

ЦРНОГОРСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЈЕТНОСТИ
ГЛАСНИК ОДЈЕЉЕЊА ПРИРОДНИХ НАУКА, 20, 2014.

ЧЕРНОГОРСКАЯ АКАДЕМИЈА НАУК И ИСКУССТВ
ГЛАСНИК ОТДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК, 20, 2014

THE MONTENEGRIN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS
GLASNIK OF THE SECTION OF NATURAL SCIENCES, 20, 2014.

UDK 551.521(497.16)

*Perko Vukotić,¹ Ranko Svrkota,² Tomislav Anđelić,³
Ranko Zekić,³ Nevenka Antović⁴*

LOKALNOSTI U CRNOJ GORI SA POVEĆANIM FONOM ZRAČENJA

Izvod

Istraživanje lokalnosti u Crnoj Gori sa povećanim fonom terestrijalnog gama-zračenja i izvora njihove povećane radioaktivnosti obavljeno je u periodu 2008–2009. godine. U tom cilju terenski je ispitano 138 lokalnosti, koje su na geološkim formacijama za koje postoje indicacije da bi mogle sadržati stijene/minerale sa povećanim koncentracijama radioaktivnih elemenata. Izbor ovih lokalnosti vršen je posebno u okviru svake od četiri geotektonske jedinice koje prekrivaju teritoriju Crne Gore, a na osnovu njihovih specifičnosti. Tako je u Durmitorskoj tektonskoj jedinici (DTJ) odabrano 47 lokalnosti za terenska ispitivanja, 37 u zoni Visoki krš (VK), 30 u Jadransko-Jonskoj zoni (JZ) i 24 lokalnosti u Budva-Cukali zoni (BZ).

Usvojen je kriterijum da se kao lokalnost sa povećanim fonom zračenja smatra ona na kojoj je jačina apsorbovane doze zračenja D u vazduhu, na visini 1 m iznad tla, najmanje za 50% veća od srednje vrijednosti jačine apsorbovane doze za Crnu Goru, koja prema ranijim istraživanjima iznosi $55 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$. Terenska mjerenja su pokazala da takvih lokalnosti,

¹ Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, Rista Stijovića 5, 81000 Podgorica, Crna Gora

² Republički zavod za geološka istraživanja, Podgorica, Crna Gora

³ Centar za ekotoksikološka ispitivanja, Podgorica, Crna Gora

⁴ Prirodno-matematički fakultet, Podgorica, Crna Gora

sa $D \geq 80 \text{ nGyh}^{-1}$, ima 27. Od njih je 13 u području DTJ, 12 u zoni VK, dvije u zoni JZ i nijedna u zoni BZ.

Sa tih 27 lokalnosti uzeti su uzorci tla za detaljniju laboratorijsku karakterizaciju njihove radioaktivnosti metodom gama-spektrometrije, tj. za određivanje koncentracija aktivnosti radioizotopa ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{226}Ra i ^{137}Cs u njima.

Povećane vrijednosti fona zračenja u vezi su sa četiri grupe geoloških formacija: boksiti (crveni – trijaski, jurski i eocenski i bijeli – kredni), paleozojsko-donjetrijaski klastiti, srednjotrijaski vulkaniti i vulkanoklastiti, i kvartarni klastiti sa uticajem grupe boksitnih formacija. Najveće pojedinačne vrijednosti jačine doze zračenja u vazduhu izmjerene su na andezitskim (192 nGyh^{-1}) i andezit-riolitskim (148 nGyh^{-1}) stijenama.

Među 10 lokalnosti sa radijacionim fonom dvostruko većim od srednjeg u Crnoj Gori ($110\text{--}192 \text{ nGyh}^{-1}$), od kojih je devet u zoni VK i jedna u području DTJ, dvije su na andezitskoj podlozi, jedna na fluvio-glacijalnom pijesku i šljunku, a ostalih sedam je nad boksitnim ležištima. Čak i ove lokalnosti sa najvećim fonom zračenja u Crnoj Gori, u poređenju sa drugim poznatim u svijetu područjima sa povećanom prirodnom radioaktivnošću, pripadaju područjima sa umjereno povećanim dozama zračenja.

Gama-spektrometrijska analiza je pokazala da je visok sadržaj kalijuma (^{40}K do 3341 Bqkg^{-1}) glavni uzrok povećane radijacije na lokalnostima na andezitnim stijenama, a visok sadržaj uranijuma i torijuma (^{238}U do 285 Bqkg^{-1} i ^{232}Th do 201 Bqkg^{-1}) na lokalnostima nad boksitnim ležištima.

LOCALITIES IN MONTENEGRO WITH ELEVATED RADIATION BACKGROUND

Abstract

Research aimed to find localities in Montenegro with elevated terrestrial gamma-radiation background and recognize sources of their radiation was conducted during the period 2008–2009. For this purpose, 138 localities which have geological formations known to contain rocks/minerals with potentially high concentrations of U, Th and K, were selected throughout the country for field investigations.

Selection of these localities was made separately within each of the four distinctive geotectonic units which cover the territory of Montenegro, based on its characteristics. In this manner, 47 localities were se-

lected in the Durmitor Tectonic Unit (DTJ), 37 in the High Karst Zone (VK), 30 in the Adriatic-Ionian Zone (JZ) and 24 localities in the Budva-Cukali Zone (BZ).

Knowing from earlier investigations that the average absorbed dose-rate in the air, 1 m above the ground, in Montenegro is 55 nGyh^{-1} , it was arbitrarily adopted that only localities with absorbed doses at least 50% above this average value will be considered as having relatively elevated radiation background. Field measurements have shown that 27 of the surveyed localities have dose values $D \geq 80 \text{ nGyh}^{-1}$. Of them, 13 localities belong to the DTJ, 12 to the VK, two to the JZ and none to the BZ.

From these 27 localities, soil samples have been collected for further laboratory radiation characterization using a gamma spectrometry method. In that way, activity concentrations of ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{226}Ra and ^{137}Cs were determined in the samples.

Elevated radiation doses in the air were measured on bauxite formations, paleozoic clastites and middle-triassic vulkanites, with the highest individual values on andesitic (192 nGyh^{-1}) and andesitic-rhyolitic (148 nGyh^{-1}) rocks.

Among 10 sites with radiation background twice higher than the average in Montenegro ($110\text{--}192 \text{ nGyh}^{-1}$), of which nine are in the VK zone and one in the DTJ, the two sites are on andesite volcanic rock, one on fluvio-glacial sand and gravel, while the other seven lie on bauxite deposits. Compared to the other known areas of high natural radiation background in the world, even these 10 localities in Montenegro belong to the areas with a moderately elevated level of radiation background.

Gamma-spectrometry has revealed that a high content of potassium (^{40}K up to 3341 Bqkg^{-1}) was the main source of elevated radiation at the localities on andesite rocks, and high uranium and thorium content (^{238}U up to 285 Bqkg^{-1} , ^{232}Th up to 201 Bqkg^{-1}) at the localities on bauxite deposits.

1. UVOD

Mjerenja i istraživanja radioaktivnosti u životnoj sredini Crne Gore intenzivirana su poslije černobiljskog nuklearnog akcidenta 1986. godine, a donekle sistematizovana posljednjih 15-ak godina projektima mjerenja prirodnog gama-fona [1–3] i radona u stanovima [4,5]. Ta istraživanja su, između ostalog, ukazala i na postojanje područja u Crnoj Gori sa povećanim nivoima zračenja. Stoga je tokom 2008. i 2009. godine, u okviru projekta koji je finansirala Crnogorska akademija nauka i umjet-

nosti, sprovedeno sistematsko istraživanje u cilju determinacije lokalnosti u Crnoj Gori sa povećanom radioaktivnošću tla.

Kao osnova projekta poslužilo je sistematsko istraživanje fona terestrijalnog gama-zračenja u Crnoj Gori, obavljeno 1994–1996. godine [1]. To istraživanje je pokazalo da srednja vrijednost jačine apsorbovane doze u vazduhu u Crnoj Gori, na visini 1m iznad tla, iznosi 55 nGyh^{-1} . Prema publikaciji UNSCEAR 2000 [6], može se izračunati da je prosječna vrijednost jačine apsorbovane doze u vazduhu za drugih sedam zemalja Jugoistočne Evrope 62 nGyh^{-1} , što je vrijednost bliska onoj u Crnoj Gori.

Kako ne postoje međunarodno prihvaćeni kriterijumi koji definišu područja sa povećanim fonom zračenja, arbitrarno je usvojeno da se kao lokalnosti sa relativno povećanim nivoom terestrijalnog zračenja u Crnoj Gori smatraju one na kojima su vrijednosti jačine apsorbovane doze u vazduhu najmanje za oko 50% veće od srednje njene vrijednosti u Crnoj Gori, tj. one sa dozama jednakim ili iznad 80 nGyh^{-1} .

Pri planiranju terenskih ispitivanja korišćena je postojeća obimna dokumentacija o geologiji i pedologiji Crne Gore [7,8] i rezultati ranijeg sistematskog istraživanja fona terestrijalnog gama-zračenja u Crnoj Gori [1,2], kao i podaci dobijeni kroz povremena prospekcijska istraživanja radioaktivnih mineralnih sirovina i prilikom nekih ciljanih mjerenja gama-zračenja na pojedinim lokalnostima u Crnoj Gori.

2. MATERIJAL I METODE

2. 1. Osnovni geološki podaci

U Crnoj Gori se jasno izdvajaju četiri geotektonske ili strukturno-facijalne jedinice sa značajno različitom geološkom evolucijom u posljednjih više od dvjesta miliona godina [7,8]. Ove jedinice, prikazane na Slici 1, poznate su kao Jadransko-Jonska zona (JZ) ili Parautohton, Budva-Cukali zona (BZ), zona Visoki krš (VK) i Durmitorska tektonska jedinica (DTJ), a odgovara im isto toliko metalogenetskih zona.

Jadransko-Jonskoj zoni (JZ) pripada primorski dio Crne Gore: okolina Herceg Novog, Tivatsko i Mrčevo polje, Luštica i Grbalj, te područje između Bara, rijeke Bojane, planine Rumije i mora. U njenoj geološkoj građi učestvuju karbonatni sedimenti gornje krede i srednjeg eocena, pojave eocenskih crvenih boksita, flišni sedimenti srednjeg i gornjeg eocena, marinski miocenski sedimenti i sedimenti kvartara.

Geotektonska jedinica Budva-Cukali (BZ) obuhvata uski primorski pojas na jugozapadnim padinama Orjena, Lovćena, Paštrovske gore, Sozine i Rumije. Navučena je na Jadransko-Jonsku zonu. U geološkoj građi učestvuju karbonatne, vulkanske i vulkanogeno sedimentne stijene, flišni sedimenti trijasa, jure, krede i paleogena i kvartarne tvorevine.

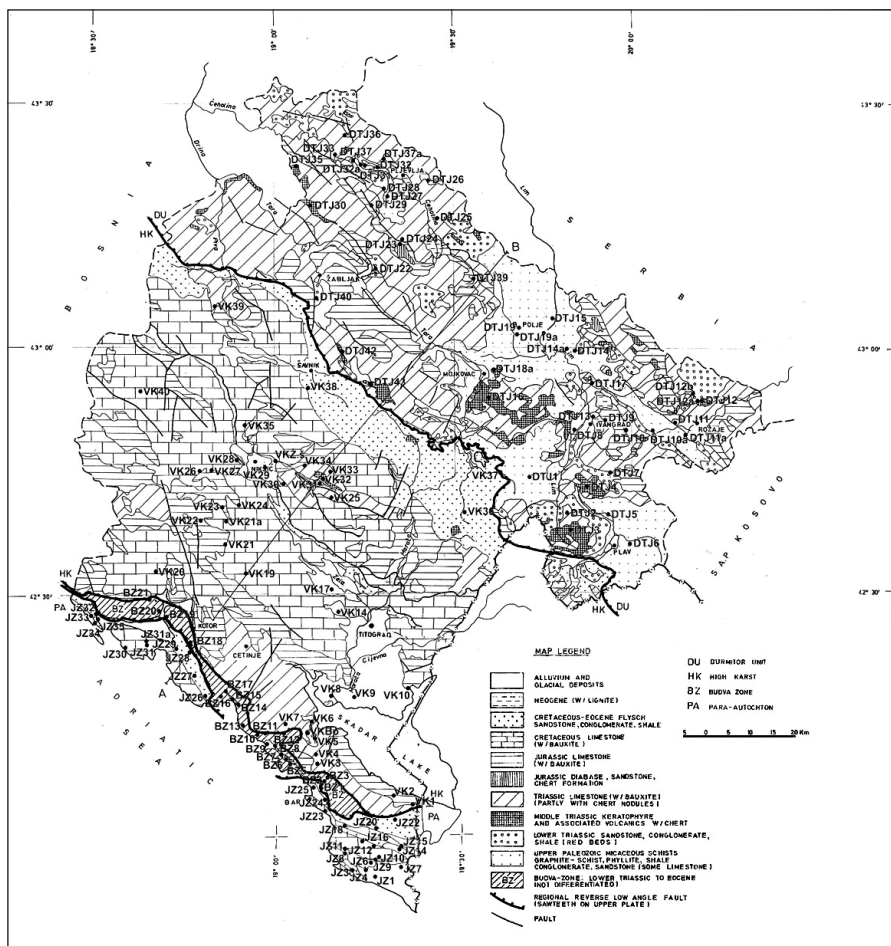
Geotektonskoj jedinici Visoki krš (VK) pripadaju središnji i južni djelovi Crne Gore sa terenima planina Rumije, Lovćena, Orjena, Budoša, Njegoša, Golije, Vojnika, Maganika, Prekornice i Žijeva i njihovih međuprostora. Čine je dvije složene raskinute antiklinalne strukture: Starocrnogorska strukturna jedinica i Kučka strukturna jedinica. Zona Visoki krš je u tektonskom odnosu sa Budva-Cukali zonom, sa navlačenjem iz pravca sjeveroistoka. Izgrađena je od permskih i donjotrijaskih klastita, karbonatnih sedimenata trijasa, jure i krede, sa rudonosnim formacijama crvenih i bijelih boksita, vulkanita i vulkanoklastita srednjeg trijasa, trijaskih i paleogenih flišnih sedimenata i kvartarnih sedimenata.

Durmitorska tektonska jedinica (DTJ) obuhvata sjeveroistočni dio Crne Gore sa terenima Pivske planine, Durmitora, Sinjajevine, Komova, Visitora, Prokletija, Ljubišnje i Kovača i područjima Rožaja, Berana, Bijelog Polja, Pljevalja. Navučena je, sa sjeveroistoka, na zonu Visoki krš preko sedimenata durmitorskog fliša. Tereni ove geotektonske jedinice izgrađeni su od klastita paleozoika i donjeg trijasa, karbonata mlađeg paleozoika, trijasa i jure, sa značajnim učešćem vulkanita i vulkanoklastita srednjeg trijasa i gornje jure, jezerskih sedimenata neogene starosti i kvartarnih tvorevina.

2. 2. Izbor lokalnosti za terenska ispitivanja

Koncepcijski pristup izboru lokalnosti za terenska ispitivanja, koji je podrazumijevao i racionalni izbor njihove mreže i broja, bio je, shodno cilju istraživanja, u izvjesnoj mjeri „pristrasan”. Tako su, u okviru postojeće strukturno-tektonske i strukturno-metalogenetske rejonizacije terena Crne Gore, pri izboru geoloških formacija „favorizovane” one za koje je teorijski ili iskustveno indicirano da bi mogle sadržati minerale sa povećanim učešćem radioaktivnih elemenata.

Ocjena da li neka lokalnost može potencijalno imati relativno povećanu prirodnu radioaktivnost vršena je posebno u okviru svake od navedene četiri krupne strukturno-tektonske jedinice. Polazeći od toga da ove jedinice imaju svoje geološke, geohronološke i metalogenetske osobenosti, mreža i broj terenskih osmatranja planirani su posebno za svaku od njih.



Slika 1. Geološka karta Crne Gore sa označenim geotektonskim jedinicama i ispitivanim lokalnostima

Nakon utvrđivanja sadržaja geoloških formacija u svakoj strukturo-tektonskoj jedinici, izvršena je analiza istih u pogledu litološkog sastava, mineralnog sastava, uslova sedimentacije (kod sedimentnih formacija), stepena metamorfizma i drugih mogućih procesa zbog kojih dolazi do alteracija stijena. Zatim je urađena analiza zastupljenosti geoloških formacija koje prema svojim karakteristikama:

– ne mogu imati povećanu prirodnu radioaktivnost, ili su kroz ranija ispitivanja pokazale nizak sadržaj U, Th i K, kao i niske vrijednosti nivoa gama zračenja;

– mogle bi imati povećanu radioaktivnost, ili su kroz ranija ispitivanja već pokazale povećan sadržaj U, Th i K, kao i povećane vrijednosti nivoa gama zračenja.

U skladu sa navedenim analizama, pri planiranju lokalnosti za terenska ispitivanja, posebna pažnja posvećena je vulkanitima i vulkanoklastitima kisjelog sastava, paleozojskim pješčarima i škriljcima, flišnim sedimentima, ležištima i pojavama crvenih i bijelih boksita, kvartarnim sedimentima (pjeskovi, gline, tresetišta) i tehnogenim deponijama nastalim nakon obogaćivanja metaličnih ruda. Manje pažnje posvećeno je karbonatima (krečnjacima, dolomitima i laporcima) i vulkanitima bazičnog karaktera.

Posebna pažnja posvećena je i onim lokalnostima na kojima je kroz ranija istraživanja dokazana povećana radioaktivnost, bez obzira na geološko-formacioni kriterijum.

Tako se došlo do ukupno 138 lokalnosti u Crnoj Gori na kojima su rađena terenska ispitivanja. Njihov raspored po strukturno-tektonskim jedinicama i geološkim facijama prikazan je u Tabeli 1.

Tabela 1. Lokalnosti na kojima su obavljena terenska ispitivanja, po strukturno-tektonskim jedinicama i geološkoj građi

Strukt.- tekton. jedinica	Broj mjerenoj lokaciji	Geološka facija								
		Klast. sedim.	Flišni sedim.	Karb. stijene	Vulk. stijene	Vulk. sedim.	Boksit bijeli	Boksit crveni	Tehnog. depon.	Ugalj i laporac
JZ	30	12	7	7				4		
BZ	24	4	4	8	3	5				
VK	37	10	4	9	1	2	6	5		
DTJ	47	26		1	4	12			2	2
Ukupno	138	52	15	25	8	19	6	9	2	2

Geološka i geotektonska složenost i prostorna zastupljenost Durmitorske tektonske jedinice (DTJ) uslovlila je i najveći broj lokalnosti (47) za terenska ispitivanja. Najveći broj njih (22) je na geološkoj podlozi izgrađenoj od paleozojsko-donjotrijaskih klastita (pješčari, škriljci, laporci), 12 lokalnosti je na vulkanitima i vulkanoklastitima srednjeg trijasa (andeziti, keratofiri, tufovi i dr.) i 4 na gornjojurskim (dijabazi i kompleks DRF). Manji broj ispitivanih lokalnosti je na klastitima kvartara (4), karbonatima (1), tehnogenim deponijama (2), uglju i laporcu (2). Jedan broj lokalnosti na kojima su u ranijim istraživanjima bile izmjerene povećane

ne vrijednosti terestrijalnog gama-fona [1] takođe je uključen u terenska ispitivanja.

U zoni Visoki krš (VK) terenski je ispitano 37 lokalnosti: 9 na kvartarnim sedimentima (glina, fluvioglacial, treset, aluvijum), 4 na flišnim sedimentima (anizijski, kredno-paleogeni i eocenski fliš), 9 na karbonatnim sedimentima (krečnjaci i krečnjaci sa rožnacima, bitumenozni sedimenti), 3 na vulkanitima i vulkanoklastitima, 11 na boksitima i 1 na paleozojskim pješčarima.

U uskom ali geološki heterogenom području Budva-Cukali zone (BZ) terenski je ispitano 24 lokalnosti, među kojima je posebna pažnja data onim na vulkanskim i vulkanoklastičnim stijenama i karbonatnim stijenama na kojima je ispitano po 8 lokalnosti za svaku od ovih grupa formacija, dok je na flišnim i formacijama kvartarnih klastita ispitivanje izvršeno na po 4 lokalnosti.

U Jadransko-Jonskoj zoni (JZ) terenski je ispitano 30 lokalnosti. Nisu se mogli izbjeći karbonati (7 lokalnosti) zbog značajne zastupljenosti, ali je posebna pažnja posvećena i lokalnostima na kvartarnim i mio-censkim klastitima (12), flišnim sedimentima eocena (7) i pojavama crvenih eocenskih boksita (4).

2. 3. Terenska mjerenja i zapažanja

Terenska mjerenja i zapažanja na svakoj od odabranih 138 lokalnosti bilježena su na pripremljenim formularima. Za svaku od lokalnosti formular sadrži preko 20 podataka neophodnih za njeno pozicioniranje, morfologiju, geotektonsku jedinicu, geološku formaciju, tip zemljišta i druga opažanja, kao i za izmjerene vrijednosti jačine apsorbovane doze zračenja i vremenske uslove pri mjerenju.

Za dozimetrijska mjerenja su na raspolaganju bili instrumenti CANNON Inspector sa sondom NaI 1.5"x1.5", VICTOREEN 190 SI sa sondom NaI 2"x2", THERMO RadEye PRD sa NaI sondom i proporcionalni brojač THERMO FH 40. Prethodna provjera njihovog pokazivanja na više različitih lokacija pokazala je da najkonzistentnije rezultate daju VICTOREEN 190 SI i THERMO RadEye, te je odlučeno da se mjerenja jačine apsorbovane doze u vazduhu izvode sa VICTOREEN 190 SI, a da se povremeno rade i kontrolna mjerenja sa THERMO RadEye.

Sva dozimetrijska mjerenja urađena su po suvom vremenu i na visini 1 m iznad tla. Na svakoj lokalnosti nastojala se dozimetrijski pokriti što

veća njena površina, te su na svakoj od njih rađena mjerenja na 10 mjesta i iz ovih mjerenja su određeni opseg rezultata i srednja jačina doze.

Sa lokalnosti na kojima je srednja vrijednost jačine apsorbovane doze u vazduhu bila jednaka ili veća od 80 nGyh^{-1} , uzimani su po standardnoj proceduri [9] uzorci tla za laboratorijsku gama-spektrometrijsku analizu.

2. 4. Gama-spektrometrija

Uzorkovani materijal sa terena drobljen je i mljeven, sušen 8 sati na $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, prosijavan na situ otvora 2 mm i potom smještan u Marineli posude zapremine 1 litar. 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 dva HPGe detektora, efikasnosti 36% i 41% i rezolucije (FWHM $1.33 \text{ MeV } ^{60}\text{Co}$) 1.72 keV i 1.80 keV respektivno, čiji fon na energetskom području $40\text{--}2700 \text{ keV}$ je 0.98 imps^{-1} i 1.22 imps^{-1} respektivno. 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 , 911.20 keV), ^{235}U (143.76 keV , 163.33 keV), ^{238}U (1001.03 keV), ^{226}Ra (295.22 keV , 351.93 keV , 609.31 keV , 1120.2 keV , 1764.4 keV) i tehnogenog radioizotopa ^{137}Cs (661.62 keV).

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3. 1. Karakteristike doza zračenja na ispitivanim lokalnostima

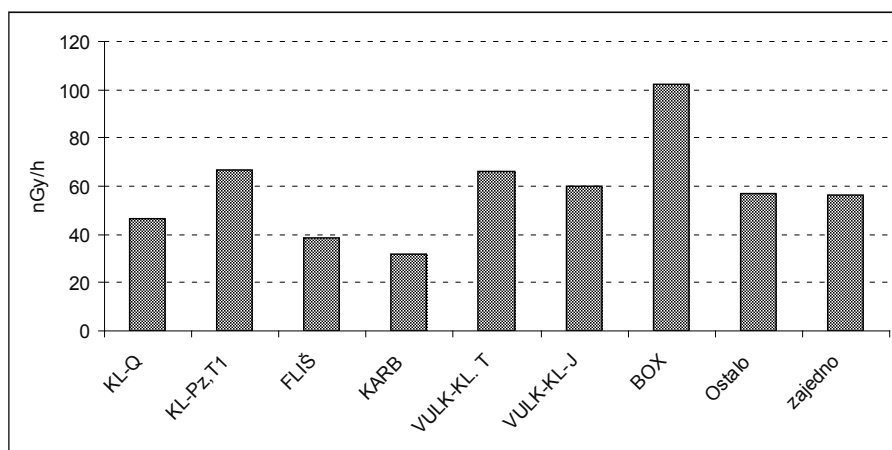
Karakteristike izmjerenih doza zračenja na ispitivanim lokalnostima, po geološkim formacijama, prikazane su u Tabeli 2, a srednje vrijednosti jačina doza i grafički na Slici 2.

Aritmetička srednja vrijednost jačina apsorbovanih doza u vazduhu na 138 ispitivanih lokalnosti, za koje su postojale indicije o mogućem povećanom fonu gama-zračenja, iznosi 56.3 nGyh^{-1} i neznatno je veća od prosjeka za Crnu Goru (55 nGyh^{-1}) dobijenog u ranijem istraživanju [1,2]. Najveće srednje vrijednosti jačina apsorbovanih doza (102 nGyh^{-1}) nađene su na boksitima (BOX), a najniže (31.8 nGyh^{-1}) na karbonatnim sedimentima (KARB).

Tabela 2. Karakteristike apsorbiranih doza zračenja u vazduhu po geološkim formacijama

Geološka formacija	Broj ispitivanih lokalnosti	Opseg jačina doza (nGy/h)	Srednja vrijednost (nGy/h)	Medijana (nGy/h)
KL-Q	29	10–125	46.3	46.1
KL-Pz,T1	23	40–94	66.5	66.7
FLIŠ	15	27–65	38.6	38.9
KARB	25	10–91	31.8	31.7
VULK-KL- T	23	26–192	64.5	64.1
VULK-KL-J	4	50–77	60.3	61.3
BOX	15	49–149	102	106
Ostalo*	4	14–105	57.0	57.0
Zajedno	138	10–192	56.3	56.4

* Deponije TE-pepela, flotacije, ugalj, laporac



Slika 2. Srednje vrijednosti jačina apsorbiranih doza u vazduhu po grupama geoloških formacija

Najniže pojedinačne vrijednosti jačine apsorbirane doze ($10 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$) izmjerene su u grupi kvartarnih klastita (KL-Q) i u grupi karbonatnih sedimenata (KARB). U klastitima kvartara (KL-Q) izmjerene vrijednosti jačine apsorbirane doze na 28 lokalnosti su relativno ujednačeno niske, sa izuzetkom lokalnosti Dragalj VK/20 ($125 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$) i Grahovo VK/22 ($96 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$), koje su na fluvio-glacijalnom nanosu, i Kusiđe VK/28 ($91 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$), gdje je crvenica na K_2 krečnjacima. Uzrok za ove izuzetke može biti u činjenici što su ovi kvartarni sedimenti prede-

ponovani sa okolnih boksitonosnih terena sa pojavama i manjim ležištima boksita.

I u karbonatnim sedimentima (KARB) izmjerene vrijednosti apsorbovane doze na 25 lokalnosti prilično su ujednačene.

Ispod ukupnog prosjeka je srednja jačina apsorbovanih doza na grupi formacija flišnih (FLIŠ) sedimentata (od anizijskog, kredno-paleogenog do eocenskog fliša).

Neznatno povećane srednje vrijednosti, u odnosu na ukupni prosjek, dobijene su u gornjojurskim vulkanitima i vulkanoklastitima (VULK-KL-J), kao i u srednjotrijaskim vulkanitima i vulkanoklastitima (VULK-KL-T). U ovim posljednjim izražen je visok stepen neujednačenosti jačina doza, vjerovatno kao posljedica preširoke grupe formacija (od silicijsko-karbonatnih, vulkanoklastičnih do vulkanskih) sa različitim genetskim i mineraloško-petrološkim svojstvima. U ovoj grupi formacija izmjerene su i najveće pojedinačne jačine apsorbovane doze zračenja i to 192 nGyh^{-1} na lokalnosti Bukovik (Crmnica) VK/7 i 148 nGyh^{-1} na lokalnosti Bukovica (Šavnik) DTJ/42. U oba slučaja radi se o kisjelijim vulkanitima andezitskog i andezitsko-riolitiskog tipa.

Srednja jačina apsorbovane doze zračenja za 23 lokalnosti u okviru grupe paleozojsko-donjotrijaskih klastita (KL-Pz,T1) iznosi 66.5 nGyh^{-1} i veća je od prosječne u Crnoj Gori. Pri terenskim ispitivanjima zapaženo je da lokalnosti sa povećanim učešćem tamnosivih i crnih škriljaca u odnosu na pješčare imaju veće doze zračenja.

Najveća srednja vrijednost jačine apsorbovane doze od 102 nGyh^{-1} dobijena je mjerenjima na pojavama i ležištima tri boksitonosne formacije (BOX), gdje se uočava i određeni trend rasta jačine doze u lancu C.BOX-E (73.0 nGyh^{-1}) → B.BOX- K₂ (111 nGyh^{-1}) → C.BOX- J,T (115 nGyh^{-1}).

3. 2. Lokalnosti sa relativno povećanim fonom zračenja

Srednja vrijednost jačine apsorbovane doze u vazduhu jednaka ili veća od 80 nGyh^{-1} registrovana je na samo 27 lokalnosti. Te lokalnosti, kao i njihove oznake u ovom istraživanju, prikazane su u Tabeli 3. Od njih je 13 u području Durmitorske tektonske jedinice (DTJ), 12 u zoni Visoki krš (VK), 2 u Jadransko-Jonskoj zoni (JZ), a niti jedna u Budva-Cukali zoni (BZ). To su, prema usvojenom kriterijumu, lokalnosti sa relativno povećanim fonom gama-zračenja u Crnoj Gori. Jačine apsorbovane doze u vazduhu i koncentracije aktivnosti radioizotopa u tlu na ovim lokalnostima prikazane su u Tabeli 4.

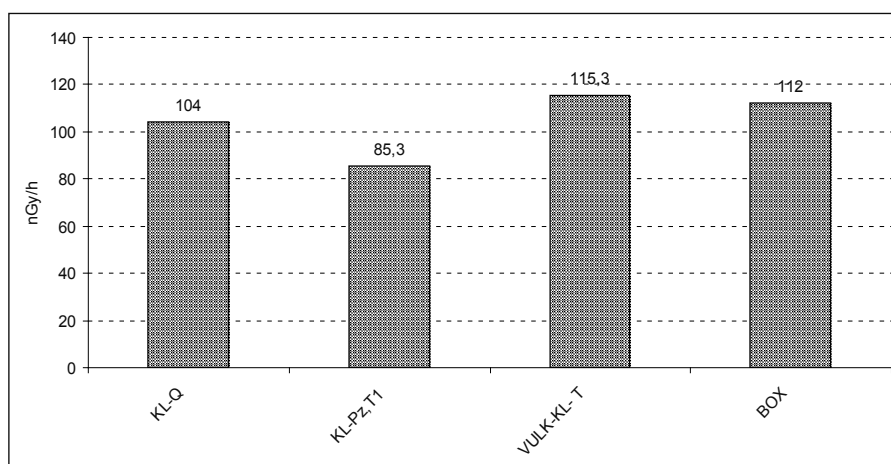
Četiri su grupe geoloških formacija kojima pripadaju lokalnosti sa povećanim fonom zračenja. To su: klastiti kvartara (KL-Q), paleozojsko-donjotrijaski klastiti (KL-Pz,T₁), vulkaniti i vulkanoklastiti srednjeg trijasa (VULK-KL-T) i boksiti trijasa, jure, krede i eocena (BOX). Sve one se nalaze u tri geotektonske jedinice, jer u Budva-Cukali zoni (BZ) nijesu nađene relativno povećane doze zračenja.

Srednje vrijednosti jačine apsorbovane doze u vazduhu za te grupe geoloških formacija prikazane su na Slici 3, sa koje se vidi da su doze najveće na trijaskim vulkanitima i vulkanoklastitima (115.3 nGyh^{-1}) i boksitima (112 nGyh^{-1}), a najmanje na paleozojsko-donjotrijaskim klastitima (85.3 nGyh^{-1}).

Slika 4 pokazuje da je, na lokalnostima koje pripadaju grupaciji boksita, značajno manja srednja jačina doze kod eocenskih crvenih boksita (CBOX-E) nego kod trijasko-jurskih crvenih (CBOX-T,J) i krednih bijelih boksita (BBOX-K).

Na Slici 5 prikazane su srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti prirodnih radioizotopa u tlu 27 lokalnosti sa povećanim fonom zračenja, a na Slici 6 i u Tabeli 5 srednje vrijednosti istih aktivnosti na tim lokalnostima po grupama geoloških formacija.

Sa Slika 5 i 6 vidi se da je koncentracija aktivnosti radioizotopa ^{40}K u tlu dominantna, a Slika 6 i Tabela 5 kazuju da je ona posebno velika kod grupe formacija trijaskih vulkanita i vulkanoklastita (VULK-KL-T), a zatim i kod paleozojsko-donjotrijaskih klastita (KL-Pz,T₁).



Slika 3. Srednje vrijednosti jačine apsorbovanih doza u vazduhu na lokalnostima sa povećanim fonom zračenja, po grupama geoloških formacija

Tabela 3. Lokalnosti u Crnoj Gori sa povećanim fonom zračenja

Geotektonska jedinica	Oznaka lokalnosti	Lokalnost	Područje
Durmitorska tektonska jedinica	DTJ/1	Trešnjevnik	Andrijevića
	DTJ/6	Plav	Plav
	DTJ/11a	Kozare	Rožaje
	DTJ/14a	Zaton	Bijelo Polje
	DTJ/15	Nedakusi (Ljećevišta)	Bijelo Polje
	DTJ/19a	Jabučno	Bijelo Polje
	DTJ/24	Kosanica – Mijakovići	Pljevlja
	DTJ/25	Mataruge	Pljevlja
	DTJ/31	Bušnje	Pljevlja
	DTJ/33	Gradac – Flotac, jalovište	Pljevlja
	DTJ/35	Rudnik Šuplja Stijena	Pljevlja
	DTJ/37	Glisnica	Pljevlja
	*DTJ/42	Bukovica	Šavnik
Zona Visoki krš	*VK/7a	Bukovik	Virpazar
	*VK/20	Dragalj	Nikšić
	*VK/21a	Ravna Aluga	Cetinje
	VK/22	Grahovo	Nikšić
	*VK/23	Bijele poljane	Cetinje
	*VK/24	Jelina pećina (Kula Bajovića)	Cetinje
	*VK/25	Borova brda (Župa)	Nikšić
	VK/26	Kruščica	Nikšić
	*VK/27	Oračine	Nikšić
	VK/28	Kuside	Nikšić
	*VK/33	Biočki stan (Župa)	Nikšić
	*VK/35	Gornjopoljski Vir	Nikšić
Jadransko-Jonska zona	JZ/8	Bratica	Ulcinj
	JZ/34	Žvinje	Herceg Novi

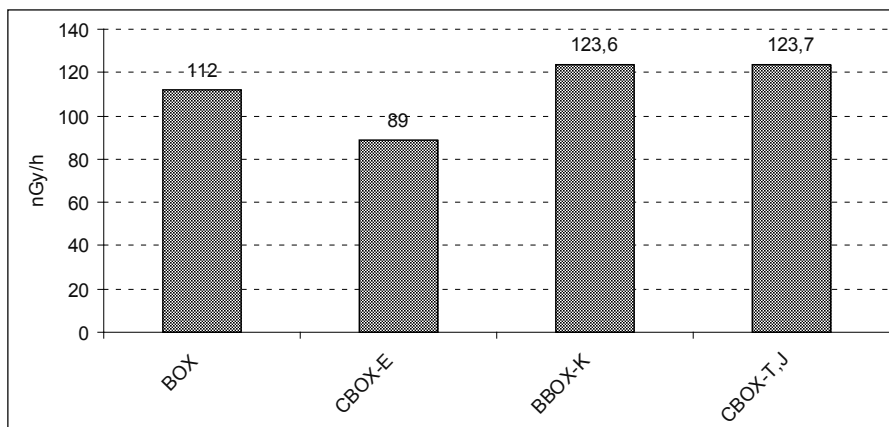
* Lokalnosti sa jačinom doze iznad 110 nGyh-1 (boldovane su lokalnosti sa više od 130 nGyh-1)

U cilju bolje preglednosti, na Slici 7 posebno su prikazane srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti ostalih prirodnih radioizotopa za 27 lokalnosti, po grupama geoloških formacija. Odatle, kao i iz Tabele 5, vidi se da je situacija sa koncentracijama ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{235}U i ^{238}U po grupama geoloških formacija suprotna od one u slučaju ^{40}K , tj. one su najveće kod boksita (BOX) i kvartarnih klastita (KL-Q).

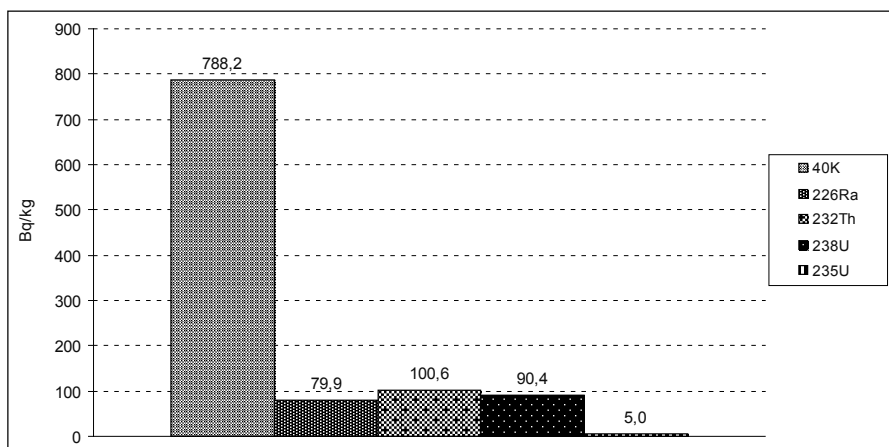
Tabela 4. Jačine apsorbovane doze u vazduhu i koncentracije radioizotopa u tlu na lokalnostima sa povećanim fonom zračenja

Geotektonska jedinica	Oznaka lokalnosti	Geološka formacija	Dsr (nGy/h)	⁴⁰ K (Bq/kg)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	²³⁵ U (Bq/kg)	²³⁸ U (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)
Durmitorska tektonska jedinica	DTJ/1	KL-Pz	83	892 ± 28	43.8 ± 1.4	62.7 ± 2.0	2.95 ± 0.50	48.1 ± 11.4	0.63 ± 0.08
	DTJ/6	KL-Pz	94	921 ± 29	35.2 ± 1.2	55.7 ± 1.9	2.82 ± 0.82	43.4 ± 12.3	2.36 ± 0.18
	DTJ/11a	KL-Pz	82	934 ± 30	33.8 ± 1.1	51.3 ± 1.8	3.24 ± 0.86	43.1 ± 9.4	5.74 ± 0.26
	DTJ/14a	KL-Pz	84	809 ± 26	39.6 ± 1.3	57.4 ± 2.0	2.12 ± 0.40	70.4 ± 18.8	22.5 ± 0.7
	DTJ/15	KL-Pz	80	635 ± 20	43.0 ± 1.4	58.8 ± 2.0	3.90 ± 0.75	71.9 ± 16.9	9.16 ± 0.33
	DTJ/19a	KL-Pz	86	1094 ± 35	41.6 ± 1.3	57.1 ± 1.8	1.55 ± 0.60	47.5 ± 9.5	0.37 ± 0.09
	DTJ/31	KL-Pz	86	939 ± 30	34.2 ± 1.1	55.9 ± 1.8	2.68 ± 0.38	47.6 ± 10.1	0.78 ± 0.10
	DTJ/24	VULK-KL-T	92	1328 ± 42	41.9 ± 1.4	33.4 ± 1.3	3.61 ± 0.65	45.9 ± 14.7	1.40 ± 0.18
	DTJ/25	VULK-KL-T	80	1089 ± 34	28.7 ± 0.9	40.4 ± 1.4	3.00 ± 0.49	47.4 ± 12.4	< 0.23
	DTJ/35	VULK-KL-T	92	1334 ± 42	18.6 ± 0.7	22.2 ± 1.0	1.38 ± 0.46	28.1 ± 18.8	0.30 ± 0.11
	DTJ/37	V-KL-T1,T2	106	1392 ± 44	44.3 ± 1.4	66.5 ± 2.3	2.91 ± 1.29	51.2 ± 19.4	40.0 ± 1.3
	DTJ/42	VULK-KL-T	148	3341 ± 106	33.2 ± 1.1	71.9 ± 2.5	2.85 ± 0.71	65.0 ± 34.4	0.41 ± 0.15
	DTJ/33	VULK-KL-T	97	2014 ± 64	15.5 ± 0.5	17.2 ± 0.7	1.59 ± 0.37	22.1 ± 15.2	0.25 ± 0.07
	*VK/7a	VULK-KL-T	192	2329 ± 75	31.2 ± 1.1	51.2 ± 1.8	2.3 ± 0.9	64.8 ± 13.1	5.6 ± 0.2
Zona Visoki krš	*VK/20	KL-Q	125	27.4 ± 1.8	73.0 ± 2.3	19.4 ± 6	4.12 ± 1.23	113 ± 14	20.2 ± 0.65
	VK/22	KL-Q	96	343 ± 11	210 ± 7	62.2 ± 2.1	8.43 ± 1.03	89.4 ± 23.7	60.4 ± 1.9
	VK/28	KL-Q	91	390 ± 12	167 ± 5	91 ± 3	7.89 ± 1.07	66.0 ± 18.8	255 ± 8
	*VK/21a	B.BOX-K	131	159 ± 5	92.3 ± 3	126 ± 4	7.8 ± 0.8	137 ± 13	20.2 ± 0.7
	*VK/23	B.BOX-K	137	109 ± 4	76.1 ± 2.4	129 ± 4	4.08 ± 0.71	73.5 ± 15.5	< 0.43
	*VK/24	B.BOX-K	134	164 ± 6	151 ± 5	169 ± 5	9.44 ± 1.32	151 ± 20	5.24 ± 0.26
	VK/26	B.BOX-K	101	95.4 ± 3.6	138 ± 5	133 ± 4	8.24 ± 0.92	172 ± 18	0.64 ± 0.16
	*VK/27	B.BOX-K	115	145 ± 5	239 ± 7	166 ± 5	16.2 ± 1.1	285 ± 190	1.40 ± 0.15
	*VK/25	C.BOX-J	149	173 ± 6	48.8 ± 1.6	196 ± 6	2.71 ± 0.54	66.0 ± 9.5	0.79 ± 0.11
	*VK/33	C.BOX-J	110	109 ± 4	66.8 ± 2.2	201 ± 6	4.92 ± 0.7	114 ± 13	2.95 ± 0.17
Jadransko-jonska zona	*VK/35	C.BOX-T2	112	146 ± 5	43.4 ± 1.4	198 ± 6	2.01 ± 0.53	38.0 ± 9.6	4.3 ± 0.2
	JZ/8	C.BOX-E	91	293 ± 10	144 ± 5	138 ± 5	6.88 ± 0.75	135 ± 10	11.5 ± 0.4
	JZ/34	C.BOX-E	87	76.4 ± 2.8	219 ± 7	208 ± 7	16.0 ± 2.3	304 ± 14	1.57 ± 0.10

* Lokalnosti sa jačinom doze iznad 110 nGyh-1 (boldovane su lokalnosti sa više od 130 nGyh-1)



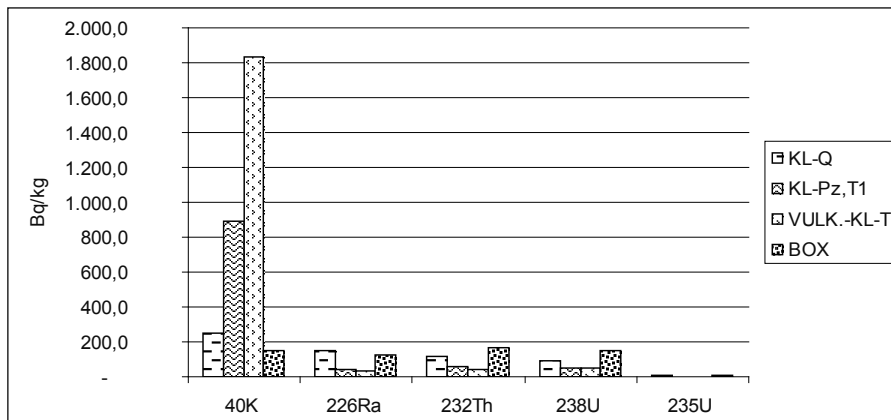
Slika 4. Srednje jačine apsorbiranih doza na lokalnostima sa povećanim fonom zračenja koje su na trijasko-jurskim, krednim bijelim i eocenskim boksitnim formacijama



Slika 5. Srednje koncentracije aktivnosti prirodnih radioizotopa u tlu, za 27 lokalnosti sa povećanim fonom zračenja

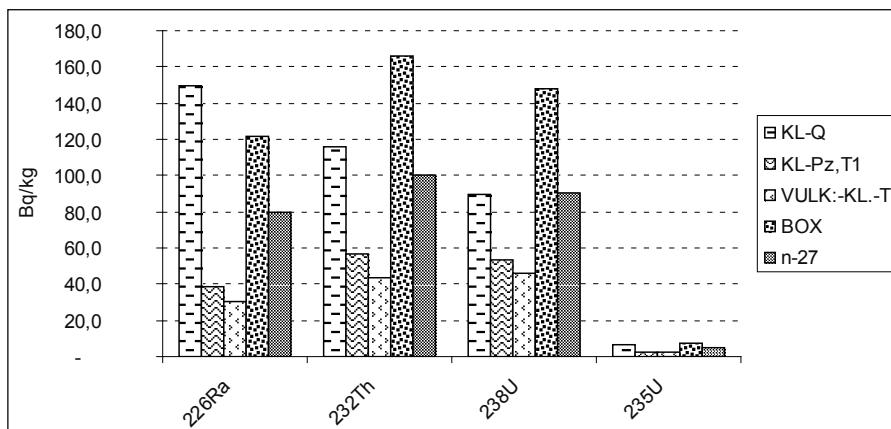
Tabela 5. Srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti prirodnih radioizotopa u tlu na lokalnostima sa povećanim fonom zračenja, po grupama geoloških formacija

Geološka formacija	Broj uzoraka	^{40}K (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{235}U (Bq/kg)	^{238}U (Bq/kg)
KL-Q	3	254	150	116	6.8	89.5
KL-Pz,T1	7	889	38.7	57.0	2.7	53.1
VULK-KL-T	7	1832	30.5	43.3	2.5	46.4
BOX	10	147	122	166	7.8	148
Zajedno	27	788	79.7	100	5.0	90.4



Slika 6. Srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti prirodnih radioizotopa u grupama geoloških formacija na lokalnostima sa povećanim fonom zračenja

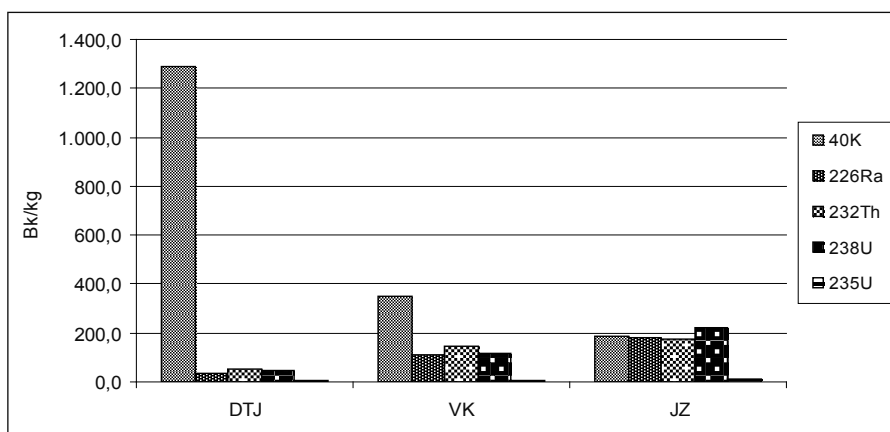
Na Slici 8 grafički su prikazane srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti prirodnih radioizotopa u tlu na lokalnostima sa povećanim zračenjem po geotektonskim jedinicama, a u Tabeli 6 date su te vrijednosti i, u cilju upoređenja, odgovarajuće srednje vrijednosti sadržaja radioizotopa u tlu Crne Gore, dobijene u ranijim istraživanjima [1,2].



Slika 7. Srednje vrijednosti koncentracija 226Ra, 232Th, 235U i 238U na lokalnostima sa povećanim zračenjem, ukupno (n=27) i po grupama geoloških formacija

Tabela 6. Srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti radioizotopa u Crnoj Gori i na lokalnostima sa povećanim fonom zračenja, po geotektonskim jedinicama

Radioizotop	Koncentracije aktivnosti (Bq/kg)			
	Crna Gora ^[1,2]	Durmitorska tektonska jedinica	Zona Visoki krš	Jadransko-Jonska zona
⁴⁰ K	246	1286	349	185
²²⁶ Ra	—	34.9	112	182
²³² Th	23.7	50.0	143	173
²³⁸ U	29.3	48.6	114	220
²³⁵ U	—	2.6	6.5	11.4

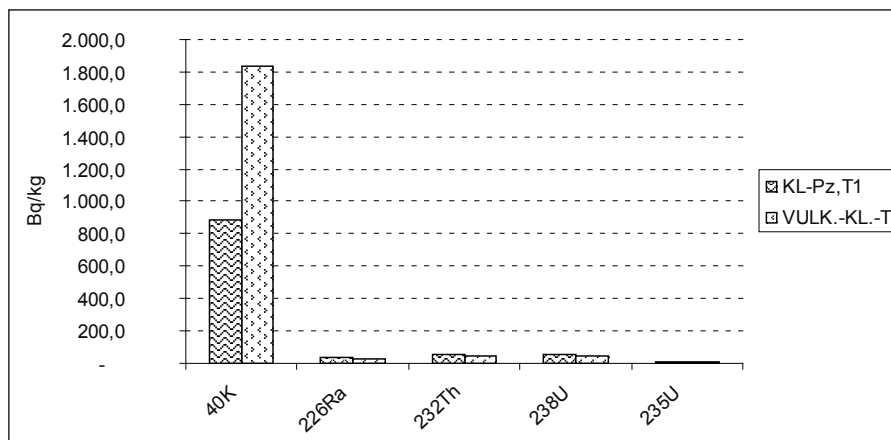


Slika 8. Srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti prirodnih radioizotopa na lokalnostima sa povećanim dozama zračenja, po geotektonskim jedinicama

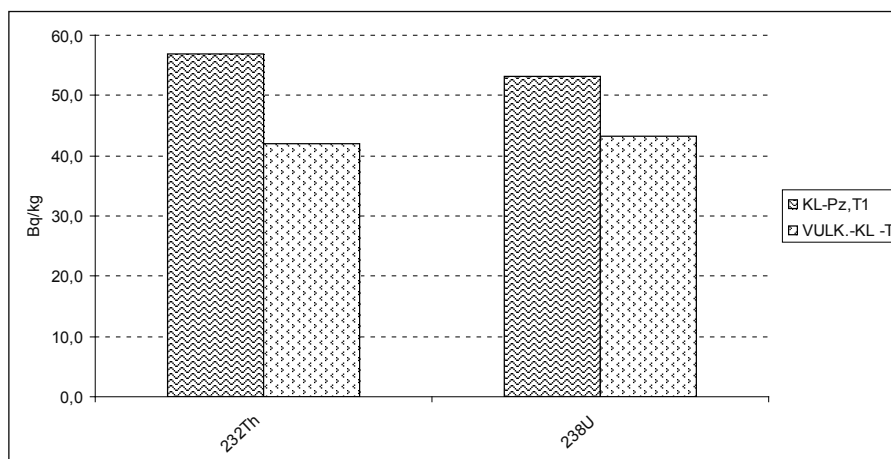
Iz Tabele 6 se vidi, što je i logično, da je srednji sadržaj svih prirodnih radioizotopa u tlu na lokalnostima sa povećanim fonom zračenja znatno veći od njihovog prosjeka za Crnu Goru. Takođe, iz Tabele 6 i sa Slike 8 je očigledno da je koncentracija kalijuma u tlu na tim lokalnostima značajno najveća u Durmitorskoj tektonskoj jedinici, ali su zato kod nje koncentracije torijuma, uranijuma i radijuma znatno manje nego u zoni Visoki krš i Jadransko-Jonskoj zoni.

3. 2. 1. Durmitorska tektonska jedinica (DTJ):

Kako je i očekivano pri planiranju istraživanja, povećane vrijednosti doze zračenja u vazduhu, a sljedstveno tome i povećane vrijednosti koncentracija aktivnosti radioizotopa u tlu, koncentrisane su u Durmitorskoj



(a)



(b)

Slika 9. Srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti radioizotopa u Pz, T_1 -klastitima i vulkanitima i vulkanoklastitima u Durmitorskoj tektonskoj jedinici: (a) svi mjereni prirodni radioizotopi; (b) ^{232}Th i ^{238}U

tektonskoj jedinici (DTJ) na dvije grupe ispitivanih formacija, a to su Pz, T_1 -klastiti i T_2 -vulkaniti i vulkanoklastiti.

Doze zračenja na ovim lokalnostima (vidjeti Tabelu 4) pokazuju evidentne razlike (oko 16%) srednjih vrijednosti između Pz, T_1 -klastita (85.9 nGyh^{-1}) i T_2 -vulkanita i vulkanoklastita (102.5 nGyh^{-1}). U T_2 -vulkanitima i vulkanoklastitima izražen je i veći stepen nejednačnosti jačina do-

za, sa rasponom od 92 do 148 nGyh⁻¹. Najveća apsorbovana doza zračenja u vazduhu od 148 nGyh⁻¹ izmjerena je na lokalnosti Bukovica DTJ/42 kod Šavnika, kojoj se u podlozi nalaze srednjotrijaski vulkaniti-rioliti. U uzorku tla sa te lokalnosti izmjerena je najveća koncentracija ⁴⁰K u tlu Crne Gore (3341 Bqkg⁻¹), koja je 13.5 puta veće od prosječne za Crnu Goru (vidjeti Tabelu 6).

U Tabeli 7 prikazane su karakteristike izmjerenih koncentracija radioizotopa u uzorcima tla sa 13 lokalnosti sa povećanim dozama zračenja u DTJ, prema geološkoj osnovi (T₂-vulkaniti i vulkanoklastiti i Pz,T₁-klastiti).

Tabela 7. Koncentracije aktivnosti radioizotopa u tlu na lokalnostima sa povećanom dozom zračenja u DTJ

Radioizotop	Koncentracije u DTJ (Bq/kg)		Koncentracije u VULK-KL-T (Bq/kg)		Koncentracije u KL-Pz,T ₁ (Bq/kg)	
	Sred.	Maks.	Sred.	Maks.	Sred.	Maks.
⁴⁰ K	1286	3341	1750	3341	889	1094
²³² Th	50.0	71.9	41.9	71.9	57.0	62.7
²²⁶ Ra	34.9	44.3	30.4	44.3	38.7	43.8
²³⁵ U	2.6	3.9	2.6	3.6	2.7	3.9
²³⁸ U	48.6	71.9	43.3	65.0	53.1	71.9

U vulkanitima i vulkanoklastitima srednjeg trijasa (VULK-KL-T) dobijene su najveće srednje vrijednosti sadržaja ⁴⁰K. U ovoj grupi formacija izmjerena je i najveća koncentracija ⁴⁰K (3341 Bqkg⁻¹) u tlu u Crnoj Gori. Kao što pokazuju Tabela 7 i Slika 9, u Durmitorskoj tektonskoj jedinici su srednje vrijednosti koncentracija Th i U veće u Pz,T₁-klastitima nego u vulkanitima i vulkanoklastitima, dok su srednje vrijednosti koncentracija K znatno niže u Pz,T₁-klastitima od onih u vulkanitima i vulkanoklastitima.

Paleozojski i donjotrijaski klastiti (KL-Pz,T₁)

Značajno su zastupljeni u sjeveroistočnim i jugoistočnim djelovima DTJ (područja Plava, Murina, Andrijevice, Bijelog Polja, Rožaja i manje u području Pljevalja). U ovu grupu formacija uvršteni su kvarcni metapješčari, arkozni pješčari, kvarcno-sericitski liskunoviti škriljci, metaalevroliti, silicijski i grafitični škriljci, rjeđe konglomerati i krečnjaci paleozojskog (od devona do perma) i donjotrijaskog (T₁) razvića. Najčešći

mineralni sastav pješčara je kvarc, mikroklin, plagioklasi, ortoklas, a kao sekundarni i sporedni minerali prisutni su sericit, hlorit, apatit, cirkon, hematit, pirit, turmalin, dok su u formacijama škriljaca, pored kvarca, prisutni feldspati, sericit, biotit, muskovit, plagioklas, hornblenda i dr.

Od 22 ispitivane lokalnosti sa geološkom podlogom izgrađenom od Pz, T₁-klastita, povećana radioaktivnost je konstatovana na 7 lokalnosti.

Povećane vrijednosti doze zračenja izmjerene su na lokalnostima na Pz-klastitima devonsko-karbonske starosti, sa rasponom od 80 do 94 nGyh⁻¹ (srednje 85.9 nGyh⁻¹). Povećane su od 50 do 70% (srednje 56%) u odnosu na srednju vrijednost za Crnu Goru (55 nGyh⁻¹). Na osnovu uvida u geološku građu podloge, pri terenskim ispitivanjima, zapaženo je da u geološkoj građi terena sa povećanim dozama zračenja značajno učešće imaju crni škriljci (Plav, Zaton, Jabučno, Bušnje).

Rezultati gama-spektrometrije uzoraka tla pokazuju da su srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti ²³²Th (57.0 Bq/kg), ²³⁸U (53.1 Bq/kg) i ⁴⁰K (889 Bq/kg) povećane u odnosu na srednje vrijednosti u Crnoj Gori za 2.4, 1.8 i 3.6 puta, respektivno. U ovoj grupi formacija, u uzorcima tla sa lokalnosti Zaton i Nedakusi, konstatovane su najveće koncentracije uranijuma u DTJ (vidjeti tabele 3 i 4).

Vulkaniti i vulkanoklastiti trijasa (VULK-KL-T)

Srednjotrijaski vulkaniti i vulkanoklastiti u Crnoj Gori zastupljeni su u četiri odvojene paralelne zone: prva u sjevernom dijelu u DTJ, dvije, kratke, u VK u Nikšićkoj Župi i Crmnici, i treća u tektonskoj jedinici BZ. Prva zona čini preko 90% svih magmatskih stijena u Crnoj Gori. Vulkaniti i vulkanoklastiti u DTJ su submarinske tvorevine i koncentrisani su, u većim masama, oko vulkanskih centara na Visitoru, Sjekirici, Bjelasići, Sinjajevini i Ljubišnji.

T₂-vulkaniti su andezitsko-dacitskog do keratofirskog i, rjeđe, riolit-skog tipa. Mineraloško-petrološki sastav ovih stijena karakterišu andezin i labrador sa sericitom i kalcitom, za andezitski tip, za keratofire su najčešći fenokristali plagioklasa (albit i oligoklas), bojani minerali pretvoreni u hlorit, oksid gvožđa i kalcit, dok su rioliti izgrađeni od fenokristala kvarca, ortoklasa, albita, biotita sa čestim izmjenama ortoklasa u sericit i kaolin. Kao sporedni minerali, u ovim vulkanitima, mogu se javiti magnetit, apatit, cirkon i dr.

Mjerenjima apsorbiranih doza zračenja na 11 lokalnosti bili su zahvaćeni svi glavni masivi izgrađeni od T_2 -vulkanita i vulkanoklastita, od kojih su na 6 lokalnosti izmjerene povećane vrijednosti jačina doza.

Ovi tipovi srednjotrijaskih vulkanskih i vulkanoklastičnih stijena i njihov mineraloško-petrološki sastav obično imaju povećane vrijednosti koncentracija ispitivanih radioizotopa, naročito ^{40}K , koji se može vezati za kisjele vulkanite tipa riolita ili keratofira sa povećanim sadržajem kalije.

Rezultati gama-spektrometrije uzoraka tla pokazuju da su im srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{232}Th (41.9 Bq/kg), ^{238}U (43,3 Bq/kg) i ^{40}K (1750 Bq/kg) povećane u odnosu na srednje vrijednosti u Crnoj Gori: ^{232}Th za 1.8 puta, ^{238}U za 1.5 puta, a ^{40}K čak preko 7 puta.

3. 2. 2. Visoki krš (VK)

Povećane doze zračenja u zoni Visoki krš izmjerene su u dvije grupe formacija na karbonatima (boksiti i klastiti kvartara) i na jednoj lokalnosti izgrađenoj od vulkanskih stijena andezitskog sastava.

Tabela 8. Koncentracije aktivnosti radioizotopa u tlu na lokalnostima sa povećanim fonom zračenja u zoni Visoki krš

Radioizotop	Koncentracije u zoni VK (Bq/kg)		Koncentracije u K1-Q (Bq/kg)		Koncentracije u BOX (Bq/kg)		Koncentracija u VULK-KL-T (Bq/kg)
	Srednje	Maks.	Srednje	Maks.	Srednje	Maks.	
^{40}K	349	2329	254	390	138	173	2329
^{232}Th	143	201	116	194	165	201	51.2
^{226}Ra	111	239	150	210	107	239	31.2
^{235}U	6.5	16.2	6.8	8.4	6,9	16.2	2.3
^{238}U	114	285	89.5	113	130	285	64.8

Iz Tabele 8 se vidi da su, u odnosu na srednje vrijednosti za Crnu Goru (vidjeti Tabelu 6), koncentracije aktivnosti ^{232}Th i ^{238}U povećane na tri ispitivane lokalnosti iz grupe kvartarnih sedimenata (KL-Q) u zoni Visoki krš, što nije bio slučaj sa grupom formacija kvartarnih klastita na lokalnostima u ostalim geotektonskim jedinicama. Mogući uzrok za ovo povećanje nalazi se u kontaminiranosti predeponovanim boksitnim materijalom u kvartarne sedimente i crvenicu.

U zoni Visoki krš najveće koncentracije aktivnosti ^{232}Th i ^{238}U izmjerene su u grupi boksitnih (BOX) formacija, a ^{40}K na jednoj ispitivanoj

lokalnosti iz grupe formacija trijaskih vulkanita (VULK-KL-T) i ona je druga najveća vrijednost (2329 Bq/kg) izmjerena u Crnoj Gori.

Boksiti (BOX)

U Kučkoj strukturnoj jedinici izdvojeni su boksitonosni rejon sa pojavama i ležištima trijaskih i jurskih crvenih boksita: rudni rejon Pive, rudni rejon Vojnika i Maganika i rudni rejon Prekornice.

U Starocnogorskoj strukturnoj jedinici, u kojoj se nalaze pojave i ležišta jurskih crvenih i krednih bijelih boksita, izdvojeni su boksitonosni rudni rejon: Zapadne Crne Gore, Orjena i Čeva.

Sve pojave i ležišta boksita deponovane su na karbonatnim sedimentima trijasa, jure i krede.

Prema dominantnom mineralnom sastavu jurski crveni boksiti pripadaju bemitskom i bemitsko-kaolinitskom tipu, rijetki su boksiti hidrargiritskog tipa. Po stepenu zastupljenosti akcesornih minerala u jurskim i trijaskim boksitima su [10]:

- dobro do srednje zastupljeni: pirit, markasit i magnetit najzastupljeniji, zatim cirkon, kvarc, ilmenit, rutil;
- slabozastupljeni: sfen, pirokseni, amfiboli, biotit hlorit, epidot, granati, staurolit, turmalin, muskovit, korund, opal, anatas, hromni spinel, galenit, sfalerit, kovelin i halkopirit.

Formacija bijelih boksita zastupljena je u Starocnogorskoj strukturnoj subzoni u području Bijelih Poljana, Budoša, Trubjele, Trepče i Banjana. U okviru ove formacije najčešće je prisutno nekoliko litoloških tipova, počev od bijelih boksita, sivih boksitnih glina, plavih glina, podinskih glina i crvenih boksita. Mineralni sastav bijelih boksita predstavljen je glavnim mineralima: kaolinit, bemit; prateći minerali su: gipsit, getit, hematit, anatas, kalcit, pirit, ilit; a akcesorni minerali: cirkon, amfibol, feldspati, piroksen, kvarc, rutil, hlorit, epidot i dr.

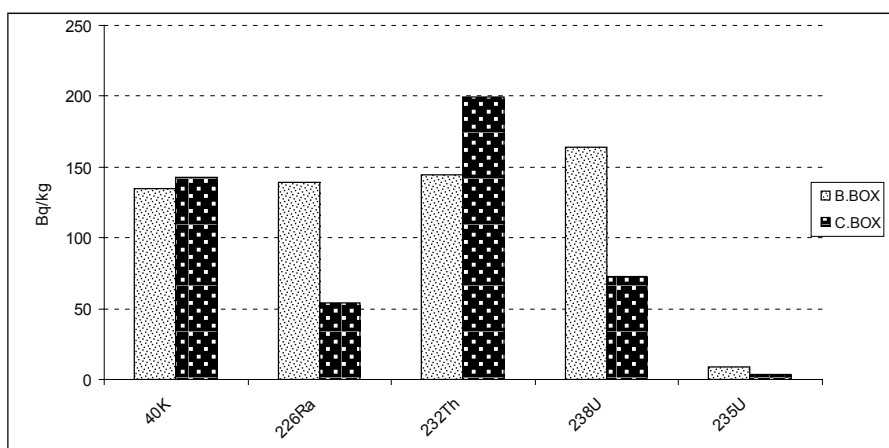
Iz Tabele 9 i Slike 10 vidi se da su srednje koncentracije kalijuma kod crvenih i bijelih boksita praktično jednake. Koncentracije torijuma su veće u crvenim boksitima, a uranijuma je znatno više u bijelim boksitima. Inače, u odnosu na sve grupe geoloških formacija ispitivanih u okvirima ovog istraživanja, crveni boksiti (kako u zoni Visoki krš tako i u Jadransko-Jonskoj zoni) imaju najveće koncentracije torijuma, a bijeli boksiti uranijuma i radijuma. U crvenim boksitima iz zone Visoki krš koncentracije torijuma su u prosjeku čak 8.4 puta veće od njihove srednje vrijedno-

sti za Crnu Goru, a uranijuma 2.5 puta, dok su u bijelim boksitima koncentracije torijuma u prosjeku veće 6 puta, a uranijuma 5.6 puta od srednje vrijednosti za Crnu Goru.

Najveće srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{238}U dobijene su na područjima sa boksitnim formacijama i kvartarnim klastitima koji se nalaze u boksitonosnom rejonu Orjena.

Tabela 9. Srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti prirodnih radioizotopa u bijelim i crvenim boksitima u zoni Visoki krš

Geološka formacija	^{40}K (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)	^{235}U (Bq/kg)	^{238}U (Bq/kg)
B.BOX	134	145	139	9.1	164
C.BOX	143	199	54.4	3.2	72.7



Slika 10. Histogram srednjih koncentracija aktivnosti prirodnih radioizotopa u bijelim (B.BOX) i crvenim boksitima (C.BOX) u zoni Visoki krš

3. 2. 3. *Jadransko-Jonska zona (JZ)*

U ovoj geotektonskoj jedinici nijesu zabilježene povećane doze zračenja na ispitivanim grupama geoloških formacija, osim na dvije lokalnosti sa pojavama crvenih eocenskih boksita (koje nijesu statistički značajne za upoređivanje sa prethodne dvije strukturno-tektonske jedinice, ali indiciraju zanimljive razlike u koncentracijama specifičnih aktivnosti u odnosu na boksite u zoni Visoki krš). Srednje vrijednosti koncentracija prirodnih radioizotopa za te dvije lokalnosti prikazane su u Tabeli 10.

Tabela 10. Srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti prirodnih radioizotopa na dvije lokalnosti u crvenim eocenskim boksitima u Jadransko-Jonskoj zoni

Geološka formacija	⁴⁰ K (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	²³⁵ U (Bq/kg)	²³⁸ U (Bq/kg)	²²⁶ Ra (Bq/kg)
C.BOX	185	173	11.4	220	182

Formacije eocenskih crvenih boksita u Jadransko-Jonskoj zoni zastupljene su u široj okolini Ulcinja i Bokokotorskog zaliva. U podini ovih boksita nalaze se gornjokredni krečnjaci a u njihovoj krovini su eocenski numulitski krečnjaci. Eocenski boksiti okoline Ulcinja izgrađeni su od minerala bemita, dijaspora, kaolinita, limonita i hidrargirita, a pominje se i prisustvo halozita, getita i rutila. Boksiti u području Boke Kotorske odgovaraju po mineralnom sastavu boksitima okoline Ulcinja. U njihovom mineralnom sastavu detektovani su akcesorni minerali: cirkon, disten, turmalin, epidot, anatas, rutil, andaluzit granat, piroksen i apatit [11].

Tabela 10 pokazuje da su u crvenim eocenskim boksitima koncentracije svih radioizotopa, osim ⁴⁰K, znatno povećane u odnosu na njihove srednje vrijednosti u Crnoj Gori (vidjeti ih u Tabeli 6). U ovoj tektonskoj jedinici, na uzorku crvenog boksita sa lokalnosti Žvinje JZ/34 kod Herceg Novog (vidjeti Tabelu 4), dobijene su apsolutno najveće vrijednosti koncentracija aktivnosti ²³²Th, ²³⁵U, ²³⁸U i ²²⁶Ra (208 Bq/kg, 16 Bq/kg, 304 Bq/kg, 219 Bq/kg respektivno) u ovom istraživanju.

3. 2. 4. Budva-Cukali zona (BZ)

U ovoj geotektonskoj jedinici, koja nije velika po površini ali je po geološkoj građi heterogena, nijesu izmjerene povećane vrijednosti apsorbiranih doza zračenja, čak ni na 8 lokalnosti na vulkanitima i vulkanoklastitima trijasa.

Očekivano niske vrijednosti apsorbiranih doza zračenja izmjerene su na lokacijama u karbonatima (KARB), dok su nešto veće vrijednosti od izmjerenih očekivane od formacija različitih flišnih sedimenata od srednjeg trijasa do krede, paleogena i eocena.

3. 3. Poređenje lokalnosti sa povećanim fonom zračenja u Crnoj Gori sa drugim sličnim područjima u svijetu

Iz Tabele 4 vidi se da je ovo istraživanje pokazalo samo 10 lokalnosti (u tabelama 3 i 4 obilježene zvjezdicom ispred oznake lokalnosti) na kojima je jačina apsorbirane doze u vazduhu veća od dvostruke srednje vri-

jednosti za Crnu Goru, tj. $D \geq 110 \text{ nGyh}^{-1}$. Kako je najveća izmjerena vrijednost jačine apsorbovane doze u vazduhu 192 nGyh^{-1} , a sve ostale ispod 150 nGyh^{-1} , može se zaključiti da ovih 10 lokalnosti sa najvećim spoljašnjim zračenjem u Crnoj Gori, u poređenju sa drugim poznatim područjima u svijetu sa visokim fonom prirodnog fona zračenja [6], prikazanim u Tabeli 11, spadaju u red onih sa umjerenim vrijednostima povećanja fona.

Tabela 11. Područja u svijetu sa povećanim prirodnim fonom zračenja [6]

Država	Područje	Karakteristike područja	Apsorbovana doza u vazduhu (nGyh^{-1})
Brazil	Gvarapari	monacitni pijesak (plaže)	90 – 90 000
Kina	Jangjiang i Kuangdong	monacitne čestice	370 (prosjeak)
Egipat	delta Nila	monacitni pijesak	20 – 400
Francuska	centralni region jugozapad	granit, škriljci, pješčari minerali uranijuma	20 – 400 10 – 10 000
Indija	Kerala i Madras	monacitni pijesak	2200 – 4 000 1 800 (prosjeak)
Iran	Ramsar Mahalat	izvorske vode	70 – 17 000 800 – 4 000
Italija	Lacio Kampanija grad Orvieto južna Toskana	vulkansko tlo	180 (prosjeak) 200 (prosjeak) 560 (prosjeak) 150 – 200
Švajcarska	Tesin, Alpi, Jura	gnajs, ^{226}Ra u karstu	100 – 200

Među ovih 10 lokalnosti nema niti jedne koja pripada Jadransko-Jonskoj (JZ) ili Budva-Cukali (BZ) zoni, koje prekrivaju cjelokupnu oblast Crnogorskog primorja sa užim zaleđem. Jedna od njih pripada Durmitorskoj tektonskoj jedinici (DTJ), a ostalih devet zoni Visoki krš (VK). Na dvije od ovih 10 lokalnosti, VK/7a (kod Virpazara) i DTJ/42 (kod Šavnika), vrsta stijena je andezit (srednjotrijaski vulkanit), na jednoj (VK/20 kod Nikšića) je fluvioglacijalni šljunak i pijesak, a na svim ostalima su ležišta bijelih ili crvenih boksita (VK/25, VK/27, VK/33 i VK/35 su u području Nikšića, a VK/21a, VK/23 i VK/24 u području Cetinja, prema Nikšiću).

Srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U i ^{226}Ra za 7 zemalja Južne Evrope iznose 433 Bqkg^{-1} , 35 Bqkg^{-1} , 52 Bqkg^{-1} (za 4 zemlje) i 35.5 Bqkg^{-1} , respektivno [6], dok su te vrijednosti za Crnu Goru nešto niže [1,2]: 246 Bqkg^{-1} za ^{40}K , 24 Bqkg^{-1} za ^{232}Th i 29 Bqkg^{-1} za ^{238}U .

Prema tome, iz Tabele 4 slijedi da je uzrok povećanih doza na lokalnostima VK/7a i DTJ/42, gdje je prisutan andezit, visoka koncentracija kalijuma (do 3340 Bqkg^{-1}) i donekle uranijuma (^{238}U do 65 Bqkg^{-1}) u tlu, a na ostalim lokalnostima, gdje su uglavnom prisutni boksiti, znatno povećane koncentracije uranijuma (^{238}U do 285 Bqkg^{-1}) i torijuma (do 210 Bqkg^{-1}).

Ovi nalazi su u saglasnosti sa ranijim istraživanjem radioaktivnosti crnogorskih boksita [12], koje je pokazalo visoke koncentracije U i Th u njima, i sa istraživanjima radona [13,14], kada je ustanovljeno da je u stanovima u Crnoj Gori najveća njegova koncentracija u Nikšiću (na čijoj su teritoriji najznačajniji crnogorski boksitni resursi), koja je 4.7 puta veća od svjetskog prosjeka i gotovo 3 puta veća od prosjeka za zemlje Južne Evrope [5].

Iz Tabele 4 primjećuje se da su koncentracije aktivnosti tehnogenog ^{137}Cs relativno niske, najčešće daleko ispod nivoa od 20 Bqkg^{-1} , što je bio nivo kontaminacije našeg područja prije akcidenta u Černobilju. To znači da se černobiljski cezijum, nakon više od dvije decenije prisustva kod nas, djelimično raspao i značajno migrirao iz površinskog sloja u dubinu zemljišta, te da on nije uzrok povećanih doza na ovim lokalnostima. Izuzetak je samo lokalnost VK/28 (Kuside – Nikšić, krečnjačko-dolomitna crnica u kamenjaru, 255 Bqkg^{-1}), gdje je gotovo isti nivo koncentracije aktivnosti ^{137}Cs izmjeren i krajem 1994. godine [1], i donekle VK/22 (Grahovo – Nikšić, 60 Bqkg^{-1}) i DTJ/37 (Glisnica – Pljevlja, 40 Bqkg^{-1}), gdje su krajem 1994. godine izmjerene oko 4.5 puta veće koncentracije ^{137}Cs [1].

4. ZAKLJUČAK

Od ispitivanih 138 lokalnosti u Crnoj Gori, za koje su postojale indicije da bi mogle imati povećani nivo radioaktivnosti, mjerenja su pokazala da je na samo 27 od njih jačina apsorbovane doze zračenja u vazduhu za 50% ili više iznad prosječne za Crnu Goru (55 nGyh^{-1}). Od ovih lokalnosti je 13 u području Durmitorske tektonske jedinice, 12 u zoni Visoki krš, 2 u Jadransko-Jonskoj zoni, a nijedna u Budva-Cukali zoni.

Analiza jačina doza u vazduhu i koncentracija aktivnosti prirodnih radioizotopa u tlu na lokalnostima sa povećanim fonom zračenja ukazuje da su povećane vrijednosti zračenja u vezi sa tri grupe geoloških formacija: paleozojsko-donjotrijaski klastiti (KL-Pz, T_1), srednjotrijaski vulkaniti i vulkanoklastiti (VULK-KL-T) i boksiti (BOX) crveni-trijaski, jurski i eocenski i bijeli-kredni. Grupu kvartarnih klastita (KL-Q) treba po-

smatrati u svijetlu uticaja grupe boksitnih formacija. Vrijednosti apsorbovane doze zračenja su najveće na boksitnim formacijama, gdje je vidljiv uticaj ^{238}U i ^{232}Th , a zanemarljiv uticaj ^{40}K . Na vulkanitima srednjeg trijasa (VULK-KL-T), pored ^{238}U i ^{232}Th , posebno je naglašen uticaj ^{40}K .

Iznad dvostruke vrijednosti (110 nGyh^{-1}) srednje jačine doze za Crnu Goru nađeno je 10 lokalnosti (njihove oznake obilježene zvjezdicom u Tabelama 3 i 4) – devet u zoni Visoki krš i jedna u području Durmitorske tektonske jedinice.

Šest je lokalnosti sa najvećim dozama zračenja u Crnoj Gori (iznad 130 nGy/h ; njihove oznake boldovane u tabelama 3 i 4). U Durmitorskoj tektonskoj jedinici je samo jedna – Bukovica (DTJ/42) kod Šavnika, i karakteriše je najveća izmjerena koncentracija kalijuma (3341 Bqkg^{-1}) u tlu u Crnoj Gori. U zoni Visoki krš ih je pet: Bukovik (VK/7a) kod Virpazara, Ravna Aluga (VK/21a) – opština Cetinje, Bijele Poljane (VK/23) – opština Cetinje, Jelina Pećina (VK/24) – opština Cetinje i Borova Brda (VK/25) – Župa Nikšićka. Najveća jačina doze (192 nGy/h) u Crnoj Gori izmjerena je na lokalnosti VK/7a kod Virpazara, kojoj je u osnovi vulkanit andezitskog tipa, a uzrok joj je veoma visoka koncentracija K u tlu (2329 Bqkg^{-1}). Ostale četiri lokalnosti karakterišu izdanci boksita, gdje su relativno visoki sadržaji U (^{238}U do 285 Bqkg^{-1}) i Th (do 201 Bqkg^{-1}) u tlu uzrok povećanog fona prirodnog zračenja.

Čak i ove lokalnosti sa najvećim dozama zračenja u Crnoj Gori, u poređenju sa drugim poznatim u svijetu područjima sa povećanom prirodnom radioaktivnošću, pripadaju područjima sa umjereno povećanim fonom zračenja.

Izmjerene koncentracije aktivnosti ^{137}Cs su relativno niske, najčešće daleko ispod nivoa od 20 Bqkg^{-1} . To potvrđuje da se černobiljski cezijum, nakon više od dvije decenije prisustva na terenima Crne Gore, djelimično raspao i migrirao sa površine u dublje slojeve tla, te da on nije značajnije uzrok povećanih doza na ispitivanim lokalnostima. Izuzetak je samo lokalnost Kuside – opština Nikšić (VK/28, krečnjačko-dolomitna crnica u kamenjaru, 255 Bqkg^{-1}), gdje je isti nivo koncentracije aktivnosti ^{137}Cs izmjeren i krajem 1994. godine.

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., Borisov G. I., Kuzmič V. V., Antović N., Dapčević S., Uvarov V. V., Kulakov V. M., “Radioactivity on the Montenegrin Coast, Yugoslavia”, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 235, Nos 1–2 (1998), p. 151–157.
- [4] Antovic N., Vukotic P., Zekic R., Svrkota R., Ilic R., “Indoor radon concentrations in urban settlements on the Montenegrin Coast”, Radiation Measurements, Vol. 42, No. 9 (2007), p. 1573–1579.
- [5] Vukotic P., Antovic N., Zekic R., Svrkota R., Ilic R., “Indoor radon concentrations in four municipalities of the central part of Montenegro”, Journal of Research in Physics, Vol. 32, No. 1 (2008), p. 1–15.
- [6] 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.
- [7] Mirković M. et al., „Geološka karta SRCG, 1:200.000”. Republička samoupravna zajednica za geološka istraživanja SRCG, Titograd, 1985.
- [8] Živaljević M., „Tumač geološke karte SR Crne Gore, 1: 200 000”. Posebna izdanja Geološkog glasnika, knjiga VIII, 1989, Zavod za geološka istraživanja SR Crne Gore.
- [9] “HASL 300 – EML Procedures Manual”. Environmental Measurements Laboratory, U. S. Department of Energy, 28 Edition, February 1997.
- [10] Cicmil S., „Metalogenija mezozojskih ležišta crvenih boksita jugozapadne Crne Gore, Izd. Rudnici boksita-Nikšić, Nikšić 1984.
- [11] Sakač K., Šinkovec B., Babić Lj., Sesar T., Drobne K., Zupanic J., „O tektonici i sedimentima paleogena i ležištima boksita područja Luštice u Hercegovini”, Geološki vjesnik, Zagreb, Vol. 40 (1987), p. 351–378.
- [12] Vukotić P., „Određivanje lantanida u uzorcima stijena metodom NAA i primjena obrazaca njihove relativne raspodjele u proučavanju porijekla matičnog materijala boksita Crne Gore”. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, 1981.
- [13] Antovic N., Vukotic P., Zekic R., Ilic R., “Indoor radon concentrations in the town of Niksic – Montenegro”. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 124, No. 4 (2007), p. 385–391.
- [14] Antovich N., Uvarov V. V., Vukotich P., Dapcevich S., “Indoor radon concentrations above bauxite ground”, Geofisica Internacional, Vol. 41, No. 3 (2002), p. 321–323.