

ЦРНОГОРСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЈЕТНОСТИ
ГЛАСНИК ОДЈЕЉЕЊА ПРИРОДНИХ НАУКА, 22, 2018.

ЧЕРНОГОРСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК И ИСКУССТВ
ГЛАСНИК ОТДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК, 22, 2018

THE MONTENEGRIN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS
PROCEEDINGS OF THE SECTION OF NATURAL SCIENCES, 22, 2018.

UDK 551.521.3(497.16)

*Perko Vukotić**, *Ranko Svrkota***,
*Tomislav Anđelić****, *Nikola Svrkota****

BUKOVIK I BUKOVICA – LOKALNOSTI SA NAJVEĆIM FONOM TERESTRIJALNOG ZRAČENJA U CRNOJ GORI

Izvod

Obimno istraživanje lokalnosti u Crnoj Gori sa povećanim fonom terestrijalnog gama zračenja i izvora njihove povećane radioaktivnosti obavljeno je u periodu 2007–2009. godine i obuhvatilo je 138 lokalnosti. Ono je pokazalo da su najviše apsorbovane doze zračenja u vazduhu izmjerene na lokalnostima Bukovik kod Virpazara i Bukovica kod Šavnika i da je osnovni uzrok tome visoki sadržaj kalijuma u tlu tih lokalnosti.

U novom, detaljnijem istraživanju u Bukoviku i Bukovici, realizovanom 2015. godine, provjerena je i potvrđena relevantnost tih ranijih rezultata za šira područja ovih lokalnosti. U Bukoviku, na visini 1 m iznad tla, izmjerena je srednja jačina apsorbovane doze od 266 nGy/h, a u Bukovici 188 nGy/h, koje su respektivno 4.8 i 3.4 puta veće od prosječne jačine doze u Crnoj Gori.

Gamaspektrometrijska analiza je potvrdila da je visok sadržaj kalijuma u tlu glavni uzrok povećanog spoljašnjeg zračenja na tim lokalnostima. U tlu Bukovika srednja koncentracija aktivnosti ^{40}K iznosi 2702 Bq/kg, a u tlu Bukovice 2108 Bq/kg, i one su respektivno 11 i 8.6 puta više od prosječne u tlu Crne Gore.

Na osnovu terenskih mjerenja procijenjena je srednja efektivna godišnja doza za odraslog čovjeka usljed izloženosti spoljašnjem zračenju terestrijalnih radionuklida tokom boravka izvan i unutar kuće na ispitivanim ruralnim lokalnostima. Za stanovnika Bukovika ona je 1.4 mSv/god, a za stanovnika Bukovice 1.0 mSv/god, što je respektivno trostruko i dvostruko više od svjetskog prosjeka.

* Perko Vukotić, Crnogorska akademija nauka i umjetnosti

** Ranko Svrkota, Republički zavod za geološka istraživanja, Podgorica

*** Tomislav Anđelić, Nikola Svrkota, Centar za ekotoksikološka ispitivanja, Podgorica

BUKOVIK I BUKOVICA – LOCALITIES WITH THE HIGHEST TERRESTRIAL RADIATION BACKGROUND IN MONTENEGRO

Abstract

Research aimed to find localities in Montenegro with elevated terrestrial gamma-radiation background and recognize sources of their radiation, which included 138 localities, was conducted during the period 2007-2009. It has revealed that the highest absorbed doses in the air are on the rural localities Bukovik and Bukovica, caused primarily by a high content of potassium in the soil of these places.

In a new, more detailed research, conducted on these two localities during 2015, relevance of the previous results was checked and confirmed for a wider area of Bukovik and Bukovica.

Average absorbed dose-rate in the air, 1 m above the ground, is found to be 266 nGy/h in Bukovik, and 188 nGy/h in Bukovica. These values are, respectively, 4.8 and 3.4 times higher than the average dose-rate in Montenegro.

Gamma-spectrometry analysis of the four composite soil samples from each one of these two localities has confirmed that a high content of potassium in soil is the main source of elevated radiation background. Average activity concentration of ^{40}K is 2702 Bq/kg in the soil of Bukovik and 2108 Bq/kg in the soil of Bukovica, and these values are, respectively, 11 and 8.6 times higher than the average in Montenegro.

Based on the field measurements, an average annual effective dose received by adults living in the investigated two rural localities due to external exposure to terrestrial sources of radiation, related to indoor and outdoor occupancy, is estimated. For an adult in Bukovik it is 1.4 mSv/year, and in Bukovica 1.0 mSv/year, which is, respectively, three and two times higher than the world average.

1. UVOD

Prvo sistematsko istraživanje fona terestrijalnog gama zračenja u Crnoj Gori urađeno je 1994–1996. godine [1,2]. Ono je pokazalo da srednja vrijednost jačine apsorbirane doze u vazduhu u Crnoj Gori, na visini 1m iznad tla, iznosi 55 nGy/h, kao i da postoje lokalnosti sa povećanim vrijednostima doze zračenja, do 130 nGy/h.

U periodu 2007–2009. godine u okviru projekta „Područja u Crnoj Gori sa relativno povećanom radioaktivnošću”, koji je finansirala Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, sprovedeno je obimno istraživanje u cilju determinacije lokalnosti u Crnoj Gori sa povećanom radioaktivnošću tla. Terenski i dozimetrijski je ispitano 138 lokalnosti za koje su njihove geološke karakteristike indicirale mogućnost povećanog fona gama zračenja [3]. Za 27 od ispitivanih lokalnosti, na kojima su bile izmjerene vrijednosti jačine apsorbirane doze u vazduhu, na visini 1 m iznad tla, najmanje za 50% veće od prosječne u Crnoj

Gori, urađene su i gamaspektrometrijske analize po jednog uzorka tla sa svakog od njih. Tada su najveće vrijednosti jačina doza konstatovane na lokalnostima Bukovik (kod Virpazara) i Bukovica (kod Šavnika), a gama spektrometrija je pokazala da su one uzrokovane visokim sadržajem kalijuma u tlu, a donekle i povećanim sadržajem uranijuma i torijuma, kao što je prikazano u Tabeli 1 [3]. U Tabeli 1 date su i srednje vrijednosti jačine apsorbovane doze u vazduhu na visini 1 m iznad tla za Crnu Goru, te koncentracije aktivnosti ^{40}K , ^{232}Th i ^{238}U u tlu [1, 2].

Tabela 1. Jačine apsorbovane doze i koncentracije aktivnosti radionuklida u tlu Bukovika i Bukovice i njihove srednje vrijednosti za Crnu Goru

Lokalnost	D (nGy/h)	^{40}K (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{238}U (Bq/kg)
Bukovik	192	2329 ± 75	51.2 ± 1.8	64.8 ± 13.1
Bukovica	148	3341 ± 106	71.9 ± 2.5	65.0 ± 34.4
Srednje za CG	55	246	24	29

Poređenjem sa drugim poznatim područjima u svijetu sa visokim fonom prirodnog zračenja [4], konstatovano je da lokalnosti Bukovik i Bukovica, sa jačinama doza 192 nGy/h i 148 nGy/h respektivno, spadaju u red područja sa umjerenim vrijednostima povećanja fona.

Zbog velikog obima istraživanja (138 lokalnosti) tada je na svakoj lokalnosti rađena dozimetrija samo na jednom mjestu, a gamaspektrometrijski je analiziran samo jedan kompozitni uzorak tla sa mjesta na kojem je mjerena doza zračenja. Zato smo u ovom novom, detaljnijem istraživanju na lokalnostima Bukovik i Bukovica, na kojima su izmjereni najviši do sada poznati nivoi fona terestrijalnog gama zračenja u Crnoj Gori, željeli da provjerimo relevantnost rezultata prikazanih u Tabeli 1 za šira područja te dvije lokalnosti, kao i da procijenimo efektivne doze zračenja za lokalno stanovništvo.

2. MATERIJAL I METODE

2.1. Karakteristike ispitivanih lokalnosti i položaj uzetih uzoraka tla

Terenska ispitivanja izvršena su u prvoj polovini septembra 2015. godine po suvom vremenu. Položaj ispitivanih lokalnosti Bukovik i Bukovica uglavnom je isti kao i onih uzorkovanih u periodu 2007–2009. godine. Pošto je u oba istraživanja riječ o istoj geološkoj podlozi ispitivanih lokalnosti, kod označavanja kompozitnih uzoraka tla uzetih sa ove dvije lokalnosti zadržana je oznaka uzorka iz prethodnog perioda, kako bi se imala mogućnost korelisanja podataka.

Sa svake od ovih lokalnosti uzeta su *core-sampling* metodom [5] po četiri kompozitna uzorka tla sa četiri međusobno dosta udaljena mjesta unutar lokalnosti.

Koordinate mjesta na lokalnostima sa kojih su uzimani kompozitni uzorci tla određivane su ručnim GPS instrumentom Garmin eTrex 20. Lokalnosti su birane tako da nijesu izložene intenzivnom antropogenom uticaju.

2.1.1. Bukovik

Lokalnost Bukovik kod Virpazara pripada geotektonskoj jedinici Visoki krš. Predstavlja strmu brjegovitu padinu, ekspaniranu prema istoku. Teren je obrastao gustom šumom i žbunjem te teško prohodan.

Geološka podloga ove lokalnosti predstavljena je kontaktnom zonom anizij-skih masivnih krečnjaka i vulkanita. Vulkaniti nad kojima je izvršeno ispitivanje masivne su stijene sklone raspadanju, hidrotermalno izmijenjene. Našim prethodnim istraživanjima [3] oni su bili determinisani kao vulkanske stijene andezitskog sastava. Međutim, kroz novija detaljnija istraživanja ovi vulkaniti su determinisani kao srednjetrijske kisjele vulkanske stijene dacitskog do dacitsko-riolitkog tipa [6], koje su izbijeljene, oksidisale i svijetlosive. Sadrže fenokristale plagioklasa, biotit, granate i kvarc u osnovnoj masi. Plagioklasi su, u najvećoj mjeri, sericitisani i kalcitisani.

Pedološki pokrivač je skeletoidan, slabo razvijen i tanak, tipa smeđeg kisje-log zemljišta na eruptivima ili litosola [7].

Uzorak 7a/1 uzet je u blizini kontaktne zone sa krečnjacima, uzorci 7a/2 i 7a/3 iz izdanačke zone sa lijeve strane puta Petrovac — Virpazar, a uzorak 7a/4 uzet je ispod puta iz prostora obraslog gustom šikarom sa razvijenijim zemljiš-nim horizontima A-(B)-C. Koordinate mjesta sa kojih su uzeti ovi uzorci da-te su u Tabeli 2.

Tabela 2. Položaj uzetih uzoraka tla na lokalnosti Bukovik

NAZIV LOKALNOSTI	OZNAKA 2007-09.	OZNAKA 2015.	GPS-X	GPS-Y	GPS-Z
Bukovik	VK/7	7a/1	4 676 863	6 584 463	396
		7a/2	4 676 971	6 584 473	388
		7a/3	4 677 115	6 584 563	379
		7a/4	4 677 105	6 584 671	327

2.1.2. Bukovica

Ispitivana lokalnost Bukovica kod Šavnika na neujednačenoj je brežuljkastoj planinskoj padini ekspaniranoj prema jugozapadu. Nalazi se sa jedne i druge strane puta Boan — Žabljak.

Lokalnost je obrasla gustom šumom (sitnogorica) lijeske, hrasta, bukve, graba i gloga, sa proplancima livada obraslih travom, žbunjem šipuraka, gloga, kleke i dr.

Tabela 3. Položaj uzetih uzoraka tla na lokalnosti Bukovica.

NAZIV LOKALNOSTI	OZNAKA 2007-09.	OZNAKA 2015.	GPS-X	GPS-Y	GPS-Z
Bukovica	DTJ/42	42a/1	4 761 573	6 596 901	1188
		42a/2	4 761 652	6 596 896	1216
		42a/3	4 761 752	6 596 841	1185
		42a/4	4 761 870	6 596 755	1180

Teren je izgrađen od smeđesivih do sivoljubičastih, ponegdje izbijeljenih vulkanita i njihovih piroklastita. Oni su silifikovani i makroskopski se zapažaju krupni fenokristali plagioklasa i kvarca. Struktura im je holokristalasto porfiriska, a osnovna masa mikrokristalasta. Prema prethodno izvršenim petrološkim ispitivanjima, mineralni sastav ovih stijena je: kvarc, albit, ortoklas i biotit. Kvarc je najviše zastupljen mineral, od bojnih minerala utvrđen je biotit, a kao sporedni minerali javljaju se cirkon i metalni minerali. Ove stijene su determinisane kao manji izliv vulkanita riolitkog tipa zajedno sa njihovim piroklastitima [8].

Koordinate položaja uzetih uzoraka tla za spektrometrijsku analizu date su u Tabeli 3.

Uzorci 42a/1 i 42a/2 formirani su od smeđeg kisjelog zemljišta na eruptivima sa razvijenim horizontom A i C i skeletom veličine komada 2–4 cm. Uzorak 42a/3 formiran je takođe iz izdanačke zone otkrivene u usjeku puta od raspadnute i usitnjene drobine vulkanita i vulkanoklastita sa čestim skeletom veličine do 5 cm. Uzorak 42a/4 uzet je ispod puta (između puta i rijeke Bukovice), iz izdanačke zone (vidljive stijene geološke podloge) silifikovanih vulkanita i vulkanoklastita. Zemljište formirano na ovom lokalitetu je tipa smeđeg kisjelog na eruptivima [7].

2.2. Dozimetrijska mjerenja

Na ispitivanoj lokalnosti, u zoni uzimanja svakog od četiri kompozitna uzorka, izvršeno je 12 mjerenja jačine apsorbovane doze zračenja u vazduhu na visini 1 m iznad površine tla, iz kojih su određeni opseg i srednja jačina doze. Jačina apsorbovane doze zračenja mjerena je prenosnim NaI spektrometrom CANBERRA INSPECTOR 1000, koji je namijenjen za mjerenja doza i identifikaciju radionuklida na terenu.

2.3. Gama spektrometrija

Uzorci tla uzeti sa ispitivanih lokalnosti pripremani su po standardnoj proceduri. Uzorkovani materijal je drobljen i mljeven, sušen 8 sati na 100°C i zatim prosijavan na situ otvora 2 mm. Poslije ove pripreme smještan je u standardne

Marineli posude zapremine 1 litar i vagan. Ovako pripremljeni analitički uzorci snimani su na gama spektrometru tek nakon 40 dana, kada je uspostavljena radioaktivna ravnoteža ^{226}Ra i ^{222}Rn .

Uzorci su analizirani metodom gama spektrometrije na niskofonskom sistemu sa HPGe detektorom, efikasnosti 41% i rezolucije 1.85 keV (FWHM 1.33 MeV ^{60}Co), čiji fon na energetskom području 40–2700 keV je 0.98 imp/s. U uzorcima su određivane koncentracije aktivnosti prirodnih radioizotopa ^{40}K (preko pika na energiji 1460.75 keV), ^{232}Th (preko pikova na 338.32 keV i 911.20 keV), ^{235}U (preko 143.76 keV i 163.33 keV), ^{238}U (preko 1001.03 keV), ^{226}Ra (295.22 keV, 351.93 keV, 609.31 keV, 1120.2 keV i 1764.4 keV) i tehnogenog radioizotopa ^{137}Cs (preko 661.62 keV).

3. REZULTATI MJERENJA

3.1. Dozimetrija

Tabela 4. Jačina apsorbivane doze na lokalnosti Bukovik

Uzorak /Lokalnost	Jačina doze (nGy/h)		
	Opseg	Medijana	Srednja vrijednost
7a/1	240–370	305	307
7a/2	240–340	285	288
7a/3	200–320	250	253
7a/4	190–250	215	216
Bukovik	190–370	270	266

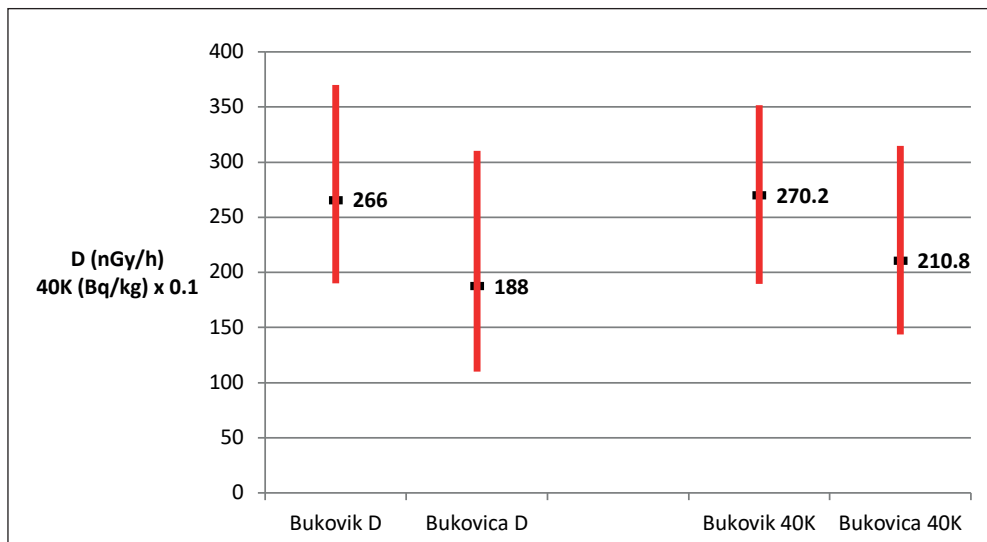
Tabela 5. Jačina apsorbivane doze na lokalnosti Bukovica

Uzorak /Lokalnost	Jačina doze (nGy/h)		
	Opseg	Medijana	Srednja vrijednost
42a/1	150–200	175	174
42a/2	150–210	180	180
42a/3	190–310	245	240
42a/4	110–190	155	157
Bukovica	110–310	180	188

Rezultati dozimetrijskih mjerenja na ispitivanim lokalnostima pojedinačno su dati u tabelama 4 i 5, a uporedni rezultati na obje lokalnosti u Tabeli 6. Opsezi i srednje jačine apsorbivanih doza na lokalnostima Bukovik i Bukovica prikazani su i grafički na Slici 1.

Tabela 6. Jačina apsorbovane doze na ispitivanim lokalnostima

Lokalnost	Geološka podloga	Jačina doze (nGy/h)		
		Opseg	Medijana	Srednja vrijedn.
Bukovik	dacit-riodacit	190–370	270	266
Bukovica	riolit	110–310	180	188

Slika 1. Jačine apsorbovane doze D i koncentracije aktivnosti ^{40}K u Bukoviku i Bukovici

3.2. Gama spektrometrija

Rezultati gamaspektrometrijske analize uzoraka tla dati su u tabelama 7 i 8, po ispitivanim lokalnostima.

U Tabeli 9 dato je upoređenje srednjih koncentracija aktivnosti radionuklida u tlu Bukovika i Bukovice.

Opsezi i srednje koncentracije aktivnosti ^{40}K na ispitivanim lokalnostima prikazani su i grafički na Slici 1, a ^{232}Th i ^{238}U na Slici 2.

Na osnovu podataka iz Tabele 7 izračunati su srednji sadržaji prirodnih radioaktivnih elemenata u tlu Bukovika i Bukovice i prikazani u Tabeli 10.

Tabela 7. Koncentracije aktivnosti radionuklida u tlu na lokalnosti Bukovik

Uzorak	⁴⁰ K (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	²³⁵ U (Bq/kg)	²³⁸ U (Bq/kg)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)
7a/1	3514 ± 93	79.2 ± 2.1	4.72 ± 0.85	102 ± 21	41.8 ± 1.1	4.40 ± 0.23
7a/2	2794 ± 74	70.2 ± 2.3	≤ 2.73	81.9 ± 24.6	41.5 ± 1.3	1.01 ± 0.24
7a/3	2604 ± 69	65.9 ± 2.1	3.11 ± 0.78	115 ± 29	43.4 ± 1.3	1.57 ± 0.23
7a/4	1894 ± 50	64.9 ± 2.1	3.82 ± 1.10	133 ± 29	40.8 ± 1.3	0.95 ± 0.19
Opseg	1894–3514	64.9–79.2	≤ 2.73–4.72	81.9–133	40.8–43.4	0.95–4.40
Srednja vrijedn.	2702	70.0	≤ 3.6	108	41.9	1.98

Tabela 8. Koncentracije aktivnosti radionuklida u tlu na lokalnosti Bukovica

Uzorak	⁴⁰ K (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	²³⁵ U (Bq/kg)	²³⁸ U (Bq/kg)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)
42a/1	1439 ± 38	44.7 ± 1.4	≤ 2.58	44.2 ± 13.3	21.3 ± 0.8	162 ± 4
42a/2	2027 ± 54	50.5 ± 1.6	≤ 1.99	59.0 ± 13.0	24.6 ± 0.8	184 ± 5
42a/3	3148 ± 83	70.8 ± 2.1	≤ 2.02	98.5 ± 22.6	32.9 ± 1.0	1.39 ± 0.19
42a/4	1817 ± 48	39.1 ± 1.2	≤ 2.01	≤ 28.3	22.3 ± 0.7	170 ± 5
Opseg	1439–3148	39.1–70.8	≤ 2.58	≤ 28.3–98.5	21.3–32.9	1.39–184
Srednja vrijedn.	2108	51.3	< 2.2	≤ 57.5	25.3	129

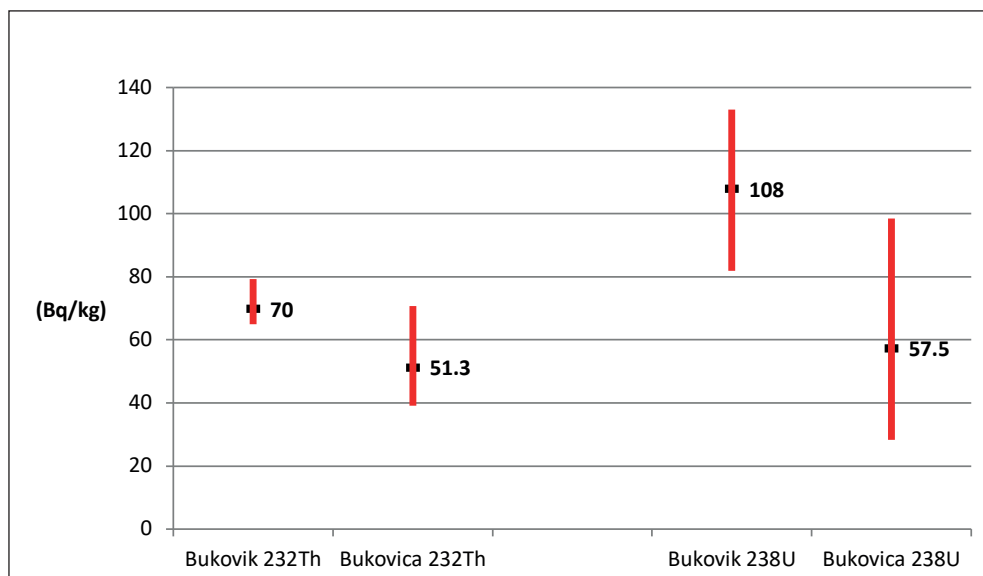
Slika 2. Koncentracije aktivnosti ²³²Th i ²³⁸U u tlu Bukovika i Bukovice

Tabela 9. Srednje koncentracije aktivnosti radionuklida u tlu Bukovika i Bukovice

Lokalnost	^{40}K (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{235}U (Bq/kg)	^{238}U (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)
Bukovik	2702	70.0	≤ 3.6	108	41.9	1.98
Bukovica	2108	51.3	<2.2	≤ 57.5	25.3	129

Tabela 10. Srednje koncentracije prirodnih radionuklida u tlu Bukovika i Bukovice

Lokalnost	Geološka podloga	K (g/kg)	Th ($\mu\text{g/g}$)	U ($\mu\text{g/g}$)
Bukovik	dacit-riodacit	87.3	17.2	8.8
Bukovica	riolit	68.1	12.6	≤ 4.9

3.3. Procjena pojedinačnog doprinosa prirodnih radionuklida u tlu dozi zračenja u vazduhu

Ako se na rezultate iz Tabele 9 primijene dozni koeficijenti [9]:

$$0.0417 \text{ nGyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1} \text{ za } ^{40}\text{K}$$

$$0.604 \text{ nGyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1} \text{ za } ^{232}\text{Th}$$

$$0.462 \text{ nGyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1} \text{ za } ^{238}\text{U},$$

dobija se srednji doprinos jačini apsorbovane doze zračenja u vazduhu od svakog od tih terestrijalnih prirodnih radionuklida pojedinačno, kao što je prikazano u Tabeli 11 i na Slici 3.

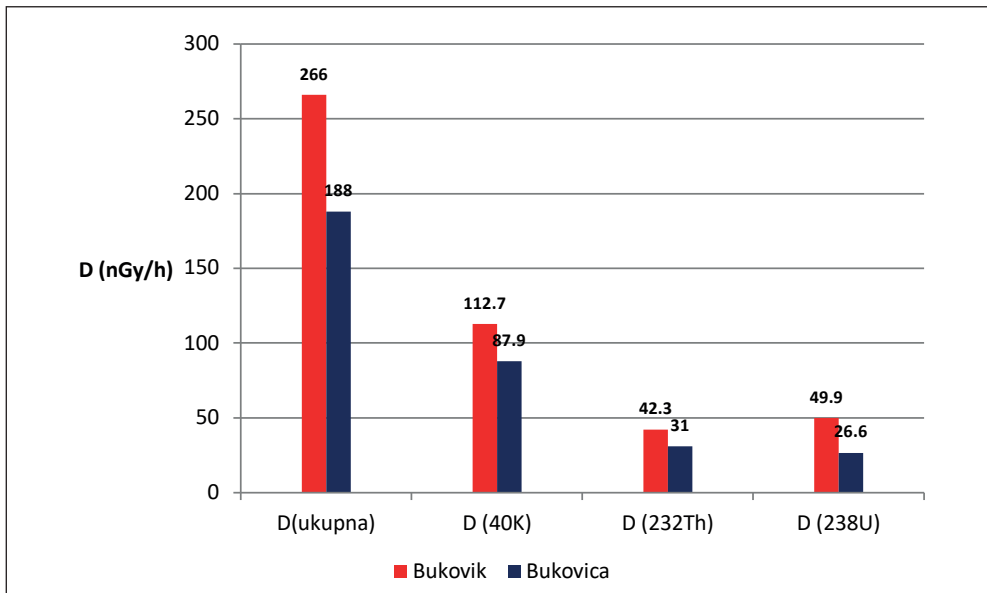
Slika 3. Doprinos ukupnoj jačini doze od ^{40}K , ^{232}Th i ^{238}U pojedinačno

Tabela 11. Srednji doprinos jačini apsorbovane doze D-zračenja u vazduhu na ispitivanim lokalnostima od prirodnih radionuklida u tlu pojedinačno

Lokalnost	Geološka podloga	D (^{40}K) (nGy/h)	D (^{232}Th) (nGy/h)	D (^{238}U) (nGy/h)
Bukovik	dacit-riodacit	112.7	42.3	49.9
Bukovica	riolit	87.9	31.0	≤ 26.6

3.4. Procjena efektivne doze za lokalnog stanovnika

Na osnovu rezultata dozimetrijskih mjerenja, u sažetoj formi prikazanih u Tabeli 6, može se uraditi procjena srednje godišnje efektivne doze H_{spolj} koju primaju odrasli stanovnici na ispitivanim lokalnostima usljed izloženosti spoljašnjem zračenju. Izloženost spoljašnjem zračenju potiče od radionuklida prisutnih u životnoj sredini u kojoj čovjek boravi, prije svega od onih u zemljištu, ali i u građevinskom materijalu od kojeg su napravljene boravišne prostorije. Stoga se H_{spolj} sastoji od dvije komponente — komponente H_{otv} , koja je posljedica boravka na otvorenom prostoru i komponente H_{zatv} , koja dolazi od boravka u zatvorenim prostorijama (u kući i na radnom mjestu).

Doze zračenja u zgradama se vrlo rijetko mjere jer jako zavise od vrste građevinskog materijala i zato značajno variraju od zgrade do zgrade, pa čak i od prostorije do prostorije. Stoga se pribjegava procjeni efektivne doze na osnovu njenog proračuna po formuli [9]:

$$H_{\text{spolj}} = H_{\text{otv}} + H_{\text{zatv}} = eDt[k + f(1 - k)], \quad (1)$$

gdje je:

- H_{spolj} – godišnja efektivna doza usljed spoljašnjeg zračenja (mSv/god),
- D – jačina apsorbovane doze zračenja u vazduhu izvan zgrada, na visini 1 m iznad tla (nGy/h),
- t – vrijeme izloženosti osobe zračenju ($t = 8760$ h),
- k – faktor boravka na otvorenom,
- e – konverzioni koeficijent za pretvaranje apsorbovane doze u vazduhu u efektivnu dozu za odraslu osobu ($e = 0.7$ Sv/Gy),
- f – „faktor zaštite” unutar zgrade ($f = 0.8$).

Tabela 12. Procjenjene godišnje efektivne doze za odrasle osobe usljed spoljašnjeg zračenja na ispitivanim lokalnostima

Lokalnost	H_{otv} (mSv/god)	H_{zav} (mSv/god)	H_{spolj} (mSv/god)
Bukovik	0.783	0.652	1.435
Bukovica	0.553	0.461	1.014

Za faktor boravka na otvorenom uobičajeno je da se koristi vrijednost $k = 0.2$ [9]. Međutim, kako obje ispitivane lokalnosti pripadaju ruralnom području, a imajući u vidu specifičnosti života i rada u ruralnim područjima Crne Gore, gdje lokalno stanovništvo najveći dio dana provodi izvan kuće baveći se nekim od oblika poljoprivredne proizvodnje, mi ćemo za proračun efektivne doze koristiti vrijednost $k = 0.4$, procjenjujući time da je tokom godine prosječno vrijeme dnevnog boravka tih ljudi na otvorenom 9.6 h.

Uz navedene vrijednosti koeficijenata, koristeći za D vrijednosti srednjih jačina apsorbovane doze zračenja na ispitivanim lokalnostima, dobijaju se procjene srednjih godišnjih efektivnih doza za odrasle osobe na lokalnostima Bukovik i Bukovica, koje su prikazane u Tabeli 12.

4. ANALIZA REZULTATA

Na osnovu formule (1), ali sa faktorom boravka na otvorenom $k = 0.2$, procjenjuje se, za svijet u cjelini, da srednja godišnja efektivna doza koju odrastao čovjek prima usljed spoljašnjeg ozračavanja od prirodnih terestrijalnih radionuklida iznosi 0.48 mSv/god, kao i da se kod većine zemalja ta srednja vrijednost nalazi u opsegu 0.3–0.6 mSv/god [9]. Naše procjene srednje godišnje efektivne doze na ispitivanim lokalnostima Bukovica i Bukovik (Tabela 12) pokazuju da je ona iznad gornje granice tog opsega, kao i da je 2 odnosno 3 puta veća od svjetskog prosjeka.

Iz Tabele 6 se vidi da su srednje vrijednosti jačine apsorbovane doze u vazduhu na lokalnostima Bukovica i Bukovik 3.4, odnosno 4.8 puta veće od prosječne doze u Crnoj Gori (55 nGy/h), a na pojedinim mjestima Bukovice 5.6 i Bukovika čak i 6.7 puta veće od nje.

Ako se uporede vrijednosti jačine doze izmjerene u Bukovici i Bukoviku 2007–2009. godine (Tabela 1) sa vijednostima dobijenim mjerenjima 2015. godine (Tabela 6), vidi se da ranije izmjerene vrijednosti pripadaju opsegu rezultata novih, detaljnijih mjerenja na tim lokalnostima, s tim što su one oko dva puta niže od gornjih granica tih opsega, koje sežu do 370 nGy/h, odnosno 310 nGy/h respektivno.

Kalijum (K), torijum (Th) i uranijum (U) su najvažniji prirodni elementi u sastavu tla koji svojom radioaktivnošću formiraju pretežni dio jačine apsorbovane doze zračenja u vazduhu iznad površine zemlje. Karakteriše ih litofilnost i vezanost za kisjele magmatske stijene. Srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{40}K , ^{232}Th i ^{238}U u tlu za čitav svijet iznose, respektivno, 400 Bq/kg, 33 Bq/kg i 37 Bq/kg [9], dok su njihove srednje vrijednosti za Crnu Goru nešto niže: 246 Bq/kg za ^{40}K , 24 Bq/kg za ^{232}Th i 29 Bq/kg za ^{238}U [1, 2].

Na osnovu tabela 11 i 9 može se zaključiti da je na lokalnostima Bukovik i Bukovica, gdje su izmjerene najveće apsorbovane doze zračenja u vazduhu u Crnoj Gori (u srednjem 266 nGy/h i 188 nGy/h), uzrok tome prije svega visoka koncentracija aktivnosti ^{40}K u tlu, koja je u Bukoviku, u srednjem, 6.8 puta viša od svjetskog i 11 puta viša od crnogorskog prosjeka, a u Bukovici 5.3 puta viša od svjetskog prosjeka i 8.6 puta viša od prosjeka za Crnu Goru. Povećanju doze zračenja u Bukoviku doprinose i ^{238}U , čija je koncentracija tu, u srednjem, 2.9 puta viša od svjetskog prosjeka i 3.7 puta viša od crnogorskog, i ^{232}Th , čija je koncentracija 2.1 put viša od svjetskog prosjeka i 2.9 puta viša od crnogorskog. U Bukovici povećanju doze zračenja takođe doprinosi donekle i ^{232}Th , čija je koncentracija u tlu tu 1.6 puta viša od svjetskog prosjeka i 2.1 puta viša od crnogorskog, kao i tehnogeni ^{137}Cs , čija je koncentracija u tlu Bukovice još uvijek značajno visoka (u srednjem 129 Bq/kg), čak i 30 godina nakon akcidenta u Černobilju.

Geološki sastav ispitivanih lokalnosti uveliko je imao uticaja na vrijednosti izmjerenih jačina apsorbovanih doza zračenja u vazduhu, kao i koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima tla. Vulkanske stijene, koje su geološka podloga ispitivanim lokalitetima, potiču od kisjelih magmi sa preko 66% SiO_2 . Pored visokog učešća SiO_2 , kisjele magme su bogate alkalijama (K i Na) i Al_2O_3 iz kojih nastaju graniti, a njihov vulkanski ekvivalent su rioliti, riodaciti, daciti, kvarc-keratofiri. Poznato je da pored relativno visokog sadržaja kalijuma ove stijene imaju i povećane koncentracije uranijuma, usljed čega se za njih vezuju i povećani nivoi spoljašnjeg zračenja [9]. Glavni minerali ove grupe stijena su: kvarc, pirokseni, hornblenda, biotit, kisjeli plagioklasi i ortoklas, a akcesorni minerali su: apatit, cirkon i sfen.

U podlozi lokalnosti Bukovik i Bukovica su kisjele vulkanske stijene dacit-riodacit i riolit, sa povećanim sadržajem alkalnih feldspata, kvarca, piroksena, apatita, cirkona i granata.

Manje, ali bez većeg značaja, mogla je na jačinu doze uticati i debljina pedološkog pokrivača koji je u Bukovici i Bukoviku, na pojedinim mikrolokacijama, tanak ili sa dosta skeleta od vulkanskih stijena.

Koncentracija aktivnosti tehnogenog ^{137}Cs u tlu lokalnosti Bukovica, koja se nalazi u sjevernom planinskom dijelu Crne Gore, na kojoj su naša mjerna mjesta

bila na nadmorskoj visini 1180 do 2016 metara, na tri mjerna mjesta kreće se od 162 Bq/kg do 184 Bq/kg, a na jednom mjestu je ona svega 1.39 Bq/kg, dok u srednjem iznosi značajno visokih 129 Bq/kg, 30 godina nakon tragičnog nuklearnog akcidenta u Černobilju, što znači da tehnogeni cezijum u Bukovici veoma sporo migrira u dubinu tla. U tlu Bukovika, međutim, koji se nalazi u južnom dijelu Crne Gore, na sva četiri mjerna mjesta, koja su na nadmorskoj visini 327 do 396 metara, koncentracija aktivnosti ^{137}Cs je veoma niska — kreće se od 0.95 Bq/kg do 4.40 Bq/kg. Ovi rezultati su u punoj saglasnosti sa mjerjenjima iz posljednje decenije prošlog vijeka [1, 2], koja su pokazala da je najveća kontaminacija teritorije Crne Gore cezijumom černobiljskog porijekla bila u planinskim oblastima sjevera, a najmanja u primorskom, južnom dijelu Crne Gore.

5. ZAKLJUČAK

Rezultati ovog detaljnijeg istraživanja potvrđuju nalaz iz perioda 2007–2009. godine [3] prema kojem je u Crnoj Gori do sada najviše spoljašnje zračenje konstatovano na lokalnostima Bukovik (kod Virpazara) i Bukovica (kod Šavnika). Srednja jačina apsorbovane doze u vazduhu u Bukoviku je 266 nGy/h, a u Bukovici 188 nGy/h, i one su respektivno 4.8 i 3.4 puta veće od prosječne vrijednosti u Crnoj Gori. Ovo povećano spoljašnje zračenje je u najvećoj mjeri uzrokovano visokim sadržajem kalijuma u tlu tih lokalnosti. Srednja koncentracija aktivnosti ^{40}K u Bukoviku je 2702 Bq/kg, a u Bukovici 2108 Bq/kg, i one su respektivno 11 i 8.6 puta više od prosjeka za Crnu Goru. Geološku podlogu ovih lokalnosti čine srednjetrijske kisjele vulkanske stijene dacitskog do dacitsko-riolitnog tipa u Bukoviku i riolitnog tipa u Bukovici.

Procijenjena srednja godišnja efektivna doza za odraslog čovjeka usljed spoljašnjeg zračenja na ovim ruralnim lokalnostima je u Bukoviku (1.4 mSv/god) trostruko, a u Bukovici (1.0 mSv/god) dvostruko veća od svjetskog prosjeka.

Tehnogeni cezijum ^{137}Cs černobiljskog porijekla još uvijek je u značajnoj koncentraciji prisutan u površinskom sloju zemljišta u Bukovici (u srednjem 129 Bq/kg), u planinskom sjevernom dijelu Crne Gore.

ZAHVALNOST: U ovom radu izloženi rezultati dio su istraživanja realizovanog u okviru Teme 2 projekta „Istraživanje radioaktivnosti u životnoj sredini”, koji odobrava i finansira Crnogorska akademija nauka i umjetnosti. Autori zahvaljuju Akademiji na finansijskoj podršci projektu.

LITERATURA

- [1] Vukotić P., Borisov G. I., Kuzmič V. V., Kulakov V. M., Antović N., Dapčević S., Mirković M., Pajović M., Svrkota R., Fuštić B., Đuretić G., „Fon gama-zračenja u Crnoj Gori”. Softverski program, MENEKO, Podgorica, 1996.
- [2] Vukotić P., Borisov G. I., Kuzmič V. V., Kulakov V. M., Antović N., Dapčević S., Mirković M., Pajović M., Svrkota R., Fuštić B., Đuretić G., „Background gamma-radiation in Montenegro”. Proceedings of The IRPA Regional Symposium on Radiation Protection in Neighbouring Countries of Central Europe, Prague, Czech Republic, September 1997, p. 477–479.
- [3] Vukotić P., Svrkota R., Anđelić T., Zekić R., Antović N., „Lokalnosti u Crnoj Gori sa povećanim fonom zračenja”, Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, Glasnik Odjeljenja prirodnih nauka, CANU, 20, 2014, str.13–40.
- [4] UNSCEAR, „Sources and Effects of Ionizing Radiation”. Report to the General Assembly of the United Nations with Scientific Annexes. Annex B: „Exposures from Natural Radiation Sources”, New York, 2000.
- [5] „HASL 300 — EML Procedures Manual”, Environmental Measurements Laboratory, U. S. Department of Energy, 28 Edition, February 1997.
- [6] Čađenović, D. i drugi, „Geološka karta Crne Gore, 1 : 50 000-list «Podgorica 3»”, manuskript, 2014.
- [7] Fuštić B., Đuretić G., „Zemljišta Crne Gore”, Univerzitet Crne Gore, Biotehnički institut, Podgorica, 2000.
- [8] Živaljević, M., Tumač geološke karte SR Crne Gore, 1 : 200 000, Posebna izdanja Geološkog glasnika — Knjiga VIII, Titograd, 1989.
- [9] UNSCEAR, „Sources and Effects of Ionizing Radiation”. Report to the General Assembly of the United Nations with Scientific Annexes. Annex B: „Exposures of the Public and Workers from Various Sources of Radiation”, New York 2010.