential of radon based on a certain granulometric composition of the soil. The area of the "Trepča" complex in the geomorphological terms consists mainly of rocks of igneous origin, in the geotectonic and seismic terms it is characterized by a deep fault and is classified as a moderate seismic area. Therefore, further investigation should focus on a larger number of facilities in the mining area and the identification of regions with high radon concentrations that exceed the national reference level for radon of 300 Bq/m<sup>3</sup>.