

UNIVERZITET U BEOGRADU  
FAKULTET ZA FIZIČKU HEMIJU

Mehdi Bashir Tereesh

**RADIOAKTIVNOST RIOLITSKO-  
GRANITOIDNIH STENA NA PODRUČJU DŽABAL  
EGIJA (JABAL EGHI) U JUŽNOJ LIBIJI**

doktorska disertacija

Beograd, 2013

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF PHYSICAL CHEMISTRY

Mehdi Bashir Tereesh

**RADIOACTIVITY OF THE RHYOLITE-  
GRANITOIDE ROCKS IN THE JABAL EGHY AREA  
OF SOUTHERN LIBYA**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

## **Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije:**

### **MENTORI:**

1. Dr Šćepan Miljanić, redovni profesor, Fakultet za fizičku hemiju, Univerzitet u Beogradu
2. Dr Mirjana Radenković, naučni saradnik, Institut za nuklearne neuke »Vinča«, Univerzitet u Beogradu

### **ČLANOVI KOMISIJE:**

3. Dr Jovan Kovačević, naučni saradnik, Geološki zavod Srbije, Beograd
4. Dr Goran Bačić, redovni profesor, Fakultet za fizičku hemiju, Univerzitet u Beogradu

Datum odbrane: \_\_\_\_\_, Beograd

Ova doktorska disertacija je ugledala svetlo dana blagodareći razumevanju i pomoći više institucija i pojedinaca iz Libije i iz Srbije. S tim u vezi želim da izrazim najveću zahvalnost Nuklearnom istraživačkom institutu Tajoura (Tajoura Nuclear Research Institute), u kojem sam zaposlen, kao i IRC (Industrial Research Center, Tripoli) za saglasnost da se ova istraživanja rade i da njihovi rezultati budu iskorišćeni za svrhe ove disertacij. Jednako tako sam zahvalan i nizu saradnika IRC, a posebno Ibrahimu Abeadu i Salahu El-Turki-ju što su omogućili prikupljanje uzoraka i rad na njima. Ništa manju zahvalnost ne dugujem ni Geološkom zavodu Srbije, koji je zajedno sa IRC radio na geološkom kartiranju oblasti Džabal Egi i pomogao u prikupljanju uzoraka, njihovu dopremi u Beograd, pripremama za analizu, tumačenju i analizi rezultata itd. Ovde ističem veliku pomoć dipl. ing. Sergeja Komarnickog, posebno vezanu za pripremu za rad i uzorkovanje, a ogromnu zahvalnost dugujem dr Jovanu Kovačeviću, koji se nesebično angažovao da mi pomogne u svim fazama izrade ove disertacije, od prikupljanja uzoraka u Libiji, preko njihove pripreme, opisivanja, te analize rezultata i pisanja disertacije.

Merenja radioaktivnosti uzoraka su obavljena u Institutu za nuklearne nauke 'Vinča', Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine. Ovom prilikom se zahvaljujem direktoru laboratorije mr Milojku Kovačeviću, što mi je omogućio da obavim merenja, dr Dragani Todorović i dr Jeleni Nikolić za veliku pomoć pri samim merenjima, a posebno dr Mirjani Radenković, što se kao komentor upustila u zajednički rad i izuzetno doprinela da i merenja i rezultati i sama disertacija budu bolji nego što bi bili bez njene velike pomoći.

Konačno, ova disertacija je deo mojih doktorskih studije na Fakulteta za fizičku hemiju Univerziteta u Beogradu, a urađena je pod neposrednim rukovodstvom mog mentora, profesora Šćepana Miljanića. On je ne samo pratio moj rad na izradi teze, svakodnevno i detaljno u svim fazama, već brinuo o meni i svim mojim ostalim problemima, od prijema na studije, nostrifikacije diplome, administrativnih problema, definisanja teme, merenja, pisanja disertacije. Zbog toga mu izražavam neizmernu zahvalnost za pomoć i podršku koju sam imao u toku svih godina mog boravka na studijama u Beogradu.

Mehdi B. Tereesh

# SADRŽAJ

Rezime .....	3
Abstract.....	6
<b>1 UVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Cilj istraživanja .....</b>	<b>11</b>
<b>2 OPŠTI DEO .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Istorijat istraživanja oblasti Džabal Egi.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Geografski položaj i osnovne geomorfološke karakteristike područja Džabal Egi .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3 Osnovne geološke karakteristike područja Džabal Egi.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4 Sadržaji elemenata i načini njihovog utvrđivanja .....</b>	<b>27</b>
<b>2.5 Procena radijacionog rizika – opšte postavke .....</b>	<b>28</b>
<b>3 METODE I MATERIJALI .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 Prikupljanje i priprema uzoraka .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 Merenje radioaktivnosti .....</b>	<b>32</b>
<i>3.2.1 Kalibracija i osnovno zračenje (fon).....</i>	<i>34</i>
<b>3.3 Metode ICP-MS i XRF .....</b>	<b>36</b>
<b>4 REZULTATI I DISKUSIJA.....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 Preliminarna terenska radiometrijska merenja .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 Određivanje specifičnih aktivnosti radioniuklida i koncentracijâ elemenata iz gama-spektrometrijskih merenja.....</b>	<b>39</b>
<i>4.2.1 Koncentracije uranijuma, torijuma i kalijuma u uzorcima iz Džabal Egija .....</i>	<i>41</i>
<i>4.2.2 Pojave uranijuma, torijuma i kalijuma u području Džabal Egi .....</i>	<i>44</i>
<b>4.3 Uprošćeni genetski model uranijumskih mineralizacija u području Džabal Egija.....</b>	<b>51</b>
<b>4.4 Procena radijacionog rizika.....</b>	<b>53</b>
<i>4.4.1 Specifične aktivnosti <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K i najvažniji parametri radijacionog rizika</i>	<i>53</i>

<i>Radijumu ekvivalentna aktivnost</i> .....	54
<i>Indeks spoljašnjeg hazarda</i> .....	54
<i>Apsorbovana doza gama zračenja</i> .....	55
<i>Godišnja efektivna doza spoljašnjeg zračenja</i> .....	55
<b>ZAKLJUČCI</b> .....	63
<b>LITERATURA</b> .....	65
<b>BIOGRAFIJA</b> .....	69

# RADIOAKTIVNOST RIOLITSKO-GRANITOIDNIH STENA NA PODRUČJU DŽABAL EGIJA (JABAL EGHI) U JUŽNOJ LIBIJI

## Rezime

Istraživanje radioaktivnih materijala koji se javljaju u prirodi (NORM) je od velikog značaja za mnoge oblasti, a naročito za geologiju. Osnov takvih istraživanja čini određivanje sadržaja prirodnih radioaktivnih izotopa uranijuma i torijuma (i potomaka njihovih radioaktivnih serija: serija  $^{238}\text{U}$ , serija  $^{235}\text{U}$  i serija  $^{232}\text{Th}$ ) u stenama, zatim izotopa kalijuma, rubidijuma itd, pošto njihovi prirodni radioaktivni izotopi spadaju u red najobilnijih radioizotopa na Zemlji. Po prirodnoj obilnosti prvi među njima je kalijum, sa obilnošću u zemljinoj kori (Klarkova vrednost) od 2,5 %, dok se uranijum i torijum pojavljuju kao elementi u tragovima, sa Klarkovim vrednostima oko 2,50 odnosno  $13 \text{ mg kg}^{-1}$ , redom.

Cilj istraživanja je bio da se merenjem radioaktivnosti utvrde koncentracije najvažnijih materijala NORM-a, a to znači izotopa  $^{238}\text{U}$  (i njegovog najvažnijeg dugoživućeg potomaka  $^{226}\text{Ra}$ ), kao i  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , u uzorcima stena koji su prikupljeni u području riolitskog masiva Džabal Egi (Jabal Egghi) – Kangara na dalekom jugoistoku Libije, blizu granice sa Čadom. To je oblast planinskog masiva Tibesti, koji je najveći planinski lanac u Sahari. Na ovaj način se dobija i informacija o ukupnom sadržaju navedenih elemenata, što je provereno i drugim metodama (ICP-MS i XRF). Dobijeni rezultati daju doprinos boljem poznavanja metalogenije ovog dela Libije, kao i postavljanju osnove za mapu prirodne radioaktivnosti područja. Sastavni deo cilja je i to da se korišćenjem rezultata merenja radioaktivnosti, posebno za izotope  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , najpre odrede njihove koncentracije, a zatim uz upotrebu opšteprihvaćenih metoda, proceni odgovarajući radijacioni rizik po ljude. Morfološki, ova oblast pripada stenovitim pustinjama, sa nadmorskom visinom između 720 i 1120 m. Osnovna geomorfološka karakteristika terena je riolitna masa u centralnom delu oblasti, koja je probila granite i zahvata površinu od oko  $60 \text{ km}^2$ . Sa stanovišta nuklearnih mineralnih

sirovina, rioliti se uvek tretiraju kao stene od najvećeg značaja. Oblast se karakteriše pustinjskom klimom. Dugačka je 12 a široka 5 km. U njoj i njenoj široj okolini prečnika od oko 500 km nema naseljenih mesta.

Ovde postoji i praktičan značaj, koji se sastoji u efikasnijem projektovanju geoloških istraživanja ovog perspektivnog područja, posebno u pogledu uranijuma, kako zbog njegove važnosti kao potencijalne nuklearne energetske sirovine, tako i sa aspekta ekologije. Otkrivena su i područja s anomalnim sadržajima ovog elementa, što pruža mogućnost da se, na osnovu prostornog razmeštaja registrovanih anomalija radioaktivnosti, njihove strukturne pozicije, asocijacije elemenata i minerala, te morfogenetskih tipova rudnih tela, izvrši definisanje i izdvajanje rudnih tela.

Merenja radioaktivnosti su vršena putem gama-spektrometrije visoke rezolucije sa HPGe detektorom. S obzirom na cilj ove disertacije, to je veoma pogodna metoda, jer daje informaciju o gotovo svim prirodnim radionuklidima koji su ovde od interesa, u kvalitativnom i kvantitativnom smislu. To je jednostavna, brza, osetljiva i nedestruktivna metoda, koja zahteva mnogo manje vremena i jeftinija je od standardne hemijske analize, putem npr. spektrometrije masa. Prethodno, na terenu je vršen radiometrijski pregled mobilnim uređajima.

Radiometrijski pregled je ukazao na dve značajne uranijumske anomalije u riolotima, kao i na nekoliko manjih anomalija u granitima koji su u bliskom kontaktu sa riolitima. Rezultati ovih terenskih merenja su kasnije potvrđeni laboratorijskim merenjima. Jedna anomalija se nalazi u centralnom delu riolitske oblasti ( $23^{\circ}14' 23,2''$ ;  $19^{\circ}17' 04''$ ), uglavnom sastavljene od silifikovanih riolita. Druga je otkrivena u blizini kontaktne zone graniti-rioliti ( $23^{\circ}13'42''$ ;  $19^{\circ}16'05''$ ) i vezana je za markantnu rasednu zonu koja se karakteriše prisustvom silifikovanih breča. Ove anomalije se mogu smatrati mineralizacijama. Koncentracije uranijuma određene u ovim mineralizacijama su u opsegu 50-600 mg kg<sup>-1</sup>. Poslednja vrednost je oko 240 puta viša od prosečne vrednosti na Zemlji.

Torijum. Na istražnom području konstatovane su nešto povećane koncentracije torijuma (relativno niski sadržaji, od 30 do 72 mg kg<sup>-1</sup>) i to u granitoidima neposredno uz kontakt sa riolitima, zapadno od riolita. S obzirom na koncentracije, otkrivene mineralizacije ne zaslužuju posebnu pažnju.



Kalijum. Uočene su nešto povećani sadržaji ovog elementa u riolitским i granitoidnim stenama područja Džaba Egi, u odnosu na srednje koncentracija u Zemljinoj kori

Rezultati dobijeni merenjem radioaktivnosti uzoraka su iskorišćeni za izračunavanje sledećih parametara radijacionog rizika: *ukupne apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu na visini 1 m od tla* ( $D$ , nGy h<sup>-1</sup>), *radijumu ekvivalentne aktivnosti* ( $R_{eq}$ , Bq kg<sup>-1</sup>), *indeksa spoljašnjeg hazarda* ( $H_{ex}$ ) i *godišnje efektivne doze spoljašnjeg zračenja* ( $AED_{outdoor}$ , μSv), kao i *rizik od pojave kancera tokom života nakon 1 godine izloženosti* (LTCMR) za <sup>226</sup>Ra, za uzorke sa najvećom obilnošću. Dobijene vrednosti ovih faktora ukazuju na povišeni radijacioni rizik u odnosu na svetski prosek, posebno u centralnom delu ove oblasti, uglavnom zbog povišenih koncentracija <sup>226</sup>Ra, što je posledica uranijumskih anomalija koje su otkrivene u ovom regionu.

Svi dobijeni podaci ukazuju da se radi o vrlo perspektivnom i interesantnom području koje zaslužuje dalja detaljnija istraživanja, kako u cilju boljeg definisanja same mineralizacije, tako i geohemijskih i fizičko-hemijskih procesa koji su doveli do deponovanja uranijumske mineralizacije.

**Ključne reči:** radioaktivnost, Libija, Džabal Egi, gama-spektrometrija, uranijum, geologija, mineralizacija, radijacioni rizik

**Naučna oblast:** prirodno-matematička

**Uža naučna oblast:** fizička hemija - radiohemija

**UDK** 544.58

# **RADIOACTIVITY OF THE RHYOLITE-GRANITOIDE ROCKS IN THE JABAL Eghi AREA OF SOUTHERN LIBYA**

## **Abstract**

Investigation on the naturally occurring radionuclides (NORM) is of a great importance in many scientific areas, especially geology. The basis for such a research is generally the determination of radioactive elements of the natural radioactive series of uranium (the  $^{238}\text{U}$  and the  $^{235}\text{U}$  series) and thorium ( $^{232}\text{Th}$ ) in rocks, as well as the isotopes of potassium and rubidium, as the most abundant radioactive isotopes on Earth. Potassium is the most abundant among them in the Earth's crust (its Clarck's value is 2.5 %), while uranium and thorium appear as 'trace' elements with Clarck's values of 2.50 and 13 mg  $\text{kg}^{-1}$ , respectively.

The aim of the research was to determine the contents and distribution of the most important naturally occurring radionuclides—uranium isotopes  $^{238}\text{U}$  (and its long-lived daughter  $^{226}\text{Ra}$ ) and  $^{235}\text{U}$ , thorium isotope  $^{232}\text{Th}$  and potassium isotope  $^{40}\text{K}$ —in the rock samples of the rhyolite massive in Jabal Eghi - Kangara region, by using radioactivity measurements. This region is located in the far southern-east part of Libya, near the border with Chad. This area is a part of the Tibesti massive, the largest mountain chain in the Sahara. In this way the information on total contents of elements of interest was obtained. They were verified by some other analytical methods (ICP-MS and XRF). Obtained results contributed to better knowledge of the metalogenic history of this part of Libya and to establishing the baseline for natural radioactivity mapping of the region. One of the purposes of this work was also to use radioactivity measurements, especially those for  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  isotopes, to determine their concentrations, as well as to estimate potential radiation risk for exposed populations, by using standard methods.

In a morphological sense, investigated area belongs to rocky deserts at altitudes from 720 to 1120 meters. The main geomorphological feature of the terrain is a rhyolite mass in the central part of the area, breaking through the granites, with an area of 60  $\text{km}^2$  (12

km × 5 km). From the point of view of nuclear raw materials, rhyolites are generally considered as the rock minerals of greatest significance. The region has a desert climate, essentially without precipitation. There are no inhabited places within the 500 km radius from the investigated area.

There is also a practical interest which consists of efficient design and management of geological investigation of this promising region, especially in regard to uranium, because of its importance as the nuclear energy raw material, and also because of ecological aspect due to possible radiation risk. Some regions with anomaly contents of this element have been discovered (see below). On the basis of their spatial distribution and structural position, physicochemical associations of elements and minerals and morphogenic types of ore bodies, the definition and ore bodies segregation can be planned.

Following the preliminary dose rate measurements, radioactivity determinations were performed using high resolution gamma spectrometry with the HPGe detector; this method provides quantitative information on almost all natural radionuclides of interest. It is a simple, fast, low-cost, sensitive and non-destructive method, less time-consuming and much cheaper than many conventional chemical methods (e.g. mass spectrometry). Prior to laboratory measurements, a preliminary radioactivity survey of observed targets at the sites was performed using mobile devices.

The preliminary radioactivity survey has indicated two significant uranium anomalies in rhyolites, and several smaller ones in granites which are in close contact with rhyolites. These results are confirmed by the laboratory analysis. One of these anomalies is located in the central part of rhyolite area (23°14' 23.2"; 19°17' 04"), mostly consisting of silicified rhyolites. The other one is discovered next to the granite-rhyolite contact zone (23°13'42"; 19°16'05"). It is connected with a noticeable tectonic zone, and characterized by the presence of silicified breccia rocks. These anomalies may be considered as mineralizations. The uranium contents in these two mineralizations were in the 50–600 mg kg<sup>-1</sup> range, the latter value being 240 times greater than the average in Earth's crust.

Thorium. Slightly increased concentrations of thorium (30–72 mg kg<sup>-1</sup>) were found in the samples of granitoids which are in contact with rhyolites, located next to them on

their western part. Due to low concentrations, discovered thorium mineralizations were not of a great concern.

Potassium. Increased potassium contents relative to the average values in Earth's crust, was noticed in the rhyolite and granitoid rocks of the Jabal Eghi area.

The results obtained from radioactivity measurements of rock samples were used to calculate the following radiation risk parameters: *Total absorbed gamma dose in air at 1 m above the ground level* ( $D$ , nGy h<sup>-1</sup>), *Radium equivalent activity* (<sup>226</sup>Ra, Bq kg<sup>-1</sup>), *External hazard index* ( $H_{ex}$ ), and *Annual outdoor effective dose* (AED<sub>outdoor</sub>, μSv), as well as *Lifetime cancer morbidity risk - one year exposure* (LTCMR) for <sup>226</sup>Ra, for samples with the highest contents of the latter. Obtained values of these factors indicate the enhanced radiation risk compared to the world average, especially in the central area of the region, mostly due to the increased <sup>226</sup>Ra contents, as the consequence of discovered uranium anomalies.

The obtained data suggest that further research of this promising and interesting region should be performed, with the aim of producing detailed description of mineralizations, as well as geochemically and physicochemically characterizing the processes that led to the deposition of the uranium mineralization.

**Keywords:** radioactivity, Libya, Jabal Eghei, gamma-spectrometry, uranium, geology, mineralization, radiation risk

**Scientific field:** natural sciences

**Scientific discipline:** physical chemistry - radiochemistry

UDK 544.58

# 1

## UVOD

Fenomen radioaktivnosti je otkrio Anri Bekerel (Henri Becquerel) 1896. godine ispitujući luminescenciju uranijumovih jedinjenja. Reč radioaktivnost se prvi put pojavljuje u radovima Marije i Pjera Kiri krajem devetnaestog veka. Tada se javio interes za radioaktivne elemente i njihove primene. Taj interes u kontinuitetu se održao do današnjih dana.

Istraživanje radioaktivnih materijala koji se javljaju u prirodi (NORM - naturally occurring radioactive materials) je od velikog značaja za mnoge oblasti, a naročito za geologiju. Osnov tih istraživanja najčešće čini određivanje sadržaja prirodnih radioaktivnih izotopa uranijuma i torijuma (i potomaka njihovih radioaktivnih serija) u stenama, zatim izotopa kalijuma, rubidijuma itd, pošto njihovi prirodni radioaktivni izotopi spadaju u red najobilnijih radioizotopa na Zemlji. Svi ovi elementi su nastali sa nastankom Zemlje (primordijarni izotopi), a s obzirom na njihova veoma duga vremena poluraspada ( $t_{1/2}$ ) izvesne količine su se zadržale i do sadašnjeg doba. Podaci o glavnim primordijalnim izotopima su dati u tabeli 1.

**Tabela 1.** Neki dugoživi (primordijalni) radionuklidi u prirodi.

Nuklid	% u elem.	$t_{1/2}$ , god.	Tip raspada	$\epsilon$ , MeV	Proizvod	Akt. elem. Bq/g
$^{238}\text{U}$	$99,2739 \pm 0,0007$	$4,469\text{A}10^9$	$\alpha$	4,270	$\rightarrow \dots ^{206}\text{Pb}$	$1,235\text{A}10^4$
$^{235}\text{U}$	$0,7204 \pm 0,0007$	$7,038\text{A}10^8$	$\alpha$	4,679	$\rightarrow \dots ^{207}\text{Pb}$	576

$^{232}\text{Th}$	100	$1,405\text{A}10^{10}$	$\alpha$	4,083	$\rightarrow \dots^{208}\text{Pb}$	4060
$^{40}\text{K}$	0,0117	$1,277\text{A}10^9$	$\beta^-$ , 89,28%	1,311	$^{40}\text{Ca}$	27,1
			$\epsilon$ , 10,72 %	1,505	$^{40}\text{Ar}$	3,3
$^{87}\text{Rb}$	27,835	$4,75\text{A}10^{10}$	$\beta^-$	0,283	$^{87}\text{Sr}$	891
$^{147}\text{Sm}$	15	$1,06\text{A}10^{11}$	$\alpha$	2,310	$^{143}\text{Nd}$	127
$^{187}\text{Re}$	62,6	$4,35\text{A}10^{10}$	$\beta^-$	0,0026	$^{187}\text{Os}$	$1,02\text{A}10^3$

$\epsilon$  – energija zračenja

Uranijum je prva i do sada jedina sirovina koja je u novijoj istoriji u celom svetu istraživana na državnom nivou, što je posledica njegovog značaja kao strateške sirovine za proizvodnju energije, ali i u vojnoj industriji. Za razliku od uranijuma, torijum za sada nema takav praktični značaj. Uranijum se u prirodi javlja u obliku dvaju primordijalnih izotopa,  $^{235}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$ , navedenih u tabeli 1, i izotopa  $^{234}\text{U}$  (0,0055 %,  $\alpha$ -emiter,  $t_{1/2} = 246\ 000$  god.), koji je član radioaktivne serije  $^{238}\text{U}$ , dok je torijum monoizotopski element – javlja se samo kao izotop  $^{232}\text{Th}$ .

Mnoge okolnosti su doprinele ubrzanom razvoju tehnike i metodologije istraživanja uranijuma, pa je stepen istraženosti terena za relativno kratko vreme izrazito povećan. Uranijum je specifičan hemijski element ne samo zbog svoje radioaktivnosti, već i zbog načina istraživanja i specifičnog geohemijskog ponašanja.

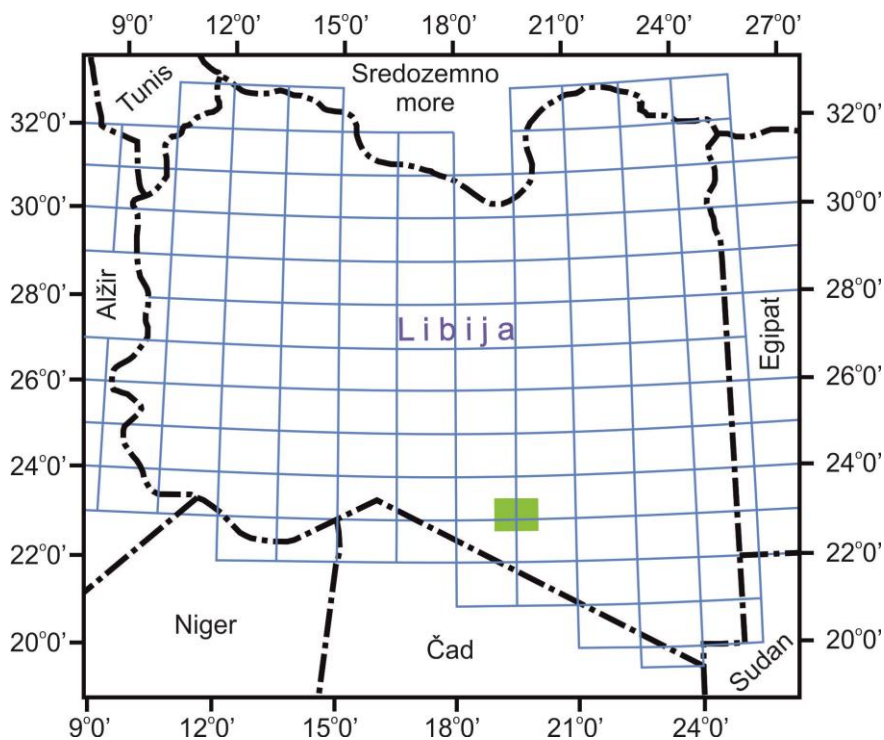
Prirodna radioaktivnost uglavnom zavisi od tri radioaktivne serije koje se javljaju u prirodi: *serija uranijuma*, čiji je rodonačelnik izotop uranijuma  $^{238}\text{U}$ , *serija torijuma*, čiji je rodonačelnik izotop  $^{232}\text{Th}$ , i *serija „aktinouranijuma“*, čiji je rodonačelnik izotop uranijuma  $^{235}\text{U}$ . Pošto je odnos  $^{235}\text{U}$  prema  $^{238}\text{U}$  manji od 1 % (tabela 1), to je njegov doprinos prirodnoj radioaktivnosti veoma mali [1],[2], pa u ovoj tezi nije uziman u obzir, mada je njegoa koncentracija u uzorcima određivana.

Po prirodnoj obilnosti prvi među ovim elementima je kalijum. Njegova zastupljenost u zemljinoj kori, tj. Klarkova vrednost (Clarke) je 2,5 %, dok se uranijum i torijum pojavljuju kao elementi u tragovima, sa Klarkovim vrednostima oko 2,50 odnosno 13  $\text{mg kg}^{-1}$  (ppm), redom [3].

U toku merenja obavljenih u okviru ove disertacije na velikom broju uzoraka prikupljenih prilikom geološkog kartiranja oblasti Džabal Egi (v. niže), zapažene su neobične anomalije uranijumske radioaktivnosti, zbog čega su istraživanja proširena i na nekoliko drugih elemenata, kao i na opise prepoznatih tipova stena i odgovarajućih geoloških aspekata vezanih za ovu oblast. To je uključilo i izradu geološke karte.

## 1.1 Cilj istraživanja

Cilj istraživanja koja su opisana u ovoj disertaciji je da se merenjem radioaktivnosti utvrde koncentracije najvažnijih materijala NORM-a, a to znači uranijumovog izotopa  $^{238}\text{U}$  i njegovog najvažnijeg dugoživućeg potomka  $^{226}\text{Ra}$ , kao i  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , u uzorcima stena koji su prikupljeni u području riolitskog masiva Džabal Egi (Jabal Eghi) – Kangara na dalekom jugoistoku Libije, blizu granice sa Čadom. Ta oblast pripada listovima NF 34-1 i NF 34-5 geoloških karata 1:250.000, a njen položaj na mapi Libije prikazuje slika 1.



**Slika 1.** Mapa Libije sa podelom na listove 1:250 000 i prikazom položaja područja Džabal Egi.

Deo je planinskog masiva Tibesti, koji je najveći planinski lanac u Sahari. Na ovaj način se dobija i informacija o ukupnom sadržaju navedenih elemenata, što je provereno i drugim metodama. Dobijeni rezultati daju doprinos boljem poznavanja geološke građe i metalogenije ovog dela Libije, kao i postavljanju osnove za mapu prirodne radioaktivnosti područja. Pored merenja radioaktivnosti stena, a radi dodatne provere, boljeg razumevanja i tumačenja u smislu sadržaja nekih elemenata u njima, u određenim slučajevima su vršena merenja i drugim metodama. Tako, svi uzorci su analizirani i metodom *induktivno spregnute plazme u masenoj spektrometriji* (ICP-MS – Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry), dok je deo njih analiziran i metodom *rendgenske fluorescencije* (XRF – X-ray Fluorescence).

Sastavni deo cilja je i to da se korišćenjem rezultata merenja radioaktivnosti, posebno za izotope  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , najpre odrede njihove koncentracije, a zatim uz upotrebu opšteprihvaćenih metoda, proceni odgovarajući radijacioni rizik po ljude, odnosno životnu sredinu.

Takođe, postoji i praktičan geoekonomski značaj, a on se sastoji u efikasnijem projektovanju narednih geoloških istraživanja ovog perspektivnog područja. Posebna pažnja je posvećena uranijumu, kako zbog njegove važnosti kao potencijalne nuklearne energetske sirovine, tako i sa aspekta ekologije.

U celini posmatrano, prvi put su na istraživanom prostoru otkrivena područja s anomalnim sadržajima ovog elementa, što u principu pruža mogućnost da se, na osnovu prostornog razmeštaja registrovanih anomalija radioaktivnosti, njihove strukturne pozicije, asocijacije elemenata i minerala, te izučavanjima prisutnih morfogenetskih tipova rudnih tela, izvrši definisanje otkrivenih uranijumskih mineralizacija.



## 2 OPŠTI DEO

### 2.1 Istorijat istraživanja oblasti Džabal Egi

Geološka istraživanja masiva Tibesti i njegove okoline su išla sporije nego istraživanja nekih drugih oblasti u Libiji, zbog velike udaljenosti od naselja i nepristupačnosti terena. Prva istraživanja je započeo Nachtigal još u 19. veku. Svoja zapažanja je objavio u trotomnoj monografiji 1896. godine. Nakon toga skoro pola veka se ništa nije dešavalo na polju geoloških istraživanja. Između 1915. i 1930. godine francuski i italijanski vojni eksperti su napravili prve, vrlo grube topografske karte Tibestija. Značajni su naponi Komandanta Tilha iz 1920. godine na geodetskim radovima. On je prvi koji je uzeo uzorke sa ovog područja radi laboratorijske analize. Kapetan Rottier je takođe uzorkovao stene koje su kasnije analizirane. Sve ovo se odnosi na oblast koja je mnogo šira od Džabal Egija, a predstvalja uvod u ozbiljnija istraživanja koja će doći kasnije.

Kasnije dolazi period francuskih istraživača, Dalloni [4], Lacroix [5] i Choubersky [6], iza kojih su ostale publikacije o geološkoj građi i stenama, kao i Delloni-jeva monografija Tibestija. Pre II Svetskog rata, 1936. i 1940. godine, italijanski geolog i kartograf Desio [7,8] je istražio i najveći deo oblasti Džabal Egi, skupljao uzorke i davao ih na analizu. O tome je napisao vrlo obiman rad 1942.

U vreme posle II Svetskog rata, između 1944. i 1956. godine, koje se može smatrati za II period istraživanja, francuski geolozi su opet istraživali područje Tibestija, sa severa i sa juga, i to dva njihova instituta: *Institut des recherches Sahariennes* (Alžir) i *Institut equatorial de recherches geologiques et minières* (Brazavil). Objavljene su mnoge karte, saopštenja, brošure o terenu, a posebno o vulkanitima, kristalnim škriljcima i granitima, što je imalo značaja za unapređivanje daljih geoloških istraživanja.

Treći period geoloških istraživanja, u okviru kojeg je istraživan severoistočni deo Tibestija, je trajao od 1955. do 1970. godine. Učestvovalo je više kompanija. Posebno su značajna istraživanja nemačkih i francuskih eksperata Hecht-a [9] Klitsch-a [10,11], Ergenzinger-a [12], Hagedorn-a [13-16] i drugih. Godine 1968. su započeta istraživanja Tibestija putem daljinske detekcije (analiza satelitskih i avio snimaka), što je omogućilo znatno lakše prepoznavanje geoloških karakteristika terena. Iz toga su proizašle dve tekstualne i jedna kartografska sinteza geologije Libije, a publikovan je i prvi Stratografski leksikon Libije (Burollet). U njemu su predstavljene sve poznate geološke formacije Libije, a njihova raspodela je predstavljena na shematskoj geološkoj karti 1:5,000,000.

Poslednji, četvrti period geoloških istraživanja Tibestija počinje osnivanjem IRC (Industrial Research Center, Tripoli) 1970. godine. Njegov geološko-rudarski departman, kao zvanična institucija za geološka i rudarska istraživanja, je imala kao zadatak i pravljenje geoloskih karata u razmeri 1:250.000. Geomorfološka, fotogeološka, vulkanološka i stratografska istraživanja su nastavljena kao i ranije. Objavljena je jedna sintetička publikacija o sirovinama (Goudarzi 1970, [17]).

Što se tiče istraživanja oblasti Tibesti, zanimljivo je da su dve magistarske teze urađene u SAD (Univerzitet Severne Karoline) na temu granita: El Makhrouf je proučavao oblast Džabal Egi, a Suayah Wādi Džebigve pluton. Ovi autori su nastavili da publikuju svoje radove sve do kasnih osamdesetih [18-21]. El Makhrouf je 1990. godine odbranio i doktorsku disertaciju na istom univerzitetu [22], koja se odnosila na različite aspekte geologije oblasti Tibesti. Bilo je i drugih istraživanja, ali se ona nisu odnosila na Džabal Egi.

IRC iz Tripolija je, u okviru tehničke saradnje sa Geološkim institutom Srbije iz Beograda, sve do nedavno sprovodio sistematska istraživanja, kako drugih rejona

masiva Tibesti, tako i oblasti Džabal Egi, koja su za ovu tezu od najvećeg interesa. Ovo predstavlja veoma važan korak u detaljnom geološkom istraživanju mineralnih sirovina u okviru prostranog severnog amfiteatra Masiva Tibesti [23].

U celini posmatrano prostor predviđen za prospekcijska istraživanja je slabo istražen.

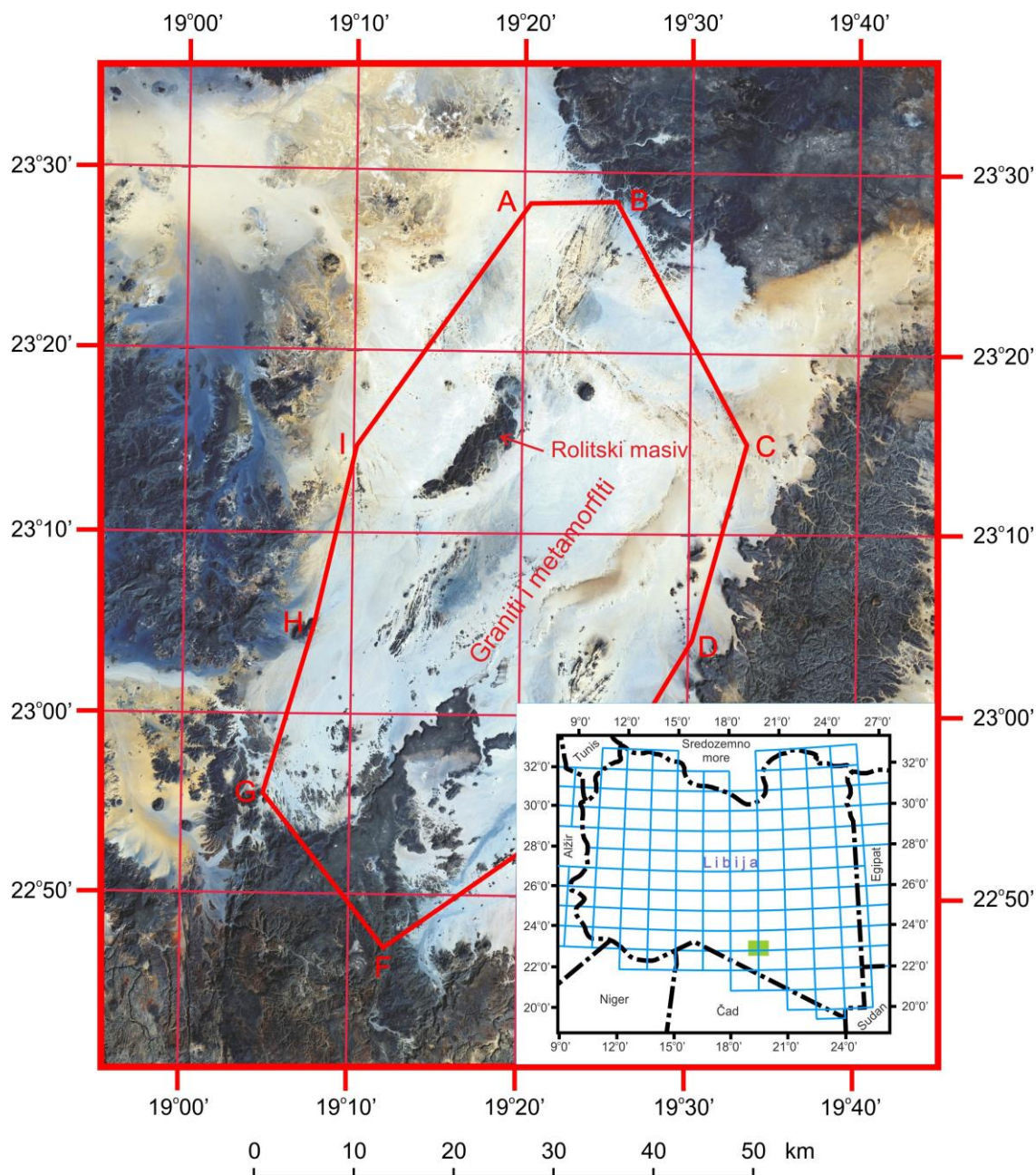
U pogledu mineralnih sirovina, istraživanja su se prvenstveno odnosila na nuklearne i metalske (metalične) mineralne sirovine. U tu svrhu još 1974. godine nekoliko kompanija (Hunting Geology and Geophysics Limited, Elstree Way, Boreham Wood, Herst) vršilo je istraživanja, a primenjena su spektrometrijska merenja, litogeochemijsko oprobavanje i laboratorijska ispitivanja prikupljenih uzoraka. Tom prilikom na velikom prostoru izdvojeno je osam lokaliteta gde su registrovani anomalni sadržaji uranijuma, torijuma i pratećih elemenata.

U okviru izrade geološke karte 1:250 000 (Geološki institut Srbije) pored ostalih, rađen je manji obim prospekcijskih istraživanja i tom prilikom na više mesta su konstantovani anomalni sadržaji bakra, zlata, srebra, molibdena i drugih metala. Na centralnom delu riolita registrovana je anomalija uranijuma [24,25].

## **2.2 Geografski položaj i osnovne geomorfološke karakteristike područja Džabal Egi**

Oblast koja je ispitivana je riolitni masiv Kangara, Džabal Egi, koja je jugoistočni deo planiskog masiva Tibesti. Ona se nalazi na krajnjem jugu središnjeg dela Libije. Oblast je prikazana u delu NF 34-1 i NF 34-5 na geološkim kartama 1:250.000. Satelitski snimak sa položajem ispitivane oblasti je prikazana na slici 2.

Morfološki, ova oblast pripada stenovitim pustinjama, sa nadmorskom visinom između 720 i 1120 m. Osnovna geomorfološka karakteristika terena je markantna visoravan izgrađena od riolitskih stena u centralnom delu ispitivane oblasti, koju čine graniti i



**Slika 2.** Satelitski snimak i mapa Libije sa prikazom položaja ispitivane oblasti (masiv Kangara, Džabal Egi) obojenim zeleno: (A) – E/19°20'30", N/23°28'09"; (B) - E/19°25'24", N/23°28'21"; (C) - E/19°33'01", N/23°14'58"; (D) - E/19°30'22", N/23°04'08"; (E) - E/19°24'35", N/22°54'51"; (F) - E/19°11'53", N/22°46'47"; (G) - E/19°04'49", N/22°56'09"; (H) - E/19°07'43", N/23°05'06"; (I) - E/19°10'17", N/23°14'44".

metamorfiti. Oblast granitoidnih stena je gotovo sravnjena usled eolske erozije i morfološki je niža od riolita. Međutim, tu se izdižu veliki grebeni sastavljeni od kvarcita, gnajsa ili skarna. Oblast se karakteriše pustinjском klimom, gotovo bez

ikakvih padavina. U ovoj oblasti i njenoj široj okolini prečnika od oko 500 km nema naseljenih mesta. Područje sa riolitima je dugačko je 12 a široko 5 km.

## **2.3 Osnovne geološke karakteristike područja Džabal Egi**

Istraživano područje se karakteriše izrazito složenom geološkom građom. Raznovrsni odnosi između litološki različitih jedinica, unutar kojih je karakteristična složena tektonska struktura, zapaženi su na terenu izgrađenom od prekambrijskih metamornih i vulkanskih stena. Geološka građa sedimenata i stratifikovanih bazalta, koji zajedno čine platformni pokrivač, relativno je jednostavna.

Stene podine predstavljaju delove „Pan-Afričke“ podine izgrađene od proterozojskih metamorfita i granitoidnih stena.

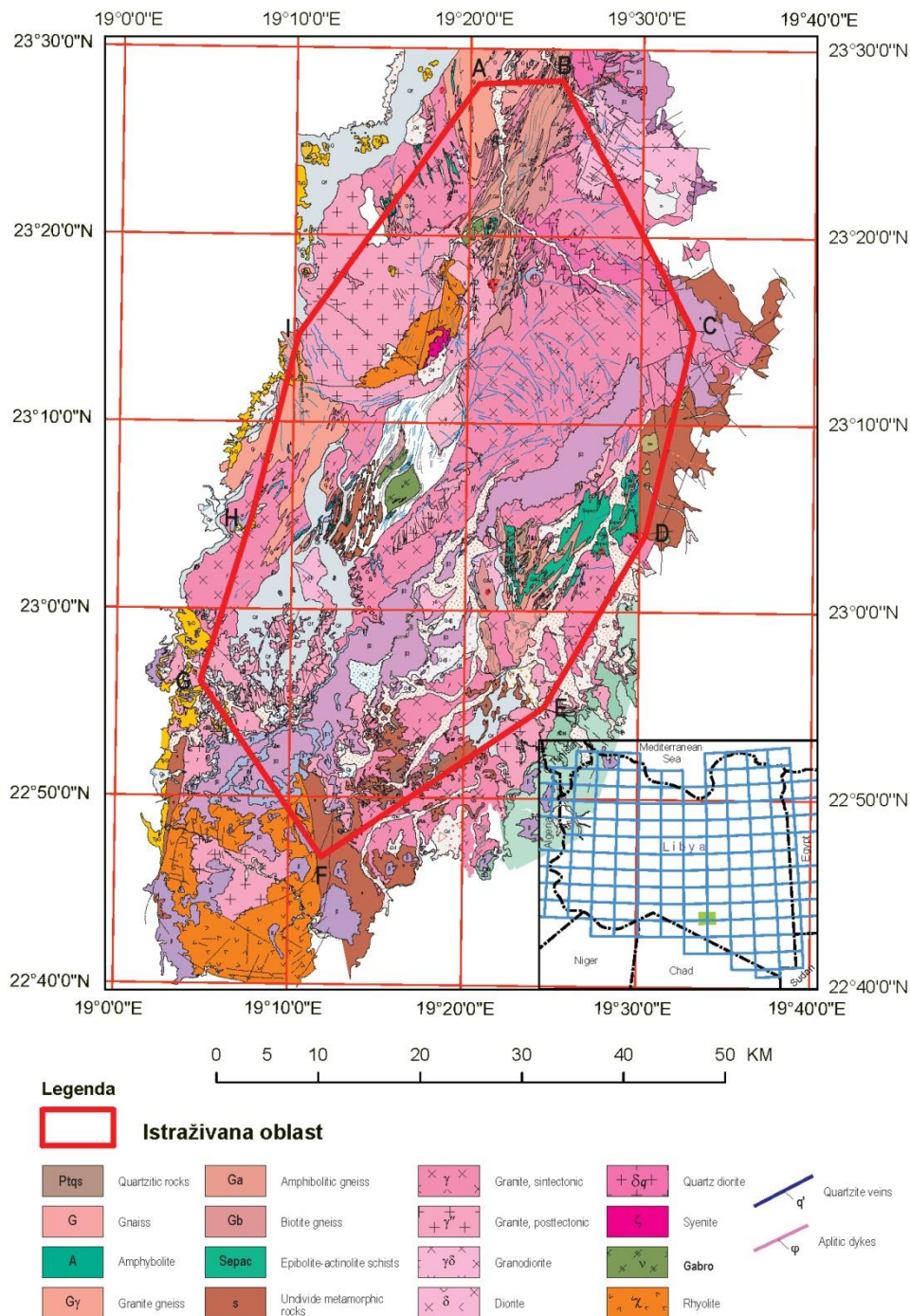
Stene podine granitskog tipa dominiraju, dok metamorfne stene imaju mnogo manje prostiranje na površini. Metamorfni kompleks je sastavljen od različitih tipova regionalno metamorfisanih stena, uglavnom u uslovima facija almandin-amfibolita i amfibolita i, u manjem obimu, u uslovima facije zelenih škriljaca. Kontaktne metamorfne stene, metamorfisane pod uslovima facije kornfela, pojavljuju se u zonama kontakata između granita i okolnih metamornih stena. Metamorfiti su predstavljeni sledećim stenama: amfiboliti, gnajsevi (dvoliskunski gnajsevi, biotit-gnajsevi, muskovit gnajsevi, amfibol gnajs, amfibolit-muskovit gnajs, gnajs-granit i amfibolski škriljci). Skarnovi i škriljci su registrovani u kontaktnim zonama.

Magmatske stene u podini Tibestija formiraju dva asemblaža. Stariji, tektonski kretani, sastavljen je od granita, granodiorita, kvarc-diorita, diorita, gabra i pratećih žičnih stena: mikro-granita, aplita i kvarcita. Mlađa, atektonska grupa magmatskih stena je predstavljena biotit-granitom, sijenitom, riolitom sa riolitskim piroklastitom kao i rezultatima post-magmatske fluidne evolucije: aplitom, pegmatitom i kvarcitom. Starost tektonski mobilisanih magmatskih stena se kreće od 687 do 629 miliona godina, dok se starost post-tektonskih vulkanskih stena kreće od 611 do 604 miliona godina.

Kao što je već rečeno, osnovna geološka građa Džabal Egija je izuzetno složena. Ovde će biti prikazane osnovne karakteristike stena koje izgrađuju ove terene.

Još u toku terenskih ispitivanja, kao osnovne, najstarije stene (stene bejzmenta), izdvojene su sledeće: amfiboliti, metavulkaniti, mikašisti, filiti, mermeri, grafitični škriljci, kvarc-serit-hloritski škriljci, kvarc-biotit-granat-staurolit-muskovitski škriljci, hornblenda-plagioklas-epidotski škriljci, kvarciti, gnajsevi, serpentiniti i druge metamorfne stene. Ove stene se javljaju kao izdužena sočiva u granitoidima koji zahvataju najveću površinu na istražnom području. Preko granitoida, u vidu izliva u centralnom delu nalazi se riolit. Detaljniji opis najvažnijih stena ovog područja dat je niže. Geološka karta područja sa položajem litoloških članova [24,25], data je na slici 3.

POLOŽAJ ISTRAŽIVANE OBLASTI - 1:500.000

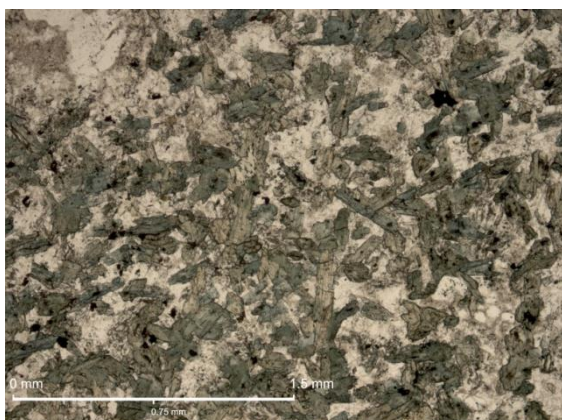


Slika 3. Geološka karta oblasti Džabal Egi i mapa Libije (istraživana oblast obojena zeleno).

Identifikovane mineralne asocijacije predstavljaju metamorfizam stena Donjeg Tibestija kao regionalni metamorfizam u intervalu od gornjih zelenih škriljaca do donjih amfibolskih facija. Kontaktne alteracije u zonama kontakta granitoida i metamorfita čine geološku građu istraživanog područja još komplikovanim (škriljci sa asocijacijama volastonit-kalcit-diopsid i slične stene). U toku sintektonske intruzije magmatskih stena, došlo je do delimičnog mešanja metamorfita i granitoida, što je imalo za posledicu formiranje delova osnovne stene u kojima se metamorfne stene ne mogu razlikovati od intruzivnih.

**Kvarciti.** Kvarciti se u ispitivanom području javljaju na dva načina, kao metamorfisani sedimenti ili kao silifikovane stene – parakvarciti, koje su deformisane zajedno sa drugim metamorfnim stenama ili se pojavljuju kao sekundarne diferencijacije završne faze magmatske aktivacije – ortokvarciti.

**Amfiboliti.** Preliminarna posmatranja na terenu pokazala su čestu pojavu amfibolita u istraživanoj oblasti. Glavna zona njihove raspodele je istočni deo oblasti, sastavljen od metamorfnih stena, gde se amfiboliti javljaju u linearno orijentisanim formama debelim po nekoliko stotina metara. Na slici 4 prikazan je mikroskopski izgled teksture amfibolita.



**Slika 4.**

Nematoblastične teksture sa granoblastičnim i porfiro-blastičnim elementima u amfibiolitu pod PPL<sup>1</sup>.

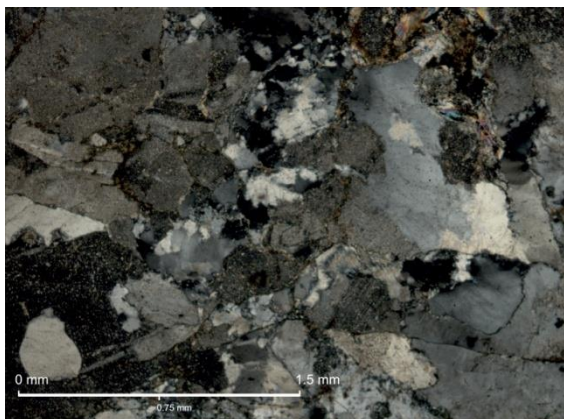
**Gnajsevi.** Gnajsevi su uobičajeni za područje Džabal Egija. Najčešće se pojavljuju u okviru zone mešanja granita i metamorfnih stena, što ove stene svrstava u gnajs-granite. Na osnovu terenskih osmatranja i laboratorijskih ispitivanja može se zaključiti da su to

---

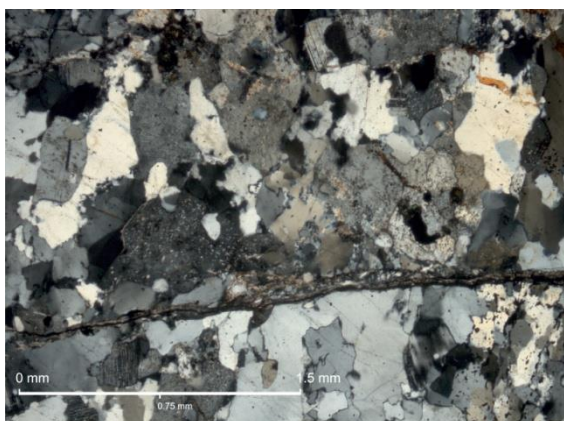
<sup>1</sup> Paralelna polarizovana svetlost



orto-metamorfiti koji su nastali alteracijom sintektonskih škriljavih granita i granodiorita. Na slikama 5 i 6 date su fotografije koje prikazuju karakterističnu strukturu metagranita – gnajseva.



**Slika 5.**  
Kataklazirana struktura metagranita u XPL<sup>2</sup>.

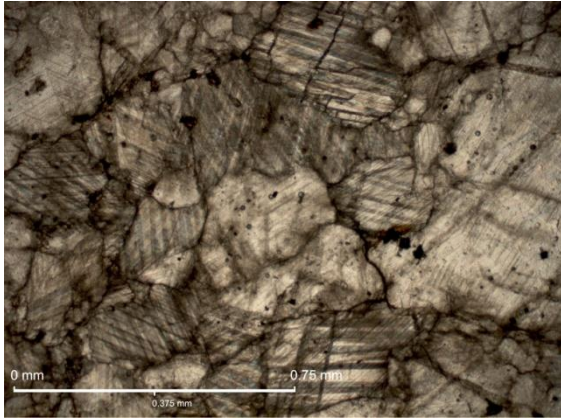


**Slika 6.**  
Detalj u tektoniziranom metagranitu pod XPL; stena je uglavnom zadržala primarne karakteristike granita.

**Mermeri.** Mermeri su pronađeni kao relativno male pojave u svim delovima metamorfnog kompleksa. Najčešće se pojavljuju u jugozapadnim delovima metamorfnog kompleksa, zatim na krajnjem istoku, dok pojave nađene severno do plutonita Kangare imaju manje debljine [20]. Mermeri obično formiraju sočiva u gnajsevima kao i duž oboda većih amfibolitskih tela, dok su manje pojave metamorfisanih klastičnih krečnjačkih stena otkrivene unutar pre-tektonskih granita. Slika 7 prikazuje strukturu mermera.

---

<sup>2</sup> XPL – ukrštena polarizovana svetlost.



**Slika 7.**  
Mermeri u PPL.

### **Magmatske stene u oblasti Džabal Egi**

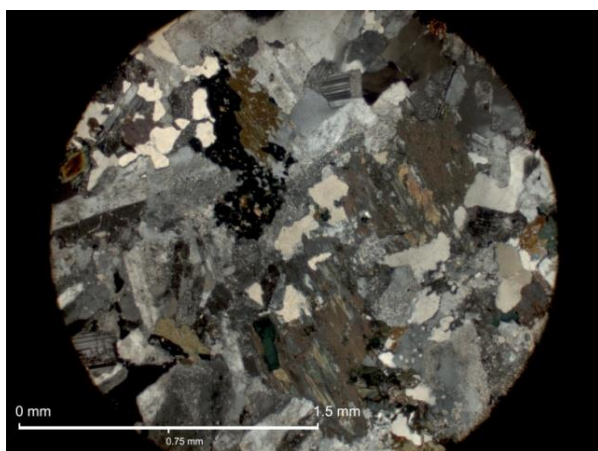
Sintektonski magmatiti su predstavljeni relativno velikim intruzijama. Glavna karakteristika ovih intruzija je konkordantan odnos između unutrašnjih struktura u magmatima i struktura okolnih metamorfita. Ovo su intruzije koje su nastale u istom periodu sa tektonskim formiranjem, koje je rezultiralo dobro razvijenim unutrašnjim tektonskim strukturama u magmatima.

**Graniti.** Graniti su najčešća vrsta magmatskih stena u bejzmentu. Ove stene čine diskontinualnu zonu u pravcu Sever-Severoistok | Jug-Jugozapad. Graniti zahvataju najveću površinu u istraživanom području. U velikim granitnim telima se odražava sintektonski karakter magmatita kroz dobro razvijene sekundarne pukotine duž kojih je došlo do smicanja. Ove rupture su ešeloni složeni u ravni. Makroskopski, to su leukokratni srednjezrne do grubozrne stene izgrađene od ortoklasa, albita, kvarca i biotita. Česte i značajne promene u mineraloškoj građi, pre svega u perifernim delovima velikih intruzija, uzrok su promena tipa stena, pa su često zapaženi prelazi prema granodioritima i dioritima.

Sadržaj uranijuma u magmatskim stenama nije stalan. Predstavlja posledicu različitih procesa: njegove migracije u procesu diferencijacije magme, zatim koncentracije  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  i drugih komponenti u magmi, uslova koji su doveli do obrazovanja magmatskih kompleksa (granitizacija, anateksis, palingeneza, frakciona kristalizacija) i drugi faktori. Graniti u proseku sadrže 4,5 ppm uranijuma. Alkalni

graniti sadrže 6,0 ppm, plagiograniti 2,7 ppm, kvarcdioriti 2,1 ppm, dioriti 1,8 ppm, daciti 2,5 ppm, rioliti 4,7, gabro-dijabazi 0,6 ppm, peridotiti 0,03 ppm uranijuma [26].

**Sintektonski dioriti.** Sintektonski dioriti su zapaženi i kartirani kao pojava u jugoistočnom delu istraživanog područja. Dioriti su utisnuti u metamorfisane škriljce. Spoljne granice su konkordantne. Kvarcdioritne stene imaju značajnu rasprostranjenost. Sve pojave ovih stena su locirane u severnom delu metamorfnog kompleksa, gde se nalaze dve velike kvarcdioritne intruzije i brojne manje mase inkorporirane u metamorfni kompleks. Mikrofotografija ovih stena je data na slici 8.



**Slika 8.**  
Detalj kvarcdiorita pod XPL, vidi se hidromorfna granularna tekstura

**Rioliti.** S obzirom na problematiku koju tretira ova doktorska disertacija, rioliti imaju poseban značaj. Velike pojave riolita su bile zapažene na istraživanom području. Rioliti leže preko podinskih metamorfnih i vulkanskih stena. Kao stene otporne na eroziju, oni čine morfološki izdignute forme u reljefu. Posle terenskih istraživanja i kasnijih laboratorijskih ispitivanja, moglo se zaključiti da postoje dve kategorije riolitskih stena. Jedna grupa je tektonizirana i sastavni je deo metamorfne podine. Ove stene su prisutne u grupi metamorfnih stena i u metagrauvakama i feldspatoidnim metapeščarima. Druga grupa riolita je post-tektonskog karaktera i u vezi je sa post-tektonskim granitima i sijenitima.

Rioliti su otkriveni u obliku polumeseca duž istočnog oboda granitoida Kangara. Oni morfolološki dominiraju u centralnom delu metamorfne podine. Rioliti su izliveni preko post-kinematskih granita i sijenita, a na njihovom severnom i južnom obodu rioliti pokrivaju pre-kinematske granodiorite. Ova granodioritska tela se smatraju velikim

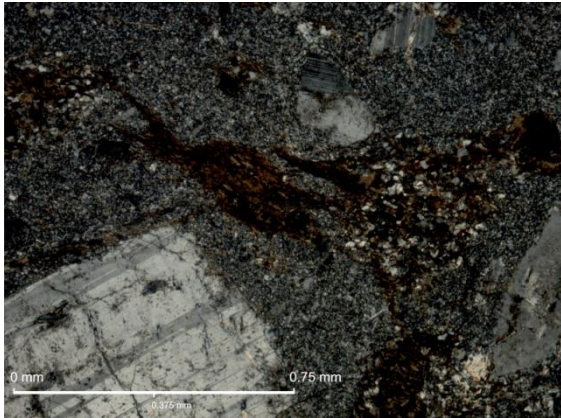
inkluzijama pre-tektonskih granitoida u okviru apikalnih delova post-kinematskih granita. Lokalno, pronađeni su intruzivni kontakti između riolita i granita. U podinskim stenama riolita ima manjih pojava transgresivno položenih konglomerata Mourizidie formacije. U domenu Kangara granita registrovani su retki dajkovi riolita.

Petrološki, ove stene odgovaraju riolitima – granit-porfiritima. One imaju ružičastu, crvenkastu i crveno-braon boju sa vidljivim fenokristalima. Fenokristali su predominantno predstavljeni kalijum-feldspatima i kvarcom koji su sjedinjeni u matriksu sastavljenom od mikrokristalinskih agregata iste faze. Stene su dosta sveže ali crvena boja zbog oksidacije je opšte prisutna. Makroskopsku fotografiju jedne takve stene prikazuje slika 9.



**Slika 9.** Makroskopska fotografija jedne tipične riolitske stene, sa tragovima tečenja.

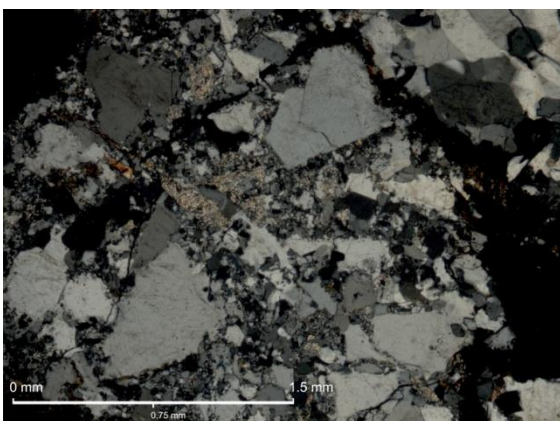
Plagioklas fenokristali dominantno se pojavljuju u riodacitskim varijetetima. Biotit je retko svež ali intenzivno do potpuno transformisan u fino-zrne agregate oksida gvožđa, što je prikazano na slici 10.



**Slika 10.**

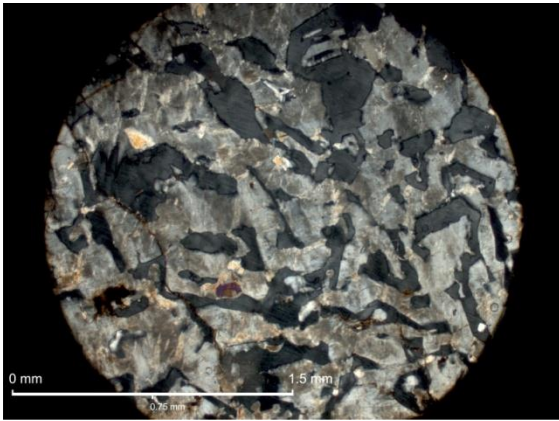
Rioliti - fotografija u XPL; detalji pokazuju delimično alterisanu ivicu fenokristala feldspata.

**Žični magmatiti.** U istražnom prostoru, registrovan je veliki broj litološki različitih žičnih intruziva u zonama izgrađenim od granita, granodiorita, diorita, gabra i riolita, kao i u zonama kontakta između ovih magmatita i okolnih metamorfita. Ovi intruzivi su detaljno izučeni u toku kartiranja. To su žična tela, genetski vezana za granitoidni magmatizam. Najverovatnije je da su žična tela nastala tokom nekoliko odvojenih ekstenzivnih faza. Prema terenskim podacima, kao i na osnovu dostupne literature na području Džabal Egi, možemo očekivati pojave brojnih litološki različitih žičnih intruzija: kvarcita, aplita, pegmatita, mikrogranita, diorita, kvarc-porfirita, feldspat-porfirita, trahita, diorita, lamprofira. Slike 11, 12 i 13 prikazuju strukture pojedinih žičnih stena.

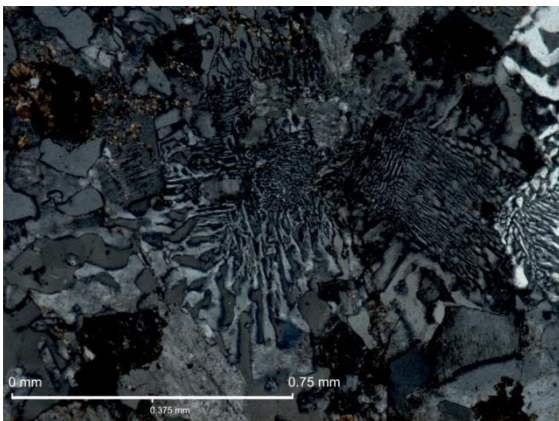


**Slika 11.**

Kataklastična struktura kvarcne žice u XPL.



**Slika 12.**  
Pegmatit u XPL.



**Slika 13.**  
Detalj mikrogranita u XPL; unutrašnji rast K-feldspata i kvarca.

Postoji jasna razlika u stepenu metamorfizma stena koje izgrađuju područje Džabal Egi. Prethodne su metamorfisane u uslovima facije zelenih škriljaca do epidot-almandin amfibolske, a kasnije je taj proces nastavljen. Prisustvo metavulkanoklastičnih stena je tipična karakteristika istraživanog područja. ‘Sintektonski’ dajkovi riolita su mnogo više rasprostranjeni, ali nisu isključivo vezani za serije metamorfnih stena, već i za granite i strukture vezane za njih. Postoji dovoljno dokaza da su, uz preovlađujući regionalni metamorfizam, zastupljene kontaktno-metamorfne pojave vezane za postojeće granitoidne intruzije. One su evidentne iz prisustva kornitskih i skarnovskih stena koje su posebno prisutne duž injekcionih zona.

## 2.4 Sadržaji elemenata i načini njihovog utvrđivanja

Osnovna metoda koja je korišćena za određivanje sadržaja prirodnih radioaktivnih izotopa, kao i odgovarajućih elemenata u svim ispitivanim uzorcima je metoda gama-spektrometrije visoke rezolucije. Takođe, svi uzorci su dodatno provereni i metodom ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry - *Induktivno spregnuta plazma u masenoj spektrometriji*), a manji broj njih i metodom XRF (X-Ray Fluorescence – *Fluorescencija X-zraka*).

Gama-spektrometrija je, s obzirom na cilj ove disertacije, odabrana kao veoma pogodna metoda, jer daje informaciju o gotovo svim prirodnim radionuklidima koji su ovde od interesa, u kvalitativnom i kvantitativnom smislu. Osim toga, to je veoma jednostavna, brza, osetljiva i pritom nedestruktivna metoda, koja zahteva mnogo manje vremena i jeftinija je od standardne hemijske analize, putem npr. spektrometrije masa ili drugih tehnika.

Najvažniji mehanizmi interakcije gama zračenja sa sredinom su: fotoelektrični efekat, Komptonov efekat i stvaranje parova. Za detekciju je poželjan fotoelektrični efekat jer se pri njemu sva energija gama-zračenja apsorbuje u jednom događaju.

Gama-spektrometrijski sistemi se biraju tako da imaju dobre karakteristike, kao što su rezolucija i efikasnost detektora. Širina linija u spektru je određena rezolucijom detektora. Visoka rezolucija omogućava da se razdvoje bliske linije. Gama spektrometrijski sistemi se dizajniraju tako da proizvode simetrične maksimume sa dobrom rezolucijom. Za izražavanje rezolucije detektora najčešće se koristi “širina na poluisini” (Full Width at Half Maximum - FWHM). Rezolucija se uvek daje za određenu gama-energiju i može se izraziti u apsolutnim (eV ili MeV) ili relativnim jedinicama.

Verovatnoća da će jedan emitovani gama-zrak interagovati sa detektorom i proizvesti odbroj je efikasnost detektora. Detektori visoke efikasnosti daju spektar za kraće vreme. Uopšteno, veći detektori imaju višu efikasnost nego mali, mada ovde i materijal zaštite detektora igra izvesnu ulogu. Efikasnost detektora se meri poređenjem spektra izvora poznate aktivnosti za izmereni odbroj na svakoj energiji sa očekivanim odbrojem na istoj energiji. Detektori HPGe uglavnom imaju veću osetljivost [27].

ICP-MS - *induktivno spregnuta plazma u masenoj spektrometriji* je u stvari vrsta spektrometrije masa kod koje se jonizacija materijala koji se analizira ostvaruje u induktivno spregnutoj plazmi, a onda se dobijeni joni uvode u spektrometar masa, razdvajaju i analiziraju na uobičajen način [28]. Veoma je osetljiva (reda ppt), precizna i relativno brza tehnika, pogodna uglavnom za analizu metala, ali i manjeg broja nemetala.

XRF je metoda hemijske i elementne analize, koja se zasniva na emisiji karakterističnog X-zračenja iz atoma ozračenih X-zračenjem veće energije ili gama-zračenjem. Ovo potonje u stvari izbija elektron iz elektronskog omotača atoma, a reemisija (fluorescencija) je posledica popunjavanja tog upražnjenog mesta od strane nekog drugog elektrona. Slično gornjoj metodi, i ova metoda je najpogodnija za analizu sadržaja metala u različitim vrstama uzoraka (minerali, staklo, forenzički materijali itd.).

## **2.5 Procena radijacionog rizika – opšte postavke**

Prirodna radioaktivnost uglavnom zavisi od vrsta stena, tako da se visoki nivoi obično povezuju sa vulkanskim stenama, najčešće granitima, zahvaljujući geohemijskom ponašanju elemenata koji pretežno doprinose ovoj radioaktivnosti. U toku magmatskih procesa topljenja i/ili frakcione kristalizacije, oni se koncentrišu u tačnoj fazi i postaju ugrađeni u odgovarajuće produkte očvršćavanja.

Iako mnogi prirodni elementi imaju radioaktivne izotope, od najvećeg značaja za radijacioni rizik su izotopi  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ . Prvi od navedenih je produkt raspada niza  $^{238}\text{U}$  (često nazivanog radijumov niz) i sa svoja dva potomka  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  je glavni izvor gama-zračenja, jer njegov doprinos čini 98 % doze koja potiče od gama-zračenja svih članova ovog niza. U isto vreme, doprinos  $^{235}\text{U}$  i njegove serije je zanemarljiv s obzirom na njegov mali udeo u prirodnom uranijumu, tabela 1.

Izotop  $^{232}\text{Th}$  je rodonačelnik sopstvenog niza i sa nekoliko svojih potomaka predstavlja značajan izvor gama zračenja. Izotop  $^{40}\text{K}$  je prisutan u prirodnom kalijumu sa 0,0117 %, a zastupljenost elementa kalijuma u Zemljinoj kori je veoma visoka i iznosi 2 do 2,5 %.



Iako i uranijum i torijum imaju mnogo manju obilnost u Zemljinoj kori od kalijuma, i to 2-3 mg kg<sup>-1</sup> U i 8-12 mg kg<sup>-1</sup> Th, njihov doprinos zračenju iz zemljišta, naročito preko svojih potomaka, uporediv je sa doprinosom kalijuma, jer se u prirodi ovi elementi javljaju isključivo kao radioaktivni izotopi.

U tom kontekstu, doprinos proizvedenih izotopa, kao što su <sup>137</sup>Cs i <sup>90</sup>Sr, takođe se može uzeti u obzir ukoliko su njihove koncentracije u nekoj oblasti dovoljno visoke. Radioaktivne osobine svih izotopa od interesa mogu se naći u odgovarajućim priručnicima [29] i u bazama podataka na Internetu.

Mada je istraživani region nenaseljen i teško dostupan, procena radijacionog rizika po ljude i čovekovu okolinu bi i ovde mogla biti od značaja za eventualne buduće aktivnosti u ovom region, zbog otkrivenih uranijumskih anomalija koje se mogu tretirati kao mineralizacije. Zato je odgovarajuća procena i urađena, a njeni rezultati su dati u poglavlju 4.4.

# 3

## METODE I MATERIJALI

### 3.1 Prikupljanje i priprema uzoraka

Za merenja predviđena u ovoj disertaciji prikupljeno je u drugoj polovini 2010. godine ukupno 110 uzoraka osnovnih stena sa različitih lokacija u oblasti riolitskog masiva Kangara u Džabal Egiju. Uzorke su prikupljali geolozi, eksperti za ovo područje, u okviru aktivnosti vezanih za geološko kartiranje oblasti. Najveći deo uzoraka su bile stene, a jedan manji deo smeša stena i peska (sekundarne stene). Masa svakog pojedinačnog uzorka bila je oko 1 kg. Uzorci su bili različitog geološkog sastava: graniti, rioliti, granitoidi, silicifikovani rioliti, apiliti itd, što zavisi od tipa stena koje izgrađuju istražni prostor. Prikupljanje uzoraka je, naravno, bilo otežano zbog toga što se radi o pustinji, zbog nedostatka komunikacija i ogromne udaljenosti istražnog područja od bilo kojeg naselja. Lokacije sa kojih su uzimani uzorci su uglavnom odabrane koristeći vrlo grubu mrežu, približno jedan uzorak po kvadratnom kilometru, sa odgovarajućim GPS koordinatama.

Pri prikupljanju uzoraka vršeno je radiometrijsko ispitivanje (pregled) čitavog riolitskog masiva (oko 60 kvadratnih kilometara) koji leži preko granitoidnih stena. Za radiometrijski pregled korišćeni su terenski scintilacioni brojač GR-110 ili  $\gamma$ -spectrometar GR-130-minispec sa natrijum-jodidnim detektorom. Oba instrumenta proizvodi firma EXPLORANIUM Kanada. Izgled ovih uređaja je prikazan na slici 14. Geološko profiliranje sa radiometrijskim pregledom, uz litogehemijsko oprobavanje, vršeno je po profilima na međusobnom rastojanju od približno 1 km. Anomalije

radioaktivnosti su ovim merenjima zapažene na dva mesta u riolitima. Jedno od njih je imalo površinu od oko  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ , a drugo oko  $50\text{ m} \times 20\text{ m}$ . Na ovim mestima pozicije uzorkovanja su bile gušće, uziman je po jedan uzorak sa površine od oko  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ , dok je u opštim slučajevima uziman po jedan uzorak sa površine od oko  $1\text{ km}^2$ .



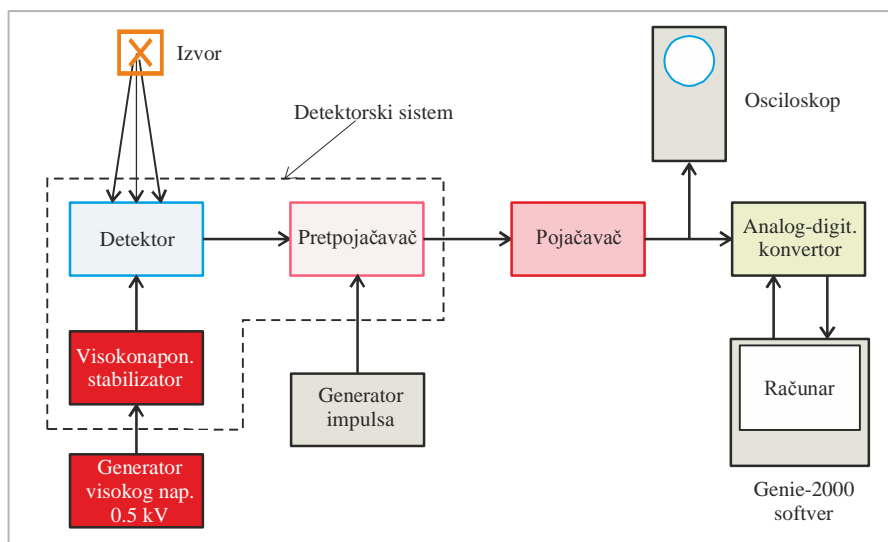
**Slika 14.** Izgled  $\gamma$ -spectrometra *Exploranium GR-130-minispec* (levo) i brojača *GR-110* (desno) koji su korišćeni na terenu.

Od ukupnog broja prikupljenih uzoraka njih oko sedamdeset je ispitivano laboratorijskim putem. Uzorci su prethodno mleveni u kugličastom mlinu, prosejani kroz sito sa dimenzijama okaca od  $0,2\text{ mm}$ , sušeni na temperature nešto iznad  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  do konstantne mase da bi se odstranila vlaga i onda homogenizovani. Svaki uzorak je, pošto mu je prethodno izmerena masa, stavljen u standardnu Marinelli posudu zapremine  $450\text{ mL}$ , hermetički zatopljen voskom i ostavljen tako da stoji oko četiri nedelje pre merenja radioaktivnosti, da bi se omogućilo zadržavanje gasovitih potomaka u posudama i porast količine proizvoda raspada uranijuma i torijuma, kao i dostizanje ravnoteže između izotopa  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$  i njihovih potomaka, tj. da bi se ostvarila sekularna ravnoteža između  $^{226}\text{Ra}$  i proizvoda njegovog raspada. Treba napomenuti da značajnije neravnoteže nisu očekivane u stenama starijim od  $10^6$  godina, a takođe se može smatrati da su članovi radioaktivnog niza  $^{232}\text{Th}$  u ravnoteži u geološkim sredinama.

## 3.2 Merenje radioaktivnosti

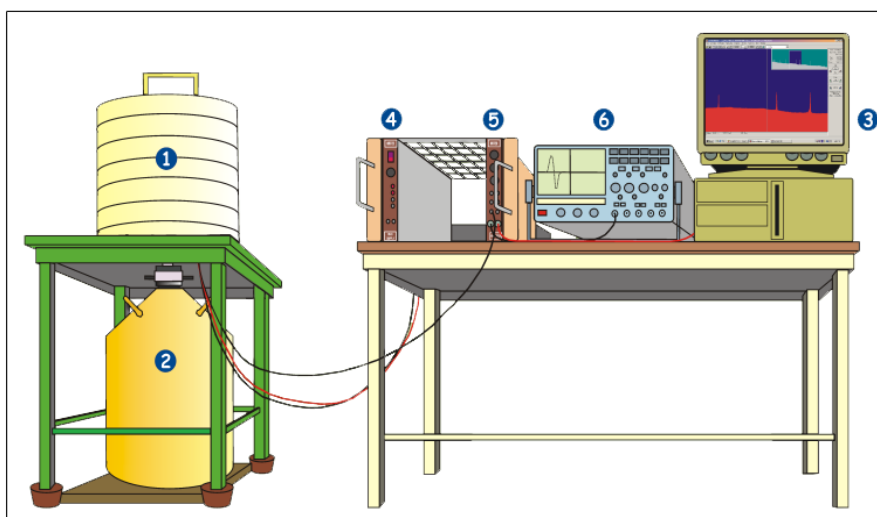
Radioaktivnost uzoraka je merena putem standardne  $\gamma$ -spektrometrije visoke rezolucije [30,27] radi određivanja koncentracija izotopa  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , kao i  $^{226}\text{Ra}$  u njima, a takođe i radi određivanja koncentracija odgovarajućih elemenata.

Spektrometrija gama-zračenja je metoda koja omogućava kvantitativnu analizu spektra energija gama-emitera u uzorcima. Na spektrometru se mogu odrediti energije fotona gama-zračenja koji se emituju iz izvora. Većina radioaktivnih izvora proizvodi gama-zračenje različitih energija i intenziteta, uobičajeno u opsegu energija od nekoliko keV do oko 10 MeV. Kada se emitovano zračenje analizira u  $\gamma$ -spektrometrijskom sistemu, kao rezultat se dobija spektar, tj. slika emitovanih intenziteta uređena po energijama. Detaljnom analizom dobijenog spektra može se izvršiti identifikacija i kvantitativno određivanje gama-emitera prisutnih u posmatranom radioaktivnom izvoru. Gama-spektar je karakteristika jezgara koja emituju zračenje, baš kao što je optički spektar karakteristika atoma i molekula koji se nalaze u uzorku. [31].



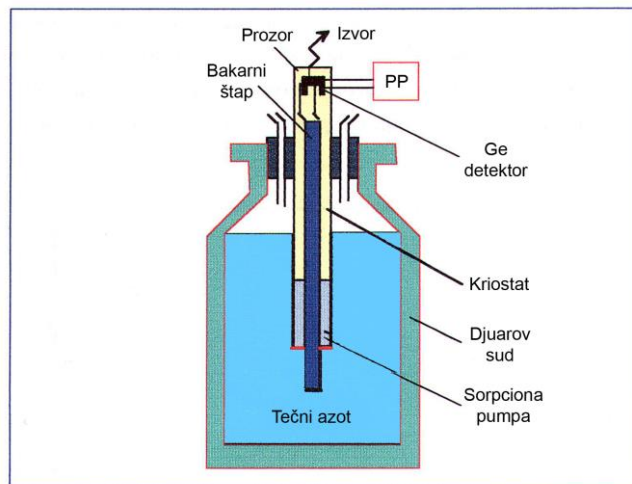
Slika 15. Shematski prikaz gama-spektrometra

Gama-spektrometrijski sistem čine: osetljivi detektor gama-zračenja, višekanalni analizator sa pojačavačem, računar sa odgovarajućim softverom za prikazivanje i analizu spektra i druge komponente (osciloskop i sl.). Shematski prikaz takvog sistema dat je na slici 15, dok njegov realan izgled prikazuje slika 16.



**Slika 16.** Gama-spektrometarski sistem visoke rezolucije: 1- zaštita detektora (olovo debljine 5 cm), 2- detektor sa pretpojačavačem (hlađen tečnim azotom) 3- računar sa PCI plug-in karticom (8k, analogno-digitalni konvertor), 4- el. napajanje , 5- pojačavač, 6- osciloskop.

Korišćen je  $\gamma$ -spektrometar sa poluprovodničkim detektorom od germanijuma visoke čistoće (HPGe - High-Purity Germanium detector, prečnik 51 mm), od firme Canberra. Šematski prikaz ovog detektora sa sistemom za hlađenje je prikazan na slici 17. Relativna geometrijska efikasnost detektora je bila 23 %, a rezolucija 1,8 keV na liniji izotopa  $^{60}\text{Co}$  od 1332,5 keV. Uzorci se stavljaju u detektor zaštićen olovom i mere oko 16 časova.



**Slika 17.** Šematski prikaz HPGe detektora.

### 3.2.1 Kalibracija i osnovno zračenje (fon)

Ako se gama-spektrometar koristi za identifikaciju uzoraka nepoznatog sastava, njegova energetska skala se prvo mora kalibrisati. Kalibracija se izvodi pomoću izvora poznatih energija kao što je  $^{137}\text{Cs}$  ili  $^{60}\text{Co}$ . S obzirom da je redni broj kanala proporcionalan energiji, skala sa kanalima se može prebaciti u energetska skalu. Ukoliko je poznata veličina kristala detektora, može se izvršiti i kalibracija intenziteta, tako da i intenziteti nepoznatog izvora odnosno količina određenog izotopa u uzorku mogu biti određeni.

Pošto je radioaktivnost svuda prisutna (osnovno zračenje - fon), neophodno je snimiti spektar tog zračenja, što znači snimiti spektar bez izvora, i to pod istim uslovima pod kojim će kasnije biti mereni uzorci. Spektar osnovnog zračenja se tada oduzima od aktuelnog spektra koji je izmeren. Oko merne instrumentacije se postavljaju olovni apsorberi da bi se smanjio nivo osnovnog zračenja.

Merenja su vršena na gama-spektrometrijskom sistemu sa zaštićenim HPGe. Kalibracija je urađena pomoću sertifikovanog standardnog referentnog materijala zemljišta (MIX-OMH-SZ, National Office of Measures, Budapest), sa nakapanim  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , u cilindričnoj Marinelli geometriji. Sva merenja uzoraka, fona i standarda su vršena u istoj geometriji, sa vremenom merenja 60 000 s.

Pre merenja uzorka, određuje se osnovno zračenje (fon) u laboratoriji tako što se izvrši merenje prazne Marinelli posude pod istim eksperimentalnim uslovima kao i uzorak.

Kasnije se osnovno zračenje oduzima od gama-spektra svakog izmerenog uzorka. Svaki izmereni spektar se analizira pomoću softverskog paketa GENIE- 2000, koji simultano fituje sve značajne fotolinije iz spektra i vrši dekonvoluciju-razdvajanje mnogostrukih ekstremuma koji se pojavljuju u spektru. Ovaj softver omogućava štampanje izveštaja o spektru koji sadrži opseg kanala u kojem se linija nalazi, energiju, odbroj, odbroj osnovnog zračenja, intenzitet i širinu identifikovanih i neidentifikovanih linija u spektru, kao i aktivnost na liniji i srednju aktivnost u  $\text{Bq kg}^{-1}$  za svaki detektovani radionuklid. Detaljna analiza spektara omogućava identifikaciju gama-emitera prisutnih u uzorcima i određivanje njihovih koncentracija. Radionuklidi čije su koncentracije određivane i odgovarajući radionuklidi koji su u tom cilju mereni (sa pripadajućim gama-linijama, tj. energijama), da bi na osnovu njih bile određene navedene koncentracije, prikazani su u tabeli 2.

**Tabela 2:** Izotopi koji su određivani i radionuklidi putem čije radioaktivnost su određivani, sa odgovarajućim gama-linijama i efikasnostima na tim linijama

Određivani nuklid	Mereni nuklid	$E_\gamma$ (keV)	$P_\gamma$ (%)
$^{226}\text{Ra}$	$^{214}\text{Pb}$	295,2	19,2
		351,9	37,2
	$^{214}\text{Bi}$	609,3	46,0
		1120,2	15,0
$^{238}\text{U}$	$^{234\text{m}}\text{Pa}$	1764,5	15,9
		63,28	4,1
		1001,03	0,839
$^{232}\text{Th}$	$^{228}\text{Ac}$	338,4	12,4
		911,2	29,0
$^{40}\text{K}$	$^{40}\text{K}$	1460,8	10,3
$^{137}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}$	661,6	85,21

Nakon analize spektra, odbroj za svaki detektovani foto-maksimum (liniju) i aktivnost po jedinici mase (specifična aktivnost ili koncentracija radioaktivnosti) za svaki od detektovanih radionuklida može se izračunati. Koncentracija  $A$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) datog radionuklida u uzorku za maksimum na energiji  $E_\gamma$ , data je kao:

$$A = \frac{I(E_\gamma)}{m \cdot t \cdot P_\gamma(E_\gamma) \cdot \varepsilon(E_\gamma)} \quad (1)$$

gde je  $I(E_\gamma)$  – odbroj ispod maksimuma na energiji  $E_\gamma$  korigovan na odbroj fona u istoj oblasti energija,  $t$  – vreme merenja (s),  $m$  – masa uzorka (kg),  $P_\gamma(E_\gamma)$  – verovatnoća raspada (prelaza) sa energijom  $E_\gamma$ ,  $\varepsilon(E_\gamma)$  – efikasnost detekcije na energiji  $E_\gamma$ .

### 3.3 Metode ICP-MS i XRF

Gama-spektrometrijska merenja su veoma selektivna i, po pravilu, u ovom vidu istraživanja najpouzdanija kad se radi o održivanju izotopskih koncentracija, s jedne strane, i obilnosti datog elementa, sa druge. Kako je već rečeno, u ovoj disertaciji su korišćene i dodatne metode: ICP-MS je korišćena za sve uzorke, za određivanje sadržaja uranijuma torijuma i kalijuma, a kod pojedinih uzoraka u kojima su otkrivene izrazito povećane koncentracije uranijuma, i za određivanje niza drugih elemenata; XRF je korišćena samo u slučaju kalijuma i to za nekoliko uzoraka.



# 4

## REZULTATI I DISKUSIJA

### 4.1 Preliminarna terenska radiometrijska merenja

Zašto su preliminarna terenska merenja važna:

- da bi se utvrdio nivo prirodne radioaktivnosti područja,
- da bi se istraživanja mogla fokusirati na mesta gde rezultati odstupaju od srednjih vrednosti,
- da bi se mogli naći dobri geološki uzorci sa različitim procentom radioaktivnosti,
- ovakva inicijalna ispitivanja mogu uputiti na oblast koja će biti razmatrana,
- da bi se dobile informacije u kojim tipovima stena je koncentrisana radioaktivnost istražnog područja.

Regionalna prospekcijska ispitivanja su rađena uporedo sa izradom geološke karte, a s ciljem otkrivanja radioaktivnih mineralnih sirovina vršen je i radiometrijski pregled. Rezultati terenskih merenja izvršenih scintilacionim brojačem (GR 110) su izraženi u impuls/s (cps), što je direktno proporcionalno broju upadnih gama-fotona (istog nivoa energije) koji u scintilacionom kristalu proizvedu proporcionalan broj svetlosnih fotona, odnosno adekvatnu struju (elektrona) na izlazu iz fotomultiplikatora. To se grubo može smatrati za relativnu meru ukupne radioaktivnosti. Vođeno je računa o tome da geometrija merenja bude približno ista u svim slučajevima, tj. da položaj brojača prema mernoj površini bude manje-više jednak za sve merene tačke. U okviru riolitiskog masiva i prostora okolo njega (u granitima) urađeno je ukupno 1000 merenja radioaktivnosti. Fonske vrednosti u riolitima kreću se oko 180 cps. Maksimalne

izmerene vrednosti su oko 3400 cps. Fonske vrednosti u granitima okolo riolita su oko 120 cps, a maksimalne izmerene vrednosti ne prelaze 500 cps.

Radiometrijskim pregledom konstatovane su i neke anomalne radioaktivnosti, a da bi se na terenu utvrdio karakter tih registrovanih anomalija korišćen je i gama-spektrometar (GR 130), koji meri sadržaje U, Th i K na mestu.

Na osnovu radiometrijskog pregleda koji je obavljan na terenu, za stene koje izgrađuju teren istražnog prostora uslovno se mogu odrediti lokalne fonske vrednosti radioaktivnosti za pojedine vrste stena izražene kao cps. One su date u tabeli 3. Izrazito anomalne vrednosti merene radioaktivnosti nisu uzimane u obzir. Tipično, nekoliko hiljada merenja, u nekim slučajevima i do pet hiljada, je izvršeno za svaku vrednost fona datu u tablici. Radiometrijski pregled je bio prva indikacija povećane radioaktivnosti riolita kroz povećane vrednosti lokalnog fona. Naknadna laboratorijska merenja su u potpunosti potvrdila ove indikacije i pokazala da one potiču od uranijuma.

**Tabela 3.** Srednje vrednosti osnovnog zračenja (fon) za različite tipove stena u oblasti Džabal Egi

Vrsta stene	Izmerene vrednosti (cps)		Lokalni fon (srednja vrednost, cps)
	Min.	Maks.	
Granitoidi	60	160	120
Rioliti	80	210	160
Sijeniti	70	130	125
Kvarciti	25	40	35
Skarnovi	35	50	40
Amfiboliti	40	60	45

Iz rezultata merenja radioaktivnosti koji su prikazani u tabeli 3 jasno se izdvajaju graniti i rioliti kao stene koje imaju metalogenetsku specijalizaciju na uranijum. Posle njih su sijeniti, dok su ostale stene (kvarciti, skarnovi i amfiboliti) neinteresantne u pogledu iznalaženja uranijumskih mineralizacija.

Po otkrivanju anomalija radioaktivnosti na jednom delu terena koji je izgrađen od riolita koji probijaju granite, vršeno je i geološko-radiometrijsko profiliranje sa uzorkovanjem.

Teren je prospektovan detaljnije, što podrazumeva radiometrijska merenja u kontinuitetu. Uzorci stena (probe) prvenstveno su prikupljeni na mestima povećane radioaktivnosti. Na prikupljenim uzorcima kasnije su vršena različita laboratorijska ispitivanja (radiometrijska, geohemijska, rudnomikroskopska i petrografska), među kojima su ovde od najveće važnosti merenja radioaktivnosti putem gama-spektrometrije. U okviru prospekcijskih istraživanja rioliti su presečeni sa 14 profila koji su približno imali pravac istok—zapad.

## 4.2 Određivanje specifičnih aktivnosti radionuklida i koncentracijâ elemenata iz gama-spektrometrijskih merenja

Osnovna aktivnost (fon) i aktivnosti uzoraka su mereni u trajanju od 60 000 sekundi na gama-linijama koje su date u tabeli 2. Za uranijum je uglavnom korišćena linija  $^{234}\text{Th}$  na 63,28 keV, dok je druga linija korišćena samo za uzorke u kojima je povećana koncentracija uranijuma, jer je ta linija vrlo slaba. Za ostale izotope korišćene su linije navedene u istoj tabeli.

Nakon obavljenih merenja izračunate su površine ispod odgovarajućih maksimuma. Na osnovu spektralne analize izračunati su brojevi impulsa za svaki foto-maksimum i aktivnost uzorka po jedinici njegove mase, tj. specifična aktivnost za svaki detektovani radionuklid. Specifična aktivnost  $A$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) odgovarajućeg radionuklida je računata korišćenjem jednačine (1)

Specifične aktivnosti izotopa  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , dobijene na navedeni način, su prikazane u tabeli 4.

**Tabela 4.** Specifične aktivnosti  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u uzorcima iz Džabal Egija, dobijene putem gama-spektrometrijskih merenja (vrednosti prikazane masnim slovima predstavljaju radioaktivnosti koje su izrazito povećane u odnosu na lokalni fon)

Uzorak		$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	Tip stene
No	Kod	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	
1	186	81±15	53±4	1261±76	Rioliti
2	187	74±10	60±6	1281±86	Rioliti
3	188	83±12	64±6	1433±94	Rioliti

4	191	154±21	88±7	1386±86	Granitoidi
5	193	125±20	88±7	1462±91	Kontaktne zone kvarcne žice
6	194	64±15	55±5	790±55	Kvarcne žice
7	198	91±15	54±5	1170±76	Rioliti
8	200	87±16	50±5	1157±75	Silifikovani rioliti
9	201	99±17	32±4	1763±111	Silifikovani rioliti
10	202	177±23	83±7	1591±99	Silifikovani rioliti, rasedne zone
11	203	146±17	147±12	1546±104	Silifikovani rioliti
12	205	130±13	101±8	1245±82	Graniti
13	207	123±14	96±8	1597±104	Silifikovane breče
14	208	180±20	91±8	1749±118	Silifikovani rioliti
15	209	377±37	122±9	1155±75	Graniti
16	210	173±22	93±7	1513±93	Kontakt riolit-granit
17	211	98±19	81±6	1512±94	Kontakt riolit-granit
18	212	63±13	73±6	1383±86	Rioliti
19	213	119±19	75±6	1485±94	Rioliti
20	214	140±13	92±8	1576±100	Rioliti
21	215	184±24	78±7	1401±89	Rioliti
22	216	139±16	101±9	1495±99	Silifikovani rioliti
23	217	122±14	101±9	1651±109	Kontakt riolit-granit
24	219	140±20	82±7	1067±69	Kvarcna breča
25	220	67±11	129±10	2304±145	Rioliti
26	222	104±12	71±6	1551±101	Rioliti
27	223	104±17	80±7	1545±96	Silifikovana breča
28	225	69±12	57±5	890±59	Rioliti
29	226	101±12	82±7	1240±82	Silifikovani rioliti
30	227	92±11	85±7	1729±112	Silifikovani rioliti
31	230	-	-	-	Riolit-brečiziran
32	231	-	-	-	Riolit-brečiziran
33	234	114±18	59±5	1092±72	Rasedne zone
34	235	171±23	88±7	1447±92	Rioliti
35	237	140±14	58±6	561±45	Kvarcne breče
36	238	66±11	24±3	322±25	Kvarcne breče
37	239	98±13	37±3	877±57	Tuf
38	240	284±32	150±11	1517±95	Aplitske žice
39	241	448±48	221±15	1210±78	Apliti
40	242	62±14	81±7	1533±97	Silifikovani rioliti
41	243	122±18	93±7	1350±86	Silifikovani rioliti
42	<b>244</b>	<b>1176±78</b>	63±7	875±65	Rioliti
43	<b>245</b>	<b>3097±185</b>	68±9	529±47	Rioliti
44	<b>246</b>	<b>3272±194</b>	64±9	593±50	Rioliti
45	248	151±14	55±5	995±68	Silifikovani rioliti
46	249	62±8	58±5	1048±72	Silifikovani rioliti
47	267	64±9	61±6	1148±79	Gabro
48	268	112±11	55±5	1044±70	Rioliti
49	269	104±16	43±4	1284±85	Rioliti

50	270	16±5	11±1	256±20	Silifikovani rioliti
51	271	0	14±2	132±13	Silifikovani stene
52	272	73±13	62±5	1131±73	Kontakt riolit-granit
53	273	111±16	66±6	1204±78	Piritisani amfiboliti
54	274	68±14	64±5	1123±72	Uškriljeni riolit
55	275	0	72±7	1120±76	Silifikovani rioliti
56	<b>620</b>	<b>1515±98</b>	26±3	893±67	Rioliti
57	<b>621</b>	<b>2788±168</b>	61±9	983±74	Rioliti
58	<b>622</b>	<b>3570± 229</b>	62±7	750±53	Rioliti
59	<b>624</b>	<b>7477±458</b>	0	140±20	Kvarcna breča
60	701	111±13	60±5	1374±88	Rioliti
61	702	126±14	104±8	1251±76	Graniti
62	706	332±33	136±9	1333±83	Graniti
63	707	103±12	61±5	1468±94	Rioliti
64	708	51±8	39±4	777±54	Graniti
65	709	182±22	70±6	1296±82	Graniti
66	710	184±21	68±6	1288±81	Rioliti
67	712d	62±12	39±4	1742±106	Graniti
68	713	104±16	64±5	1774±108	Rioliti
69	2775	73±11	63±5	1242±77	Graniti
70	2776d	82±15	59±5	1342±83	Rioliti
71	2778d	147±19	80±6	1451±90	Rioliti

#### 4.2.1 Koncentracije uranijuma, torijuma i kalijuma u uzorcima iz Džabal Egija

Specifične aktivnosti radioizotopa koje su date u prethodnoj tabeli su preračunate u koncentracije odgovarajućih elemenata koristeći sledeći izraz:

$$F_E = A_I \frac{M_I}{\lambda_I N_A f_I} C \quad (2)$$

gde je  $F_E$  frakcija elementa E u uzorku,  $A_I$  je izmerena specifična aktivnost datog radioizotopa ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ),  $M_I$ ,  $\lambda_I$ , i  $f_I$  su njegovi atomska masa ( $\text{kg mol}^{-1}$ ), radioaktivna konstanta ( $\text{s}^{-1}$ ) i atomska obilnost u prirodi, respektivno,  $N_A$  je Avogadrov broj, dok je  $C$  konstanta koja ima vrednost  $10^6$  za U i Th, a  $10^2$  za K. Na ovaj način koncentracije elemenata su izražene kao  $\text{mg kg}^{-1}$  za uranijum i torijum, odnosno kao procenat (%) za kalijum. Radi poređenja, dobijeni podaci su, zajedno sa rezultatima dobijenim metodom ICP-MS analize, kao i XRF analize za neke uzorke, prikazani u tabeli 5.

**Tabela 5.** Koncentracije elemenata U, Th i K u uzorcima prikupljenim u oblasti Džabal Egi

Uzorak		U (mg kg <sup>-1</sup> )			Th (mg kg <sup>-1</sup> )			K (%)	
No	Kod	Gama	ICP-MS	XRF	Gama	ICP-MS	XRF	Gama	XRF
1	186	6,5±1,2	1,86		13,0±1,1	11,7		4,16±0,25	
2	187	6,0±0,8	2,38		14,8±1,4	13,3		4,22±0,28	
3	188	6,7±1,0	2,45		15,7±1,5	15,4		4,73±0,31	
4	191	12,4±1,7	6,37		21,8±1,7	22,4		4,57±0,28	
5	193	10,1±1,6	6,12		21,6±1,7	22,9		4,82±0,30	
6	194	5,2±1,2	1,45		13,4±1,2	12,3		2,60±0,18	
7	198	7,3±1,2	2,89		13,4±1,2	11		3,86±0,25	
8	200	7,1±1,3	3,69		12,3±1,1	12,6		3,81±0,25	
9	201	8,0±1,4	0,99		8,0±0,9	5,1		5,82±0,37	
10	202	14,3±1,8	6,29		20,5±1,7	22,7		5,25±0,33	4,7
11	203	11,8±1,4	7,75		36,2±2,9	32,8		5,10±0,34	
12	205	10,6±1,1	4,62		24,9±2,0	21,5		4,10±0,27	
13	207	10,0±1,1	1,63		23,6±2,0	17,5		5,27±0,34	
14	208	14,6±1,6	9,7		22,5±2,1	18,2		5,77±0,39	
15	209	30,6±3,0	21,8		30,1±2,2	28,9		3,81±0,25	3,6
16	210	14,0±1,8	4,21		22,9±1,8	23,5		4,99±0,31	
17	211	7,9±1,5	1,56		19,9±1,6	16,7		4,99±0,31	4,6
18	212	5,1±1,1	1,16		18,0±1,4	17,8		4,56±0,29	
19	213	9,7±1,5	2,14		18,5±1,5	18,2		4,90±0,31	
20	214	11,3±1,1	4,7		22,6±1,9	19,8		5,20±0,33	
21	215	14,9±1,9	7,06		19,3±1,6	16,2		4,62±0,29	
22	216	11,3±1,3	3,67		25,0±2,2	17,1		4,93±0,33	
23	217	9,9±1,1	2,02		24,9±2,2	17,3		5,45±0,36	
24	219	11,3±1,7	2,41		20,3±1,6	14,8		3,52±0,23	
25	220	5,4±0,9	4,7		31,9±2,6	15,7		7,60±0,48	
26	222	8,4±0,9	4,16		17,4±1,6	15,1		5,11±0,33	
27	223	8,4±1,4	1,25		19,6±1,6	13,1		5,10±0,32	
28	225	5,6±1,0	1,55		13,9±1,2	11,3		2,94±0,20	
29	226	8,2±1,0	1,15		20,2±1,8	9,1		4,09±0,27	
30	227	7,4±0,9	3,87		21,1±1,8	5,4		5,70±0,37	
31	230	-	175,5		-	1,43		-	
32	231	-	40,9		-	0,23		-	
33	234	9,2±1,5	4,87		14,6±1,3	18,1		3,60±0,24	
34	235	13,8±1,9	1,6		21,6±1,8	10,7		4,77±0,30	
35	237	11,3±1,2	3,77		14,4±1,5	9,6		1,85±0,15	
36	238	5,4±0,9	1,48		5,9±0,6	4,6		1,06±0,08	
37	239	8,0±1,0	1,11		9,1±0,8	8,5		2,89±0,19	
38	240	23,0±2,6	14,1		36,9±2,7	38,7		5,00±0,31	4,5
39	241	36,3±3,9	21,2		54,5±3,7	72,8		3,99±0,26	3,6
40	242	5,0±1,1	0,12		19,9±1,6	1,4		5,06±0,32	
41	243	9,9±1,5	4,54		22,9±1,8	23,2		4,45±0,28	

42	<b>244</b>	<b>95,3±6,3</b>	<b>50,1</b>	<b>71,5</b>	15,5±1,7	10,7	13,0	2,89±0,21	2,2
43	<b>245</b>	<b>250,9±15,0</b>	<b>214</b>	<b>208,9</b>	16,7±2,3	11,6	9,6	1,74±0,15	1,1
44	<b>246</b>	<b>265,0±15,7</b>	<b>204</b>	<b>208,6</b>	15,9±2,1	11	8,6	1,96±0,16	1,5
45	248	12,2±1,2	4,69		13,5±1,3	10,5		3,28±0,22	
46	249	5,0±0,7	1,49		14,3±1,3	9,9		3,46±0,24	
47	267	5,2±0,8	2,31		14,9±1,5	12,6		3,79±0,26	
48	268	9,1±0,9	2,52		13,4±1,2	12,3		3,44±0,23	
49	269	8,4±1,3	1		10,5±1,1	7,9		4,23±0,28	
50	270	1,3±0,4	0,44		2,7±0,4	2,7		0,84±0,07	
51	271	0,0±0,0	0,25		3,4±0,5	1,9		0,44±0,04	
52	272	6,0±1,1	1,62		15,4±1,3	14,7		3,73±0,24	
53	273	9,0±1,3	1,6		16,2±1,4	14,2		3,97±0,26	
54	274	5,5±1,1	0,91		15,7±1,3	13		3,71±0,24	
55	275	0,0±0,0	0,45		17,8±1,6	5,7		3,69±0,25	
56	<b>620</b>	<b>122,7±7,9</b>	<b>74,2</b>	<b>105,8</b>	6,5±0,7	10,4	10,3	2,95±0,22	2,2
57	<b>621</b>	<b>225,8±13,6</b>	<b>149</b>	<b>187,0</b>	15,1±2,3	11,6	11,2	3,24±0,24	2,2
58	<b>622</b>	<b>289,2±18,5</b>	<b>232</b>	<b>225,1</b>	15,3±1,8	12,1	10,4	2,47±0,18	1,9
59	<b>624</b>	<b>605,7±37,1</b>	<b>356</b>	<b>294,2</b>	0,00±0,0	2,9	3,1	0,46±0,07	0,1
60	701	9,0±1,0	3,16		14,7±1,4	12,3		4,53±0,29	
61	702	10,2±1,1	10,6		25,6±2,0	56,7		4,13±0,25	
62	706	26,9±2,7	19,95		33,5±2,3	48,1		4,40±0,27	
63	707	8,4±1,0	2,93		15,0±1,3	14,5		4,84±0,31	
64	708	4,2±0,6	1,56		9,7±1,0	12,4		2,56±0,18	
65	709	14,7±1,8	12,4		17,2±1,4	53,9		4,28±0,27	
66	710	14,9±1,7	2,57		16,8±1,4	8,8		4,25±0,27	
67	712d	5,0±1,0	2,08		9,7±0,9	15,1		5,75±0,35	
68	713	8,4±1,3	2,91		15,8±1,3	17,9		5,85±0,36	
69	2775	5,9±0,9	-		15,5±1,2	-		4,09±0,26	
70	2776d	6,7±1,2	-		14,5±1,2	-		4,42±0,27	
71	2778d	11,9±1,6	4,25		19,8±1,5	15,4		4,79±0,30	

Tabela 5 je dobra ilustracija pouzdanosti različitih metoda koje su korišćene za određivanje koncentracije elemenata. Bez svake sumnje, gama-spektrometrija je od svih navedenih najpouzdanija. Tabela pokazuje da se ICP-MS analiza vrlo dobro slaže sa merenjima radioaktivnosti za torijum (u rasponu od 15%), dok je slaganje za uranijum relativno dobro, većina rezultat je u rasponu od 60%, pri čemu su vrednosti dobijene metodom ICP-MS uvek niže od odgovarajućih vrednosti dobijenih na osnovu radioaktivnosti. Međutim, saglasnosti među metodama skoro da nema za kalijum. Ovo neslaganje je donekle očekivano, pošto relativno nizak potencijal jonizacije kalijuma čini da se on jonizuje dosta rano pri ulasku u plazmu. Na taj način on je od strane

radijalnog električnog polja primoran da na svom putu kroz plazmu migrira iz centralne zone. Ovo znači da je njegova koncentracija u centralnoj zoni znatno niža od stvarne koncentracije, što značajno utiče na merenje kalijuma ovom metodom. Kalijum nije jedinstven u svom ponašanju kod ICP merenja. Zbog toga su ovde iskorišćeni rezultati XRF metode za neke uzorke da bi se nedvosmisleno potvrdili rezultati dobijeni iz gama-spektrometrije.

Drugo, zapaža se da su koncentracije torijuma i kalijuma koje su date u tabelama 4 i 5, u proseku na nivou fona, dok su koncentracije uranijuma u nekim uzorcima (620–622, 624, 244–246; ovi brojevi su dati masnim slovima u tabelama 4 i 5) znatno povećane.

Kao što je ranije napomenuto, prilikom prikupljanja uzoraka su rađena i radiometrijska merenja pešačkom prospekcijom. Tada je zapažena vrlo interesantna anomalija radioaktivnosti u riolitima.

#### *4.2.2 Pojave uranijuma, torijuma i kalijuma u području Džabal Egi*

Rioliti se nalaze na centralnom delu istražnog područja i zahvataju površinu od oko 60 km<sup>2</sup> (slika 2). Rioliti su probili granite, a smešteni su u okviru velike regionalne šire zone (strukture) koja ima pravac pružanja severoistok–jugozapad. Prostor koji pokrivaju rioliti ispresecan je većim rasednim zonama pravca pružanja severozapad–jugoistok. Sa stanovišta nuklearnih mineralnih sirovina, rioliti se uvek tretiraju kao stene od najvećeg značaja.

Interesantno je napomenuti da se na osnovu radiometrijskog pregleda uslovno mogu izdvojiti tri vrste granitoida. Jedne pokazuju vrednosti od 40 do 60 cps, druge od 80 do 110 cps, i treće vrste, verovatno najmlađe, imaju vrednosti od 150 do 200 cps. Ako se uzme u obzir vrsta stena dobijene vrednosti su najčešće na nivou fonskih vrednosti za ove stene osim za granitoide koji se nalaze neposredno uz kontakt sa riolitima.

Radiometrijski pregled je ukazao na dve značajne uranijumske anomalije u riolotima, kao i na nekoliko manjih anomalija u granitima koji su u bliskom kontaktu sa riolitima. Rezultati ovih terenskih merenja su kasnije potvrđeni laboratorijskim merenjima, što se može videti u tabelama 4 i 5. Slika 18 prikazuje kako izgleda prostor u riolitima u kojem su otkrivene anomalije radioaktivnosti.





**Slika 18.** Izgled prostora sa anomalnom radioaktivnošću u riolitima: gore - anomalija I; dole – anomalija II.

**Anomalija I.** Nalazi se u centralnom delu riolitske oblasti ( $23^{\circ}14' 23,2''$ ;  $19^{\circ}17' 04''$ ), koja je uglavnom sastavljena od silifikovanih riolita, gde na površini terena nije moguće zapaziti bilo kakvu strukturu. U jednom njenom delu, čije su dimenzije  $60\text{ m} \times 40\text{ m}$ , merenjima na terenu je konstatovana radioaktivnost od oko 500 do preko 2400 cps, što je znatno iznad fona. Ovo je kasnije potvrđeno preciznim laboratorijskim merenjima, koja su pokazala da se koncentracije uranijuma u tom reonu kreću od 95 do oko  $290\text{ mg kg}^{-1}$ . Ove vrednosti odgovaraju uzorcima koji su kodirani kao 244 do 246, i 620 do 622 (tabela 4). Uz pomoć prenosivog  $\gamma$ -spektrometra GR-130 potvrđeno je da ova anomalija

potiče isključivo od uranijuma, pošto su odgovarajući odbroji za Th i K bili na nivou osnovnog zračenja za ovaj tip stena. Iskustvo u radu sa ovim instrumentom i način na koji su vršena merenja omogućuju da se, na osnovu očitano broj impulsa u sekundi, grubo proceni koncentracija uranijuma u jedinicama  $\text{mg kg}^{-1}$ . Procene dobijene na ovaj način su kasnije potvrđene putem tri vrste laboratorijskih merenja koje su korišćene u ovom radu. U zaključku se može reći da su sve metode dale vrlo slične rezultate, koji nedvosmisleno potvrđuju da je ispitivano područje obogaćeno u uranijumu u odnosu na lokalni fon. U nekim slučajevima ta obogaćenost ide i do dva reda veličine. Na odstojanju od oko 400 m od glavne anomalije radioaktivnosti registrovane su još dve manje anomalije od oko 400 cps.

**Geohemijska analiza uzoraka anomalije I.** Kao što je već rečeno, pored radioloških metoda merenja u ovom radu je bila primenjena i ICP-MS metoda. Ona je korišćena za geohemijske analize ograničenog broja uzoraka sa lokacija na kojima su registrovane uranijumske mineralizacije (anomalija I), ne samo da bi se upoređivali sadržaji uranijuma ili torijuma sa onima koji su dobijeni putem gama-spektrometrije, već i da bi se odredile koncentracije oko četrdeset elemenata koji se pojavljuju u mineralima. Ovi elementi su važni da bi se razumeo celokupni geološki kontekst u odnosu na uranijum. Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 6 zajedno sa odgovarajućim Klarkovim vrednostima za pojedine elemente.

**Tabela 6.** Rezultati geohemijskih (ICP-MS) analiza riolita sa povećanim sadržajem uranijuma – **anomalija I**. Koncentracije su date u jedinicama  $\text{mg kg}^{-1}$ . Vrednosti štampane masno odgovaraju povišenim koncentracijama odgovarajućih elemenata u odnosu na Klarkove vrednosti [32].

Uzorak-kod		244	245	246	620	621	622	3177*
Tip stene		Silifikovani riolit	Rioliti	Rioliti	Rioliti	Rioliti	Rioliti	Rioliti
Element	Klark							
Au	0,0043	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,005
Ag	0,07	0,09	0,03	0,11	0,08	0,09	0,12	0,13
As	1,7	<b>16,8</b>	<b>12,2</b>	<b>21,9</b>	<b>19,1</b>	<b>20,7</b>	<b>21,4</b>	<b>36,6</b>
Ba	650	340	320	330	260	410	300	240
Be	38	0,39	0,7	0,44	0,42	0,32	0,52	0,41
Bi	0,009	0,06	0,06	0,09	0,15	0,27	0,24	0,1
Cd	0,13	0,15	0,21	0,16	0,16	0,07	0,21	0,14
Ce	70	71,8	59,8	56	64,2	80,3	67,9	57

Co	18	29,2	18	30,9	15,2	15,7	15,7	26,7
Cr	83	18	10	15	31	30	18	26
Cs	3,7	6,57	1,55	3,33	5,02	7,32	3,24	3,67
Cu	47	36,9	4,5	12,3	18,2	10	14,8	19,2
Ga	19	10,45	5,25	8,1	9,63	10,7	7,51	8,03
Ge	1,4	0,18	0,14	0,16	0,12	0,12	0,1	0,1
Hf	1	1,32	0,82	1,43	1,04	1,08	0,75	0,83
Hg	0,083	0,07	0,08	0,07	0,02	0,02	0,02	0,01
In	0,25	0,045	0,018	0,022	0,031	0,035	0,024	0,022
La	29	35,6	28,7	27,3	29,5	38,7	33	29,5
Li	32	52,3	17,6	34,4	36,6	44,2	31,7	32,4
Mn	1000	548	501	477	684	535	463	701
Mo	1,1	1,15	1,44	2,64	2,49	3,55	3,75	<b>20</b>
Nb	20	0,68	1,58	1,22	0,66	0,56	1,43	0,86
Ni	58	9,9	5,6	9,2	13	11,5	8,6	18,9
P	930	<b>1090</b>	<b>1280</b>	<b>1060</b>	<b>1120</b>	<b>1170</b>	<b>1180</b>	<b>1060</b>
Pb	16	11	26,6	29,7	16,6	28,3	32,7	27,3
Rb	150	100,5	23,3	71	79,4	100,5	61,2	72,2
Re	0,001	0,001	<0,001	0,001	<0,001	0,001	0,001	0,001
Sb	0,5	0,81	0,94	0,95	1,11	1,14	1,19	1,03
Sc	10	9,4	2,5	4,1	6,2	8,1	4	4,3
Se	0,05	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,5	0,4
Sn	2,5	2,2	2,7	2,5	2,9	2,9	3,7	1,8
Sr	340	42	53,3	46,8	49,4	35,4	68,6	51,3
Ta	2,5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Te	0,002	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Th	13	10,7	11,6	11	10,4	11,6	12,1	8,8
Tl	1	0,81	0,25	0,82	0,65	0,97	0,68	0,86
U	2,5	<b>50,1</b>	<b>214</b>	<b>204</b>	<b>74,2</b>	<b>149</b>	<b>232</b>	<b>152,5</b>
V	90	55	17	35	41	51	27	34
W	1,3	84	64,9	69,1	2,16	1,63	1,08	0,6
Y	29	12,45	13,05	14,7	11,55	14,45	14,15	10,15
Zn	83	61	33	57	52	75	48	67
Zr	170	42,8	33,6	49,5	39,7	44,5	34,9	28,2

\* Radioaktivnost ovog uzorka nije merena.

Formiranje uranijumskih mineralizacija je u direktnoj vezi s njegovim geohemijskim svojstvima i ponašanjima u različitim geološkim sredinama. Uranijumske mineralizacije koje su otkrivene u Džabal Egiju su prostorno i genetski povezani sa granitoidnim stenama koje su probili rioliti. Na osnovu geoloških i strukturnih karakteristika ove oblasti, kao i lokacija uranijumskih mineralizacija, a imajući u vidu rezultate geohemijskih analiza (v. tabelu 6 – povećani sadržaji As i P), može se zaključiti da je u njihovom formiranju važnu ulogu imao hidrotermalni stadijum. U vodama koje imaju pH vrednost između 4 i 7,5, najverovatnije je da se formiraju kompleksi uranil-jona sa

$\text{KAsO}_4^{2-}$  i  $\text{SiO}_3^{2-}$ . U prisustvu jona  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  i  $\text{Fe}^{2+}$  smanjuje se rastvorljivost uranil-kompleksa. To dovodi do formiranja znatno povoljnijih uslova za nastajanje uranijumskih mineralizacija. Neki od ovih minerala su nerastvorni (npr. njihova jedinjenja sa  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{AsO}_4^{3-}$ ,  $\text{SiO}_2$  itd.), tako da se ona pojavljuju zajedno sa uranijumom na istoj lokaciji, dok druga vrlo lako odlaze u rastvor [33].

**Anomalija II.** Otkrivena je u blizini kontaktne zone graniti-rioliti ( $23^\circ 13' 42''$ ;  $19^\circ 16' 05''$ ) i vezana je za markantnu rasednu zonu koja se karakteriše prisustvom silifikovanih breča. Ova zona je povezana sa primetnom tektonskom zonom. Azimut zone je  $160^\circ$  a nagib  $85^\circ$ . Radiometrijska merenja na terenu su pokazivala vrednosti od 400 do preko 3000 cps. Na osnovu ovih, ali i naknadnih laboratorijskih merenja, pokazano je da su koncentracije uranijuma u nekim od merenih uoraka veće od onih kod anomalije I i da se kreću od 40 do oko  $600 \text{ mg kg}^{-1}$ . Ti rezultati se odnose na uzorke 230, 231 i 624). Istovremeno koncentracije torijuma u ovim stenama su zanemarljive.

**Geohemijska analiza uzoraka anomalije II.** Sa mesta na kojem je konstatovana ova uranijumska anomalija su uzeta tri uzorka radi dalje geohemijske analize na značajne elemente, slično kako je postupljeno i kod anomalije I. Rezultati ove analize su prikazani u tabeli 7.

**Tabela 7.** Rezultati geohemijskih (ICP-MS) analiza riolita sa povećanim sadržajem uranijuma – **anomalija II.** Koncentracije su date u jedinicama  $\text{mg kg}^{-1}$ . Vrednosti štampane masno odgovaraju povišenim koncentracijama datih elemenata u odnosu na Klarkove vrednosti [32].

Uzorak-kod		230	231	624
Tip stene		Riolit-breča	Riolit-breča	Riolit-breča
Element	Klark			
Au	0,0043	<0,2	<0,2	<0,2
Ag	0,07	<b>1,2</b>	<b>0,62</b>	<b>1,18</b>
As	1,7	<b>13,1</b>	<b>9,5</b>	<b>14,5</b>
Ba	650	<b>2800</b>	<b>2270</b>	<b>2420</b>
Be	38	1,56	1,44	1,16
Bi	0,009	0,43	0,17	2,63
Cd	0,13	0,61	0,42	0,64
Ce	70	31,7	17,45	19,4
Co	18	4,3	23,6	2

Cr	83	18	12	20
Cs	3,7	0,7	0,43	0,55
Cu	47	22	20,1	18,1
Ga	19	3,14	1,78	1,92
Ge	1,4	0,09	0,05	<0,05
Hf	1	0,44	0,21	0,34
Hg	0,083	<b>0,18</b>	<b>0,22</b>	<b>0,72</b>
In	0,25	0,067	0,044	0,153
La	29	14,1	4,1	5,7
Li	32	1,8	1	1
Mn	1000	774	493	267
Mo	1,1	<b>32,4</b>	<b>52,6</b>	<b>44,7</b>
Nb	20	0,23	0,12	0,23
Ni	58	5,4	5,6	6,8
P	930	200	250	282
Pb	16	<b>77,9</b>	<b>88,4</b>	<b>231</b>
Rb	150	4,6	2,5	3,3
Re	0,001	<0,001	0,003	0,001
Sb	0,5	4,44	4,05	6,78
Sc	10	4,2	3,6	2,2
Se	0,05	0,8	0,3	1
Sn	2,5	1,9	1,8	1,7
Sr	340	78,9	57,3	69,6
Ta	2,5	<0,01	0,01	0,01
Te	0,002	<0,01	0,01	0,06
Th	13	3,9	1,6	2,9
Tl	1	1,43	0,23	0,1
U	2,5	<b>175,5</b>	<b>40,9</b>	<b>356</b>
V	90	14	10	6
W	1,3	3,15	183	5,54
Y	29	25,3	9,63	28
Zn	83	93	91	109
Zr	170	19,6	9,3	18,4

S obzirom na mesto i način pojavljivanja ove uranijumske anomalije, može se zaključiti sledeće. Iz mineralizovanih rastvora koji su cirkulisali kriz granite i riolite, a posebno kroz rasedne zone u njima, na geohemijski povoljnim mestima (prostori sa mineralima glina i gvožđa) vršeno je obaranje uranijuma (v. odeljak 4.3). Upravo minerali glina koji su nastali drobljenjem granita prilikom rasedanja su dosta prisutni u otkrivenoj strukturi. Takođe, u strukturi je registrovano značajno prisustvo minerala gvožđa (posebno limonita). I minerali glina i minerali gvožđa su u prirodi izuzetni apsorberi uranijuma.

**Ostale uranijumske anomalije**, koje su pokazale niže odbroje pri terenskom radiometrijskom pregledu (300 do 500 cps), su vezane za pukotinske sisteme u granitoidima koji se nalaze neposredno uz proboje riolita u okviru granitoidnog masiva, neposredno uz riolite. One, naravno, nisu ekonomski interesantne, ali mogu poslužiti kao dokaz da je glavni primarni izvor uranijumskih mineralizacija povezan sa granitoidima. Treba reći i to da stene sa povećanim sadržajem uranijuma ne sadrže torijuma više nego što su srednje fonske vrednosti za područje, što može da ukaže na to da se na tim mestima vrši deponovanje a ne ispiranje uranijuma.

Rezultati hemijskih analiza ukazuju na to da su konstatovane uranijumske mineralizacije praćene anomalnim sadržajima srebra, arsena, molibdena i olova.

Rioliti se nalaze u centralnom delu ispitivane oblasti, u zoni od oko 60 kvadratnih kilometara. Iako je oblast teško dostupna, ova ispitivanja bi mogla biti značajna za buduće aktivnosti, zbog otkrivenih anomalija uranijuma, koje se mogu smatrati mineralizacijama. Koncentracije uranijuma određene u ovim mineralizacijama su u opsegu 50 - 600 mg kg<sup>-1</sup>. Poslednja vrednost je oko 240 puta viša od prosečne vrednosti za Zemlju.

**Pojave torijuma.** Na istražnom području većina povećanih koncentracija torijuma nalazi se u granitoidima neposredno uz kontakt sa riolitima, zapadno od riolita. Radi se o relativno niskim sadržajima torijuma sa vrednostima od 30 do 72 mg kg<sup>-1</sup>. Opšta ocena je da su registrovane pojave torijuma malog inteziteta i da kao takve nemaju većeg značaja. S obzirom na koncentracije, otkrivene mineralizacije ne zaslužuju posebnu pažnju.

**Kalijum.** Uzimajući u obzir da je srednja koncentracija kalijuma u Zemljinoj kori oko 2,5%, a u magmatskim stenama 3,3%, rezultati prikazani u tabeli 5 ukazuju na nešto povećane sadržaje ovog elementa u riolitskim i granitoidnim stenama područja Džabal Egi. Najvažniji nosači uranijuma su primarne kalk-alkalne i alkalne magmatske stene, u kojima kalijum preovladava u odnosu na natrijum. Koncentracije uranijuma se smanjuju kako se ide prema alkalnijim i prema kalcijum-magnezijumskim tipovima granitoidnih kompleksa.

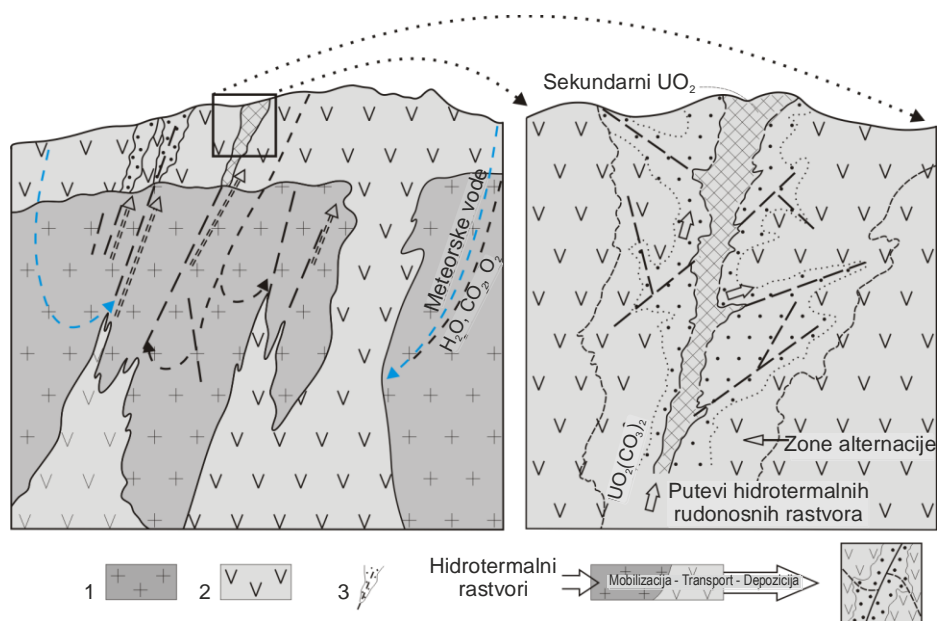
### **4.3 Uprošćeni genetski model uranijumskih mineralizacija u području Džabal Egija**

Glavni primarni izvor uranijumskih mineralizacija su granitoidi. Uranijum je iz njih uglavnom mobilisan putem hladnih rastvora koji su cirkulisali kroz granite i riolite, a posebno kroz rasedne zone u njima, i deponovao na geohemijski povoljnim mestima (prostori sa mineralima glina, oksidima gvožđa itd.). U početnoj fazi, a to je faza magmatske diferencijacije, uranijum je uglavnom bio vezan sa petrogenim mineralima granitoida, kao što su feldspat i biotit [34]. Mada je koncentracija uranijuma u ovim mineralima relativno niska (npr. srednja koncentracija u feldspatu je  $10^{-6}$  %), ukupna količina uranijuma koji je na ovaj način vezan u ovim stenama je velika, zbog velike količine ovih stena i nosećeg minerala u njima. S druge strane, koncentracija uranijuma u biotitu, su oko pet puta više nego srednje koncentracije u magmatskim stenama. To takođe može biti od značaja za rudne depozite. Pored tragova uranijuma u petrogenim mineralima magmatskih stena, on se u njima takođe pojavljuje i u obliku nezavisnih minerala, katjonskih zamena u akcesornim mineralima granitoidnih kompleksa i vulkanita, kao i na površinama kristala.

Imajući u vidu genezu rudnih depozita i mogućnosti formiranja uranijumskih koncentracija koje bi bile ekonomski interesantne, koje su prostorno i genetski vezane za kisele i intermedijerne magmatske komplekse, njihovo ispiranje je od posebnog interesa. Ono je povezano s mogućnostima mobilizacije uranijuma iz primarnih izvora i njegovog koncentrisanja u sredini preko koje bi bio transportovan na mesta mineralizacije. Pod povoljnim fizičko-hemijskim i geohemijskim uslovima, teorijski oko 40% ukupnog uranijuma može biti mobilisano iz granitoidnih kompleksa. U vodenim rastvorima uranijum se najčešće javlja u obliku sulfatnih, karbonatnih, fosfatnih, hloridnih i fluoridnih kompleksa. Rastvorljivost ovih jedinjenja pretežno zavisi od pH i Eh vrednosti, temperature i fizičko-hemijskih svojstava rudonosnih fluida. Brojni faktori mogu imati uticaj na uranijumsku mineralizaciju [35] iz rudonosnih rastvora i pojavu mineralizacije u riolitskom masivu, a takvi su promene hemijskog sastava, degaziranje rastvora na svom putu kroz riolite, u hemijskim reakcijama sa kompleksima koji se nalaze u stenama itd. Najznačajniji faktori koji dovode do uranijumskih mineralizacija

su promene pH i Eh vrednosti, kao i promene koncentracije CO<sub>2</sub> duž puta rudonosnih rastvora od granita do riolita.

Imajući u vidu sve prikupljene podatke može se pretpostaviti da se uranijumske mineralizacije nalaze u prostornoj i genetskoj vezi sa magmatskim (vulkanskim) kompleksima – riolitima, koji su lokalizovani u markantnoj složenoj strukturi tektonskog ili vulkanogeno-tektonskog porekla (tip kaldera). To dalje znači da se ne isključuje mogućnost da se radi o vulkanogenim uranskim mineralizacijama. Neki zanimljivi podaci o masivu Tibestija generalno, ali i o području Džabal Egija, a koji se odnose na ovo pitanje, se mogu naći u naučnoj literaturi [36,37]. Prostorni položaj postorogenog magmatizma koji istovremeno predstavlja i litoliški kontrolni faktor položaja orudnjenja, je kontrolisan mestima preseka dubokih razlomnih zona. U zavisnosti od strukturnog i litološkog kontrolnog faktora, nalaze se i oblici rudnih tela.



**Slika 19.** Shematski prikaz genetskog modela obrazovanja uranijumske mineralizacije u riolitima regiona Džabal Egija: 1 – granitoidne stene; 2 – rioliti; 3 – uranijumska mineralizacija [38]. Dužina stranice kvadrata je 300 m.

Slika 19 prikazuje moguće položaje i oblike rudnih tela, kao i model formiranja uranijumskih mineralizacija. Na uranijumskoj pojavi i rudna tela su najverovatnije u vidu rudnih stubova. Glavni rudni mineral je pehblenda, a ne isključuje se mogućnost prisustva i kofinita, uraninita i titanata uranijuma. Do sveobuhvatnog objašnjenja



geneze ovih uranijumskih mineralizacija može se doći nakon detaljnih geoloških istraživanja.

Na osnovu svih rezultata koji su ovde izneti stvoreno je opravdano uverenje da bi istraživanja oblasti Džabal Egi, a pre svega njegov deo koji se sastoji od riolita, trebalo nastaviti, pošto to može biti od značaja za otkrivanje nuklearnih mineralnih sirovina.

## 4.4 Procena radijacionog rizika

Rezultati dobijeni merenjem radioaktivnosti uzoraka su iskorišćeni za izračunavanje sledećih parametara radijacionog rizika: *ukupne apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu na visini 1 m od tla ( $D$ , nGy h<sup>-1</sup>), radijumu ekvivalentne aktivnosti ( $Ra_{eq}$ , Bq kg<sup>-1</sup>), indeksa spoljašnjeg hazarda ( $H_{ex}$ ) i godišnje efektivne doze spoljašnjeg zračenja AED<sub>outdoor</sub>, μSv).*

### 4.4.1 Specifične aktivnosti <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K i najvažniji parametri radijacionog rizika

Koncentracije navedenih (značajnih) radioizotopa u uzorcima (Bq kg<sup>-1</sup>), tj. njihove specifične aktivnosti ( $A$ ), određene su iz gamaspektrometrijskih merenja na već opisani način. One su korišćene za izračunavanje značajnih parametara radijacionog rizika i to: *ukupne apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu na visini 1 m od tla, radijumu ekvivalentne aktivnosti, indeksa spoljašnjeg hazarda i godišnje efektivne doze spoljašnjeg zračenja.* Definicije i načini izračunavanja ovih parametara su dati niže. Pomoću tih parametara može se izvršiti odgovarajuća procena rizika po ljude koji bi boravili u istraživanom području [24]. Parametri koji su bliže povezani sa zdravljem kao što su *procenjene doze za specifične organe ili rizik za pojavu kancera* nisu ovde izračunavane, jer su ispitivane lokacije nenaseљene. Međutim, za neke uzorke je izračunata veličina koja se naziva *rizik za pojavu kancera usled izloženosti od 1 godine* (LTCMR - *the lifetime cancer morbidity risk, one year exposure*), kao specifična mera rizika za pojavu kancera pri eventualnom povremenom boravku u ovoj oblasti. Takvi

boravci bi se mogli očekivati u budućnosti, s obzirom na otkrivene uranijumske anomalije i njihovo dalje istraživanje radi eventualne eksploatacije.

### ***Radijumu ekvivalentna aktivnost***

Pojam *radijumu ekvivalentne aktivnosti* je uveden da bi se opisalo postojanje gama emisije iz različitih smeša uranijuma (odnosno radijuma), torijuma i kalijuma u materijalima, odnosno da bi se aktivnost prisutnih prirodnih radionuklida u materijalima izrazila preko jedne veličine, koja adekvatno opisuje pridruženi radijacioni rizik.

Iz vrednosti koncentracija radionuklida određenih na osnovu merenja radioaktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , izračunavana je *radijumu ekvivalentna aktivnost* ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) primenom sledeće jednačine [39]:

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1,43A_{Th} + 0,077A_K \quad (3)$$

Ova veličina je definisana podrazumevajući da  $370 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ } ^{226}\text{Ra}$ , ili  $259 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ } ^{232}\text{Th}$ , ili  $4810 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ } ^{40}\text{K}$  proizvodi istu dozu gama zračenja. Otuda i odgovarajući faktori u jednačini ( $1,43 = 370 : 259$  i  $0,077 = 370 : 4810$ ).

### ***Indeks spoljašnjeg hazarda***

*Indeks spoljašnjeg hazarda* je korisna veličina za procenu potencijalnog hazarda usled postojanja gama zračenja koja emituju radionuklidi od interesa. On predstavlja sumu odnosa radioaktivnih koncentracija razmatranih izotopa sa njihovim referentnim vrednostima, koje su određene kao prihvatljivi nivoi rizika. Indeks spoljašnjeg hazarda ( $H_{ex}$ ) se izračunava iz jednačine [39]:

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (4)$$

Kada je vrednost ovog indeksa iznad 1, tada je rizik iznad prihvatljivog nivoa. U tom slučaju bi trebalo preduzeti neke mere da se *radijumu ekvivalentna aktivnost* i *srednja godišnja doza* održe ispod dozvoljenih nivoa od  $370 \text{ Bq kg}^{-1}$ , odnosno  $1 \text{ mSv}$ , respektivno [40].

### ***Apsorbovana doza gama zračenja***

Koncentracije radionuklida od značaja  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u uzorcima zemljišta, koje su određene iz merenja, mogu se koristiti za procenu *apsorbovane doze gama zračenja iz zemljišta na 1 m iznad tla* ( $\text{nGy h}^{-1}$ ). Za određivanje *apsorbovane doze* su korišćeni konverzioni faktori ( $\text{nGy h}^{-1}$  per  $\text{Bq kg}^{-1}$ ) [41] iz izraza:

$$D = 0,462A_{\text{Ra}} + 0,604A_{\text{Th}} + 0,042A_{\text{K}} \quad (5)$$

iako je moguće koristiti i druge preporučene vrednosti [42-44]. Pritom se smatra da su produkti raspada radionuklida  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$  u ravnoteži i da je doprinos ostalih prirodnih i veštačkih radionuklida zanemarljiv [45].

### ***Godišnja efektivna doza spoljašnjeg zračenja***

*Godišnja efektivna doza spoljašnjeg zračenja* ( $\text{AED}_{\text{outdoor}}$ ,  $\mu\text{Sv}$ ) se dobija iz apsorbovane doze gama zračenja primenom faktora koji uzimaju u obzir kategoriju izloženog stanovništva (odrasli) i prosečno vreme koje se provodi u ispitivanoj oblasti (outdoor occupancy factor). Za preporučene vrednosti ovih faktora od  $0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$  i  $0,2$  (UNSCEAR) [41]  $\text{AED}_{\text{outdoor}}$  je dato kao:

$$\text{AED}_{\text{outdoor}} = D \cdot N_h \cdot 0,7 \cdot 0,2 \quad (6)$$

gde je  $D$  – apsorbovana doza gama zračenja u vazduhu ( $\text{nGy h}^{-1}$ ), a  $N_h$  – broj sati u jednoj godini (8760).

Dobijene koncentracije  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  i odgovarajuće apsorbovane doze gama zračenja ( $D$ ) su prikazane u tabeli 8, dok su vrednosti ostalih veličina za procenu rizika date u tabeli 9. Deo rezultata koji se navode u tablici 8 je već ranije dat u tabeli 4, ali je ovde to ponovljeno da bi se lakše uočio njihov značaj u jednom drugačijem kontekstu.

**Tabela 8.** Koncentracije radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  i odgovarajuće doze gama zračenja koje potiču od ovih radioizotopa u uzorcima iz Džabal Egija, dobijene iz gamaspektrometrijskih merenja. Izotopi  $^{137}\text{Cs}$  ili  $^{90}\text{Sr}$  nisu detektovani u uzorcima.

Uzorak		Koncentracija A ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )			D ( $\text{nGy h}^{-1}$ )
Broj	Kod	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	
1	186	42±4	53±4	1261±76	104,4±7,8
2	187	61±6	60±6	1281±86	118,1±9,7
3	188	60±6	64±6	1433±94	126,2±10,4
4	191	96±7	88±7	1386±86	155,8±11,0
5	193	102±8	88±7	1462±91	161,6±11,7
6	194	71±6	55±5	790±55	98,9±8,3
7	198	67±6	54±5	1170±76	113,0±8,9
8	200	72±6	50±5	1157±75	112,2±8,7
9	201	53±5	32±4	1763±111	117,9±9,2
10	202	92±7	83±7	1591±99	159,6±11,6
11	203	108±10	147±12	1546±104	203,6±15,8
12	205	82±7	101±8	1245±82	151,5±11,5
13	207	87±7	96±8	1597±104	165,2±12,7
14	208	142±12	91±8	1749±118	194,0±15,5
15	209	233±16	122±9	1155±75	229,9±15,9
16	210	75±6	93±7	1513±93	154,3±11,1
17	211	56±5	81±6	1512±94	138,0±10,2
18	212	39±4	73±6	1383±86	120,3±8,9
19	213	54±5	75±6	1485±94	132,4±10,1
20	214	93±8	92±8	1576±100	164,5±12,2
21	215	114±9	78±7	1401±89	158,8±11,8
22	216	109±9	101±9	1495±99	174,2±13,7
23	217	99±9	101±9	1651±109	176,2±14,1
24	219	78±6	82±7	1067±69	130,8±9,9
25	220	147±12	129±10	2304±145	242,9±17,8
26	222	89±8	71±6	1551±101	148,7±11,6
27	223	74±6	80±7	1545±96	147,1±10,8
28	225	31±3	57±5	890±59	86,1±7,0
29	226	94±8	82±7	1240±82	144,9±11,5
30	227	58±6	85±7	1729±112	151,2±11,8
31	234	71±6	59±5	1092±72	114,4±9,0
32	235	109±9	88±7	1447±92	163,8±12,2
33	237	108±9	58±6	561±45	108,8±9,8
34	238	47±4	24±3	322±25	49,7±4,7
35	239	34±3	37±3	877±57	74,9±6,0

36	240	154±11	150±11	1517±95	225,3±15,6
37	241	264±18	221±15	1210±78	306,4±20,7
38	242	47±5	81±7	1533±97	134,9±10,1
39	243	98±8	93±7	1350±86	157,9±11,7
40	<b>244</b>	<b>1004±62</b>	63±7	875±65	538,6±35,7
41	<b>245</b>	<b>2954±167</b>	68±9	529±47	1428,0±85,0
42	<b>246</b>	<b>2891±163</b>	64±9	593±50	1399,6±82,5
43	248	116±9	55±5	995±68	128,4±10,3
44	249	62±6	58±5	1048±72	107,6±8,9
45	267	53±5	61±6	1148±79	109,2±9,3
46	268	63±6	55±5	1044±70	105,9±8,5
47	269	39±4	43±4	1284±85	97,7±8,2
48	270	22±2	11±1	256±20	27,5±2,8
49	271	25±3	14±2	132±13	25,5±2,9
50	272	34±4	62±5	1131±73	101,0±7,8
51	273	50±5	66±6	1204±78	113,3±8,8
52	274	36±3	64±5	1123±72	102,1±7,8
53	275	42±5	72±7	1120±76	110,1±9,3
54	<b>620</b>	<b>1322±80</b>	26±3	893±67	664,1±41,3
55	<b>621</b>	<b>2358±135</b>	61±9	983±74	1167,7±71,3
56	<b>622</b>	<b>2457±136</b>	62±7	750±53	1204,3±69,5
57	<b>624</b>	<b>5256±284</b>	0	140±20	2434,3±132,3
58	701	90±7	60±5	1374±88	135,5±10,4
59	702	85±7	104±8	1251±76	154,8±11,5
60	706	204±14	136±9	1333±83	232,5±15,5
61	707	77±7	61±5	1468±94	133,8±10,3
62	708	36±4	39±4	777±54	72,9±6,4
63	709	117±9	70±6	1296±82	150,8±10,8
64	710	114±8	68±6	1288±81	147,7±10,6
65	712d	45±4	39±4	1742±106	118,0±8,5
66	713	88±7	64±5	1774±108	154,2±10,9
67	2775	45±4	63±5	1242±77	110,7±8,1
68	2776d	64±5	59±5	1342±83	121,6±8,9
69	2778d	111±8	80±6	1451±90	160,8±11,4
<b>Srednja vred. (M)</b>		<b>339±21</b>	<b>73±6</b>	<b>1224±80</b>	<b>252</b>
<b>Svetski prosek (W)<sup>(7)</sup></b>		<b>33</b>	<b>45</b>	<b>420</b>	<b>59</b>
<b>M/W</b>		<b>10,26</b>	<b>1,62</b>	<b>2,91</b>	<b>4,27</b>
<b>SD</b>		<b>872</b>	<b>33</b>	<b>405</b>	<b>391</b>
<b>M1</b>		<b>83</b>	<b>75</b>	<b>1285</b>	<b>138</b>
<b>SD1</b>		<b>46</b>	<b>34</b>	<b>370</b>	<b>48</b>

Na dnu gornje tabele, srednje vrednosti i srednje svetske vrednosti za sve izmerene veličine date su zajedno sa njihovim odnosima, radi lakše analize. Odatle se može videti da su koncentracije  $^{226}\text{Ra}$  u veoma širokom opsegu od 22 do 5256 Bq kg<sup>-1</sup>, sa srednjom vrednošću od 339 Bq kg<sup>-1</sup>, što je više od 10 puta iznad svetskog proseka. Za neke uzorke ovaj odnos je čak 160. Iz prethodnih rezultata [25] poznato je da ovi uzorci odgovaraju otkrivenim mineralizacijama uranijuma, što objašnjava povišene aktivnosti radijuma. Istovremeno,  $^{232}\text{Th}$  se kreće u opsegu od 11 do 221 Bq kg<sup>-1</sup>, sa srednjom vrednošću 73 Bq kg<sup>-1</sup>, što je neznatno iznad svetskog proseka. Konačno,  $^{40}\text{K}$  je u opsegu od 132 do 2304 Bq kg<sup>-1</sup>, sa srednjom vrednošću od 1244 Bq kg<sup>-1</sup>. Ta vrednost je gotovo tri puta viša od svetskog proseka, dok je u nekim uzorcima ovaj odnos i do pet puta. Slično i u skladu sa koncentracijama, srednja vrednost izračunate *apsorbovane doze gama zračenja na 1m iznad tla* je više od 4 puta viša od svetskog proseka i čak 11 puta viša od doze 23,0 nGy h<sup>-1</sup>, koja je tipična za Tripoli [46], glavni grad Libije. Redosled izotopa prema njihovom udelu u dozi je: 62%, 17% i 20%, za  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , respektivno. Iz prikazanih rezultata se može izvući zaključak da je radioaktivnost ispitivanog terena značajno povišena, naročito na nekim mestima i svakako zahvaljujući uranijumskim anomalijama u riolitnim stenama.

**Tabela 9.** Radijumu ekvivalentna aktivnost, indeks spoljašnjeg hazarda i godišnja efektivna doza spoljašnjeg zračenja

Uzorak		$Ra_{eq}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$H_{ex}$	AED <sub>outdoor</sub> (μSv)
Broj	Kod			
1	186	215±16	0,580±0,044	128±10
2	187	245±20	0,662±0,055	145±12
3	188	261±22	0,705±0,059	155±13
4	191	329±23	0,888±0,064	191±13
5	193	340±25	0,919±0,067	198±14
6	194	210±18	0,567±0,048	121±10
7	198	235±19	0,634±0,051	138±11
8	200	233±18	0,629±0,049	138±11
9	201	235±19	0,633±0,051	144±11
10	202	334±25	0,901±0,067	196±14
11	203	437±34	1,181±0,093	250±19
12	205	323±25	0,872±0,067	186±14

13	207	347±27	0,938±0,073	203±15
14	208	407±33	1,099±0,089	238±19
15	209	496±34	1,341±0,093	282±19
16	210	325±24	0,876±0,064	189±14
17	211	287±21	0,777±0,058	169±12
18	212	250±19	0,676±0,051	148±11
19	213	275±21	0,743±0,057	162±12
20	214	345±26	0,933±0,070	202±15
21	215	334±25	0,902±0,068	195±14
22	216	369±29	0,996±0,079	214±17
23	217	371±30	1,002±0,082	216±17
24	219	278±21	0,752±0,057	160±12
25	220	509±38	1,376±0,102	298±22
26	222	309±24	0,834±0,066	182±14
27	223	307±23	0,828±0,062	180±13
28	225	181±15	0,488±0,040	105±9
29	226	306±25	0,828±0,067	178±14
30	227	314±25	0,847±0,067	185±14
31	234	240±19	0,647±0,052	140±11
32	235	345±26	0,933±0,070	201±15
33	237	235±21	0,635±0,057	133±12
34	238	106±10	0,286±0,027	61±6
35	239	154±12	0,417±0,034	92±7
36	240	485±34	1,310±0,091	276±19
37	241	673±45	1,819±0,123	376±25
38	242	281±21	0,758±0,058	165±12
39	243	334±25	0,903±0,067	194±14
40	<b>244</b>	1161±77	3,138±0,209	661±44
41	<b>245</b>	3092±184	8,356±0,498	1751±104
42	<b>246</b>	3029±179	8,186±0,484	1716±101
43	248	271±22	0,731±0,060	157±13
44	249	225±19	0,609±0,051	132±11
45	267	228±20	0,615±0,053	134±11
46	268	221±18	0,598±0,049	130±10
47	269	199±17	0,537±0,046	120±10
48	270	57±6	0,155±0,016	34±3
49	271	55±6	0,149±0,017	31±3
50	272	211±17	0,569±0,045	124±10
51	273	237±19	0,639±0,050	139±11
52	274	213±16	0,576±0,044	125±9
53	275	232±20	0,625±0,054	135±11
54	<b>620</b>	1428±89	3,860±0,240	814±51

55	<b>621</b>	2521±155	6,814±0,418	1432±87
56	<b>622</b>	2604±151	7,037±0,407	1477±85
57	<b>624</b>	5281±286	14,235±0,773	2985±162
58	701	196±22	0,760±0,059	166±13
59	702	267±25	0,892±0,067	190±14
60	706	456±33	1,354±0,091	285±19
61	707	384±22	0,747±0,058	164±13
62	708	182±14	0,410±0,037	89±8
63	709	273±23	0,856±0,062	185±13
64	710	313±22	0,838±0,061	181±13
65	712d	277±17	0,637±0,047	145±10
66	713	281±23	0,856±0,062	189±13
67	2775	232±17	0,621±0,046	136±10
68	2776d	257±19	0,680±0,050	149±11
69	2778d	307±24	0,912±0,065	197±14
		<b>M 535</b>	<b>1,451</b>	<b>M 309</b>
		<b>DL* 370</b>	/	<b>W 70,0</b>
		<b>M/DL 1,45</b>	-	<b>M/W 4,41</b>
		<b>SD 850</b>	<b>2,294</b>	<b>480</b>
		<b>M1 288</b>	<b>0,782</b>	<b>169</b>
		<b>SD1 104</b>	<b>0,283</b>	<b>59</b>

\* DL – Ova vrednost odgovara granici maksimalne doze za stanovništvo od 1 mSv.

Kao što se jasno vidi iz ove tabele 9, *radijumu ekvivalentna radioaktivnost* se kreće od 55 do 5281 Bq kg<sup>-1</sup> sa srednjom vrednošću od 537 Bq kg<sup>-1</sup>. To znači da srednja vrednost prevazilazi nivo koji odgovara maksimalno dozvoljenoj dozi za stanovništvo za gotovo 50%. Takođe, vredno je pomenuti da za uzorke 244-246 i 620-622, koji odgovaraju riolitnim stenama, kao i uzorak 624 (kvarcna breča), odnos između izračunatog Ra<sub>eq</sub> i maksimalne prihvatljive vrednosti (DL) je između 3 i 14. Ovi uzorci su uzeti sa dve specifične lokacije na kojima su otkrivene mineralizacije uranijuma [25], tako da je ovaj rezultat očekivan. Pozicije ovih mesta su već opisane u prethodnom tekstu. *Indeks spoljašnjeg hazarda H<sub>ex</sub>*, što je modifikacija *radijumu ekvivalentne aktivnosti*, pokazuje slično ponašanje. Srednja vrednost dobijena za naše uzorke je takodje 50% iznad prihvatljivog nivoa tj. iznad 1. Međutim, u nekim slučajevima koji su pomenuti ova vrednost je znatno viša i ide i do 14. Redosled izotopnih udela u ukupnim Ra<sub>eq</sub> and H<sub>ex</sub> vrednostima je 63%, 19% i 18%, za <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K, respektivno. Tako, <sup>226</sup>Ra opet ima najveći udeo (gotovo dve trećine) dok je ostatak podjednako podeljen između



$^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ . Konačno,  $\text{AED}_{\text{outdoor}}$  vrednosti su u opsegu 31 do 2985  $\mu\text{Sv}$ , sa srednjom vrednošću od 309  $\mu\text{Sv}$ . Ova vrednost je 4,41 puta viša od svetskog proseka za  $\text{AED}_{\text{outdoor}}$  iz prirodnih izvora iz zemljišta [41], ali samo 0,309 puta viša od maksimalne dozvoljene doze za stanovništvo, po preporukama ICPR [40].

Standardne devijacije (SD) izračunate za sve veličine u tabelama 8 i 9 i za sve ispitivane uzorke (69) imaju vrednosti koje su znatno iznad srednjih vrednosti odgovarajućih veličina. Očigledno je da ovako velika razlika potiče od 7 uzoraka (244-246, 620-622 i 624), u kojima je koncentracija radijuma-226 (tabela 8) veoma visoka zbog mineralizacija uranijuma. Kada se ovih 7 uzoraka eliminiše iz tabela, dobijene srednje vrednosti (M1) i odgovarajuće standardne devijacije (D1) postaju očekivane za uobičajenu distribuciju. Pored toga, slična analiza za koncentracije torijuma i kalijuma u tabeli 8 pokazuje zanemarljive razlike između M-M1 i D-D1 vrednosti.

Monitoring radioaktivnosti zemljišta je generalno od najvećeg značaja za planiranje regionalnog i urbanog razvoja. Međutim, rezultati dobijeni u ovom radu neće, naravno, biti korišćeni u te svrhe, jer je istraživana oblast nenaseljena, ali mogu biti korišćeni za geopatološko kartiranje. Ipak, treba napomenuti da se rioliti iz ovog područja ne bi smeli koristiti kao građevinski material.

Pored izmerenih i izračunatih veličina datih u ovom radu, moguće ljudske aktivnosti u budućnosti usled postojanja uranijumskih mineralizacija u ovoj oblasti, kao i njihovog ekonomskog potencijala u smislu eksploatacije nuklearnih sirovina, mogu usloviti potrebu za procenom nekih specifičnih faktora rizika, uprkos tome što teren nije naseljen. Najilustrativniji među njima je verovatno *rizik od pojave kancera tokom života nakon 1 godine izloženosti (LTCMR)*. Kao što je prikazano u tabelama 8 i 9, najveći rizik dolazi od  $^{226}\text{Ra}$ , naročito u onim delovima terena (odnosno u odgovarajućim uzorcima) gde su nađene izuzetno visoke koncentracije uranijuma [25]. Rezultati izračunavanja LTCMR za  $^{226}\text{Ra}$  u uzorcima sa najvećim sadržajem uranijuma (i radijuma-226) prikazani su u tabeli 10, koja je dobijena primenom EPA uputstva za izloženost zračenju iz životne sredine [47] i UNSCEAR [41] vrednosti za koncentraciju prašine u vazduhu od  $50 \mu\text{g m}^{-3}$  (neophodno za izračunavanje inhalirane količine), i za srednju količinu, od  $100 \text{ mg day}^{-1}$ , koja se direktno unosi ingestijom. Mogućni meteorološki uticaji nisu uzeti u obzir.

**Tabela 10.** Procenjeni rizik od pojave kancera tokom života nakon 1 godine izloženosti (LTCMR) za  $^{226}\text{Ra}$ , za uzorke sa najvećom obilnošću

Uzorak kod	$^{226}\text{Ra}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	LTCMR inhalacija	LTCMR ingestija	LTCMR spoljašnje ozračivanje	Ukupno LTCMR
244	1004	$1,14 \times 10^{-7}$	$7,22 \times 10^{-7}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$1,16 \times 10^{-4}$
245	2954	$3,34 \times 10^{-7}$	$2,12 \times 10^{-6}$	$3,38 \times 10^{-4}$	$3,41 \times 10^{-4}$
246	2891	$3,27 \times 10^{-7}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$3,31 \times 10^{-4}$	$3,33 \times 10^{-4}$
620	1322	$1,50 \times 10^{-7}$	$9,51 \times 10^{-7}$	$1,51 \times 10^{-4}$	$1,52 \times 10^{-4}$
621	2358	$2,67 \times 10^{-7}$	$1,70 \times 10^{-6}$	$2,70 \times 10^{-4}$	$2,72 \times 10^{-4}$
622	2457	$2,78 \times 10^{-7}$	$1,77 \times 10^{-6}$	$2,81 \times 10^{-4}$	$2,83 \times 10^{-4}$
624	5256	$5,95 \times 10^{-7}$	$3,78 \times 10^{-6}$	$6,02 \times 10^{-4}$	$6,06 \times 10^{-4}$

Iz svega navedenog se može videti da su neke koncentracije  $^{226}\text{Ra}$  od 30 do 160 puta više od svetskog proseka, koji je 33 Bq kg<sup>-1</sup> [41]. Tako je i procenjeni LTCMR za radijum relativno visok. Takođe, značajan broj uzoraka pokazuje povećavu obilnost  $^{40}\text{K}$ , tipično tri do četiri puta veću od svetskog proseka od 420 Bq kg<sup>-1</sup> [41]. Ipak, odgovarajuće vrednosti LTCMR nisu uključene u gornju tablicu jer ne doprinose u većoj meri ukupnoj vrednosti. Aktivnost torijuma je samo neznatno povišena u poređenju sa svetskim prosekom od 45 Bq kg<sup>-1</sup>, osim u manjem broju uzoraka.

## 5 ZAKLJUČCI

U ovoj disertaciji su merenjem radioaktivnosti utvrđene koncentracije najvažnijih materijala NORM-a, tj. koncentracije uranijumovih izotopa  $^{238}\text{U}$  i  $^{235}\text{U}$ , zatim  $^{226}\text{Ra}$ , te  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , u uzorcima stena koji su prikupljeni u području riolitkog masiva Džabal Egi (Jabal Egghi) – Kangara na dalekom jugoistoku Libije, prilikom izrade geološke karte područja. To područje je deo šire oblasti planinskog masiva Tibesti, koji je najveći planinski lanac u Sahari, a pripada listovima NF 34-1 i NF 34-5 geoloških karata 1:250.000. I ono i njegova šira okolina su nenaseljeni i predstavljaju kamenitu pustinju. U disertaciji je dat i pregled dosadašnje istorije istraživanja ove zanimljive i egzotične oblasti, iz kojeg se vidi da su se istraživanja uglavnom odnosila na širu oblast Tibestija, dok je područje Džabal Egija samo sporadično doticano. Takođe, dati su opisi najvažnijih tipova stena koje su tamo nađene i njihove fotografije, kao i geološka karta područja.

Za određivanje radioaktivnosti je korišćena metoda gama-spektrometrije visoke rezolucije. Na ovaj način su određeni ne samo koncentracije navedenih izotopa već i ukupni sadržaji odgovarajućih elemenata. Dobijeni rezultati su provereni metodom ICP-MS i metodom XRF.

Posebna pažnja je posvećena uranijumu, kako zbog njegove važnosti kao potencijalne nuklearne energetske sirovine, tako i sa aspekta ekologije. Tako, u riolitima koji probijaju granite otkrivene su dve lokacije sa izrazito povećanim koncentracijama ovog elementa u odnosu na lokalni fon, koje se mogu smatrati uranijumskim mineralizacijama. Pozicije lokacija su ( $23^{\circ}14' 23.2''$ ;  $19^{\circ}17' 04''$ ) i ( $23^{\circ}13'42''$ ;

19°16'05"), a koncentracije uranijuma u njima se kreću od 95 do oko 290 mg kg<sup>-1</sup> (anomalija I), odnosno od 40 do oko 600 mg kg<sup>-1</sup> (anomalija II).

Pojave neznatno povećanih koncentracija torijuma (od 30 do 72 mg kg<sup>-1</sup>) u odnosu na prosečne vrednosti su nađene u granitoidima neposredno uz kontakt sa riolitima. S obzirom na nivo koncentracija, otkrivene mineralizacije ne zaslužuju posebnu pažnju.

Dobijeni rezultati ukazuju na nešto povećane sadržaje kalijuma u riolitskim i granitoidnim stenama područja Džaba Egi u odnosu na njegovu srednju koncentraciju u Zemljinoj kori od oko 2,5%, a u magmatskim stenama 3,3%. Najvažniji nosioci uranijuma su primarne kalk-alkalne i alkalne magmatske stene, u kojima kalijum preovladava u odnosu na natrijum. Koncentracije uranijuma se smanjuju kako se ide prema alkalnijim i prema kalcijum-magnezijumskim tipovima granitoidnih kompleksa.

Pored toga što se merenjem radioaktivnosti određene koncentracije navedenih izotopa i elemenata, ono je poslužilo za postavljanje osnova za mape prirodne radioaktivnosti područja, kao i za procenu radijacionog rizika po stanovništvo i životnu sredinu.

Tako, određene su specifične aktivnosti radionuklida <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K, kao radioizotopa koji dominantno doprinose gama-emisiji koja potiče iz tla. Na osnovu ovih merenja su određivani sledeći parametri radijacionog rizika: *apsorbovana doza gama zračenja u vazduhu na 1 m od tla (D, nGy h<sup>-1</sup>)*, *radijumu ekvivalentna aktivnost (Ra<sub>eq</sub>, Bq kg<sup>-1</sup>)*, *indeks spoljašnjeg hazarda (H<sub>ex</sub>)* i *godišnja efektivna doza usled spoljašnjeg izlaganja (AED<sub>outdoor</sub>, μSv)*, kao i *rizik od pojave kancera tokom života nakon 1 godine izloženosti (LTCMR)*. Dobijene vrednosti ovih parametara ukazuju na povišeni radijacioni rizik u odnosu na svetski prosek. U centralnom delu ove oblasti procenjeni radijacioni rizik je vrlo visok, uglavnom zbog povišenih koncentracija <sup>226</sup>Ra, što je posledica uranijumskih anomalija koje su otkrivene u ovom regionu.

Na osnovu svih rezultata koji su ovde izneti stvoreno je opravdano uverenje da bi istraživanja oblasti Džabal Egi, a pre svega njegovog dela koji se sastoji od riolita, trebalo nastaviti, pošto je to od značaja za definisanje ležišta nuklearnih mineralnih sirovina.

## LITERATURA

- [1] Fortescue J.A.C., Landscape geochemistry - retrospect and prospect - *Appl. Geochem.* 7 (1990), 1-53.
- [2] Levinson A.A. (1980) – Introduction to exploration geochemistry. 2nd ed., Applied Publishing Ltd., Wilmette, Ill., p. 929.
- [3] Vernadskiĭ, V.I., 1983. Ocherki geohimii, Nauka, Moskva. (In Russian).
- [4] Dalloni, M. 1934. Geologie et Tectonique. In: Mission au Tibesti (1930-31). Mem. Accad. Sci. Ser. 2, vol.61 (1), pp.118-167, Paris.
- [5] Lacroix, A. 1934. Mission au Tibesti (1930-31) dirigee par M. Dalloni, volcanism et lithologie. Memoire Accademie de Sciences, Ser.2., Vol. 61., pp. 169-366. Paris.
- [6] Choubersky, A. De. 1934. Mission au Tibesti; Lithologie: Etude des roches antecambriennes. Memories Academie Science, Ser.2. vol.61, pp. 98-117. Paris.
- [7] Desio, A. 1942. Il Sahara Italiano. Il Tibesti Nord-Orientale. Publ. R. Soc. Geogr. Ital., pp.1-232, Roma.
- [8] Desio, A. 1942. Il Tibesti Nordorientale. Reale Soc. Geographica Italiana. (English translation by M. Pedroni). Roma.
- [9] Hecht, F., Fürst, M. Z. Klitzsch, E. 1964. Zur Geologie von Libyen (Contribution ala geologie de la Libye). Geol. Rundschau Dtsch., Vol.53, No.2, pp. 413-470, 2 fig., 3 pl., 2 cartes, Stuttgart.
- [10] Klitzsch, E. 1965. Zur regional geologischen Position des Tibesti massivs. Max Richter Festschrift, 65 Geburstag, pp. 111-125. Clausthal-Zellerfeld.
- [11] Klitzsch, E. 1966. Comments on the geology of the central parts of southern Libya and northern Chad. Petrol. Explor. Soc. Libya, 8<sup>th</sup> Ann. Field Conf., 1966, South-Central Libya, pp. 1-17, Tripoli.

- [12] Ergenzinger, P. 1966. Road log Bardai Iron au Natron (Tibesti). Petroleum Exploration Society of Libya, 8<sup>th</sup> Annual Field Conference, 1966. South central Libya, pp. 89-94. Tripoli.
- [13] Hagedorn, H. 1966. Landforms of the Tibesti region. Petroleum Exploration Society of Libya, 8<sup>th</sup> Annual Field Confer. pp. 53-58. Tripoli.
- [14] Hagedorn, H. 1971. Untersuchungen über Relieftypen ariden Raume an Beispilen aus dem Tibesti – Gebirge und seiner Umgebung. Zeitschrift. v. Geomorphologie, Neue Folge, Supplem, Vol. 11, p. 1-251. Berlin - Stuttgart.
- [15] Hagedorn, H. & Pachur, H.J. 1971. Observations on climatic geomorphology and Quaternary evolution of land-forms in South-central Libya. In: C. Gray. edit.: Symposium Geology of Libya, pp. 378-400. Tripoli.
- [16] Hagedorn, H. 1980. Geological and Geomorphological observations the Northern Slope of the Tibesti Mountains, Central Sahara. In: M.J. Salem & M.T. Busrewil eds: The Geology of Libya, vol. III, pp. 823-835. London.
- [17] Goudarzi, G. H. 1970. Geology and Mineral Resources of Libia. A Reconnaissance. U.S. Geol. Survey Prof. Paper, No.660, p. 104., Washington.
- [18] Suayah, I. B. 1984. Geochemistry, Chronology and Petrogenesis of the Wādi Yebique pluton, Central Tibesti Massif, Libya. M. Sc. Thesis, North Carolina University, Chapel Hill.
- [19] Suayah, I. B. & Rogers, J. J. W. 1986. Geochemistry, Chronology and Petrogenesis of the Wādi Yebique Pluton. Central Tibesti Massif. Libya. Journal of African Earth. Sci. vol. 5, pp. 413 – 422. Amsterdam.
- [20] El-Makhrouf A. A. 1984: Geology, petrology, geochemistry and Geochronology of Eghi (Nugay) batholiths alkali-rich granites, NE Tibesti, Libya. Unpublished MSc thesis, University of North Carolina at Chapel Hill, 289p.
- [21] El-Makhrouf A. A., Tectonic interpretation of Jabal Eghei area and its regional application to Tibesti orogenic belt, south central Libya (S.P.L.A.J.), Journal of African Earth Sciences (and the Middle East) 7(7-8) (1988), 945-967.
- [22] El-Makhrouf, A. A. 1990. Geologic Studies on the Tibesti massif, South Central Libya. Ph. D. thesis, North Carolina University, p. 267. Chapel Hill.
- [23] Kovačević J. i dr.: Geological investigations of gold mineralization and the accompanying polymetallic mineralizations (Ag, Cu,Pb,Zn, Mo, U, etc.) in a part of Jabal Eghi area, Libya; TECHNICAL REPORT And First Project Results; Beograd –Tripoli, 2010.
- [24] M. B. Tereesh, M. B. Radenkovic, J. Kovacevic and S. S. Miljanic, Terrestrial Radioactivity of the Jabal Eghei Area in Southern Libya and Assessment of the

Associated Environmental Risks, *Radiation Protection Dosimetry* 2012; doi: 10.1093/rpd/ncs124.

- [25] Kovačević, J., Tereesh, M. B., Radenković, M. B. and Miljanić, Š. S. Discovery of uranium mineralizations in the rhyolite-granite complex in the Jabal Eghei area of southern Libya, *J. Serb. Chem. Soc.* (2012) doi: 10.2298/JSC120919124K.
- [26] Beus, A.A., Grigorijan S.V., 1975: Geochemical methods of exploration of solid mineral raw materials, sub. 278, “Nedra”Moscow.
- [27] Knoll, G.E., 2000. Radiation Detection and Measurement, third ed. John Wiley & Sons, New York.
- [28] Thomas R., Practical Guide to ICP-MS, Marcel Dekker, Inc., New York, 2004.
- [29] Firestone, R. B. Table of Isotopes (8<sup>th</sup> edition – book and CD, V. S. Shirley, Ed., Updates available at <http://ie.lbl.gov/toibook.html>), John Wiley & Sons, Inc., New York (1996).
- [30] Gilmore, G.R., 2008. Practical Gamma-Ray Spectrometry, second ed. John Wiley & Sons, Warrington (UK).
- [31] Gilmore G, Hemingway J. *Practical Gamma-Ray Spectrometry*. John Wiley & Sons, Chichester: 1995, ISBN 0-471-95150-1.
- [32] Beus, A.A., Grigorian, S.V., 1977. Geochemical exploration methods for mineral deposits, Applied Publishing Ltd., Wilmette (IL-USA).
- [33] Romberger, S.M., 1984. Transport and deposition of uranium in hydrothermal systems at temperatures up to 300 °C: Geological implications, in: De Vivo, B. (Ed.), Uranium geochemistry, mineralogy, geology, exploration and resources, The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 12–17.
- [34] Moreau, M., 1977. L'uranium et les granitoides—essai d'interpretation (in French), in: Jones, M. J. (Ed.), Geology, mining, and extractive processing of uranium: London, Institution of Mining Metallurgy, pp. 83–102.
- [35] Jaireth, S, McKay, A and Lambert, I 2008, ‘Association of large sandstone uranium deposits with hydrocarbons’, *AusGeo News*, 89:8-12.
- [36] Suayah, I.B., Miller, J.S., Miller, B.V., Bayer, T.M., Rogers, J.J.W., 2006. Tectonic significance of Late Neoproterozoic granites from the Tibesti massif in southern Libya inferred from Sr and Nd isotopes and U–Pb zircon data, *J. Afr. Earth. Sci.* 44, 561–570.
- [37] Makkrouf, A.A., 1988. Tectonic interpretation of Jabal Eghei area and its regional application to Tibesti orogenic belt, south central Libya (S.P.L.A.J.), *J. Afr. Earth. Sci.* (and the Middle East) 7(7-8), 945–967.

- [38] Toljić M., Kovačević, J., 2010: Geological map of Libya 1:250 000; Sheet Wadi Eghei NF 34-1 General Report (Mineral raw materials), str. 264-299.
- [39] Beretka, J. and Mathew, P. J. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and byproducts. *Health Phys.* 48, 87–95 (1985).
- [40] United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations, New York (1998).
- [41] United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR). Exposure from natural radiation sources. United Nations, New York (2000).
- [42] Saito, K. and Jacob, P. Gamma ray fields in the air due to sources in the ground. *Radiat. Prot. Dosim.* 58, 29–45 (1995).
- [43] Clouvas, A., Xanthos, S., Antonopoulos-Domis, M. and Silva, J. Monte Carlo calculation of dose rate conversion factors for external exposure to photon emitters in soils. *Health Phys.* 78, 295–302 (2000).
- [44] Quindos, L. S., Fernandez, P. L., Rodenas, C., Gomez-Arozamena, J. and Arteche, J. Conversion factors for external gamma dose derived from natural radionuclides in soils. *J. Environ. Radioact.* 71, 139–145 (2004).
- [45] Jacob, P., Paretzke, H. G., Rosenbaum, H. and Zankl, M. Effective dose equivalents for photon exposure from plane sources on the ground. *Radiat. Prot. Dosim.* 14, 299–300 (1986).
- [46] Shenber, M. A. Measurement of natural radioactivity levels in soil in Tripoli. *Appl. Radiat. Isot.* 48, 147–148 (1997).
- [47] U.S. Environmental Protection Agency (EPA) Cancer risk coefficients for environmental exposure to radionuclides, Federal Guidance Report 13. EPA 402–R-99-001, Oak Ridge National Laboratory (1999).



## BIOGRAFIJA

LIČNI PODACI: **Mehdi Bashir Tereesh** je rođen 07. aprila 1962. u Tažuri (Libija). Državljanin je Libije.

OBRAZOVANJE: U Tažuri je, u periodu od 1976. do 1979. godine, završio tzv. *nižu i srednju* školu. Studirao je u SSSR na Hemijskom fakultetu Lenjingradskog državnog univerziteta im. A. A. Ždanova (sada Sankt-Peterburški državni univerzitet) u periodu 1981-1988, gde je stekao zvanje *magistar hemijskih nauka* specijalizacija *radiohemija*. Diploma stečena na navedenom univerzitetu je odlukom Univerziteta u Beogradu od 18.06.2009. godine priznata kao diploma *magistra fizičkohemijskih nauka*. Od 2008. godine Mehdi Bashir Tereesh je student doktorskih studija Fakulteta za fizičku hemiju.

RADNO ISKUSTVO: Od 1988. do 2007. god. je bio zaposlen u Centru za nuklearna istraživanja u Tažuri (TNRC, Libija), Sektor za istraživanje i razvoj, gde je radio na:

- istraživanju i razvoju metoda za proučavanje i odvajanje određenih elemenata iz ruda i vode,
- tretmanu tečnog i čvrstog radioaktivnog otpada (RAO),
- solidifikaciji hemijskog i radioaktivnog otpada,

- koordinaciji projekata na polju odlaganja RAO sa IAEA<sup>3</sup> i drugim centrima,
- tretmanu otpadnih voda iz drugih hemijskih laboratorija,
- istraživanju i razvoju jonoizmenjivačke smole u centru za skladištenje RO,
- kontroli procedura za tretman i vođenje arhive za skladišteni radioaktivni otpad.

#### ISTRAŽIVANJA I OBUKA:

- 1- Regionalni kurs obuke za tehnike upravljanja radioaktivnim otpadom, Kairo – Egipat (28. maj -15. jun 1994.),
- 2- Regionalni kurs obuke o usvajanju i usklađivanju propisa o bezbednosti na polju upravljanja radioaktivnim otpadom, Akra – Gana (3 – 14. april 1995.)
- 3- Koordinator projekta u okviru tehničke saradnje podržanog od strane IAEA (Sustaining the Waste Management Infrastructure (AFRA I-4) - RAF/3/005-003) Simpozijum o radioaktivnom otpadu, Tuson SAD.

Govori: arapski, engleski, ruski i srpski jezik.

#### OBJAVLJENI NAUČNI RADOVI IZ OBLASTI DOKTORSKE DISERTACIJE:

1. Mehdi Bashir Tereesh; Mirjana B. Radenkovic; Jovan Kovacevic; Scepán S. Miljanic, Terrestrial Radioactivity of the Jabal Eghei Area in Southern Libya and Assessment of the Associated Environmental Risks, *Radiation Protection Dosimetry* 2012; doi: 10.1093/rpd/ncs124.
2. J. Kovačević, M. B. Tereesh, M. B. Radenković, Š. S. Miljanić, Discovery of uranium mineralizations in the rhyolite-granite complex in the Jabal Eghei area of southern Libya, *J. Serb. Chem. Soc.* (2012) doi: 10.2298/JSC120919124K.

---

<sup>3</sup> IAEA (International Atomic Energy Agency) – Međunarodna agencija za atomsku energiju (sa sedištem u Beču).

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а \_\_\_\_\_ Mehdi Bashir Tereesh \_\_\_\_\_

број индекса \_\_\_\_\_ 2008/0313 \_\_\_\_\_

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

\_\_\_\_\_ Радиоактивност риолитско-гранитоидних стена на подручју Џабал Егија  
\_\_\_\_\_ (Jabal Eghi) у јужној Либији \_\_\_\_\_

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

**Потпис докторанда**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске  
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора Mehdi Bashir Tereesh

Број индекса 2008/0313

Студијски програм Докторске студије физичке хемије

Наслов рада Радиоактивност риолитско-гранитоидних стена на подручју  
Цабал Егија (Jabal Eghi) у јужној Либији

Ментор Др Шћепан Миљанић, редовни професор, Универзитет у Београду -  
Факултет за физичку хемију

Др Мирјана Раденковић, научни сарадник, Институт за нуклеарне  
науке ВИНЧА, Универзитет у Београду

Потписани/а Mehdi Bashir Tereesh

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис докторанда**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Прилог 3.**

**Изјава о коришћењу**

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

---

Радиоактивност риолитско-гранитоидних стена на подручју Џабал Егија (Jabal Eghi) у јужној Либији

---

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

**Потпис докторанда**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_