UDK 550. 8 + 539. 16
YU ISSN 0351-4498

RADIOAKTIVNOST U PRIRODI

ZNAČAJ ZA ISTRAŽIVANJA U GEOLOGIJI

ANTONIJE ANTONOVIĆ

POSEBNA IZDANJA GEOINSTITUTA, KNJIGA 12 BEOGRAD, 1990

UDK 550.8+539.16
YU ISSN 0351—4498

Antonije Antonović

RADIOAKTIVNOST U PRIRODI
značaj za istraživanja u geologiji

Posebna izdanja Geoinstituta, knjiga 12

BEOGRAD
1989

REDAKCIJSKI ODBOR

Dr Antonije Antonović
Dragan Koprivica
Mr Milan Milojević
Dr Veljko Omaljev
Mr Damnjan Protić
Mr Bude Radulović
Nada Vasković

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK

Dr Veljko Omaljev

RECENZENTI

Dr Đorđe Bek-Uzarov

redovni profesor univerziteta
Prirodno matematički fakultet
»Svetozar Marković«
u Kragujevcu

Radosav Pantić

redovni profesor univerzlteta
Rudarsko geološki fakultet
u Beogradu

Izdavanje ove knjige materijalno su pomogli

Republička zajednica nauke Srbije
Združena elektroprivreda Srbije
Radna zajednica — stručne službe
za studije i istraživanja

PREDGOVOR

U svetskoj stručnoj publicistici ove vrste postoji znatan broj namenskih radova, usmerenih na radiometrijska izučavanja uopšte ili svedenih na metodologiju istraživanja određenih radioaktivnih materija, u prvom redu urana. Znatno više informacija u okviru ove teme stiče se međutim na međunarodnim skupovima, organizovanim od strane specijalizovanih agencija (na pr. IAEA u okviru UN), što je posebno istaknuto u uvodnom izlaganju.

Ova knjiga je sumar svih pojavnih oblika radioaktivnosti u prirodi u najsažetijem obliku, nedvosmisleno okrenuta prema geologiji, gde je ovaj značajan fenomen neopravdano zanemaren. Cela materija je izložena sa neophodnim minimumom fizičke i matematičke teoretske osnove, posebno kada je reč o oceni metodologije istraživanja urana. Uran, torijum i kalijum ne samo da su glavni nosioci radioaktivnosti u prirodi, već su uran i zasada u manjoj meri torijum u sagledivoj budućnosti i bez obzira na zloslutne ekološke pretnje, glavne energetske sirovine, koje se nikako ne mogu zaobići.

Pored glave o istraživanju urana, u knjizi su obrađena pitanja izotopne geologije, geohronologije, tehnike nuklearnih reaktora, zaštite od radioaktivnog zračenja, prirodnog nuklearnog reaktora Oklo. Kao poseban prilog nalazi se i tabelarni prikaz svih stabilnih izotopa kao i značajnijih radioizotopa sa neophodnim obeležjima. Na taj način je, bar donekle popunjena praznina u geološkoj literaturi na srpskohrvatskom jeziku, ako se izuzmu neka retka izdanja od pre tridesetak godina.* U najnovije vreme pažnju privlači i jedna knjiga na engleskom jeziku sličnog opusa,** ali i sa znatnim razlikama u odnosu na našu knjigu, u pogledu izbora, obima i namene materije.

Pisac je u ovaj rad uneo gotovo četrdesetogodišnje iskustvo istraživača geologa, ne samo na području radioaktivnih materija, kako u Jugoslaviji, tako i u mnogim drugim zemljama Azije i Afrike. Treba reći da je ova

---

* Ristić M., Đorđević L., Vičić D., 1957: Istraživanje radioaktivnosti mineralnih sirovina, Građevinska knjiga, Beograd, p. 132.

** Durrance E. M., 1986: Radioactivity in geology, principles and applications, E. Horwood Ltd, Halsted Press, p. 441.

knjiga bila predviđena kao delo dvojice autora, od kojih je jedan bio Slaviša Gojković, renomirani istraživač iz oblasti nuklearne geologije, koji se u samom početku priprema za rad na knjizi razboleo i ubrzo preminuo početkom 1987. godine. Njegovo je delo ugrađeno ne samo u vidu sugestija u pojedinim tumačenjima suptilnih fizičkih fenomena, već i kao neposredno učešće u nekim zajedničkim i posebnim eksperimentima, kako je to naznačeno u odgovarajućim odeljcima knjige.

Pisac izražava zahvalnost za izvanrednu pomoć u konačnoj redakciji teksta i mnogobrojne sugestije koje su dali prof. dr Đ. Bek-Uzarov, prof. R. Pantić, prof. dr O. Milošević i prof. dr D. Draškić, kao i za usluge koje je pružio dr P. Anastasijević u pripremnoj fazi za izdavanje knjige. U izboru i nabavci literature pisac duguje posebnu zahvalnost osoblju Biblioteke Instituta »Boris Kidrič« u Vinči, kao i N. Đorđeviću i F. Barbiču.

Podjednaku pomoć u diskusijama i sugestijama kao i u izboru literature autor je imao u prvom redu od M. Ignjatijevića, A. Lovrića, R. Nedimović, N. Simić, M. Petrovića, M. Milojevića, B. Ilića, M. Kneževića, M. Obrenovića, V. Filipović, S. Gertika, V. Omaljeva, R. Popovića, S. Konjevića, Z. Červenjaka, B. Potkonjaka, V. Ocokoljića i dr. Na kraju autor izražava zahvalnost J. Simić za izradu najvećeg dela grafičkih priloga na visokom profesionalnom nivou.

U grafičkoj opremi izbegnute su fotografije zbog neizbežnog pada kvaliteta usled presnimavanja, pa su one zamenjene reprodukcijama u vidu crteža.

Beograd, decembra 1988. godine

UVOD

Glavna tema ove knjige je traganje za uranom, koji je sredinom ovog veka uzdrmao svet, više nego bilo koja prirodna supstanca dotada i čija moć još uvek nije na zalasku. Masovnija istraživanja urana započeta su gotovo istovremeno u mnogim zemljama širom sveta, neposredno iza drugog svetskog rata. Razvijene zemlje, u prvom redu velike sile, mogle su da formiraju geološko-istraživačke timove za dati trenutak i potrebe, obučene za primenu radiometrijskih metoda, i da im pruže odgovarajuću terensku i laboratorijsku opremu, na nivou tadašnjeg znanja u svetu.

U manje razvijenim i nerazvijenim zemljama, koje su imale iste ambicije, ali gotovo ni jednu od pomenutih pogodnosti, naročito u početnim godinama, najčešće posle ratnih pustošenja, napore u organizovanju pratile su, pored ostalog i izuzetne teškoće usled potpunog zatvaranja pristupa postojećim iskustvima, u uslovima hladnog rata i užurbanog punjenja arsenala nuklearnim bojevim glavama, za koju je svrhu uran tada gotovo isključivo korišćen. Povrh svega toga, istraživanje urana je posebno bilo hendikepirano gotovo potpunim nedostatkom školovanog kadra na svim nivoima, naročito u zemljama koje su se oslanjale na sopstvene mogućnosti.

Uran je donekle izuzetan metal, ne samo zbog značaja kao važne energetske sirovine, već zbog načina istraživanja i specifičnog geohemijskog ponašanja. Istraživanjem urana pokriveni su danas svi kontinenti sa velikim, mada neujednačenim stepenom istraženosti i tek u najnovije vreme postoij tendencija da se, uporedo sa usporavanjem tempa izgradnje nuklearnih reaktora, ograniči potraga za uranom. Černobiljski akcident početkom 1986. je znatno osnažio ovu tendenciju, ali ipak sa većim usmeravanjem ka ovladavanju tehnikom sigurnijih i jeftinijih nuklearnih reaktora.

Uran kao i fisibilni proizvodi nuklearnih transmutacija su isključivo energetske sirovine, za razliku od ugljovodoničnih goriva, koja su isto tako značajne hemijske sirovine. Zato bi se, korišćenjem nuklearnih goriva bar za dogledno vreme usporilo korišćenje ovih drugih kao goriva, neracionalno sa gledišta strategije upotrebe sirovina uopšte. S druge strane, zahtev za ograničenje ili čak potpuno odstranjivanje nuklearne energije kao rizika zagađenja je pitanje koje duboko zadire u demografsku politiku u svetu. To znači da se moraju ili limitirati raslipnički prohtevi i neumereno korišćenje iscrpivih prirodnih resursa i zavesti najviša moguća reciklacija

sirovina, uz maksimalno korišćenje alternativnih izvora energije ili se mora drastično smanjiti populacioni priraštaj. Na taj način, pri dosadašnjem trendu životnih potreba, nuklearna energija se ne može isključiti, a da ne izazove duboke socijalne promene, za koje čovečanstvo još nije spremno. Uostalom, ni klasična goriva nisu, u krajnjem ishodu štetnosti, ništa manji zagađivači sa svojim kiselim kišama, ugljen dioksidom (efekat staklene bašte) i sl.

Osnovni pristup istraživanju nuklearnih sirovina, uključivši i izbor metode, zavisi od terenske situacije i stepena istraženosti, uz određen redosled i postupnost istraživanja u smislu detaljnosti, što se uostalom odnosi i na druge mineralne sirovine.

Neosporno je da su osnovni vid istraživanja nuklearnih sirovina radiometrijske metode, ali isto tako treba uvažavati činjenicu da ove metode bez neposrednog sagledavanja sveukupne geološke građe ispitivanog prostora, ne samo da gube značaj, već mogu da dovedu do pogrešnih zaključaka.

Od drugih vidova istraživanja treba navesti geohemijske metode (mada je izraz hemijske metode prikladniji, slično primeni izraza geofizičke metode), koje se odnose na detektovanje urana u vodama, stenama i u tlu. Od zapaženijeg značaja su uranohidrohemijska ispitivanja kao regionalna metoda, mada podređenija po efektima od radiometrijskih. Tu isto tako spada i detektovanje helijuma.

Ostale metode odnose se na konvencionalna geofizička i geološka istraživanja, primenjiva i kod nuklearnih sirovina.

Ovde treba razjasniti neke formalne nesporazume oko odgovarajuće upotrebe pojedinih izraza, simbola i oznaka. Upotreba termina elemenat nije prikladna u odnosu na nuklearne procese, pošto je elemenat kao atom, čije jezgro ostaje netaknuto, učesnik u hemijskim procesima, pa je stoga upotreba izraza »radioaktivni element« neadekvatna. Izraz »radioaktivni izotop« ili »radioizotop« zamenjen je po preporuci ISO (International Standardisation Organization) izrazom »radionuklid«, što je prihvaćeno i u jugoslovenskoj standardizaciji (JUS). Izraz izotop može se eventualno upotrebiti kod neradioaktivnih nuklida, kao na pr. »stabilni izotop«, isto kao i »stabilni nuklid«. Za opis karaktera zračenja obično se upotrebljava slovni naziv kao alfa, beta i gama, umesto simbola α, β i γ, kojima je više mesto u matematičkim izrazima. Umesto radioaktivnog zračenja treba upotrebljavati adekvatniji izraz »jonizujuće zračenje«. Gama zračenje se još naziva i energetsko zračenje, a gama zrak se često imenuje kao gama foton ili gama kvant.

Sve jedinice, ukoliko nisu opisno date, označuju se simbolima ili po fizičkim dimenzijama (ukoliko simbol ne postoji) prema Međunarodnom sistemu jedinica fizičkih veličina (SI). Kod nekih masovno primenjivanih jedinica ponegde su stavljene u zagradi i vrednosti u starim jedinicama, jedino ako se citira prema literaturi gde su one tako date, što se prvenstveno odnosi na R/h, odnosno μR/h ili eman i sl.

ISTORIJSKI PREGLED RAZVOJA ATOMISTIKE

Nastupanje atomske (tačnije nuklearne) ere vezuje se obično za godinu otkrića prirodne radioaktivnosti od strane francuskog fizičara Bekerela (Henri Becquerel) 1896, mada je ono podstaknuto otkrićem katodnih zraka od strane Rentgena (Röntgen), godinu dana ranije. Odmah po otkriću urana kao izvora zračenja Marija Kiri (Curie) — Sklodovska (Sclodowska) je otkrila sličnu osobinu kod torijuma. Ona je isto tako prva upotrebila elektroskop za merenje intenziteta zračenja, nazvavši istovremeno osobinu ovog zračenja — radioaktivnost. Bračni par Kiri (Marija i Pjer) je već krajem 1898. godine mogao da saopšti otkriće novih elemenata, radijuma i polonijuma, izvora neuporedivo jače radioaktivnosti od urana kao osnovnog materijala. Bekerel je prvi došao na ideju da magnetom deluje na zrake koji potiču od radioaktivnih elemenata, otkrivši tako tri osnovne vrste, alfa (α), beta (β) i gama (γ) zrake, a isto tako je nazvao β zrake negatronima, kako se i danas nazivaju, uprkos kasnijem definisanju elektrona. Elektromagnetni karakter gama zraka je utvrdio Vilar (Villard) 1900. godine, a prirodu alfa zračenja kao jezgra helijuma utvrdio je Rederford (Rutherford) tek 1909. godine, mada je Kruk (Crooke) još 1903. godine detektovao alfa čestice putem scintilacije, koju su izazvale alfa čestice na ekranu cink-sulfida. Rederford je 1919. godine, kada je alfa česticama bombardovao azot i dobio kiseonik, izveo i prvu nuklearnu reakciju, ostvarivši po prvi put vekovni san alhemičara o transmutaciji elemenata.

Tridesete godine ovog veka bile su ključne za razvoj nuklearnih nauka, koje su utrle put prvoj, nažalost tragičnoj verifikaciji razorne snage nuklearne energije, a zatim i kasnijoj mirnodopskoj upotrebi ovih ogromnih resursa energije (još i danas bez adekvatne zamene u domenu energetike). Tako je otkriće neutrona kao čestice koja učestvuje u građi jezgra atoma usledilo 1932. godine (Čedvik — Chadwick), a prvu nuklearnu fisiju urana izvršili su Han i Štrasman (Hahn i Strassman) 1939. godine, mada su vrlo blizu istog otkrića bili I. Ž. Kiri i P. Savić. Ova otkrića su neposredno dovela do prve nuklearne mašine — reaktora, koju je izgradio Fermi 1942. godine u Čikagu, a prva fisiona nuklearna eksplozija (urana 235) izvedena je 16. jula 1945. godine na poligonu Triniti (Trinity) kod mesta Alamogordo u državi Nju Meksiko u SAD.

Nedugo posle završetka drugog svetskog rata, kada je neviđeni razvoj industrije izazvao glad za energijom, razvijaju se nuklearni reaktori za proizvodnju električne energije sve većih snaga, koje krajem sedamdesetih godina već premašaju 1000 MW po reaktoru. Uporedo s tim, naročito pedesetih godina i kasnije, pune se arsenali nuklearnim bojevim glavama, a posle dve tragične ratne eksplozije nad živim ciljevima (Hirošima i Nagasaki, avgusta 1945. godine), usledile su mnogobrojne »probne« eksplozije nuklearnog oružja u vazduhu, uključivši i neuporedivo snažnije fuzione (tzv. hidrogenske) bombe, sve do njihovog prenošenja u podzemlje. Prva nuklearna elektrana (5 MW) izgrađena je 1954. godine u SSSR, a počev od šezdesetih godina širom sveta, naročito u vodećim industrijski razvijenim zemljama, umnožavaju se nuklearni reaktori raznih tipova, koji na pr. u Francuskoj 1985. godine već daju oko 60% ukupne proizvodnje električne energije. Uporedo se, međutim, javljaju sve veći otpori izgradnji nuklearnih reaktora zbog rizika zagađenja (akcidenti, deponovanja visoko radioaktivnih otpadaka i sl.).

Ovakvi posleratni trendovi uslovili su, razume se, veliku potražnju urana, neviđenu pre toga u istoriji čovečanstva, o čemu će biti reči u Glavi III — Metode istraživanja. Uran se inače može upotrebiti jedino kao gorivo (ili eksploziv) i ukoliko bi se našla jeftinija i čistija alternacija za masovnu proizvodnju energije, a nuklearno oružje bilo definitivno odbačeno, uran bi ubrzo pao u zaborav.

GLAVA I

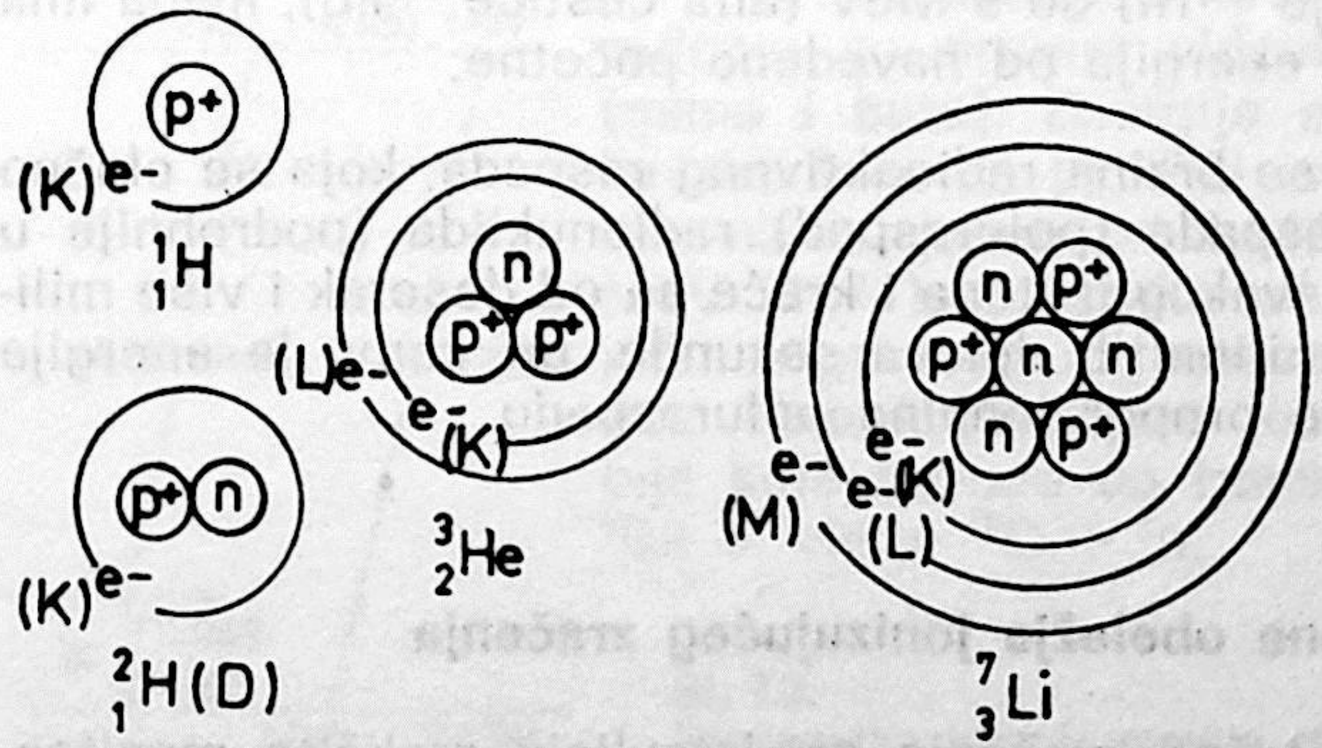
RADIOAKTIVNOST I NUKLEARNI RASPAD

I.1. PRIRODA JONIZUJUĆEG ZRAČENJA

I.1.1. Nuklidi

Osnovna osobina radionuklida je zračenje, koje omogućava njihovo detektovanje i merenje. Izvori zračenja su zapravo pojedina jezgra u sastavu određenog elementa, pored stabilnih, neradioaktivnih izotopa (IV.5). Mnogi od radionuklida koji se nalaze u prirodi makar i na granici detektabilnosti, proizvode se u cilju primene na mnogim poljima čovekove delatnosti i postaju sve traženiji komercijalni artikli.

Jezgra nuklida se označavaju sa dva broja. Broj koji se stavlja pri vrhu simbola za odgovarajući hemijski elemenat (A) znači ukupan broj nukleona (zbir protona i neutrona), koji čine masu jezgra (u mirovanju), pa i atoma u celini, pa se zato zove m a s e n i b r o j. Masa protona (p) i neutrona (n) je uglavnom ista i iznosi $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg (više detalja u [7]), dok je masa elektrona (e) 1836 puta manja ($9{,}09 \times 10^{-31}$ kg). Broj pri dnu (Z) je a t o m s k i ili r e d n i b r o j jezgra i označava samo broj protona odnosno broj orbitalnih elektrona (e^-) u odgovarajućem atomu (sl. I.1.). Jezgro atoma ima prečnik 10^{-15} m, a atom (do krajnje spoljašnje orbite) 10^{-10} m. Prema gornjem objašnjenju izotop ima punu oznaku ${}^{A}_{Z}X$ (ponekad



Sl. I.1.

Šematski pregled građe najlakših atoma i njihovih jezgara.

se označava sa ${}_{Z}X^{A}$ ili X^{A}_{Z}), na pr. ${}^{40}_{19}K$, ali se obično stavlja samo broj A (^{40}K), pošto sam simbol podrazumeva odgovarajuće mesto u tablici elemenata. Veza između građe atoma odnosno jezgra i ovih oznaka prikazana je na sl. I.1.

I.1.2. Opšte osobine jonizujućeg zračenja

Jonizujuće zračenje je posledica spontanog raspada jezgra i ima tačno određene karakteristike za svaki radionuklid (radioizotop), a jezgra elemenata počev od broja 84 (polonijum, sa svim nuklidima) su nestabilna. Raspad jezgra je veoma složen proces i predstavlja stanje pobuđenosti (eksitacije) praćeno emitovanjem određenih čestica odnosno zraka, koji se međusobno bitno razlikuju po svojoj fizičkoj prirodi i efektima, kao što su na pr. alfa, beta i gama zraci (čestice). Pri tom procesu vrši se transmutacija nuklida, pretvaranjem u druge nuklide (izotope), a kod elemenata najviših rednih brojeva nastaju transmutacioni nizovi (porodice, familije), sa većim brojem članova od početnog do završnog nuklida (vidi I.2.2.).

Alfa (α) zračenje se sastoji od jezgra helijuma (^{4}He), beta (β) zračenje je emisija negativno i pozitivno naelektrisanih čestica — elektrona (e^{-}) i pozitrona (e^{+}), a gama zračenje se sastoji od fotona (γ), koji su iste prirode kao i X-zračenje (rentgensko), a koje se isto tako javlja kod spontanog raspada jezgra. Drugi vid raspada je spontana fisija (cepanje) jezgra, koja je u prirodi neuporedivo ređa od spontanog raspada; tokom fisije jezgra, koja daje sasvim različite proizvode od raspada, dolazi do emisije neutrona (n). Ovde još treba napomenuti jednu (neutralnu) elementarnu česticu koja nastaje beta raspadom a to je neutrino (ν).

Energija zračenja izražava se jedinicom elektronvolt (eV). To je mala jedinica, koja odgovara ubrzanju jednog elektrona pri potencijalnoj razlici (naponu) od jednog volta, pa je energija 1 eV jednaka $1{,}6 \times 10^{-19}$ J (džula) (tačnije u [7]). Zato se u praksi energije jonizujućeg zračenja izražavaju u kilo elektronvoltima (1 keV = 1000 eV) ili u mega elektronvoltima (1 MeV = 1,000.000 eV). Energije zračenja radionuklida iz prirode kreću se obično od 0,04 MeV (gama zračenje ^{232}Th) do 9 MeV (alfa čestice ^{212}Po), mada ima i pratećih X-zračenja nižih energija od navedene početne.

Treba najzad reći da se brzina radioaktivnog raspada, koja se obično izražava kao vreme poluraspada (poluraspad) radionuklida (podrobnije u odeljku I.2.1) razlikuje kod svakog izotopa i kreće se od desetak i više milijardi godina pa do deset milionitih delova sekunde, pri čemu je energija zračenja po pravilu obrnuto proporcionalna poluraspadu.

I.1.3. Posebna obeležja jonizujućeg zračenja

Pojedini vidovi jonizujućeg zračenja predstavljaju različite manifestacije radioaktivnog raspada. S jedne strane to su čestice različitih brzina

(energije), a s druge strane je to elektromagnetno-fotonsko zračenje istih brzina (svetlosti) ali različitih učestalosti (energija), pa su, shodno tome, različiti efekti prolaza (prodora) kroz materijale. Jedino im je zajedničko poreklo iz jezgra atoma, mada se javljaju i sekundarna (orbitalna) zračenja, izazvana primarnom emisijom iz jezgra. Radioaktivno (jonizujuće) zračenje je, ustvari, posledica dve osnovne vrste raspada jezgra, alfa i beta, koja su načešće praćena gama zračenjem, mada se navodi i gama raspad, koji predstavlja deeksitaciju ostatka jezgra emisijom gama fotona, posle alfa ili beta raspada.

I.1.3.1. ALFA RASPAD I ZRAČENJE

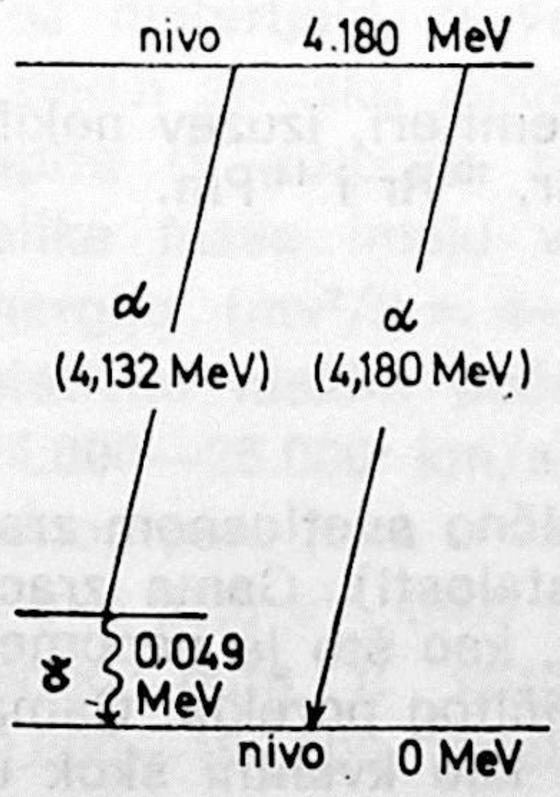
Alfa zraci su jezgra helijuma (^4He) odnosno pozitivno naelektrisani joni, koji se sastoje od dva protona i dva neutrona, pa je to najteža čestica koja se izbacuje prilikom nuklearnih procesa, sa 7400 puta većom masom od elektrona. Alfa čestica ima dakle oznaku $^4_2$ He, a nuklearna formula alfa raspada za bilo koji radionuklid ide s desno ulevo, prema opadajućem rednom (atomskom) broju Z:

$$^{A}_{Z}X - {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X$$

Kao primer može se navesti ^{238}U, koji emituje alfa čestice i transformiše se na sledeći način:

$$^{238}_{92}U - {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{234}_{90}Th$$

Alfa čestica po zaustavljanju zahvata dva elektrona i na taj način postaje inertan gas helijum (^4He je gotovo isključivi sastojak helijuma u prirodi), koji u metodologiji istraživanja može da posluži kao indikator koncentracije urana. Alfa zračenje se javlja uglavnom kod najtežih radionuklida, počev od rednog broja 83 (bizmut — Bi).



Sl. I.2.
Energetska transformacija alfa čestica.

Alfa zračenje ima najveću moć jonizacije u poređenju sa drugim vidovima radioaktivnog zračenja (gama i beta). Energije alfa čestica mogu se razlikovati. Tako na pr. ^{238}U emituje čestice dva energetska nivoa, jedan od 4,180 MeV (77%) i drugi 4,132 MeV (23%), a razlika od 0,049 MeV ispoljena je u vidu odgovarajućeg gama kvanta (sl. I.2). Alfa čestice bombardovanjem jezgara vrše nuklearne reakcije koje dovode do transmutacije elemenata, na pr. $^9Be + {}^4He = {}^{12}C + {}^1n$.

I.1.3.2. BETA RASPAD I ZRAČENJE

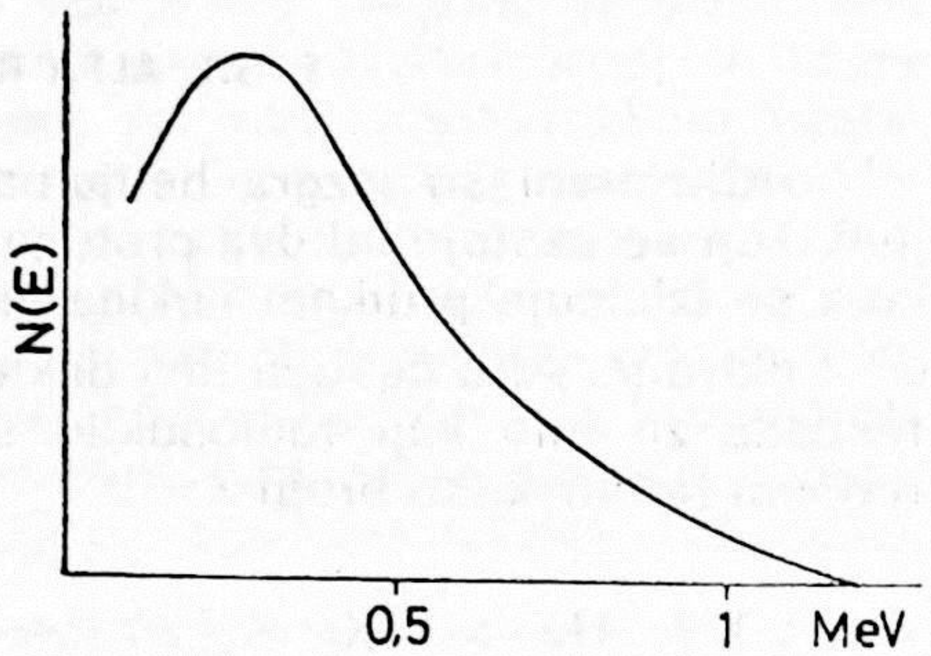
Beta zraci su negativno (β^-) ili, ređe, pozitivno naelektrisane čestice (β^+) iste mase kao i elektroni ($^{0}_{-1}e$), sa kontinuiranim energetskim spektrom, za razliku od orbitalnih elektrona, koji imaju linearni spektar, mada i kod prvih dominira određeni pik maksimalne energije (sl. I.3).

Gotovo svi radionuklidi su beta emiteri, izuzev nekih najtežih jezgara (^{222}Rn, ^{226}Ra i dr.). Nuklearna transmutacija kod beta (β^-) raspada sledi:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{0}_{-1}e - {}^{A}_{Z+1}X, \text{ na pr.}$$

$$^{32}_{15}P \rightarrow {}^{0}_{-1}e - {}^{32}_{16}S$$

Ova formula ukazuje da se jedan neutron iz jezgra emisijom elektrona (e^- odn. β^-) pretvara u proton, čime jezgro ide za jedno mesto napred, zadržavajući isti maseni broj.



Sl. I.3.
Energetski spektar beta čestica izotopa ^{40}K.

Usled raspada sa emisijom pozitrona (β^+ raspad) proton se pretvara u neutron, pa se tako redni broj atoma smanjuje za jedinicu. Kod ^{40}K 11% jezgara doživljava pozitronski (β^+) raspad, transformišući se u ^{40}Ar (β^- raspad daje ^{40}Ca) uz emisiju jednog gama kvanta energije 1,46 MeV. Isti proces pretvaranja protona u neutron dešava se privlačenjem jednog orbitalnog elektrona od strane protona, obično iz najbliže — K ljuske, što se naziva elektronski zahvat (ez ili, na engleskom e.c. — electron capture ili još K-zahvat). Usled ovakvog zahvata dolazi do emisije kvanta X-zračenja iz omotača jezgra. Kod ^{40}K na elektronski zahvat otpada 0,2% raspada jezgra. Uzgred treba napomenuti da je beta raspad isto tako praćen emisijom neutrina (odnosno antineutrina) kao čestice bez mase i naelektrisanja.

Beta emiteri su najčešće istovremeno i gama emiteri, izuzev nekih čistih beta (β^-) emitera, kao što su ^{14}C, ^{45}Ca, ^{63}Ni, ^{90}Sr, ^{106}Rr i ^{147}Pm.

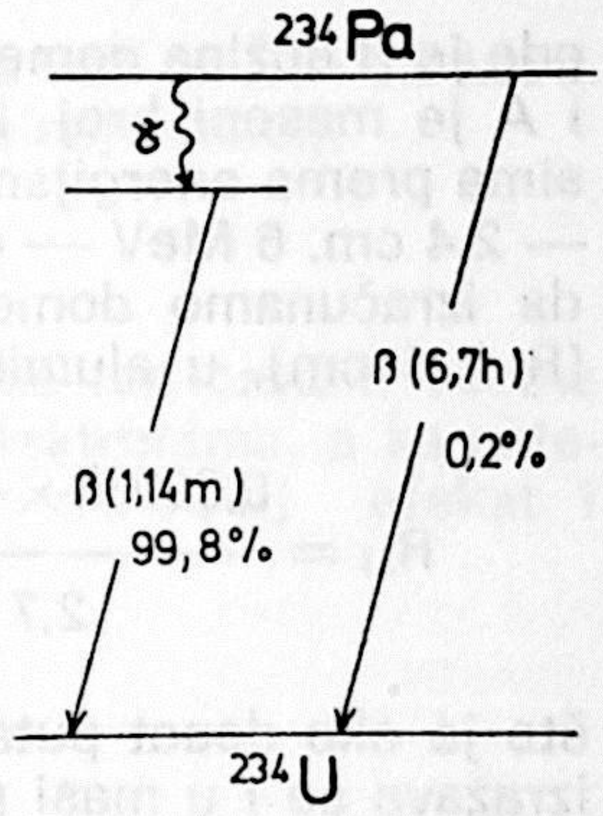
I.1.3.3. GAMA ZRAČENJE

Gama zračenje je energetska emisija fotona, slično svetlosnom zračenju, od koga se razlikuje po višoj energiji (učestalosti). Gama zraci (koji se još nazivaju gama kvanti ili gama fotoni) su, kao što je napomenuto, po prirodi istovetni sa X-zracima, samo su različitog porekla. Gama zraci potiču isključivo iz jezgra, dok X-zraci nastaju kao kvantni skok u najnižim orbitama elektrona u atomima (ljuske K, L i M).

Gama zraci imaju linijski spektar, karaktenističan za svako jezgro koje ih emituje. Ne postoje čisti gama emiteri, već oni odražavaju razliku energetskih nivoa čestica, kako je prikazano u prethodnim poglavljima, kao i na sl. I.2. Gama spektri većine radionuklida kreću se u rasponu od 0,02—3 MeV.

I.1.3.4. IZOMERSKI PRELAZ

Izomerski prelaz (ip ili na engleskom i.t. — isomeric transition) predstavlja izdvajanje nuklida istog rednog broja Z i istog atomskog broja A, ali sa drugim poluživotom i karakterom raspada, koje je izazvano metastabilnim stanjem. Ima nekoliko izomera u raznim nizovima radioaktivnog raspada, kao na pr. ^{234}Pa u uran-radijumovom nizu. Najveći deo ovog nuklida (99,8%) koji se drugačije zove UX_2, ima poluživot 1,1 min. i beta-gama je emiter, dok minimalan ostatak istog nuklida, koji je izomer pod drugim nazivom — UZ, ima poluživot 6,7 h i samo je beta emiter. Ovaj vid izomerskog prelaza prikazan je šematski na sl. I.4.



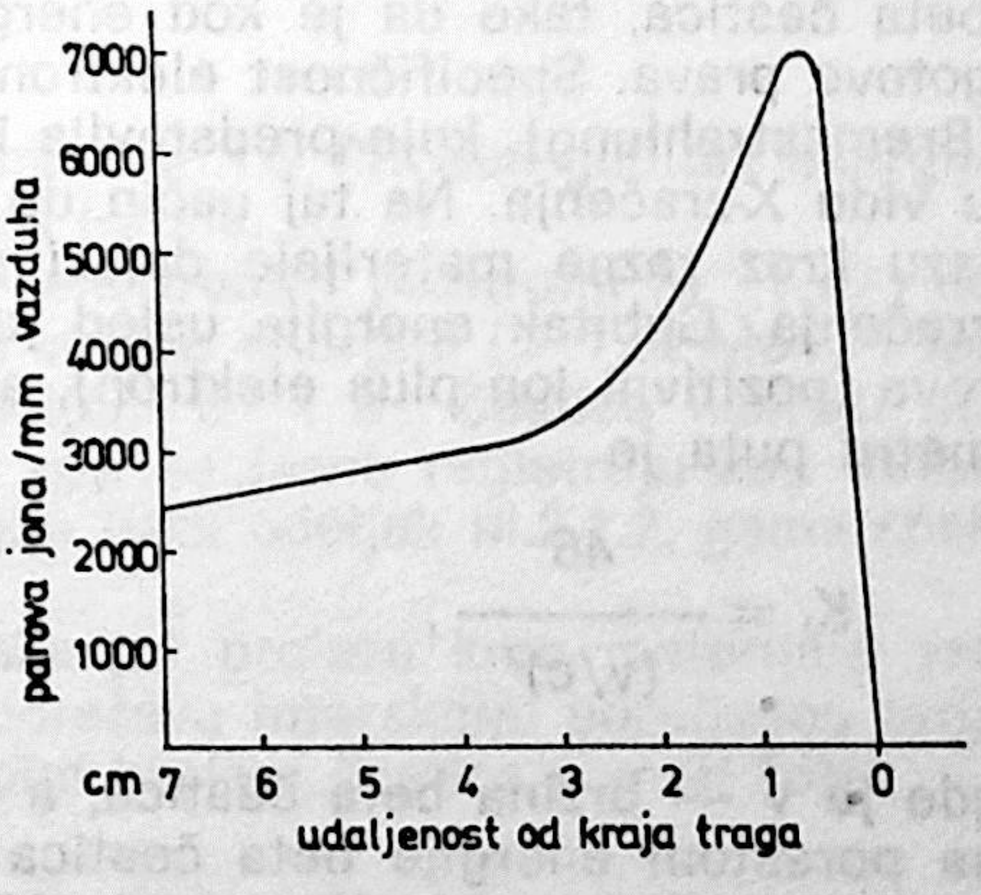
Sl. I.4.
Izomerski prelaz ^{234}Pa [8].

I.1.3.5. PROLAZ JONIZUJUĆEG ZRAČENJA

Ovde je dat uprošćen prikaz efekata prolaza i slabljenja jonizujućeg zračenja kroz različite materijale, što ima veliki praktičan značaj kako za merenje radioaktivnosti, tako i za zaštitu od ovog zračenja. Efekti prolaza svode se uglavnom na elastične ili neelastične sudare zraka kao projektila i čestica u jezgru (atomu) kao mete.

Alfa zračenje

Alfa čestice imaju mali domet kroz materijale, u vazduhu na normalnom pritisku ispod 10 cm, a list papira ih potpuno zaustavlja. Zbog velike mase imaju veliku kinetičku energiju ($mv^2/2 = 4—5$ MeV uprkos relativno niskim početnim brzinama (14.000—25.000 km/s). Za stvaranje jednog para jona u vazduhu potrebno je oko 33,5 eV, tako da na 1 cm pređenog puta u vazduhu proizvede 50.000—100.000 jonskih parova [5] (sl. I.5).



Sl. I.5.
Specifična jonizacija alfa čestica [8].

Približna relacija dometa R_s (cm) alfa čestica kroz određeni materijal izražena je preko Breg-Klemanove (Bragg-Kleeman) formule:

$$R_s = \frac{3{,}2 \times 10^{-4} \cdot R \sqrt{A}}{\varrho}$$

gde je R dužina dometa kroz vazduh (cm), ϱ gustina čvrste materije (g/cm^3) i A je maseni broj. Domet alfa čestice u vazduhu stoji u sledećim odnosima prema energijama α čestica: 1 MeV — 0,5 cm, 2 MeV — 1 cm, 4 Mev — 2,4 cm, 6 MeV — 4,5 cm i 10 MeV — 10 cm. Na taj način možemo na pr. da izračunamo domet alfa zraka koje emituje radon, energije 5,5 MeV ($R = 4$ cm), u aluminijumu ($\varrho = 2{,}7$; $A = 27$):

$$R_{Al} = \frac{0{,}00032 \times 4 \times 5{,}2}{2{,}7} = 0{,}0025 \text{ cm odn. } 0{,}025 \text{ mm}$$

što je oko deset puta tanje od folije za zavijanje namirnica. Ova vrednost izražava se i u masi po jedinici površine, a u ovom slučaju iznosi:

$$R_s \times \varrho = 0{,}0025 \times 2{,}7 = 0{,}00675 \text{ g/cm}^2 \text{ ili } 0{,}0675 \text{ kg/m}^2$$

Na sličan način se dolazi do odgovarajućih podataka za papir ili tekstil, čija je gustina $\varrho = 1$ g/cm³, tako da debljina 0,15 mm zadržava u potpunosti alfa čestice i najviših energija (10 MeV).

Beta zračenje

Beta čestice gube energiju pri prolazu kroz materijale usleg elastičnih sudara sa elektronima iz omotača, menjajući pri tom pravac kretanja. Ovo skretanje (rasejavanje) je manje pri većim energijama (brzinama) beta čestica, tako da je kod energija iznad 1 MeV putanja ovih čestica gotovo prava. Specifičnost elektronskog zračenja je tzv. zakočno zračenje (Bremsstrahlung), koje predstavlja izgubljenu energiju usporenih elektrona u vidu X-zračenja. Na taj način do gubitka energije beta čestice pri prolazu kroz razne materijale dolazi usled jonizacije, eksitacije i zakočnog zračenja. Gubitak energije usled jonizacije izražen je brojem jonskih parova (pozitivni jon plus elektron), a empirijski izraz za broj jona po centimetru puta je

$$K_t = \frac{46}{(v/c)^2},$$

gde je v — brzina beta čestica, a c — brzina svetlosti. Jonizacija opada sa porastom energije beta čestica (I.3.2.1), tako da na pr. elektroni od 0,046 MeV ($v/c = 0{,}40$) stvaraju 28.800 parova jona po 1 m, dok elektron energije 1,125 MeV ($v/c = 0{,}95$) daje svega 5100 parova/m.

Debljina apsorbera zavisi, strogo uzev, od gustine elektrona u određenom elementu, koja u prvom redu zavisi od atomskog (rednog) broja Z, zapravo od odnosa sa masenim brojem (Z/A). Za energije preko 0,5 MeV odnos debljine i energije beta čestica je linearan. Tako na pr. beta čestice energije 1 MeV apsorbuje se u aluminijumu debljine do 1,4 mm (4 kg/m²), od 2 MeV do debljine 3,7 mm (10 kg/m²) itd., na osnovu formule:

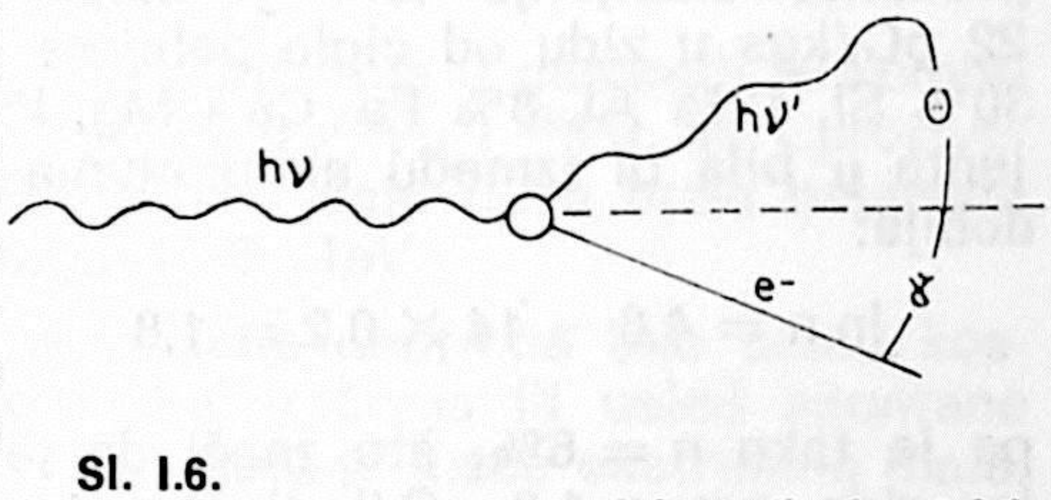
$$R = 5{,}42\,E - 1{,}33,$$

gde je R debljina u kg/m², a E energija u MeV; formula važi za $E > 0{,}8$ MeV. Za manje energije apsorpcija se vrši po eksponencijalnoj funkciji.

Gama zračenje

Pri prodoru gama zraka u materijale dešavaju se raznorodni, veoma složeni procesi interakcije uglavnom sa orbitalnim elektronima, a karakteristična su tri efekta: fotoefekat, Komptonov (Compton) efekat i stvaranje parova elektron pozitron.

Fotoelektrični efekat (apsorpcija) nastaje kada gama zrak (foton) izbaci jedan elektron (nazvan fotoelektron) iz omotača jezgra (obično iz ljuske K, L i M), pri čemu se kompletna energija gama fotona predaje atomu, koji se pri tome pretvara u jon, ali se kao sporedan efekat javlja i rentgensko zračenje. Intenzitet fotoelektričnog efekta je najveći za zrake male energije i za elemente visokog broja.



Sl. I.6.
Šema komptonovog efekta (kod niskih energija upadnog fotona).
hν — upadni kvant; hν' — rasejani kvant (pod uglom Θ); e⁻ — izbačeni elektron (pod uglom γ) sa energijom $h\nu = h\nu' + E_{e^-}$.

Komptonov efekat ili rasejavanje rezultira, slično prethodnom, u izbijanju odnosno elastičnom rasejavanju jednog elektrona, ali upadni gama zrak (foton) ne gubi svu energiju, već se javlja sekundarno gama zračenje niže energije (veće talasne dužine). kako je to ilustrativno prikazano na šemi u sl. I.6. Pri tom gubitak energije proporcionalan je energiji upadnog gama fotona.

Stvaranje parova beta čestica — elektrona i pozitrona (e^- i e^+) nastaje interakcijom gama zraka (fotona) visoke energije ($> 1{,}02$ MeV) i jezgara visokog atomskog broja. Anihilacijom e^- i e^+ čestica nastaju dva gama fotona, svaki energije 511 keV, koji se jasno registruju kod detektovanja gama zračenja određene energije (vidi odeljak III.2.1.2, gama spektrometrija).

Slabljenje (absorpcija) gama zraka pri prolazu kroz materijale vrši se po eksponencijalnoj funkciji, koja odražava interakciju određenog broja fotona snopa zračenja (dn) sa istovetnim brojem čestica u meti (dN):

$$dn = dN = \frac{N \cdot n \cdot \delta}{S}$$

gde je δ efikasan presek za odgovarajuću interakciju (mikroskopski presek — verovatnoća sudara snopa čestica sa jezgrom, pojam iz neutronske fizike), a S je jedinična površina mete. Ova funkcija važi za tanke mete, dok za deblje mete broj čestica mete N može da se izrazi preko gustine odnosno broja čestica po jedinici zapremine ili N/V, pa se dobija nova veličina, koja se zove linearni koeficijent apsorpcije (u neutronskoj fizici to je makroskopski presek sa oznakom Σ), dimenzije m^{-1}:

$$\mu = \delta\,(N/V)$$

Na taj način, rešenje jednačine za početni upadni broj čestica snopa n_o je

$$n = n_o\, e^{-\mu x} \quad \text{ili} \quad \ln n = n_o - \mu x$$

gde je n — broj čestica koji je prešao dužinu x (bez interakcije).

Slabljenje (absorpcija) se obično izražava u procentima, tako da je $n_o = 100$ odnosno $\ln n_o = 4{,}6$. Koeficijent μ zavisi od energije gama fotona i od materijala, pa se za energije 0,5—5 MeV kreće: za Al 30—7,5, Fe 106—25, Pb 500—49 i za vodu 13—3 m^{-1}. Kao primer, treba izračunati procenat slabljenja tankog snopa zračenja energije 0,7 MeV, jačine 22 pC/kgs u zidu od cigle debljine 0,2 m. Kako u sastav cigle ulazi oko 30% Si, 12% Al, 8% Fe, Ca i Mg, kao i 50% O, srednja vrednost koeficijenta μ bila bi između aluminijuma i vode ili oko 14 m^{-1}. Računom se dobija:

$$\ln n = 4{,}6 - 14 \times 0{,}2 = 1{,}8$$

pa je tako n = 6%, što znači da je jačina (ekspozicione doze) zračenja iza zida svega 1,3 pC/kgs. Ova izračunavanja nisu precizna pošto nisu uzeti u obzir svi efekti interakcije (Sl. I.10). U geološkoj praksi javljaju se međutim prostrani izvori zračenja širokog snopa (do 2π), o čemu će biti reči na drugom mestu (III.2.1.3).

Kao izraz slabljenja (apsorpcije) gama zračenja koristi se još poludebljina, odnosno opadanje zračenja za 50%, pri čemu je poludebljina

$$d_{1/2} = \ln 2/\mu$$

Za jedan alevrolit (mudstone) u Engleskoj nađeno je da se $d_1/_2$ kreće od 0,058—0,078 m, u zavisnosti od energije gama zraka (1,64—2,6 MeV) [9].

I.1.4. Neutronsko zračenje

Za interakciju neutrona sa jezgrom atoma bitna je njegova kinetička energija, na osnovu čega se ove čestice razlikuju. Brzi neutroni imaju energiju 0,5—15 MeV ili više odnosno kreću se brzinom do 60.000 km/s. Najsporiji su tzv. termalni neutroni, brzina im je svega oko 2 km/s, a sred- energija oko 0,025 eV. Između ovih nalazi se ceo niz grupa neutrona, intermedijarni, rezonantni, spori i epitermalni, o čemu ovde neće biti Neutroni gube energiju na razne načine, bilo putem neelastičnih i

elastičnih sudara (rasejavanje) ili u nuklearnim reakcijama (fisija). Kod sudara gubitak energije je utoliko veći ukoliko je meta veća (proton na pr.). Moguć je najzad i zahvat neutrona bez odbijanja (sudara), s tim što dobijenu energiju zahvaćenog neutrona jezgro emituje u vidu gama fotona. Na ovoj reakciji (n, γ)* počiva proizvodnja najvećeg broja radionuklida, na pr. u reaktoru. Verovatnoća da se neutron susretne sa jezgrom zavisi i od efikasne površine jezgra koja se naziva presek (δ — bilo je reči u prethodnom odeljku), izražen u jedinici površine, a variraju na pr. od 10^{-28} m^2 n $\times$ 10^{-24} m^2. Brzina neutrona i presek jezgra (mete) su međuzavisne kategorije i imaju bitan značaj u reaktorskoj tehnici.

Najveći izvor neutrona su nuklearni reaktori, gde se postiže fluks od 10^{14} — 10^{16} n/m^{2}s, a u brzim reaktorima i do 6×10^{17} n/m^{2}s**, sa veoma širokim energetskim spektrom od 0,001 eV do 15 MeV. Vrlo podesan izvor neutrona, sličan reaktoru, je transuranski nuklid kalifornijum 252. Tako na pr. 100 mg ^{252}Cf daje fluks termalnih neutrona 2×10^{11} n/m^{2}s, slično reaktoru snage 1 kW.

Akceleracijom molekula sa ^{2}H na metu sa ^{3}H mogu se proizvesti monoenergetski neutroni velike energije (14 MeV), podesnim za izazivanje reakcija (n, p), (n, 2n), (n, α) i dr. i to u lakim jezgrima, što je inače nemoguće postići termalnim neutronima.

Često korišćen izvor neutrona za razna merenja u geologiji je kombinacija berilijuma i raznih alfa emitera, kao ^{208}Po, ^{238}Pu i ^{239}Pu, ali i proizvođači drugih teških čestica, naročito ^{241}Am, koji daje fluks brzih neutrona energije 0,3—13 MeV, naročito u opsegu 3—6 MeV.

U prirodi dolazi do ograničene produkcije neutrona bilo usled kosmikčog bombardovanja, zatim dejstvom alfa zračenja ili usled spontane fisije najtežih radionuklida (uključivši i ^{238}U), koja je inače ekstremno mala, reda 1 neutron po 1 kg u sekundi (u granitu na pr. 1 neutron po 1 toni u sekundi), ali se tokom mnogo miliona godina mogu stvoriti merljive količine novih izotopa (nuklida). U geološkoj istoriji bilo je izuzetno velikih produkcija neutrona u okviru lokalnih prirodnih reaktora (vidi poglavlje IV.4 — Fenomen Oklo).

I.2. RADIOAKTIVNI RASPAD

I.2.1. Karakter radioaktivnog raspada

U prethodnom poglavlju bilo je reči o fizičkim osnovama i efektima jonizujućeg zračenja kao posledice radioaktivnog raspada. Ovaj raspad se izražava u vidu broja atoma (N) koji se transmituju u jedinici vremena. Ovde se često radi o ogromnom broju raspada, na pr. reda 10^{10} Bq (raspada u sekundi). Nepunih deset godina posle otkrića radioaktivnosti utvrđeno je da se radioaktivni raspad vrši po eksponencijalnoj funkciji verovatnoće. Ako je N — broj jezgara koji se raspada, λ — konstanta raspada (faktor

---

* Kod ovog načina obeležavanja nuklearnih reakcija prvo slovo označava udarnu česticu, a drugo proizvedenu česticu, na pr. ^{12}C(n, 2n) ^{11}C ili ^{10}B(n, α)^7 Li i sl.

** La centrale de Creys-Melville — Electricité de France, 1982.

proporcionalnosti, dimenzije s^{-1}), a Δt interval vremena u kome se vrši raspad, onda je verovatnoća raspada

$$-\Delta N = N\lambda\Delta t \text{ ili } dN = -N\lambda dt$$

a rešenje ove diferencijalne jednačine je

$$N = N_o e^{-\lambda t} \text{ odn. } \ln N = \ln N_o - \lambda T \qquad (I.2.1.)$$

gde je N_o početni broj jezgara, a N je broj jezgara koji se još nisu raspali u vreme $t = 0$. Pošto se broj neraspadnutih jezgara asimptotski približava nuli, kao najkarakterističnije je uzeto ono vreme za koje se broj jezgara (atoma) svede na polovinu, što se naziva vreme poluraspada (poluraspad, poluživot) i označava se sa $T_{1/2}$ (ali će u nekim slučajevima zbog racionalnosti biti označen jednostavnije sa T).

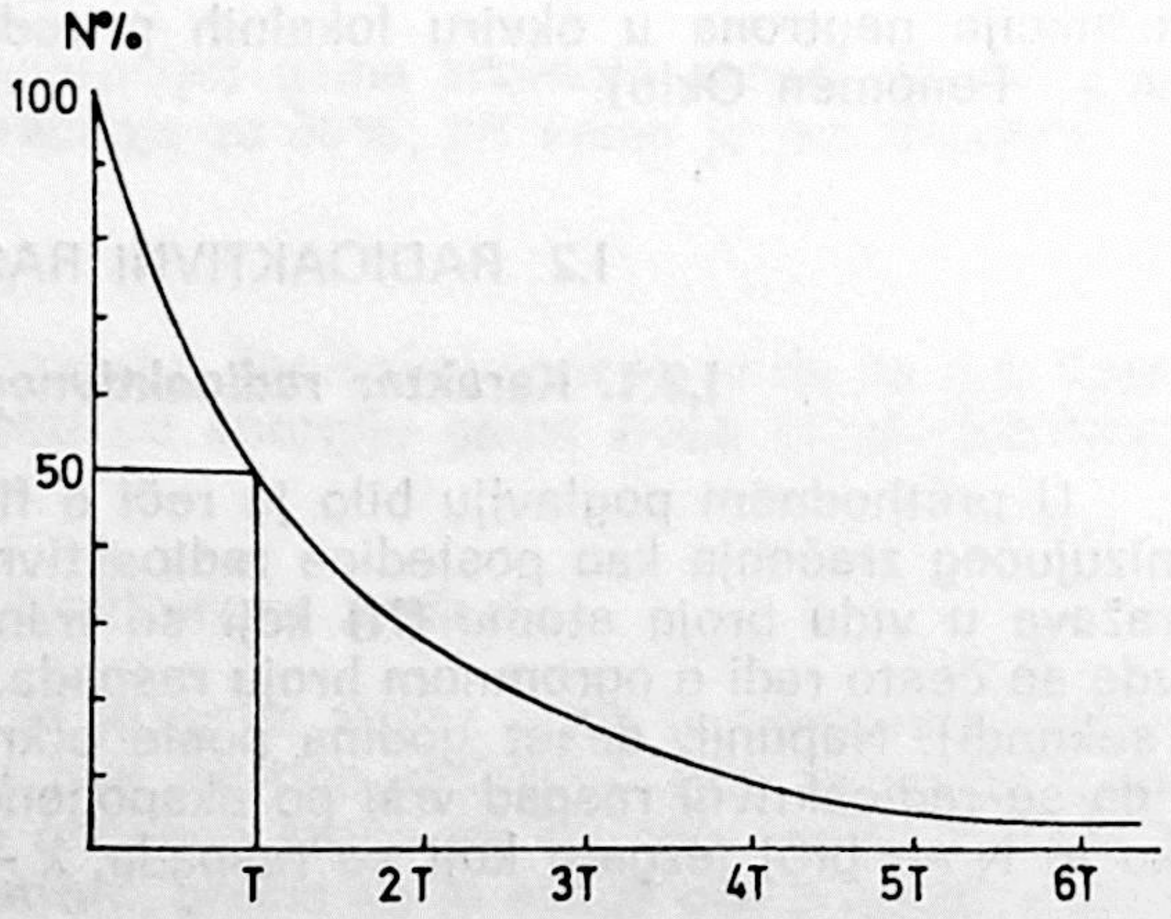
Poluraspad $T_{1/2}$ se određuje merenjem za svaki radionuklid, što često predstavlja osetljiv i složen postupak, naročito za dugoživeće nuklide, na što ukazuju razlike prema raznim podacima. Na osnovu gornje formule poluraspad se može izraziti na sledeći način:

$$\frac{N_o}{2} = N_o e^{-\lambda T_{1/2}} \text{ ili } \ln N_o - \ln 2 = \ln N_o - \lambda T_{1/2} \text{ i dalje,}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0{,}6931}{T_{1/2}} \qquad (I.2.2.)$$

$$T_s = 1/\lambda = 1{,}44\ T_{1/2} \qquad (I.2.3.)$$

Zakon raspada grafički je prikazan na sl. I.7. Ovde se jasno vidi asimptotski karakter opadanja radioaktivnosti, što je od bitnog značaja kod merenja radioaktivnosti uopšte. Puni raspad radioaktivne materije (ustvari do 0,1% od početne mase) nastaje praktično za period od $10\ T_{1/2}$.



Sl. I.7.
Linearni grafik zakona radioaktivnog raspada.

Za izražavanje vremena raspada uveden je još jedan pokazatelj, nazvan srednji poluraspad (poluživot) T_s na engleskom — average lifetime — T_A, na ruskom средняя продолжительност жизни (τ):

Poluraspad se izražava u sekundama, minutima, satima, danima i godinama. Ovo vreme se obično za svaki jezik iskazuje početnim slovima ili skraćenicama. Za srpskohrvatski jezik važi Zakon o sistemu mera (SI) za sve pomenute jedinice izuzev za godinu i poklapaju se sa oznakama na engleskom jeziku: (s) sekunda (second na engleskom), (min., m) minuta (minute), (h) sat (hour), (d) dan (day) i za godinu (g., god.) odnosno (y) za engleski naziv year. Analogna slova odnosno skraćenice za rusku ćirilicu su сек, мин, ч (час), ден — дня, лето — лет.

Slučajevi raspada koji se najčešće sreću u praksi mogu se relativno lako izračunavati, kao što se vidi iz nekoliko sledećih primera.

Ako se uzme da se na pr. etalon kobalta 60, koji služi za kalibraciju mernih uređaja, koristi 2 godine, treba da se dobije vrednost smanjenja radioaktivnosti, koja je adekvatna smanjenju broja raspada. Zna se da je poluživot ^{60}Co 5,27 godina (Tabela IV.5.1) pa se račun izvodi prema formuli I.2.1, s tim što se vrednost N izražava u procentima u odnosu na $N_o = 100$:

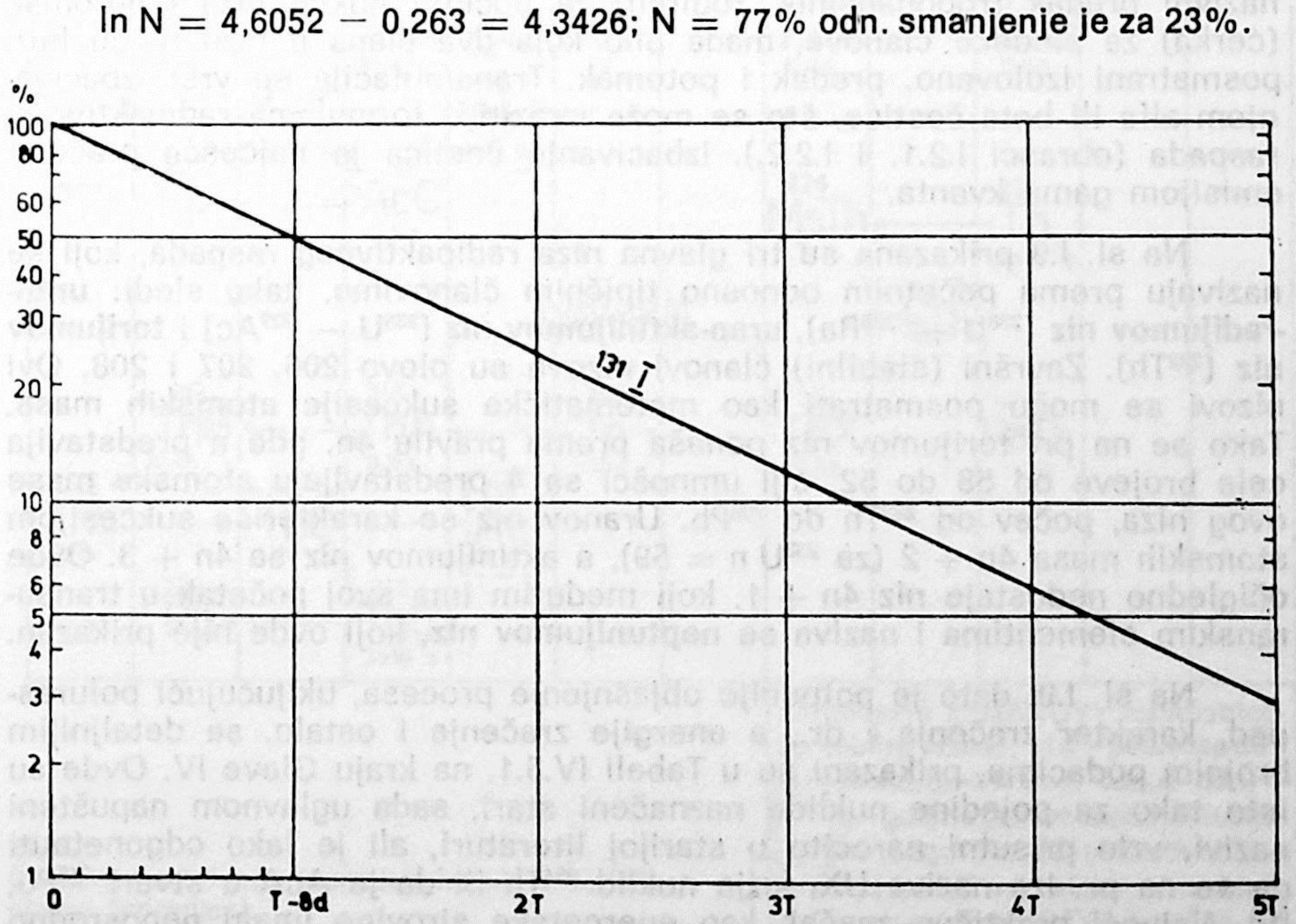
$$\ln = N_o - \ln N = \lambda t$$

$$\lambda = \frac{0{,}6931}{5{,}27} = 0{,}1315$$

$$t = 2;\ \ln 100 = 4{,}6052$$

$$\ln 100 - \ln N = 0{,}263$$

$$\ln N = 4{,}6052 - 0{,}263 = 4{,}3426;\ N = 77\%$$ odn. smanjenje je za 23%.



Sl. I.8.
Semilogaritamski grafik raspada joda 131.

Drugi primer odnosio bi se na pitanje za koliko dana bi se početna radioaktivnost joda 131 smanjila od 20 pC/kgs na svega 0,7 pC/kgs odnosno na 4% početnog intenziteta. U računu možemo koristiti bilo koju jedinicu ili pak procente, kao u našem primeru (ordinata na Sl. 8). Poluživot ^{131}I je 8 dana:

$$t = \frac{\ln 100 - \ln 4}{\lambda}; \lambda = \frac{0{,}6931}{8} = 0{,}0866$$

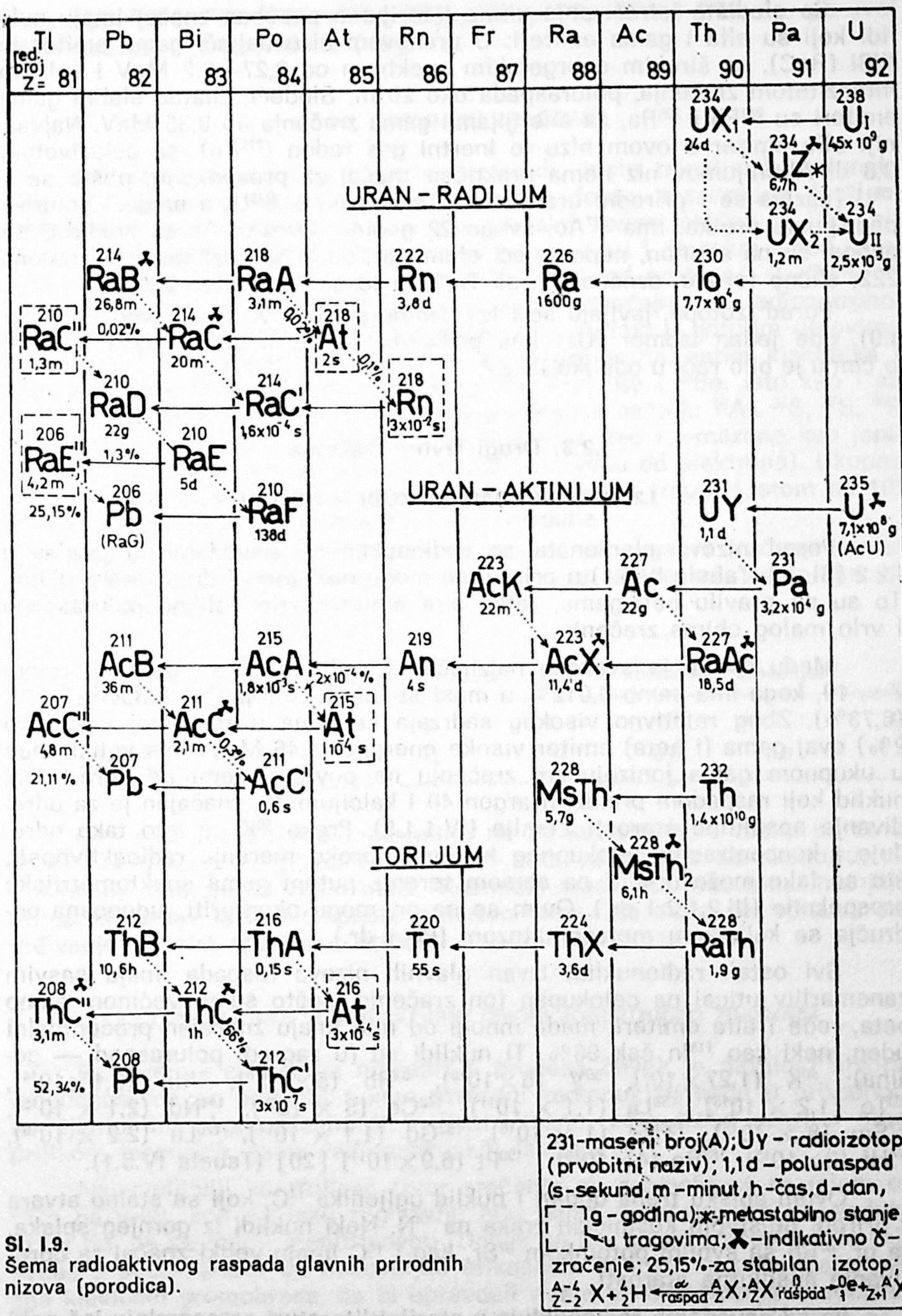
$$t = \frac{4{,}605 - 1{,}386}{0{,}0866} = 37{,}2 \text{ dana (tačka n na sl. I.8.)}$$

I.2.2. Nizovi radioaktivnog raspada

Prilikom radioaktivnog raspada jezgara određenih nuklida (izotopa), oni prelaze u nuklide istog ili različitog A ili Z, a sam proces se zove transmutacija. Novi nuklidi mogu biti isto tako radioaktivni i sposobni za dalju transmutaciju, ali u svakom slučaju svaka takva transmutacija u nizu završava se stabilnim, neradioaktivnim izotopom. Na taj način, kod pojedinih elemenata, naročito onih sa najvećim rednim brojem (torijum i uran), stvaraju se nizovi ili porodice radioaktivnog raspada, u kojima ima do 16 i više članova (Sl. I.9.). Kod objašnjenja procesa koriste se za članove niza nazivni predak (rodonačelnik, roditelj) za početni nuklid niza i potomak (ćerka) za sledeće članove, mada bilo koja dva člana u nizu mogu biti, posmatrani izolovano, predak i potomak. Transmutacija se vrši izbacivanjem alfa ili beta čestice, što se može izraziti u formulama radioaktivnog raspada (obrasci I.2.1. i I.2.2.). Izbacivanje čestica je najčešće praćeno emisijom gama kvanta.

Na sl. I.9 prikazana su tri glavna niza radioaktivnog raspada, koji se nazivaju prema početnim odnosno tipičnim članovima, kako sledi: **uran-radijumov niz** (^{238}U — ^{226}Ra), **uran-aktinijumov niz** (^{235}U — ^{227}Ac) i **torijumov niz** (^{232}Th). Završni (stabilni) članovi nizova su olovo 206, 207 i 208. Ovi nizovi se mogu posmatrati kao matematičke sukcesije atomskih masa. Tako se na pr. torijumov niz ponaša prema pravilu 4n, gde n predstavlja cele brojeve od 58 do 52, čiji umnošci sa 4 predstavljaju atomske mase ovog niza, počev od ^{232}Th do ^{208}Pb. Uranov niz se karakteriše sukcesijom atomskih masa $4n + 2$ (za ^{238}U $n = 59$), a aktinijumov niz sa $4n + 3$. Ovde očigledno nedostaje niz $4n + 1$, koji međutim ima svoj početak u transuranskim elementima i naziva se **neptunijumov niz,** koji ovde nije prikazan.

Na sl. I.9. dato je potpunije objašnjenje procesa, uključujući poluraspad, karakter zračenja i dr., a energije zračenja i ostalo, sa detaljnijim brojnim podacima, prikazani su u Tabeli IV.5.1. na kraju Glave IV. Ovde su isto tako za pojedine nuklide naznačeni stari, sada uglavnom napušteni nazivi, vrlo prisutni naročito u starijoj literaturi, ali je lako odgonetnuti da se na pr. iza naziva UX_1 krije nuklid ^{234}Th ili da je AcA u stvari ^{215}Po, itd. Najveći praktičan značaj, kao energetske sirovine imaju neposredno ^{235}U, a posredno (kao mete za oplođavanje ^{238}U od koga nastaje fisioni ^{239}Pu) i ^{232}Th (fisioni ^{233}U, detaljnije u poglavlju IV.2).



Sl. I.9.
Šema radioaktivnog raspada glavnih prirodnih nizova (porodica).

Sa gledišta istraživanja urana i torijuma poseban značaj imaju nuklidi koji su alfa i gama emiteri. U uranovom nizu najjači gama emiter je ^{214}Bi (RaC), sa širokim energetskim spektrom od 0,27—2,2 MeV i velikim intenzitetom zračenja, poluraspada oko 20 m. Sledeći, znatno slabiji gama emiteri su ^{241}Pb i ^{226}Ra, sa energijama gama zračenja do 0,35 MeV. Najvažniji alfa emiter u ovom nizu je inertni gas radon (^{222}Rn), sa poluživotom 3,8 d. Aktinijumov niz nema praktičan značaj za prospekciju, pošto se u ^{238}U (naziva se i prirodni uran) nalazi svega 0,7% ^{235}U, a najduži poluraspad, posle pretka, ima ^{227}Ac, svega 22 godine. Oznaka An za nuklid ^{219}Rn odnosi se na aktinon, nepostojeći elemenat, da bi se razlikovao od radona 222, slično toronu, označenom sa Tn, koji je ustvari radon 220.

Pored izotopa, javljaju se i tzv. izomerski parovi, na pr. kod ^{234}Pa (Sl. I.9), gde jedan izomer (Uz) ima poluživot 6,7 h, a drugi (Ux2) 1,14 m, o čemu je bilo reči u odeljku I.1.3.4.

I.2.3. Drugi izvori zračenja

I.2.3.1. DRUGI RADIONUKLIDI U PRIRODI

Pored nizova elemenata sa radionuklidima navedenih u poglavlju I.2.2 (Sl. I.9, Tabela IV.5.1) u prirodi se mogu naći mnogi drugi radionuklidi. To su po pravilu beta-gama, retko alfa emiteri, vrlo velikog poluraspada i vrlo malog obima zračenja.

Među ovima je svakako najznačajniji kalijum 40 sa rednim brojem $Z = 19$, koga ima samo 0,012% u masi stabilnih izotopa ^{39}K (93,26%) i ^{41}K (6,73%). Zbog relativno visokog sadržaja kalijuma u zemljinoj kori (oko 2%) ovaj gama (i beta) emiter visoke energije (1,46 MeV) ima veliki udeo u ukupnom gama jonizujućem zračenju na površini zemljine kore. Ovaj nuklid koji raspadom prelazi u argon 40 i kalcijum 40, značajan je za određivanje apsolutne starosti Zemlje (IV.1.1.5). Preko ^{40}K se isto tako određuje i koncentracija celokupnog kalijuma, preko merenja radioaktivnosti, što se lako može uraditi na samom terenu, putem gama spektometrijske prospekcije (III.2.1.2 i dr.). Ovim se na pr. mogu okonturiti rudonosna područja sa kalijskom metasomatozom (Pb i dr.).

Svi ostali radionuklidi izvan glavnih nizova raspada imaju sasvim zanemarljiv uticaj na celokupan fon zračenja, pošto su to većinom samo beta, ređe i alfa emiteri, mada mnogi od njih imaju značajan procentualni udeo, neki kao ^{115}In čak 96%. Ti nuklidi su (u zagradi poluraspad — godina): ^{40}K ($1{,}27\times10^{9}$), ^{50}V (6×10^{15}), ^{87}Rb (5×10^{10}), ^{115}In ($5{,}1\times10^{14}$), ^{123}Te ($1{,}2\times10^{13}$), ^{138}La ($1{,}1\times10^{11}$), ^{142}Ce (5×10^{15}), ^{144}Nd ($2{,}1\times10^{15}$), ^{147}Sm (8×10^{15}), ^{150}Nd (1×10^{16}), ^{152}Gd ($1{,}1\times10^{14}$), ^{176}Lu ($2{,}2\times10^{10}$), ^{174}Hf (2×10^{15}), ^{187}Re (4×10^{10}) i ^{190}Pt ($6{,}9\times10^{11}$) [20] (Tabela IV.5.1).

Ovom spisku treba dodati i nuklid ugljenika ^{14}C, koji se stalno stvara u prirodi dejstvom kosmičkih zraka na ^{14}N. Neki nuklidi iz gornjeg spiska, na pr. ^{87}Rb sa svojim potomkom ^{87}Sr, kao i ^{14}C imaju veliki značaj za određivanje apsolutne starosti.

Pored navedenih radionuklida u starijoj literaturi se spominju još neki »polustabilni« izotopi čiji bi se poluraspad kretao od 10^{10} do 10^{21} godina,

kao na pr. ^{92}Mo, ^{96}Zr, ^{100}Mo, ^{113}In, ^{123}Sb, ^{130}Te, ^{180}Ta, ^{180}W i ^{209}Bi, što po svoj prilici zasada nije potvrđeno [19].

I.2.3.2. KOSMIČKO ZRAČENJE

Veći izvor jonizujućeg zračenja u prirodi, posle zemaljskih radionuklida, je kosmos, iz koga u svakom trenutku dopiru raznorodne čestice, neuporedivo većih energija od onih iz zemaljskih izvora, obično 15 GeV, ali ponekad čak do 1 PeV, tako da se mogu registrovati i do 1 km ispod zemljine površine. Ovo zračenje se sastoji 70—90% od protona i 9—20% od alfa čestica, ali je prisutno i gama zračenje (značajno za radioastronomiju). Kosmičke čestice naročito reaguju sa jezgrima u gornjim delovima atmosfere i to prvenstveno dejstvom na jezgra azota, zatim kiseonika i argona. U interakciji sa azotom nastaju ^{3}H, ^{3}He, ^{7}Be i ^{10}Be, isto kao i sa jezgrima kiseonika, uključiv i ^{14}C. Iz jezgra argona nastaju ^{26}Al, ^{35}S, ^{38}S, ^{33}P i ^{32}K. Kosmički protoni proizvode nove nukleone kao i π-mezone kao jonizujuću komponentu (mezon ima masu 200 puta veću od elektrona). Ukupna količina novih nuklida, koji se na taj način stvaraju, iznosi 1 atom na 10^7 atoma, odnosno 4×10^{12} atoma na 1 cm^3 vazduha.

Intenzitet kosmičkog primarnog i sekundarnog gama zračenja zavisi s jedne strane od geografske širine, a s druge strane od nadmorske visine, kao što se vidi iz tabele I.1.

Tabela I.1. Jačina doze gama zračenja u atmosferi izazvanog kosmičkim zračenjem

Visina km	0	1	2	3	4
Zračenje pC/kgs	0,2	0,36	0,6	0,9	1,4

Ovo zračenje dostiže maksimum na 20 km visine, a zatim se smanjuje. Pored toga, na polovima je četiri puta veće nego na ekvatoru, ali ova razlika nestaje na visini mora. Kosmički zraci isto tako bitno menjaju izotopski sastav lakih elemenata u meteoritima, što može poslužiti za određivanje njihove apsolutne starosti.

I.2.3.3. ZNAČAJNIJI MANUFAKTURNI IZVORI JONIZUJUĆEG ZRAČENJA

Razvojem i primenom nuklearnih procesa čovek je nažalost stvorio mogućnost da se pojedini rukom stvoreni radionuklidi nađu u prirodnom ambijentu, bilo kontrolisano ili nekontrolisano, koje treba uzeti u obzir prilikom terenskih gama radiometrijskih ispitivanja.

Najupadljiviji kontrolisan izvor zračenja su gromobrani sa iglom od ^{60}Co na vrhu, koji se lako registruju bilo gama prospekcijom iz vazduha ili na tlu, pa se mogu identifikovati. Danas se ovi izvori zračenja uklanjaju svuda u svetu, pošto su nedovoljno efikasni u odnosu na poboljšane verzije klasičnih gromobrana, da bi opravdali rizike od ozračivanja neadekvatnom upotrebom. Pored gromobrana, jaki izvori gama zračenja koriste se u nekim uređajima za protivpožarnu zaštitu.

Najveće nekontrolisano širenje radioaktivnosti u prirodi, pored nazemnih eksplozija nuklearnog oružja, nastalo je kao posledica tragičnog akcidenta u Černobilju (SSSR) krajem aprila 1986. g. (krajnji bilans — 28 umrlih i 237 opasno ozračenih ljudi). Od mnogobrojnih, većinom kratkoživećih radionuklida, koji su isparili iz užarenog jezgra reaktora, najveći značaj ima ^{137}Cs, sa poluživotom od 30 godina, što znači opasnost bar za daljih 100 godina, ukoliko se ne preduzimaju odgovarajuće mere. Količina izbačenog cezijuma sedmostruko je veća od količine ovog radionuklida oslobođene atomskom eksplozijom nad Hirošimom [6]. Cezijum je posle havarije raznešen vetrovima, a padavinama je dosta neravnomerno raspoređen na tlu širom Evrope, kako u makro planu, tako i u odnosu na mikroklimatsku situaciju u trajanju od nekoliko dana posle katastrofe, što se odnosi na padavine. Ovu mikro neravnomernost ilustruje podatak da je na pr. Topčider bio nekoliko puta više kontaminiran nego selo Vinča, udaljen nešto manje od 15 km od Topčidera u Beogradu [6]. Godinu dana posle rasturanja radioaktivnog materijala, na travnatom humusnom pokrivaču intenzitet gama zračenja ostao je povećan za 50—100% u odnosu na fon u Beogradu pre akcidenta [2]. To se isto oseća na terenima Srbije, vrlo različito usled pomenutog neravnomernog rasipanja, ali već 1988 god. znatno manje, prvenstveno usled premeštanja cezijuma u dublje partije tla.

Pored toga, treba voditi računa o drugim mogućim akcidentima lokalnih razmera, od kojih je najverovatniji gubitak radioaktivnih izotopa koji se koriste naročito u medicinskim i nekim istraživačkim ustanovama, a ne treba isključiti i radioaktivni otpad iz nuklearnih elektrana, koji je međutim pod znatno oštrijim režimom kontrole, a naročito s obzirom da nema neposrednu upotrebnu vrednost. Kao najveća tragedija posle Černobiljske smatra se krajnje neodgovorno odbacivanje kapsule sa ^{137}Cs (opet isti izotop kao kod Černobilja) u gradu Gojanija u Brazilu septembra 1987. godine, koja je dospela u ruke ljudi koji pojma nisu imali u kakvoj se opasnosti nalaze. Kapsula je iz radoznalosti otvorena, ozračeno je 200 ljudi, od kojih petoro nije moglo biti spašeno.

Zbog ovakvih akcidenata, koji nisu tako retki, mada obično bez tako tragičnih posledica kao onaj u Brazilu, svi geolozi koji se bave gama-radiometrijskom prospekcijom moraju imati u vidu mogućnost da naiđu na neki trag rasipanja ovakvih radionuklida, što znači da se svaki uzrok povećane radioaktivnosti mora do kraja razjasniti.

Kao posledica eksplozija hidrogenskih bombi u vazduhu (šezdesetih godina) osetno je bila povećana količina tricijuma (^{3}H) u atmosferi, mada se danas dobrim delom raspao, a sve većim sagorevanjem ugljovodonika povećava se količina ^{14}C, čime se remeti ravnoteža koja postoji milionima godina.

Treba još spomenuti primetna povećanja gama radioaktivnosti kod većih naslaga životinjskog izmeta (obično ovčjeg), koja potiču od urana, a moguće su i koncentracije cezijuma, pre Černobilskog akcidenta, koje bi poticale iz vremena proba atomskog oružja u vazduhu. Višestruka povećanja gama radioaktivnosti u odnosu na fon mogu se danas naći i u pepelu ognjišta u nekim predelima Srbije i Makedonije.

Povećani sadržaji urana, koji se mogu detektovati samo preko alfa zračenja, nalaze se u podzemnim vodama žitorodnih krajeva, gde se duži

niz godina koristi fosfatno đubrivo, gde je uran dospeo iz neprečišćenih fosfata.

I.2.4. Radioaktivna ravnoteža

I.2.4.1. ODNOSI PREDAKA I POTOMAKA

Pod pojmom radioaktivne ravnoteže podrazumeva se stalni odnos nuklida-pretka i njegovih potomaka. Ako se na pr. ekstrahuje hemijski čist uran (^{238}U), koji je samo alfa emiter, u njemu će se postepeno povećavati sadržaji potomaka — radijuma i drugih, sve dok se te količine posle izvesnog vremena ne ustale, radijum na 0,3 ppm itd. U geologiji je značajan prvenstveno uran-radijumov niz zbog urana koji je glavni predmet istraživanja.

Tabela I.2. Poluraspad nekih značajnijih prirodnih radioizotopa

Izotop	Ravnotežna količina %	Vreme polurasporeda $T_{1/2}$*	u sekundama	Konstanta raspada λ
^{238}U	1	$4{,}498\times10^{9}$ g	$1{,}41848\times10^{17}$	$4{,}8865\times10^{-18}$
^{234}Th	$1{,}42\times10^{-11}$	24,101 d	$2{,}0823\times10^{6}$	$3{,}333\times10^{-7}$
^{234}Pa	$4{,}83\times10^{-16}$	1,175 m	70,5	$9{,}832\times10^{-3}$
^{234}U	$5{,}45\times10^{-3}$	$2{,}475\times10^{5}$ g	$7{,}81051\times10^{12}$	$8{,}874\times10^{-14}$
^{230}Th	$1{,}76\times10^{-5}$	$7{,}7\times10^{4}$ g	$2{,}42993\times10^{12}$	$2{,}852\times10^{-13}$
^{226}Ra	$3{,}34\times10^{-7}$	1600 g**	$5{,}04922\times10^{10}$	$1{,}373\times10^{-11}$
^{222}Rn	$2{,}15\times10^{-12}$	3,825 d	$3{,}3048\times10^{5}$	$2{,}0974\times10^{-6}$

* g — godina, d — dan, m — minut

** Vrednosti za poluživot radijuma kreću se, prema raznim autorima, od 1590—1620 g., ali se u novije vreme najčešće navodi 1600. godina.

U tabeli I.2. prikazan je prvi deo uranovog niza, zaključno sa radonom, čije ravnotežno stanje ima veliki značaj kod istraživanja urana. Za godinu je uzeta srednja vrednost od 365,25 dana, tako da ona iznosi 31,557.600 sekundi (dan — 86.400 s). Ovde su, pre svega, date ravnotežne količine potomaka (M_2) u odnosu na pretka ^{238}U (M_1), čija je ravnotežna količina uzeta za jedinicu, prema obrascu:

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{A_2}{A_1}$$

gde su T_1 i T_2 vremena poluraspada (ista vremenska jedinica) pretka i potomka, a A_1 i A_2 njihove atomske mase. Konačne vrednosti se dobijaju množenjem koeficijentom obilnosti pretka (vrednosti oko 0,99).

Nagomilavanje količine potomka, kada se radi o dugoživućem pretku, vrši se po obrascu:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_1}{\lambda_2}(1 - e^{-\lambda_2 t})$$

gde su N_1 i N_2 broj atoma pretka i potomka.

Ako je poznata količina pretka N_1 (g), masa bilo koga potomka izračunava se po obrascu:

$$N_n = k \frac{\lambda_1 N_1 A_n}{\lambda_n A_1} \qquad (I.2.3.)$$

gde je A atomska masa, a k koeficijent obilnosti pretka (0,99). Na taj način može se naći na pr. količina ^{226}Ra (g) u ravnoteži sa 1 g ^{238}U:

$$N_{Ra} = 0{,}9927 \frac{\lambda U \times 1}{\lambda_{Ra}} \times \frac{A_{Ra}}{A_U} \approx 3{,}35 \times 10^{-7}\ g$$

$$\lambda_U = 4{,}88 \times 10^{-18};\ \lambda_{Ra} = 1{,}373 \times 10^{-11};\ A_U = 238;\ A_{Ra} = 226$$

Ovde nećemo ulaziti u izračunavanje vremena potrebnog za dostizanje ravnoteže. Napomenimo samo da je za uran-radijumov niz potrebno vreme potpune konsolidacije oko 800.000 godina, dok je na pr. za ravnotežu radijuma 226 i radona 222 potrebno svega tridesetak dana. Ravnotežno stanje između ^{226}Ra i ^{238}U se lako utvrđuje merenjem odgovarajućih karakterističnih energetskih pikova gama zraka (odeljak III.2.1.2 — Radiometrijske analize).

I.2.4.2. ZNAČAJ RADIOAKTIVNE RAVNOTEŽE U ISTRAŽIVANJU URANA

Ravnotežna stanja raznih transmutacionih sistema u prirodi imaju veliki značaj u geologiji, na pr. u geohemiji i izotopskoj geohronologiji (poglavlje IV.1). Ovde će biti reči o značaju ravnotežnog stanja, pre svega uranovog, a delom i aktinijumovog niza za istraživanje urana. Ovde se imaju u vidu dva aspekta uranove ravnoteže: prvi je traganje za povećanim koncentracijama urana, a drugi se odnosi na ocenu ovih koncentracija uglavnom na osnovu radiometrijskih analiza.

Kod ocene ravnotežnog stanja u obzir dolaze potomci dovoljno dugog života (poluraspada) da se mogu pratiti na relativno duge rokove. Iz uranovog niza to su ^{234}U (250.000), ^{230}Th (77.000) i ^{226}Ra (1600), a iz aktinijumovog niza samo ^{231}Pa (32.000), dok su svi ostali potomci, uključujući i torijumov niz, mnogo kraćeg života (u zagradi je dat poluraspad u godinama; vidi sl. I.9). Ravnoteža znači da je količina svih ovih radionuklida, kako predaka (^{238}U, ^{235}U) tako i potomaka — konstantna (Tabela I.2). Neravnoteža znači promenu međusobnih odnosa usled raznih procesa, u prvom redu hemijskog frakcionisanja, čak i kada se radi o različitim nuklidima istog elementa, kao na pr. ^{238}U i ^{234}U. Ovaj zadnji izotop se obično javlja u mobilnom (rastvornom) šestovalentnom stanju, više od prvog, pa je odnos $^{234}U/^{238}U$ vrlo promenljiv, naročito u površinskim uslovima. Ustvari, do poremećaja odnosno do povećanja ^{234}U u odnosu na svoga pretka dolazi najčešće kod prvobitno niskih koncentracija urana, pa bi to mogao da bude

kriterijum da li uran u rastvoru voda potiče od bogatog ili siromašnog izvora [9].

Radijum 226 je posebno interesantan kao indikator orudnjenja urana, ne toliko sam po sebi koliko njegov neposredni potomak ^{222}Rn. Radijum je ustvari najlakše rastvoran od svih navedenih elemenata odnosno njihovih nuklida, ali isto tako vrlo lako prelazi u nerastvoran sulfat. Najmanje je pokretan protaktinijum (^{231}Pa), pa se može smatrati indikatorom za količine ostalih elemenata odnosno karakterističnih radionuklida. Jedini potomak ^{226}Ra dužeg poluraspada je ^{210}Pb ili RaD (22 godine) i može da posluži kao pokazatelj duže aktivnosti ^{222}Rn u određenoj sredini, prvenstveno u tlu, ali ne duže od 100—120 godina, koliko bi bio rok detektabilnosti ovog radionuklida.

Mogu se najzad detektovati i finalni proizvodi raspada ovih nizova — ^{206}Pb i ^{207}Pb, ali i nezavisni ^{204}Pb, kao pokazatelj u odnosima. Prema nekim iskustvima, odnos $^{206}Pb/^{204}Pb < 18$ je dobar indikator uranovog orudnjenja, ali je već 20 loš pokazatelj [9].

Neravnoteža se javlja u mnogim ležištima urana i drugim sredinama širom sveta i smatra se u osnovi da je manjak ^{238}U posledica luženja, dok do njegovog obogaćenja dolazi usled savremenog deponovanja. Ponašanje urana, kao i radijuma, zavisi od redoks potencijala sredine (vidi II.1.1.3), tako da se višak rastvorenog ^{226}Ra nalazi u redukcionim sredinama, svuda gde je na pr. organska materija uticala na obaranje urana. Višak slobodnog (mobilnog) urana javlja se u domenu oksidovanih sulfidnih ležišta, gde dolazi do luženja urana i obaranja radijuma kao sulfata. Potpuno preovlađivanje nuklida radijuma može se naći u naslagama toplih izvora, kao posledica obaranja radijuma sa sulfatima Ba i Sr, kao i sa hidroksidima gvožđa ([9] cit. R o s h o l t, 1959). Ovome bi se mogli dodati oksidi Mn i minerali glina. Kao primer se može navesti izvor Majur-Slatina na južnom podnožju Cera, gde slabo termalizovana voda nosi samo radijum, kao uostalom i sve radioaktivne termalne vode (vidi III.2.1.3., 4. Radioaktivni izvor Majur-Slatina).

Utvrđivanje radijumske ravnoteže ima veliki značaj kod ocene ležišta urana, naročito kod proračuna rezervi, ako se koriste podaci gama karotaža. Ova ravnoteža može da se izrazi preko odnosa ^{226}Ra i ^{238}U, s tim što se ^{226}Ra može izraziti preko ekvivalentne količine urana, sa kojom bi bio u ravnoteži, a označava se sa eRa. Ovo se odnosi na analizu rudnog materijala u vidu probe, koja se podvrgava spektrometrijskoj gama radiometrijskoj analizi, određivanjem preko pikova ^{226}Ra i ^{234}Th (vidi III.2.1.2, Radiometrijske analize). Odmah pada u oči da i ^{234}Th može da bude u neravnoteži prema ^{234}U odnosno prema ^{238}U. Relativno prihvatljiva provera može se postići hemijskom (fluorimetrijskom) analizom urana, čija tačnost ipak može da bude poremećena promenom odnosa $^{234}Th/^{238}U$. Kada se uran određuje preko gama radiometrijskog karotaža (ukupna radioaktivnost), što se masovno primenjuje kod istraživanja ležišta urana, pretpostavlja se otsustvo većih koncentracija torijuma i kalijuma (što se brzo ustanovi), a uran se registruje na bazi gama zračenja uglavnom ^{214}Bi i ^{214}Pb. Ovde je od primarnog značaja da se na osnovu jezgra bušotine na odgovarajućem nivou gama karotažnog pika nađe stepen ravnoteže ^{226}Ra i ^{238}U, da bi se, u slučaju neravnoteže, eventualno izvršile korekcije gama

karotažnog urana (Uk). Na primeru ležišta urana kod Bukulje u Srbiji, A. Antonović i V. Omaljev* upotrebili su odnos eRa/Ur kao svojevrsni koeficijent tačnosti, kojim su vršili korekcije karotažnog urana. Ovaj koeficijent je za rudne koncentracije urana iznosio oko 0,8—0,9, što ukazuje ujedno i na relativno skorašnji prinos urana, dok je za podrudne koncentracije bio iznad jedan. Ovde je isto tako utvrđeno da je odnos hemijski analiziranog urana (Uh) i radiometrijskog urana (Ur) bio praktično jednak jedinici.

Detektovanje svih nabrojanih radionuklida vrši se različitim metodama, od kojih je najčešće primenjivana gama spektrometrija za određivanje ^{238}U (ali zajedno sa ^{234}U i ^{235}U) i ^{226}Ra u čvrstim materijalima, zatim i skupna alfa radiometrija (emanometrija) za određivanje ^{222}Rn i ^{228}Rn u vazduhu i vodama, kao i ^{226}Ra u vodama (Glava III, gama radiometrijske i alfa radiometrijske metode). Za ostale radionuklide, kao ^{234}U, ^{230}Th i ^{231}Pa, može se koristiti alfa spektrometrijska metoda (merenja u impulsnim jonizacijonim komorama), pri čemu, zbog malih razlika u energijama alfa zračenja, treba prethodno izvršiti hemijsko razdvajanje odgovarajućih elemenata. Ovde je isto tako moguća primena masene spektrometrije, što međutim iziskuje veoma skupe uređaje.

I.3. MERNE JEDINICE

Merenje jonizujućeg zračenja osniva se na dva osnovna fizička fenomena: jedan održava broj raspada jezgara (aktivnost izvora zračenja), a drugi se odnosi na efekte zračenja u okolnoj materijalnoj sredini (doza zračenja). Merne vrednosti su izražene u novim jedinicama (SI), a samo izuzetno su uporedo prikazivane i stare jedinice, u slučajevima kada su uzimani kao primer poneki stari dokumenti o merenju radioaktivnosti, kako je napomenuto i u uvodu.

I.3.1. Aktivnost izvora zračenja

Aktivnost radionuklida može se registrovati kroz broj jezgara koji se raspadaju u jedinici vremena. Na taj način jedinica aktivnosti izvora je jedan raspad u sekundi, koja se zove bekerel (becquerel) sa simbolom Bq.

Broj raspada u jedinici vremena $\Delta N/\Delta T$ za bilo koji radioizotop dobija se iz proizvoda λN (specifična aktivnost), gde je prvi množitelj konstanta radioaktivnog raspada (obrazac I.2.2), a drugi označava broj atoma u jednom gramu odgovarajućeg izotopa. Vrednost N dobija se kada se Avogadrov broj (6,0247 ili okruglo 6×10^{23}) podeli sa atomskom masom izotopa.

Stara jedinica kiri (curie — Ci) imala je vrednost broja raspada u 1 g ^{226}Ra, koja se može izračunati prema izrazu λN. Broj N je $6{,}0247 \times 10^{23}/226 = 0{,}02666 \times 10^{23}$ atoma; konstanta raspada je $\lambda = 0{,}6931/1600$, a da bi se izrazilo u sekundama, ovaj količnik množi se sa $3{,}154 \times 10^7$ (broj sekundi u 1 god.), pa je $\lambda = 1{,}373 \times 10^{-11}$; konačno je $\lambda N = 3{,}6616 \times 10^{10}$ raspada u sekundi, tako da 1 Ci odgovara okruglo $3{,}7 \times 10^{10}$ Bq.

Na taj način imamo sledeće odnose stare i nove jedinice:

$$1\ \text{Ci} = 3{,}7 \times 10^{10}\ \text{Bq} \qquad \text{(I.3.1)}$$

---

* Izveštaji (1986. i 1988. g.) u Geoinstitutu, Beograd.

Ovde treba navesti ove jedinice u odnosu na jedinične zapremine, na pr. za merenje radona (radijuma) u vazduhu i vodi:

$$1 \text{ eman} = 10^{-10} \text{ Ci/l} = 3{,}7 \text{ Bq/l} \qquad \text{(I.3.2)}$$

Nekada je primenjivana još jedna stara jedinica zvana mahe (mache), koja označava količinu radona u jednom litru fluida, koja u jonizacionoj komori stvara tok struje od 0,001 CGS jedinica ($3{,}33 \times 10^{-13}$A). Kako u 1 litri komore koncentracija radona 1 emana stvara tok od $0{,}275 \times 10^{-3}$ jedinica CGS, dobija se odnos 1 mahe = 3,64 emana = 13,5 Bq.

I.3.2. Doze jonizujućeg zračenja

Doza jonizujućeg zračenja može se izražavati pre svega preko efekta jonizacije, odnosno količine elektriciteta po jedinici mase (kulon po kilogramu — C/kg). Unošenje određene doze energije radioaktivnim zračenjem izražava se džulima po kilogramu (J/kg), pri čemu se posebno razlikuju efekti u ljudskom organizmu.

I.3.2.1. EKSPOZICIONA DOZA ZRAČENJA

Ekspoziciona doza jonizujućeg zračenja definisana je po Međunarodnom sistemu jedinica fizičkih veličina (SI) kao količina jona istog znaka ukupnog naelektrisanja od jednog kulona (1 C), koje stvara zračenje u vazduhu mase jednog kilograma (1 kg). Na taj način definiše se neimenovana jedinica C/kg. Kako je naboj jednog jona (jednog elektrona), $1{,}602 \times 10^{-19}$ C, onda jedan kulon daje $6{,}24 \times 10^{18}$ jona po kilogramu vazduha. Stara jedinica rentgen (R) označava količinu elektriciteta od 1 ESJ ($0{,}333 \times 10^{-9}$ C) koju stvara gama zračenje sa pridruženim česticama u 1 cm^3 (0,001293 g) vazduha. Na taj način dobija se ekvivalent:

$$1\text{R} = 2{,}58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \qquad \text{(I.3.3)}$$

U geologiji se koristi jačina ekspozicione doze zračenja, pri čemu je kao stara jedinica važila rentgen na čas (R/h ili manje jedinice kao mR/h ili μR/h). Nova (neimenovana) jedinica je $C.kg^{-1}s^{-1}$ ili C/kgs. Konverzija stare jedinice u novu vrši se na bazi konverzije jedinice ekspozicione doze (formula I.3.3):

$$1 \text{ R/h} = 2{,}58 \times 10^{-4}/3600 = 7{,}1667 \times 10^{-8} \text{ C/kgs ili}$$

$$1 \text{ μR/h} \approx 7{,}2 \times 10^{-14} \text{ C/kgs odn. } 0{,}072 \text{ pC/kgs}$$

Nepravilno je vršiti zamenu sa C = A.s za jedinicu A/kg.

I.3.2.2. APSORBOVANA I EKVIVALENTNA DOZA ZRAČENJA

Ove jedinice se ne koriste u geologiji, pa će o njima samo ukratko biti reči. Dimenzija apsorbovane doze jonizujućeg zračenja je džul po kilo-

gramu, a jedinica se naziva grej (gray), namesto stare jedinice rad, koja ima istu dimenziju:

$$1\ Gy = 1\ J/kg$$

$$1\ rad = 0{,}01\ Gy$$

Ekvivalentna doza zračenja (sivert — sievert, Sv) odnosi se isključivo na energiju zračenja apsorbovanu od strane čoveka. Iako ima istu dimenziju kao i prethodna (J/kg), apsorbovana energija bitno zavisi od karaktera zračenja. Ako se za gama i beta zračenje uzme faktor 1, neutroni imaju faktor 10, a alfa čestice čak faktor 20. Stara jedinica je rem:

$$1\ rem = 0{,}01\ Sv$$

Obe jedinice mogu se izraziti i kao jačina apsorbovane ili ekvivalentne doze — 1 Gy/s (jednako 1 W/kg) ili Sv/s (ali je nepravilno Gy/čas ili Sv/god.).

I.3.2.3. SPECIFIČNA AKTIVNOST I MASENI KOEFICIJENT SLABLJENJA

Ovde su izneta još dva pojma iz nuklearne fizike koji mogu imati izvestan značaj u geologiji, naročito kada se radi o masenom koeficijentu apsorpcije (aerogama prospekcija).

Specifična aktivnost radionuklida je $A_s = \lambda N$, gde je λ konstanta raspada, a N se dobija kada se Avogadrov broj podeli sa atomskom masom odgovarajućeg radionuklida (odeljak I.3.1.). Recipročna vrednost specifične aktivnosti ($1/\lambda N$) predstavlja masu radionuklida po jedinici aktivnosti (jedinica g/Bq). U Tabeli I.4. prikazane su obe vrednosti za neke značajnije radionuklide.

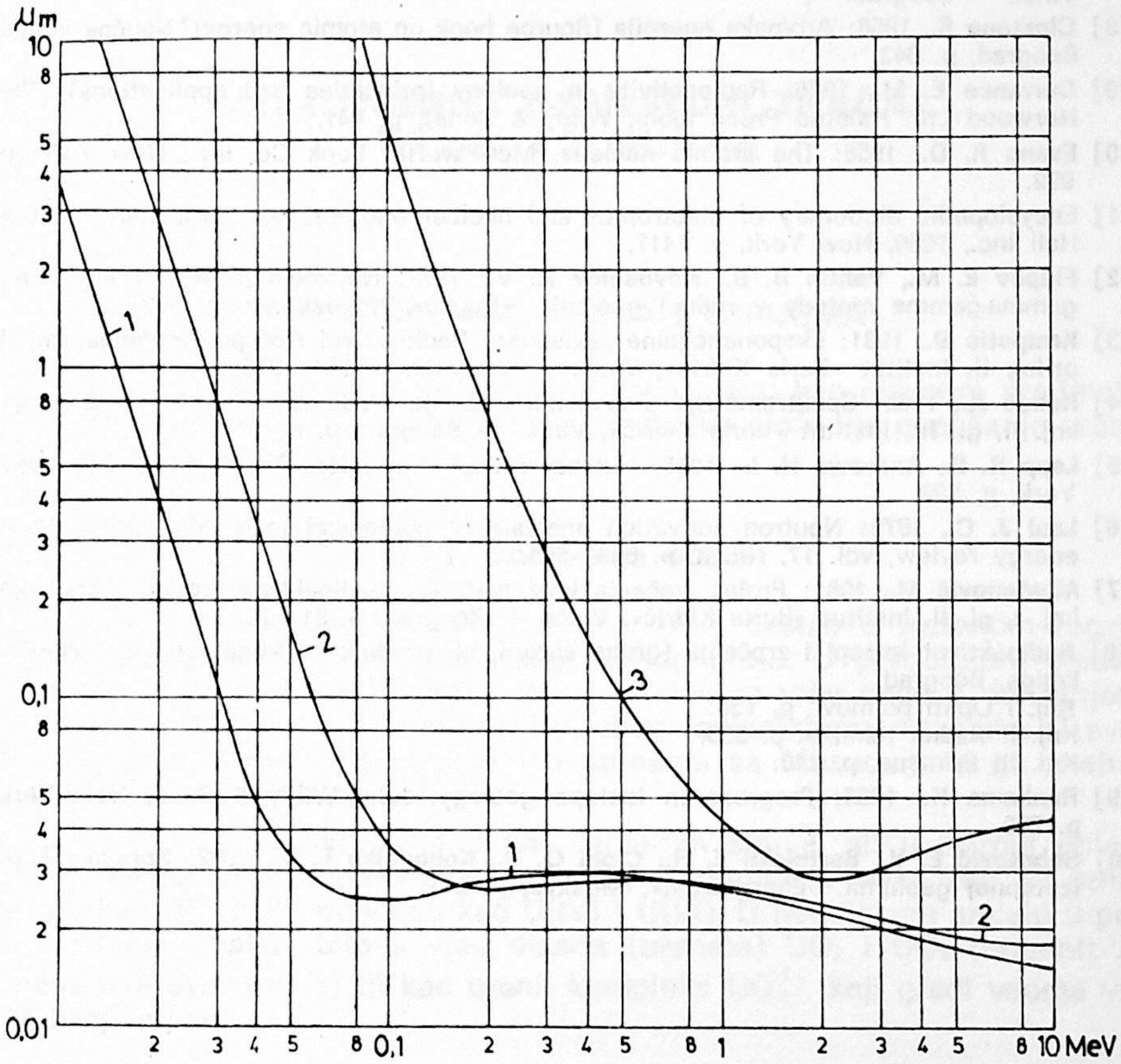
Tabela I.4.

Radionuklid	Poluraspad $T_{1/2}$*	λs^{-1}	λN	Masa (g) / 1 Bq
^{60}Co	5,57 g	$3{,}943\times10^{-9}$	$3{,}959\times10^{13}$	$2{,}526\times10^{-14}$
^{131}I	8 d	$1{,}003\times10^{-6}$	$4{,}613\times10^{15}$	$2{,}168\times10^{-16}$
^{137}Cs	30,1 g	$7{,}297\times10^{-10}$	$3{,}209\times10^{12}$	$3{,}116\times10^{-13}$
^{226}Ra	1600 g	$1{,}373\times10^{-11}$	$3{,}660\times10^{10}$	$2{,}732\times10^{-11}$
^{235}U	$7{,}1\times10^{8}$ g	$3{,}093\times10^{-17}$	$7{,}929\times10^{4}$	$1{,}261\times10^{-5}$
^{238}U	$4{,}5\times10^{9}$ g	$4{,}886\times10^{-18}$	$1{,}237\times10^{4}$	$8{,}085\times10^{-5}$

*h sat, d — dan, g — godina

Maseni koeficijent slabljenja (apsorpcije) je količnik linearnog koeficijenta slabljenja (apsorpcije, vidi I.1.3.5, Gama zračenje) i gustine odgovarajuće supstance [7]: $\mu m = \mu/\varrho$ a jedinica je m^2/kg. Na slici I.10 prikazana je promena masenog koeficijenta apsorpcije (u jedinici cm^2/g)

skupno za sve efekte prolaza gama zraka kroz neke supstance, u zavisnosti od promene energije zračenja.



Sl. I.10.
Ukupni maseni koeficijent slabljenja (cm^2/g): u 1. vazduhu, 2. aluminijumu i 3. olovu.

LITERATURA

[1] **Aničin I.**, 1981: Elementarne čestice. Radioaktivni izotopi i zračenje, knj. I, gl. I, Institut »Boris Kidrič«, Vinča — Beograd, p. 1—30.

[2] **Antonović A.**, 1987: Merenje gama radioaktivnosti u zemljištu kod Beograda posle černobiljskog akcidenta. Tehnika, Opšti deo, br. 7—8, Beograd, p. 629—632.

[3] **Baranov V. I.**, 1956: Radiometrija. ANSSSR, Moskva, p. 343.

[4] **Bek-Uzarov Đ.**, 1981: Elementarne fizičke veličine i jedinice u oblasti jonizujućih zračenja u međunarodnom sistemu jedinica — Sl. Institut »Boris Kidrič«, Vinča — Beograd.

[5] **Bek-Uzarov Đ.**, 1979: Standardni međunarodni simboli i nazivi osnovnih pojmova iz oblasti nuklearnih reakcija i jonizujućih zračenja. Institut »Boris Kidrič«, Vinča — Beograd.

[6] **Bek-Uzarov Đ.,** 1988: Nakon černobiljskog akcidenta: greške, pouke i iskustva. Nuklearna tehnologija br. 1, Beograd, p. 18—24.

[7] **Bek-Uzarov Đ., Vujić J.,** 1979: Standardni međunarodni nazivi i oznake fizičkih veličina i jedinica — SI u oblasti atomske i nuklearne fizike. Institut »Boris Kidrič«, Vinča — Beograd.

[8] **Clastone S.,** 1958: Atomska energija (Source book on atomic energy). Naučna knjiga, Beograd, p. 643.

[9] **Durrance E. M.,** 1986: Radioactivity in geology (principles and applications). Ellis Horwood Ltd. Halsted Press (John Wiley & Sons), p. 441.

[10] **Evans R. D.,** 1955: The atomic nucleus. McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, p. 972.

[11] Encyclopedic dictionary of electronics and nuclear engineering. Sarbacher, Prentice Hall Inc., 1959, New York, p. 1417.

[12] **Filipov E. M., Vahtin B. S., Novoselov A. V.:** 1972: Nejtron-nejtronnyj i nejtronnyj gamma-gamma metody v rudnoj geofiziki. »Nauka«, Novosibirsk, p. 347.

[13] **Krmpotić Đ.,** 1981: Eksponencijalne zavisnosti. Radioaktivni izotopi i zračenja, knj. I, prilog II, Institut »Boris Kidrič«, Vinča — Beograd, p. 251—256.

[14] **Kukoč A.,** 1985: Spektrometrija jonizujućih zračenja. Radioaktivni izotopi i zračenja, knj. II, gl. III, Institut »Boris Kidrič«, Vinča — Beograd, p. 63—91.

[15] **Lapp R. E., Andrews H. L.,** 1955: Nuclear radiation physics. Prentice Hall Inc., New York, p. 532.

[16] **Laul J. C.,** 1979: Neutron activation analysis of geological materials. IAEA, Atom. energy review, vol. 17, No. 3, p. 603—695.

[17] **Mlađenović M.,** 1981: Prolaz zračenja kroz materiju. Radioaktivni izotopi i zračenja, knj. I, gl. II, Institut »Boris Kidrič«, Vinča — Beograd, p. 31—72.

[18] Radioaktivni izotopi i zračenja (grupa autora, gl. urednik I. Draganić), 1962, Naučna knjiga, Beograd:
Knj. I Opšti pojmovi, p. 136.
Knj. II Radne tehnike, p. 353.
Knj. III Primena, p. 240.

[19] **Rankama K.,** 1963: Progress in isotope geology. John Wiley & Sons, New York, p. 705.

[20] **Sobotovič E. V., Bartnickij E. H., Cjonj O. V., Kononeiko L. V.,** 1982: Spravočnik po izotopnoj geohimii. »Energoizdat«, Moskva, p. 241.

GLAVA II

METALOGENIJA I PRIVREDNI ZNAČAJ URANA I TORIJUMA

II.1. GEOHEMIJA URANA I TORIJUMA

Najveći obim u ovom poglavlju pripada uranu kao glavnom predmetu izučavanja u ovoj knjizi, a i s obzirom na daleko složenije ponašanje urana u geohemijskom ciklusu.

II.1.1. Geohemija urana

Uran je prisutan u vasioni kao elemenat nastao u fuzionom (egzotermnom) izgaranju elemenata višeg rednog broja. U prvobitnom oblaku odnosno u fazi akrecije planeta bilo ga je znatno više nego u današnjem planetarnom (asteroidnom) materijalu, zbog radioaktivnog raspada. U svakom slučaju, u meteoritima kao i u stenama sa Meseca ima ga znatno manje nego u zemljinoj kori.

Uran se hemijski javlja u pet valentnih stanja, ali u prirodi dolazi gotovo isključivo u četvorvaletnom i šestovalentnom stanju, koji se označavaju kao U^{4+} i U^{6+} odnosno kao U(IV) i U(VI). U hemijskom smislu u prirodi se uran nalazi bilo u vidu oksida (uranata) UO_2 i UO_3 (uraninit je smeša ova dva oksida) ili kao uranil kompleks UO_2^{2+} koji gradi veoma veliki broj minerala.

II.1.1.1. URAN MAGMATSKOG POREKLA

U endogenim uslovima, količina urana povećava se u kiselim i alkalnim stenama, zajedno sa Th, Zr, Hf, TR, Nb i Ta, u vidu akcesornih minerala koji često idu uz biotit [10]. Kao ilustracija može se navesti granitoidni masiv Cera u SZ Srbiji, gde su sva značajnija povećanja sadržaja urana vezana za koncentracije akcesornih minerala u biotitu iz pegmatoidnih stena. Tipični akcesorni minerali urana ili nosioci urana su uraninit, uranotorit, betafit, monacit, sfen, pirohlor, alanit, epidot i dr.

II.1.1.2. URAN HIDROTERMALNOG POSTANKA

Geohemija urana u hidrotermalnim rastvorima je malo izučena i kontroverzna, pre svega zbog dubioze o genezi ležišta urana tzv. strukturne

kontrole (orudnjenja diskordantnog tipa). Ova orudnjenja, uglavnom žičolikog oblika, smatrana su ranije ad hoc hidrotermalnim, ali je veliki broj, naročito onih u prekambrijskim terenima, koja su pretrpela endogene-metamorfne promene, za koje se ne može pouzdano reći da li su rudonosni rastvori bili endogenog ili egzogenog porekla. Veliki broj drugih mlađih ili znatno mlađih žičnih orudnjenja, na pr. u Portugalu, Španiji, Francuskoj, Jugoslaviji i dr. podležu ovoj dilemi.

Na temperaturama ispod 400°C, prema sovjetskim i francuskim studijama, uran se transportuje u rastvorima bogatim CO_2, kao uranil karbonatni jon. Pad pritiska CO_2 je dovoljan da se taloži uranov oksid, u prisustvu fero gvožđa (sulfidi Fe, bazične stene). Kod nekih žičnih orudnjenja urana, koja se mogu smatrati hidrotermalnim, karakteristični pratioci su Ni, Co i Ag, nekad još sa Bi.

II.1.1.3. URAN U EGZOGENOM CIKLUSU

Pod ovim ciklusom se podrazumeva ponašanje urana u vodenom rastvoru, naročito transport i obaranje, što je od značaja za formiranje sedimentnih i infiltracionih ležišta.

Uran je u velikoj meri rastvoran u vodi u vidu šestovalentnog uranil katjonskog kompleksa UO_2^{2+} odnosno karbonatnih kompleksa UO_2OH^+ i $(UO_2)_3(OH)_5^+$, zatim negativnih karbonatnih kompleksa $UO_2CO_3^-$, $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ i $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ [14], ali isto tako u vidu fluorida, fosfata, arsenata i dr. Njihov opstanak u rastvoru zavisi međutim podjednako od više faktora kao što su temperatura, kiselost (pH), redoks potencijal (Eh), pritisak CO_2, zatim prisustvo absorbenata i reduktanata.

Uranil joni nastaju ustvari rastvaranjem inače teško rastvorljivih uranata — uraninita i kofinita, koji se kao primarne tvorevine nalaze u nekim magmatskim i drugim stenama kao akcesorni ili rasuti minerali. Rastvorljivost ovih uranata u vodi, pri temperaturi od 25°C, zavisi od pH, Eh i P_{CO2}. Tako na pr. pri Eh = 0 V stabilni su kod pH 0—8, a pri Eh = 0,2 stabilnost se održava kod pH 0—5. Porast pritiska P_{CO2} od 0,03 bara na 0,1 bar povećava rastvorljivost uraninita za više od 1000 puta, za vrednosti Eh iznad — 0,05 V, pri isto tako visokim vrednostima pH [14]. Zato se ne može govoriti o nekom konstantnom stanju rastvorljivosti ili nerastvorljivosti uraninita, koji bi se mogao smatrati, kao akcesoran mineral na pr. u granitu, kao povoljan ili nepovoljan izvor urana. U svakom slučaju u rastvoru uran cirkuliše samo u vidu uranilnih kompleksa, koji mogu, pri povoljnim uslovima da budu oboreni u vidu minerala, ali isto tako ponovo da budu rastvoreni, znatno lakše nego uranati.

Najvažniji uranilni minerali su vanadati karnotit i tjujamunit kao i fosfati grupe autunita, zatim silikat uranofan (silikat kofinit je uranat). Vanadati će se obarati samo ako su uranonosne vode ispirale primarne minerale koje sadrže vanadijum (na pr. montrezit ili neki vanadonosni liskuni), autuniti u prisustvu fosfora, bez vanadijuma, a uranofan pri deficitarnosti V i P, uz dovoljno SiO_2. Autunit i uranofan su najmanje stotinu puta rastvorljiviji od karnotita i tjujamunita, pa se daleko teže obaraju, izu-

zev u aridnim klimatskim uslovima odnosno u blizini granitoidnih stena, gde nastaje i kalijski autunit [14]. Tako se na pr. najveće koncentracije autunita u Jugoslaviji nalaze uz škriljave riolite odn. kvarcporfire između Strumice i Dojranskog jezera u Makedoniji.

Uranili u rastvoru mogu da budu adsorbovani od strane raznih materija kao što su prirodni koloidi, uključivši i organsku materiju, Fe (III) hidroksid, zeoliti, gline i dr. Maksimalna adsorpcija uranila od strane hidroksida gvožđa je između vrednosti pH 4—5 i 8—9, što su ujedno i rasponi minimalne rastvorljivosti uranila. Kada je jednom adsorbovan, uranil odn. uran tipa U(VI) može da bude redukovan u daleko nerastvorniji uranat tipa U(IV) kao uraninit ili kofinit, koji se inače mogu taložiti iz vode pri mnogo većem razblaženju nego što se doskora pretpostavljalo [14]. Redukcija se vrši uz istovremenu oksidaciju, na pr. Fe^{2+} (sulfidi ili fero silikati) u $Fe(OH)_3$, HS^- u SO_4, CH_4 (metan) u CO_2, H u H_2O i sl. Redukcija urana i oksidacija gvožđa idu po sledećoj formuli:

$$UO_2(CO_3)_3^{4-} + 2\,Fe^{2+} + 3\,H_2O = UO_2 + 2\,Fe(OH)_3 + 3\,CO_2$$

Nastali feri hidroksid može da pređe dehidratacijom odnosno rekristalizacijom u hematit, ali se ovaj mineral neposredno stvara u sličnim procesima na višim temperaturama (hematitizacija). Ukoliko adsorbovani uran ne bi bio redukovan, mogao bi da bude ponovo rastvoren i odnesen, najčešće usled povećanja pH (alkalna sredina) sa povećanjem CO_2, ali se isto dešava i sa znatnim smanjenjem pH (jače povećanje kiselosti).

Iz ovoga se može zaključiti da se, kod ponašanja urana u egzogenim uslovima uz prisustvo vode, radi o vrlo dinamičnim i često reverzibilnim procesima rastvaranja, transporta, fiksiranja i ponovnog obaranja, čiji hemizam još uvek nije dovoljno razjašnjen. Ovi procesi su stoga teško predvidljivi pa je zato i eventualna prognozna lokalizacija mesta gde bi se procesi mogli obaviti najčešće dubiozna. Određivanje tzv. rastvornog stanja u stenama (luženje razblaženom sonom kiselinom) samo ukazuje na uraninit kao akcesorni mineral u odnosu na teže rastvorljive nosioce urana (ukoliko im rešetka nije oštećena, pa se uran lakše iznosi), kao što su alanit, monacit, apatit, sfen, cirkon i dr. Međutim, da li će doći do rastvaranja tog uraninita, zatim do transporta, fiksacije i redukcije uranila iz vode i na kom mestu, može se govoriti samo uopšteno. Zato dolazi do ne malog razočarenja kada se na nekoj lokalnosti steknu svi geološki povoljni uslovi za orudnjenje (infiltracionog tipa u sedimentima na pr.) ali urana nema.

Na kraju treba pomenuti pojavu praškaste pehblende u mnogim orudnjenjima urana u Jugoslaviji, verovatno i u drugim orudnjenjima u Alpskom mobilnom pojasu, čiji geohemijski karakter i ponašanje u gore navedenim uslovima nisu proučavani. Može se očekivati da je eventualna povećana rastvorljivost praškaste pehblende u odnosu na masivnu pehblendu ili uraninit posledica daleko većih aktivnih površina mnogobrojnih sićušnih oolita, koji uz to nisu čvršće povezani.

II.1.1.4. SADRŽAJI URANA U STENAMA I PRIPOVRŠINSKIM VODAMA

Sadržaji urana u različitim stenama u kosmičko-globalnim razmerama prikazani su u tabeli II.1. U kiselim ili intermedijarnim odnosno alkalnim

stenama postoje isto tako osetne varijacije sadržaja urana i torijuma, koji su najčešće u jednom stalnom odnosu, a koji iznosi oko 3,5. To se vidi iz tabele II.2, gde su prikazani srednji sadržaji U i Th u nekim granitoidnim intruzivima kao i nekim kiselim i alkalnim vulkanitima Jugoslavije. Kada je reč o odnosu Th/U, ovaj bi mogao da bude i eksplicitniji kao pokazatelj mogućeg izvora urana, nego rastvorljivost u razblaženoj kiselini, ukoliko ovaj pokazatelj ima nekog bitnijeg značenja za ocenu uranonosnosti u univerzalnom smislu.

Tabela II.1. Klarkovi, K, U i Th u Zemlji i van nje

Sredina	K%	U ppm	Th ppm
Meteoriti*	0,045	0,009	0,038
Zemljina kora**	1,8	1,5	7,3
Bazične stene**	0,7	1	4
Kisele stene**	3,5	3	17
Peščarski sedimenti**	1,3	0,45	1,7
Škriljci, glinci**	2,7	3,7	12
Krečnjaci**	0,28	2,2	1,7
Morska voda*	0,039	0,003	0,00001

*[22], **[5].

Tabela II.2. Sadržaji U i Th u nekim magmatskim stenama Jugoslavije

	1	2	3	4	5	6	7	8
ppm U	9,7	5,7	1,3	11,7	4,5	4,3	6,4	1,9
Th	33	25	4,6	49	13	15	29	4,5
Th/U	3,4	4,4	3,5	4,2	2,9	3,2	4,5	2,4

1. Riodaciti, Mariovo, 2. dacito-andeziti, Kratovo-Zletovo, 3. andeziti, Timok-Pek, 4. trahitoidi, Gnjilane; granitoidi; 5. Cer, 6. Bukulja, 7. Janja, 8. Bujanovac, 1—3 [3]; 4 — A. Antonović, V. Filipović, 1975; 5[17]; 6 kao 4; 7—8 — S. Pavlović, 1964.

Sadržaji urana u pripovršinskim vodama (tekuće i podzemne vode) isto tako znatno variraju. Durrance [10] navodi podatke o sadržaju urana u površinskim vodama iz raznih izvora, kao na pr. o ruskim rekama (100 ispitanih reka) koje sadrže uran 0,07—7 ppb, srednje 0,5 ppb, u američkim rekama srednje 0,1 ppb, ali u uranonosnim terenima 1—10 ppb (u površinskim vodama) odnosno 1—150 ppb (u podzemnim vodama), a u vodama iz rudnika urana 15—400 ppb. U Jugoslaviji je slična situacija, mada su sadržaji urana u vodama u celini nešto viši i obično se kreću 1—2 ppb. U potocima na granitoidima Bukulje ima srednje 3 ppb i u bunarima 13 ppb, a u granitoidima Cera sve vode sadrže oko 0,7 ppb (S. Pokrajac, 1977—1980).

II.1.1.5. GEOHEMIJA RADIJUMA I RADONA

Geohemija radijuma i radona je svakako nerazdvojni deo geohemije urana, mada kao različiti elementi, pogotovo i različitih agregatnih stanja, imaju posebno geohemijsko ponašanje. Pošto su ova dva elementa proizvodi fizičkih procesa u okviru nuklearnog raspada urana, o njima je bilo više reči, delom i sa geohemijskog aspekta, što je neizbežno, u odeljku I.2.4.2, gde se govori o radioaktivnoj ravnoteži.

Količine radijuma i radona u zemljinoj kori mogu se dobiti na osnovu sledećih podataka: sadržaj urana u kori je 1,5 ppm (tabela II.1), odnos urana i radijuma je $1:3{,}3\times10^{-7}$, a odnos urana i radona $1:2{,}15\times10^{-12}$ (tabela I.2, odeljak I.2.4.1.). Kako je masa zemljine kore (do 40 km dubine) $5{,}7\times10^{19}$ t, masa urana je $8{,}5\times10^{13}$ t, masa radijuma $2{,}8\times10^{7}$ t, a masa ukupnog radona u zemljinoj kori je svega 175 t (po nekim autorima 100 t). O ponašanju radona u tlu i stenama biće daleko više reči u poglavlju III.2.2.

II.1.1.6. GEOHEMIJSKI CIKLUS URANA U ZEMLJINOJ KORI

Ciklus urana u zemljinoj kori započinje u dalekoj prekambriji najmanje preko oko 3100 miliona godina, koliko je najveća određena starost uraninita u arhajskim kvarcnim konglomeratima južne Afrike, čija se starost inače smatra 2800—2200 miliona godina. Dugo je trebalo da se konačno utvrdi detritično poreklo ovog uraninita, koji je posle deponovanja u konglomeratima pretrpeo razne endogene (hidrotermalne) promene, pod vrlo verovatnom pretpostavkom da je posle prelaska u detritus mogao opstati na površini samo usled deficitarnosti kiseonika u tadašnjoj atmosferi Zemlje. Poreklo ovog primordijalnog uraninita (i betafita) je svakako magmatsko, iz tadašnjih kiselih intruziva. Na više mesta postoje ekonomske koncentracije uranovih minerala rasutih u intruzivima, kao što su na pr. alkalni granitoidi (nefelin sijenit) na Grenlandu (1200 miliona godina) ili granitoidi Rössinga u Namibiji (betafit, uraninit, 600 miliona godina) i dr.

Najveće mase urana cikliraju od kiselih (alkalnih) magmatskih stena ili njihovih detritusa svih starosti, preko pripovršinskih vodenih tokova, do zamki najčešće u terigenim detritičnim stenama, obično uz pomoć ugljovodonika, po pravilu organogenog porekla. Ovo zadnje ipak važi za mlađu geološku istoriju Zemlje, ali je poznata uloga kerogena pri fiksiranju i obaranju urana u prekambriji, mada poreklo ovog ugljovodonika nije jasno. Jedan deo urana iz mora dospeva isto tako u taloge fiksiran kerogenima i fosforom, najverovatnije organogenog porekla. Manji deo urana izluči se iz endogenih (hidrotermalnih) rastvora. Sasvim je izvesno da je jedan deo uranonosnih sedimenata regenerisan u vidu anateksoidne prerade, čime je izvršena i reciklacija geohemijskog toka urana.

II.1.2. Geohemija torijuma

Geohemija torijuma je daleko jednostavnija od urana, pre svega zbog veoma ograničene rastvorljivosti jona Th^{4+}. U magmatskim stenama ciklus torijuma je tesno povezan sa uranom, tako da se uglavnom nalaze u istim akcesornim mineralima, kao torit (uranotorit), monacit, cirkon, sfen i ala-

nit. Tako na pr. monacit iz granitoida kod Stalaćkih visova sadrži 2300 ppm U i 50000 ppm Th, sfen iz granodiorita Surdulice sadrži 290—520 ppm U i do 380 ppm Th, a cirkon iz granita Janje na Staroj planini sadrži oko 3500 ppm U i 1700—3200 ppm Th (S. Pavlović, M. Ristić, 1961. i 1963). Torijum se isto tako nalazi u uraninitu katatermalnog postanka, ali ne ide dalje u niže temperaturne i egzogene rastvore, no pomenuti akcesorni minerali kao rezistentni sastojci ulaze u detritus. Moguća je eventualna magmatogena reciklacija u procesima anateksisa ovih sedimenata.

II.2. MINERALOGIJA URANA I TORIJUMA

Ovde je dat jedan skraćeni prikaz mineralogije urana i torijuma, uz izbor važnijih minerala prema obilnosti i značaju ([4] i [15], kao i Dana's System of Mineralogy, 1946). Pregled je prikazan opisno i tabelarno.

II.2.1. Minerali urana

Uran gradi ili učestvuje u vrlo velikom broju minerala, kao oksida, silikata, titanata, liskuna-fosfata, vanadata i dr.

Oksidi su ekonomski daleko najznačajniji minerali urana i javljaju se u više morfogenetskih varijeteta, kao što su **uraninit** (na ruskom настуран), **pehblenda** ili **praškasta pehblenda.**

Uraninit dolazi u kristalnoj formi u visokotemperaturnim orudnjenjima, obično u pegmatitskoj fazi, pri čemu često sadrži, pored olova, nešto torijuma i retkih zemalja. Pehblenda po pravilu nastaje u hidrotermalnim, a praškasta pehblenda u infiltracionim orudnjenjima, ali se i u ovim zadnjim može naći masivna pehblenda i obratno. U ova dva zadnja varijeteta praktično nema torijuma i jedina primesa je olovo, a sporadično i cirkonijum.

Svi ovi oksidi su uvek smeše četvorovalentnog (UO_2) i šestovalentnog (UO_3) urana, pri čemu sadržaj UO_2 varira najčešće od 45—72%, a UO_3 od 13—35%. Na taj način sadržaj oksida urana varira u širokim granicama od 65—95%. Sledeća komponenta po obilnosti je olovo, koje po pravilu nastaje radioaktivnim raspadom urana (PbO najčešće 5—15%), zatim — kod uraninita — torijum i retke zemlje (TR — najviše cer i lantan) i to 2—14% ThO i 1—12% TR_2O_3 sa nešto itrijuma.

Silikati odnosno hidrosilikati urana su drugi po učestalosti, mada su relativno kasno zapaženi i izučeni. Tako je na pr. **kofinit** tačno dijagnosticiran tek 1955. godine, s obzirom da je makroskopski i mikroskopski vrlo sličan (praškastoj) pehblendi. Ovaj mineral sadrži obično 46—68% UO_2, do 45% UO_3, 10—16% SiO_2 i 1,5—5% H_2O. Javlja se kako u endogenim (hidrotermalnim) tako i u egzogenim mineralizacijama. **Uranofan** je jedan od najčešćih sekundarnih (egzogenih) minerala urana, mada se zbog neupadljive boje i oblika obično teško zapaža, a za razliku od kofinita, koji je čest rudni mineral, nema veći ekonomski značaj (sadrži 65% U_3O_8).

Titanati su visokotemperaturni minerali, javljaju se u pegmatitskim, pneumotolitskim i katatermalnim tvorevinama, ali imaju podređen ekonom-

Tabela II.3. Hemijske i fizičke osobine značajnijih minerala urana i torijuma

Naziv minerala	Hemijska formula	Oblik	Boja	Tvrdina	Specifična težina	Ostali podaci
Uraninit	Neodređena smeša UO_2+UO_3	kocka, oktaedar	Crna	5,5—6	10,5	Nekad zelenkasta
Pehlblenda	„ „ „	Masivan, radijalni agregati	„	3—4	3—9	
Praškasta pehlblenda	„ „ „	Radijalna mikroskopska zrna	„	Engl. »sooty pitchblende«, franc. »néopechblende«, nemač. »Uranschwärze«, ruski »урановая черн«		
Kofinit	$U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$	Finozrnast, masivan	„	5—6	5,1	Mrki ogreb
Uranofan (uranotil)	$CaO \cdot 2\,UO_3 \cdot 2\,SiO_2 \cdot 6\,H_2O$	radijalan, igličast, masivan	Bledo žuta	2—3	3,8	
Branerit	$U\,Ti_2O_6$	kristalni oblici	Crna	4,5—5,5	4,2—5,4	Dominantan UO_3
Davidit	$(Fe, U)\,TiO_3O_7$	Piramidalni kristali	Sivo do mrko crna	5—6	4,5	Varijetet ferutit kod Prilepa
Betafit	$(U, Ca)_{2-x}(Nb, Ta, Ti)_2O_6(OH)_{1-x}$	Oktaedri	Zelenkasto crna	∼4	3,4—4,9	
Autunit	$Ca(UO_2)_2(PO_4)_2\,10 — 12\,H_2O$	Listasti kristalići	Jarko žuta	2—2,5	3—3,2	Intenzivna fluorescencija pod UV zracima
Torbernit	$Cu(UO_2)_2(PO_4)_2\,12\,H_2O$	Bipiramidalni kristali	Smaragdno zelena	2—2,5	3,2	
Tjujamunit	$Ca(UO_2)_2(VO_4)_2\,5 — 8\,H_2O$	Kompaktne do kristalaste mase	Jarko žuta	mek	3,3—3,6	
Karnotit	$K_2O \cdot 2\,UO_3 \cdot V_2O_5 \cdot n\,H_2O$	Zemljast	Žuta	2—3	∼4	
Torijanit	ThO_2	Kocke	Crna	5,5—7	9,7	
Torit	$Th\,SiO_4$	Kocke	Mrkocrna	4,5	6,7	
Oranžit	„	Masivan	Narandžasta	4	4,1	Torit sa vodom
		Minerali — nosioci torijuma				
Monacit	$TR(PO_4)$	Kristalni oblici	Raznobojan	5—5,5	4,6—5,4	Najčešće 4—9% ThO_2
Bastnezit	$TR\,F(CO_3)$	Sitno kristalast, zrnast	Žuta do crvena	4,5	5	Sa Y, 0,2—0,3% ThO_2

ski značaj. **Branerit** i **davidit** su oksidi urana i titana u različitim proporcijama, uz razne druge primese. Tako na pr. branerit sadrži, pored glavnih komponenti, još oko 3,5% CaO, 13% ThO_2, 7,4% CeO_3, 6,5% Y_2O_3. Davidit isto tako sadrži primese Fe, TR, Cr, V, Nb, Th i dr., pored sadržaja 7—10% U_3O_8. Nalazi se u pegmatitima, granitima, amfibolskim dajkovima i sl., ali je prisutan i kao rudni mineral u nekim uranovim ležištima u Australiji (Brouken Hil, Radijum Hil i dr.). Ovde treba navesti i **betafit** koji nije izraziti titanat, kao što se vidi iz formule (tabela II.3) i sadrži obilne primese. Tako na pr. kalcijum može biti zamenjen sa retkim zemljama do 16%; inače, sadržaj U_3O_8 ide do 27%. Nalazi se kao rudni mineral u ležištu urana Bankroft u Kanadi, a ima ga i na Madagaskaru, zajedno sa nekim torijumovim mineralima, kao i u poznatom velikom ležištu urana Rössing u Namibiji.

Uranovi **liskuni-fosfati** i **vanadati** su česti egzogeni minerali, mada im je ekonomski značaj sasvim podređen. **Autunit** se obično javlja u obliku liski, koje odbleskom svetlosti još više potenciraju žutu boju, dok se **torbernit** javlja u obliku jasno uočljivih jarko zeleno-žutih kristalića. Dva slična vanadata, **tjujamunit** i **karnotit** su česti minerali na izdancima pehblende, koji su dugo bili izloženi atmosferilijama, odnosno površinskim uticajima uopšte, naročito u ležištima tipa platoa Kolorada u SAD (»roll« tip). Neki od ovih minerala intenzivno fluoresciraju pod ultravioletnim zracima, što se koristi kao jedna od prospekcionih metoda za otkrivanje urana. Sadrže obično 45—55% U_3O_8.

Pored navedenih, mogli bi se ukratko navesti i još neki češći sekundarni minerali, na pr. uranati olova, vrlo živih žutonarandžastih do crvenih boja, sa prelazom u mrke pa i crne boje, kao što su bekerelit i kirit, koji zajedno sa još nekim isto tako sekundarnim mineralima čine smešu, ranije nazivanu skupnim imenom gumit. Slede zatim arsenijat bakra i urana cojnerit, pa barijum vanadat urana fransevilit, kao i razni sulfati, molibdati, selenidi, teluridi i dr.

II.2.2. Minerali torijuma

Mineralogija torijuma je znatno jednostavnija, a najznačajniji minerali su oksid **torijanit** i silikat **torit.** Kod torijanita sadržaj ThO_2 varira obično od 60—90%, a oksida urana (preovlađuje UO_3) od 5% do čak 40%, uz nešto retkih zemalja (do 8% oksida TR) i olova (do 5% PbO). Kada je sadržaj urana visok, ovaj mineral dobija ime uranotorijanit. Torit teoretski sadrži 81% ThO_2 i 19% SiO_2, ali isto tako ima primesa U, TR (do 11% TR_2O_3), Y, Zr, Pb i dr. Kada preuzme malo vode, dobija narandžastu boju, pa se ovaj varijetet naziva oranžit. Oba ova torijumova minerala javljaju se kao akcesorije u granitima i pegmatitima, odakle lako prelaze u rasipe, ali nemaju ekonomski značaj. Torit se nalazi u zapaženim količinama u granitu Motajice.

Glavni ekonomski značajni nosioci torijuma su **monacit** i **bastnezit,** prvi fosfat, a drugi fluorni karbonat retkih zemalja. Monacit sadrži torijum od 2,5% do čak 20%, koji je najverovatnije primešan u vidu silikata — torita. Monacit je uz to znatno češći akcesorni mineral od torijanita i torita, a i tvrdina mu je osetno veća, pa ga zato mnogo više ima u rasipima

(morskim plažama). Bastnezit se nalazi kao rudni mineral u vidu rudnih žica i u karbonatitima (diseminacije), a sadrži oko 0,1% Th.

II.3. MINERALNA LEŽIŠTA URANA I TORIJUMA

Ovde će biti reči prvenstveno o uranu, kao najvažnijoj metaličnoj energetskoj sirovini, koji se nalazi u mnogobrojnim raznovrsnim tipovima ležišta širom sveta. Uprkos izvanredno izučenoj metalogeniji urana, geneza izvesnih značajnih tipova ležišta urana je još uvek kontroverzna, u smislu suštinske dileme o descedentnom ili ascedentnom prinosu rudne supstance. Za uran je karakteristično da je ipak veći deo ekonomski značajnih koncentracija u svetu, a pogotovo onih sa niskim sadržajima (fosfati, crni škriljci), koji nose ogromne količine metala, nastao u supergenim uslovima. Zbog ovih dilema klasifikacije osnovane na genetskim kriterijumima, pored velike razuđenosti, nisu dovoljno indikativne, pa se ležišta urana u svetu razvrstavaju prema jednostavnim praktičnim kriterijumima. Genetske klasifikacije predstavljaju ipak značajan pristup u izučavanju metalogenije urana i kao takve su nezaobilazne.

Jankovi ć [13] daje za jugoslovenska ležišta urana klasičnu podelu na pegmatitska, pneumatolitska, hidrotermalna, infiltraciona i sedimentna, izdvajajući određene metalogenetske uranonosne epohe i područja, slično kao za druge metale.

Ziegler [32] sva poznata svetska ležišta vezuje za određene geotektonsko-strukturne jedinice, kao što su arhajska kratonska jezgra (starija od 2500 miliona godina), sa osnovnom masom (bejsment) i formacijom pokrivača, zatim proterozojski, kaledonski, hercinski i alpski ubrani lanci ili orogeni, uključujući i američke kordiljere, sa geosinklinalnim spratovima i formacijama pokrivača. Ležišta po tipovima su piritonosni konglomerati, kontinentalni peščari, kvazimonometalne žice, diseminacije sa stratiformnom kontrolom, žice sa polimetalima, žice sa magnetitom, ležišta sa molibdenom u vezi sa vulkanitima, epimetamorfni peribatolitski škriljci, pegmatoidi i skarnovi, alkalni kompleksi i karbonatiti (U i Th) i kalkareniti.

Pomenute praktične klasifikacije bazirane su obično na morfogenim obeležjima ili na litološkom karakteru matične stene, ali se isto tako prave razlike između minerogeneze urana uopšte i mineralnih ležišta kao ekonomske kategorije.

Rodonačelnik ovih racionalnih klasifikacija je francuski geolog Gangloff [11], koji je sva ležišta urana u svetu svrstao u samo dva tipa: a) ležišta sa strukturnom kontrolom, u prvom redu žična, koja dominiraju među endogenim tipovima, i b) ležišta sa stratigrafskom kontrolom, gde spadaju infiltraciona i sedimentna ležišta.

Engleski geolog Bowie (Bowie [6]) predložio je vrlo sličnu, nešto proširenu klasifikaciju, sa podelom ležišta urana na tri osnovne grupe: (1) diskordantna, gde spadaju dislokativna, pretežno endogena, žična i žičolika ležišta, uključivši i diseminacije u magmatskim stenama, (2) penekonkordantna (bilo bi racionalnije — penekordantna), što bi značilo pseudokonkordantna, vezana prvenstveno za (terigene) konglomerate i peščare, rasipnog i infiltracionog, a delom vero-

vatno i hidrotermalnog postanka, i (3) konkordantna, gde spadaju marinska sedimentna ležišta, kao što su crni (bituminozni) uranonosni škriljci i uranonosni fosfati. Termin »diskordantan« koji se odnosi na morfogeno-dislokativni tip rudnog tela (žice i sl.) može izazvati nesporazum uvođenjem isto tako novog tipa ležišta urana vezanog po postanku za jednu značajnu diskordanciju u proterozoiku, negde pre oko 1800 miliona godina, naročito u Kanadi i Australiji, što sa prvim terminom, iako veoma sličnim, nema nikakve veze.

Još praktičniju klasifikaciju predložio je američki geolog Najnindžer (Nininger [16]) isto tako za ekonomski značajnija ležišta urana: peščari, konglomerati, škriljci i žice, što je u osnovi slično sa Bowievom klasifikacijom.

Međunarodna atomska agencija u Beču (IAEA) primenjuje u novije vreme svoju (treću u ovom pregledu) klasifikaciju, blisku sa prvim dvema, ali potpuniju [28]:

1. Ležišta u kvarcnim konglomeratima (odnosi se na arhajske konglomerate odnosno penekonkordantna orudnjenja urana).
2. Ležišta u diskordanciji (novi tip, vezan za proterozojsku diskordanciju kao regionalno-geološkog pojma, za razliku od po imenu sličnog morfogenetsko-dislokativnog tipa, kako je objašnjeno u prethodnom tekstu).
3. Magmatska ležišta (pegmatoidi, diseminacije).
4. Žična ležišta (diskordantna, po Bowieu).
5. Ležišta u peščarima.
6. Površinska ležišta (uglavnom kalkreti).
7. Ostalo (gde bi spadali i marinski crni škriljci kao i fosfati, između još nekih drugih tipova).

U sledećim poglavljima dat je sasvim kratak prikaz uranovih ležišta i orudnjenja u pojedinim kontinentima, regionima i zemljama, uzimajući u obzir klasifikovanje po gornjim kriterijumima. Može se smatrati da ovako skraćeni pregled zadovoljava potrebe za razumevanje osnovne materije iznesene u ovoj knjizi.

II.3.1. Severna Amerika

Najznačajnija ležišta diskordantnog (dislokativnog, u morfogenom smislu) i delom penekonkordantnog tipa nalaze se najvećim delom u centralnoj Kanadi, u severnom delu države Saskačevan, u predelu jezera Atabaska. Ovde je smešten veliki uranonosni rejon Biverlodž (Beaverlodge), koji obuhvata oko tridesetak ležišta, između kojih je sada već povađeno orudnjenje Ganer (Gunnar). Ovde se nalazi jedan od najvećih rudarsko-prerađivačkih kompleksa urana na svetu, u okviru ležišta Ki Lejk (Key Lake). Na 115 km SI od Ki Lejka otkriveno je oko 1980. godine nesumnjivo najbogatije i jedno od najvećih ležišta urana na svetu — Cigar Lake (Sigar Lejk). Prema programu bušenja (65 bušotina) realizovanom u 1983. godini [7] utvrđeno je da je rudonosna struktura duga 1700 m, široka 100 m, a zaleže u peščarima Atabaska na dubini od 410—440 m ispod površine. U 7 najboljih bušotina srednja debljina rudnog sloja je oko 16 m,

sa srednjim sadržajima 7,2—24% U_3O_8. Ukupne rezerve, prema podacima iz 1985. godine [8], kategorije sigurnih rezervi, donje granice sadržaja 0,1%, iznosile su 110.000 t metala sa 12% U, dok su u drugom rudnom telu ka zapadu otkrivene verovatne rezerve od daljih 40.000 t urana sa 4% metala. Novo rudno telo (Tobia Lake) otkriveno je na 800 m severno od Sigar Lejka. U ovom ležištu uran se nalazi u paragenezi sa mineralima As, Ni i Co i sulfidima gvožđa, slično kao i kod Ki Lejka. U ovom rejonu nalazi se i jedno značajnije monometalno ležište urana Rebit Lejk (Rabbit Lake).

Većina ležišta urana u Saskačevanu, čiji postanak, u smislu descedentnog ili ascedentnog prinosa urana, nije jasan (ležišta ponekonkordantnog tipa), vezuju se za pomenutu proterozojsku diskordanciju, gde mlado-prekambriski, gotovo neporemećeni peščari formacije Atabaska leže sa izrazitom diskordancijom preko metamorfisanih granita i kvarcita donje prekambrije. Treba ponovo naglasiti da ovaj tip nema veze sa diskordantnim tipovima u morfogenetskom smislu (p o B o w i e u), pa bi možda termin »ležišta diskordancije«, zbog moguće konfuzije, trebalo izostaviti u postojećim klasifikacijama.

Uz gore navedena ležišta trebalo bi navesti i neka manja ležišta urana u istom regionu Saskačevana. To su pre svega orudnjenja u proterozojskim fluvijalnim sedimentima, zatim u predelu Šarlbua Lejk (Charlebois Lake), tri mala bogata ležišta vezana za jednu prstenastu strukturu prečnika oko 40 km, u pomenutom peščaru Atabaska.

Tipična p e n e k o n k o r d a n t n a ležišta imaju veliki značaj ne samo u Kanadi i SAD nego i u svetu, mada se ovde radi o orudnjenjima vrlo različite starosti, praktično tokom cele geološke istorije zemljine kore, od arhaika do tercijara. Ovde se ustvari mogu razlikovati dva osnovna tipa ležišta urana prema sredini zaleganja: p e š č a r s k i i k o n g l o m e r a t s k i.

P e š č a r s k a ležišta urana nalaze se u SAD i vezana su za terigene, prvenstveno fluvijalne sedimente trijaske do tercijarne starosti u državama Vajoming, Kolorado-Juta, Novi Meksiko i Teksas (južni deo). To su ustvari infiltraciona ležišta, gde je uran obaran iz podzemnih voda u zonama tzv. redukcionih barijera, gde je glavni faktor redukcije nagomilana ugljificirana biljna materija, mada ima slučajeva kada je obaranje urana izazvano tečnim ugljovodonicima. Veći deo ovih ležišta pripada tzv. tipu roll-front ili skraćeno »rols« tipu. Dimenzije rudnih tela jako variraju, od nekoliko desetina do par stotina metara po protezanju, debljine 1—30 m. Srednji sadržaji urana su obično 0,1—0,2%, mada se mogu naći i znatno bogatije partije. Primarni minerali su pehblenda i kofinit, koji su na površini oksidirani i pretvoreni u karnotit.

Ležišta urana k o n g l o m e r a t s k o g tipa vezana su za grubozrne kvarcne konglomerate proterozojske starosti (nešto preko 2000 miliona godina) u JI Kanadi, u predelu jezera Hjuron, kod lokalnosti Eliot Lejk, Blajnd River, Egnju Lejk (Eliot Lake, Blind River, Agnew Lake). U ovom kompleksu debelom 1000 m orudnjene su pojedine partije 30—50 m, sa debljinom uranonosnih slojeva oko 3 m. Uran se nalazi u cementu konglomerata u vidu uraninita, zajedno sa piritom. Srednji sadržaji su oko 0,12% U_3O_8, uz velike rezerve od 200.000—300.000 t U_3O_8. Detaljnije o genezi biće reči u opisu sličnih ležišta u južnoj Africi.

K o n k o r d a n t n a ležišta kao što su marinski crni škriljci (formacija Čatanuga — Chattanooga) i fosfati (formacije Fosforija — Phosphoria) zauzimaju velika prostranstva u SAD, ali se zasada uran dobija samo kao uzgredan proizvod iz fosfata.

II.3.2. Latinska Amerika

Ležišta d i s k o r d a n t n o g tipa su gotovo dominantni nosioci ekonomski značajnih količina urana na ovom podkontinentu.

U **Meksiku** su to orudnjenja u kiselim vulkanitima (ležište Chihuahua predstavlja hidrotermalno punjenje u brečastim kanalima, sa oko 0,1% U_3O_8, uz nešto molibdena, koji je i supergeno prinošen) i andezitima (oblast Sonora, ležište Amoles sa uranom u pukotinama, uz srebronosni galenit). Rudna tela su relativno malih dimenzija, sa 1000—2000 t urana.

U **Brazilu** se najveće uranonosno rudno područje nalazi na platou Posos de Kaldas (Poços de Caldas), površine oko 1000 km², sa nefelin-sijenitskim vulkanitima i kalderama kao vulkanskim oblicima (gornje-kredne do tercijarne starosti). Ovde se nalazi verovatno supergeno premeštan i koncentrisan uran sa molibdenom (u vidu supergenog minerala ilsemanita). Rezerve urana su 22.000 t, a molibdena 25.000 t, koje su većim delom povađene. Na istom području nalaze se i velike rezerve torijuma, a ima i cirkonijuma. Značajna lokalnost je isto tako Lagoa Real u istočnom Brazilu, gde je uran vezan za albitite (donji proterozoik) sa rezervama od preko 50.000 t U_3O_8, srednjeg sadržaja 3,5%.

Ležište urana p e n e k o n k o r d a n t n o g tipa imaju isto tako veliki značaj u zemljama Latinske Amerike.

U **Meksiku** se nalazi više orudnjenja vezanih za sedimente, ali su malih dimenzija, a najznačajnije je ležište u provinciji Nuevo Leon u SI delu zemlje sa više rudnih tela od po 1000 t U_3O_8 sadržaja 0,05—0,14%, u vidu kofinita i pehblende.

U jugoistočnom delu **Brazila** nalaze se orudnjenja tipa arhajskih kvarcnih konglomerata, istih kao u Kanadi i južnoj Africi, ali sa mnogo manjim količinama urana. U istočnom delu ove zemlje, u predelu Itataia, nalaze se donje proterozojski gnajsevi i kristalasti škriljci, koji sadrže mrko-crvenu fosfatsku stenu, sa smešom apatita, kalcita i kalcedona (»kolofanit«), sa 21% P_2O_5 i 0,14 U_3O_8 odnosno sa rezervama 14 miliona tona P_2O_5 i 77.000 t U_3O_8. U južnom Brazilu, kod mesta Figuiera, nalaze se srednje-permski fluvio-deltaični uranonosni sedimenti sa rezervama od 2000 t i sadržajem oko 0,2% U_3O_8, pored većih masa rude sa 0,03—0,04% U_3O_8.

Argentina je nosilac ekonomski značajnijih orudnjenja urana u sedimentima, od kojih se najveće količine nalaze u regionu Siera Pintada, sa istoimenim ležištem u permskim i permotrijaskim peščarima. Uran se nalazi u vidu uranofana i uraninita sa rezervama 12.000 t i sadržajem 0,11% U_3O_8. U ovim istim (tzv. Prekordiljerskim) terenima nalazi se još jedno ležište urana u permokarbonskim peščarima — Saladillo, sa pehblendom i uranofanom i sadržajem 0,074% U_3O_8.

II.3.3. Afrika

Na ovom kontinentu nalaze se najveći aktivni rudnici urana na svetu, bilo sa podzemnom eksploatacijom (Arlit u Nigeru) ili sa površinskim kopom (Rössing u Namibiji), pored mnogih drugih značajnih ležišta urana.

Ležišta d i s k o r d a n t n o g tipa imaju u Africi manjim delom istorijsku ulogu. Među takve spada ležište Šinkolobve u južnom Zairu (bivša provincija Katanga) gde se pored minerala nikla i kobalta nalazi i uraninit. Ovo ležište je inače poznato po veoma bogatoj asocijaciji od 67 minerala. Pored ovog, pominje se, u novije vreme, jedno značajno žično ležište urana u Alžiru, vezano za granite, sa rezervama od 26.000 t urana. Mnogo veći značaj ima pomenuto ležište Rössing (Namibija) diseminacionog (»porfirskog«) tipa u granitoidima. Starost orudnjenja je 510 miliona godina, glavni uranovi minerali su uraninit i betafit, sa sadržajem 0,04% U_3O_8 i ogromnim rezervama.

Ležišta urana p e n e k o n k o r d a n t n o g tipa imaju veći značaj od prethodnog. To su pre svega kvarcni konglomerati **Withwatersranda** u Južnoafričkoj Republici, koji se protežu na površini od 10.000 km². Radioaktivnost je ovde otkrivena još 1915. godine, ali je proizvodnja urana počela tek 1952. godine, tako da se uran (0,025% u rudi) dobija kao uzgredan proizvod uz zlato. Glavni mineral je uraninit, koji je rasipnog postanka, a jedino tumačenje što nije bio razoren tokom veoma dugog bitisanja u egzogenim uslovima je otsustvo kiseonika u tadašnjoj atmosferi (pre 2800—2200 miliona godina). Uraninit je kasnije pretrpeo izvesne transformacije hidrotermalnog karaktera, što je dugo dovodilo do nedoumice u pogledu njegovog postanka. U **Nigeru** se nalazi nekoliko velikih ležišta urana (u eksploataciji) u karbonskim do jurskim fluvijalnim peščarima, sa rudnim telima tipa »rolls«. To su ležišta Arlit (pomenut kao najveći podzemni rudnik u svetu), Akouta, Afasto Ouest i dr. Srednji sadržaji se kreću 0,25—0,42% U, sa pojedinačnim rezervama do 20.000 t urana. Ležište Mounana-Oklo u **Gabonu** nalazi se u prekambrijskim peščarima, glavni minerali su kofinit i pehblenda, u pojedinim delovima i sa koncentracijama od blizu 80% U_3O_8, tako da su ova rudna tela aktivirana kao prirodni nuklearni reaktori (poglavlje IV.4. Fenomen Oklo).

Ležišta urana k o n k o r d a n t n o g tipa odnose se na fosfate u gotovo celoj severnoj Africi a samo u **Maroku** se nalaze ogromne rezerve od 6,526.000 t urana sa srednjim sadržajem od 0,01—0,012%.

II.3.4. Azija

Najveći kontinent na Zemlji je relativno siromašan uranom i nema nijednog poznatog područja sličnog bogatim uranonosnim revirima severne Amerike, Afrike i Australije. Ovde zapravo nisu poznati resursi Sovjetskog Saveza na azijskom kontinentu, na pr. u Kazahstanu, gde se inače nalazi odavno poznato uranovo orudnjenje Tjuja Mujun. Slična je situacija i sa Kinom, koja svakako ima svoje izvore urana.

U **Indiji** se najveće količine urana nalaze u ležištima d i s k o r d a n t n o g tipa, u metasedimentima probijenim granitima, u zoni na-

vlačenja Singhbhum u državi Bihar, sa rezervama od pedesetak hiljada tona urana.

U sedimentima istočnog dela **Pakistana** koje čine peščari formacije Siwalik srednje miocenske do donje pliocenske starosti, nalaze se rudna tela duga do 100 m, debela 2—3 m, sa uraninitom i konfinitom, srednjeg sadržaja 0,05—0,5% U_3O_8.

Uranonosni peščari neogene starosti nalaze se i u **Japanu**, gde je uran vezan za zeolite ili se javlja na drugi način. To su mala rudna tela sa oko 500 t U_3O_8, srednjeg sadržaja 0,05%.

U **Turskoj** (Anadolija) se nalaze mnogobrojna manja ležišta urana vezana za fluvijalne, deltaične i lagunske sedimente, sa sadržajima oko 0,05% U_3O_8.

II.3.5. Australija

Ovo je kontinent sa jednim od najvećih resursa urana u svetu, zajedno sa Afrikom i severnom Amerikom (Kanada).

U Australiji postoji nekoliko uranonosnih regiona, od kojih je najvažnije područje oko reke **Aligator** u severnom delu države Severna Teritorija, u blizini grada Darvina. To su ležišta penekonkordantnog tipa, koja se nalaze u donje-proterozojskim peščarima (u domenu poznate proterozojske diskordancije, starosti oko 1800 miliona godina). Najveća ležišta su Nabarlek, Rendžer (Ranger), Džabiluka (Jabiluka), Kungara (Koongarra), otkrivena u periodu 1969—1972. godine. Glavni uranov mineral je pehblenda, a srednji sadržaji se kreću od 0,24—1,84% U_3O_8, mada pojedina rudna tela manjih dimenzija dostižu i do 10% U_3O_8. Ovde se nalazi i jedno znatno ranije otkriveno ležište — Ram Džangl (Rum Jungle), gde se uraninit nalazi u asocijaciji sa Cu, Co, Ni i Pb.

Sledeće uranonosno područje nalazi se u državi **Južna Australija,** gde se pre svega nalazi drugi stari rudnik urana — Radium Hill (od 1950. godine) diskordantnog tipa, gde je glavni mineral urana davidit.

Ovde je početkom osamdesetih godina učinjeno spektakularno otkriće velikog ležišta bakra i urana Olimpik Dem (Olympic Dam). To je izrazito skriveno rudno telo, koga su na površini odavale nedefinisane gravimetrijske i geomagnetske anomalije. Tu su bušenjem, ispod sterilnog pokrivača od 300 m, do 1300 m dubine, utvrđene dokazane rezerve od 450 miliona tona rude sa 2,5% Cu i 0,08% U_3O_8 (sa nešto srebra i zlata), u okviru ukupnih rezervi od dve milijarde tona rude sa 1,6% bakra i 0,06% oksida urana ([27, 28]). Eksploatacija treba da krene 1988. godine, obuhvatajući najpliću i najbogatiju rudu sa 3,5% Cu i 0,18% U_3O_8. Glavni tip rude čini parageneza bornit-halkopirit-pirit, u breči bogatoj hematitom, a nalaze se sočiva i žice halkozina i bornita. Glavni uranov mineral je uraninit, a ima nešto kofinita i branerita [27].

Treće područje sa orudnjenjem penekonkordantnog tipa nalaze se u zapadnoj Australiji, sa ležištima urana kalkretskog načina pojavljivanja, na lokalnosti Jiliri (Yeelirrie). Površinski orudnjeni sloj srednje debljine 3 m proteže se preko gnajseva na dužini od 9 km, širine 750 m. Starost ovog sloja je tercijarna (bez bliže odredbe), a srednji sadržaj je 0,15 U_3O_8.

Pored navedenih, u Australiji se nalaze i mnoga druga manja ležišta urana, kao dopuna inače ogromnog potencijala ove zemlje, kako u pogledu urana, tako i nekih drugih metala.

II.3.6. Evropa

U Evropi nema bogatih velikih ležišta urana. Izuzetak u izvesnom smislu čini **Švedska,** gde se nalaze vrlo velike rezerve od 350.000 t U_3O_8, vezane za crne škriljce (konkordantni tip), sa srednjim sadržajem oko 0,035% U_3O_8. Sličnog tipa je i ležište San Ipolit (St. Hyppolite) u istočnoj Francuskoj (kod Strazbura), ali sa neuporedivo manjim količinama urana.

Ležišta urana diskordantnog tipa vezana su za hercinske granitoide, prvenstveno u Francuskoj, zatim u Španiji i Portugalu, kao i u području Erzgebierge (Rudne Planine) u graničnom području Nemačke DR i Čehoslovačke.

U **Francuskoj** se nalaze mnogobrojna tipična žična ležišta urana (u domenu Centralnog masiva i Bretanje), obično srednjih dimenzija, kao što su Lašo (Lachaux), već povađeno, sa sekundarnim mineralima urana, kao i sa sulfidima Pb, Zn i Cu), Bua Nuar (Bois Noirs), markantna razlomna zona sa kvarcnom brečom, cementovanom pehblendom i silicijom), zatim grupa rudnih žica u oblasti Limuzen, kao Anriet (Henriete), Marnjak (Margnac), Brižo (Brugeauds) i dr. sa karakterističnom asocijacijom pehblende i crnog fluorita, sa nešto kalcedona, barita i kalcita, sa srednjim sadržajem 0,05—0,28% urana. U Bretanji ima isto tako nekoliko rudnih ležišta sličnog tipa, kao Commanderie, Šapel Laržo (Chapelle Largeaux), Ekarpier (Escarpière).

U **Portugalu** se nalazi nekoliko manjih žičnih ležišta urana, među kojima je Urkheirisa (Urgeiriça). Rudni minerali su pehblenda i kofinit, sa gangom od jaspisa i kalcedona. Sadržaji su se kretali od 0,18—0,28% U_3O_8. Pored ovog, druga ležišta sličnog sastava su Beiras, Alto Alentejo, Bica i dr.

U **Španiji,** uglavnom u istoj graničnoj oblasti sa Portugalom, nalaze se slična ležišta urana. Nešto istočnije su veoma značajne pojave niskoprocente rude urana (0,05% U_3O_8) u tercijarnim peščarima, kod mesta Ciudad Real.

U **Čehoslovačkoj** se nalazi jedno od najčuvenijih ležišta urana žičnog tipa Jahimovo (vidi II.1), poznato kao tip »formacije U-Ni-Co-Ag-Bi«, gde se uran nalazi kao pehblenda. U **Nemačkoj DR** nalazi se nekoliko manjih žičnih orudnjenja urana, vezanih kao i prethodna za hercinske granitoidne komplekse.

U južnoj **Engleskoj** (poluostrvo Kornuol) uran je isto tako vađen veoma rano iz kasiteritskih žica, kao uzgredan proizvod, gde je još 1845. godine proizvedeno 2000 t urana, koji se izvozio u Nemačku (koristio se za bojenje stakla i porculana).

Na **Grenlandu** se nalazi jedno veliko ali siromašno ležište urana (Ilamaussaq) diseminacionog tipa u nefelin-sijenitima, sa rezervama od 250.000 t sadržaja 0,034% U_3O_8, sa nešto torijuma.

Najveće ležište penekonkordantog tipa u Evropi je **Lodève** u južnoj Francuskoj, vezano za permske crvene peščare. Uran u obliku finozrne pehblende vezan je za bitumiju, sa nešto molibdena, koja se javlja pretežno duž pukotina. Sadržaj urana je mestimično vrlo visok. Ležište je nedavno pušteno u proizvodnju. Sledeća ležišta ovog tipa vezana su za oligocenske i druge tercijarne peščare na južnom obodu Centralnog masiva i u JZ Francuskoj.

Ovom tipu pripada i ležište Meček u južnoj **Mađarskoj,** a slično se nalazi i u JI **Rumuniji,** kao i Žirovski vrh u Jugoslaviji, o kome će biti reči u sledećem odeljku. U ovim ležištima uran je vezan za ugljifiiranu biljnu materiju.

II.3.6.1. Jugoslavija

Ležište diskordantnog tipa odnose se na žične koncentracije urana u granitima (Mezdreja i Gabrovnica kod Kalne na Staroj planini i Cigankulja na Bukulji), kao i na uranonosni štokvrk u vulkanitima Zletovske reke kod Kratova u Makedoniji. To su relativno mala rudna tela sa niskim sadržajima urana.

Pomenuto ležište urana Žirovski Vrh u Sloveniji, koje pripada penekonkordantnom tipu, nalazi se u veoma ubranim srednjepermskim Gredenskim peščarima, sa pehblednom kao glavnim rudnim mineralom. Po dimenzijama ovo je ležište urana srednje veličine. Ostala ležišta ovog tipa vezana su za neogene klastite sa ugljifiiranim biljnim ostacima, na lokalnostima Preturica-Kamenac i Jelovik kod Bukulje, kao i Iverak kod Cera u Srbiji.

II.3.7. Rudna ležišta torijuma

O monacitu kao jednom od glavnih nosioca torijuma bilo je reči u pregledu mineralogije urana i torijuma (II.2). Najznačajnije rasipne koncentracije monacita i drugih torijumovih minerala nalaze se na morskim plažama južne Indije (država Kerala), sa sadržajem 7—9% Th i rezervama od oko 400.000 t metala. U znatno manjem obimu ima ga i na nekim plažama Australije.

Sledeće rezerve torijuma vezane su, u vidu primarnih koncentracija, za već pomenuti magmatski alkalni kompleks Poços de Caldas u Brazilu (Morro de Fenro, Araxa i dr.), sa preko 300.000 tona metala. Glavni mineral-nosioc torijuma u nekim žičnim ležištima u Kaliforniji (SAD) je bastnezit, sa (sigurnim) rezervama od preko 100.000 t torijuma. U novije vreme otkrivene su velike rezerve torijumonosnog bastnezita u Turskoj, gde ovaj mineral sadrži 0,21% ThO_2. Sigurne rezerve torijuma ovde iznose 334.000 tona, pored daljih 400.000 t verovatnih rezervi.

II.3.8. Rezerve i proizvodnja urana u svetu

Ovaj pregled bazira uglavnom na podacima iz publikacije OECD-IAEA Uranium iz 1986. godine [28], za sve zemlje sveta tržišne ekonomije. Pre

pregleda rezervi treba nešto reći o kategorizaciji rezervi koja se primenjuje u mnogim zemljama, a koja ima dvojni karakter: jedna se odnosi na način utvrđivanja rezervi, a druga na cenu koštanja po kilogramu urana.

Prvi vid kategorizacije ima uglavnom tri kategorije:

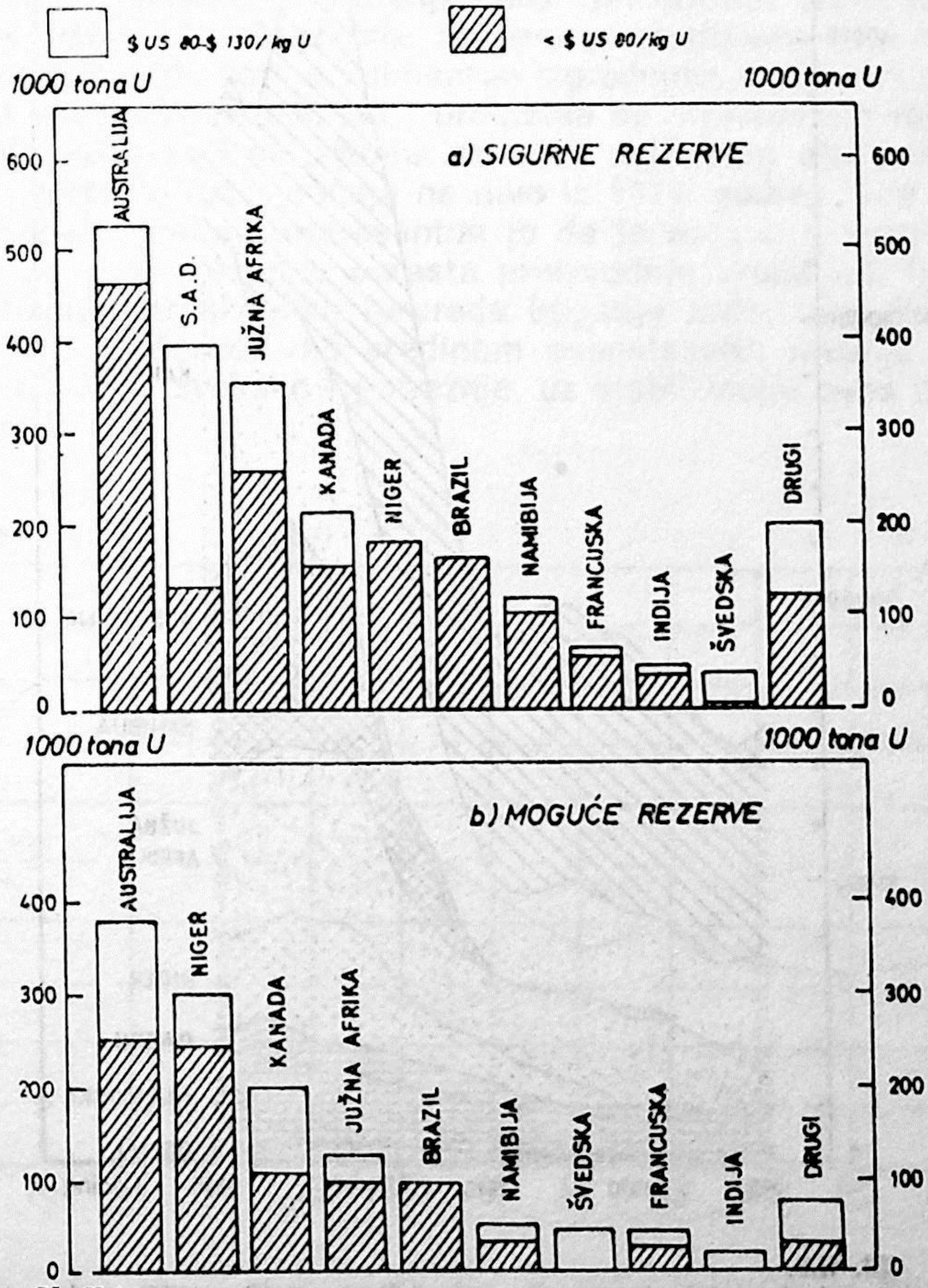
(1) Sigurne rezerve (reasonably assured odnosno raisonnablement assurées ili reserves I),

(2) Moguće rezerve (estimated additional odnosno supplementaires estimées ili reserves II) i

(3) Verovatne (speculative).

Kada je reč o ceni koštanja, onda postoje tri granične vrednosti — 80, 130 i 260 dolara po kilogramu, pa se i tu mogu izdvojiti tri kategorije:

< $ 80/kg U, $ 80—130/kg U i $ 130—260/kg U, mada se ova zadnja retko prikazuje.

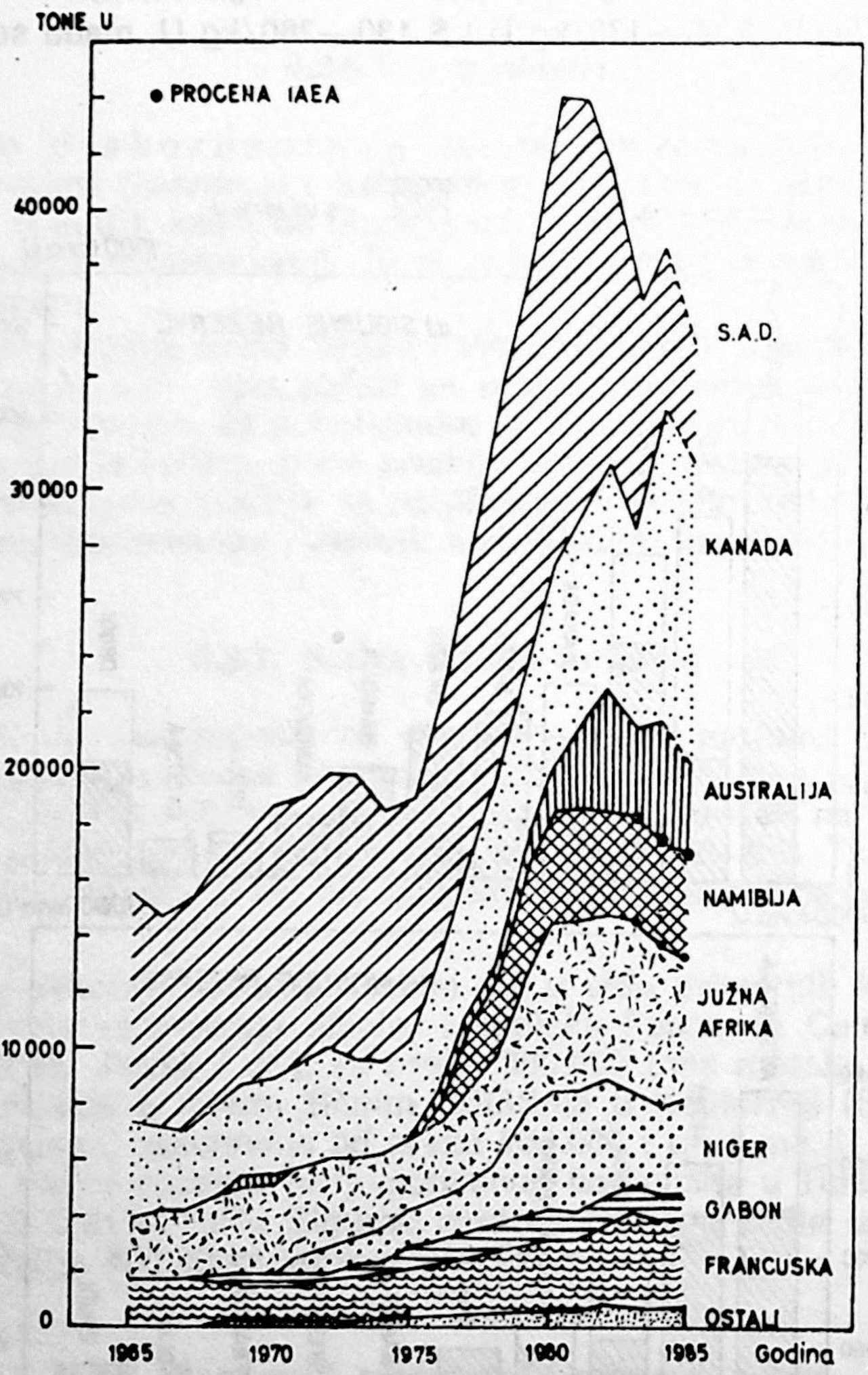


Sl. II.1.
Raspodela urana u svetu tržišne ekonomije [28].

Na sl. II.1. dijagramski su prikazane rezerve urana u svetu upravo po navedenim dvojnim kriterijumima.

Dahlkamp [9] daje pregled rezervi urana po genetskim tipovima. Na žičolike tipove, gde svrstava celo područje Atabaska u Kanadi i orudnjenja u prekambrijskim peščarima severne Australije, zatim žice u Centralnom masivu Francuske u granitoidima Španije i Portugala, otpada 33% svetskih rezervi, na crne škriljce i fosfate 22%, na arhajske konglomerate 15% itd.

Dinamika proizvodnje urana prikazana je na sl. II.2, iz koje se vidi, pre svega, da su najveći proizvođač SAD, a zatim da proizvodnja urana opada počev od 1980. godine (što se odnosi i na obim prospekcionih ra-



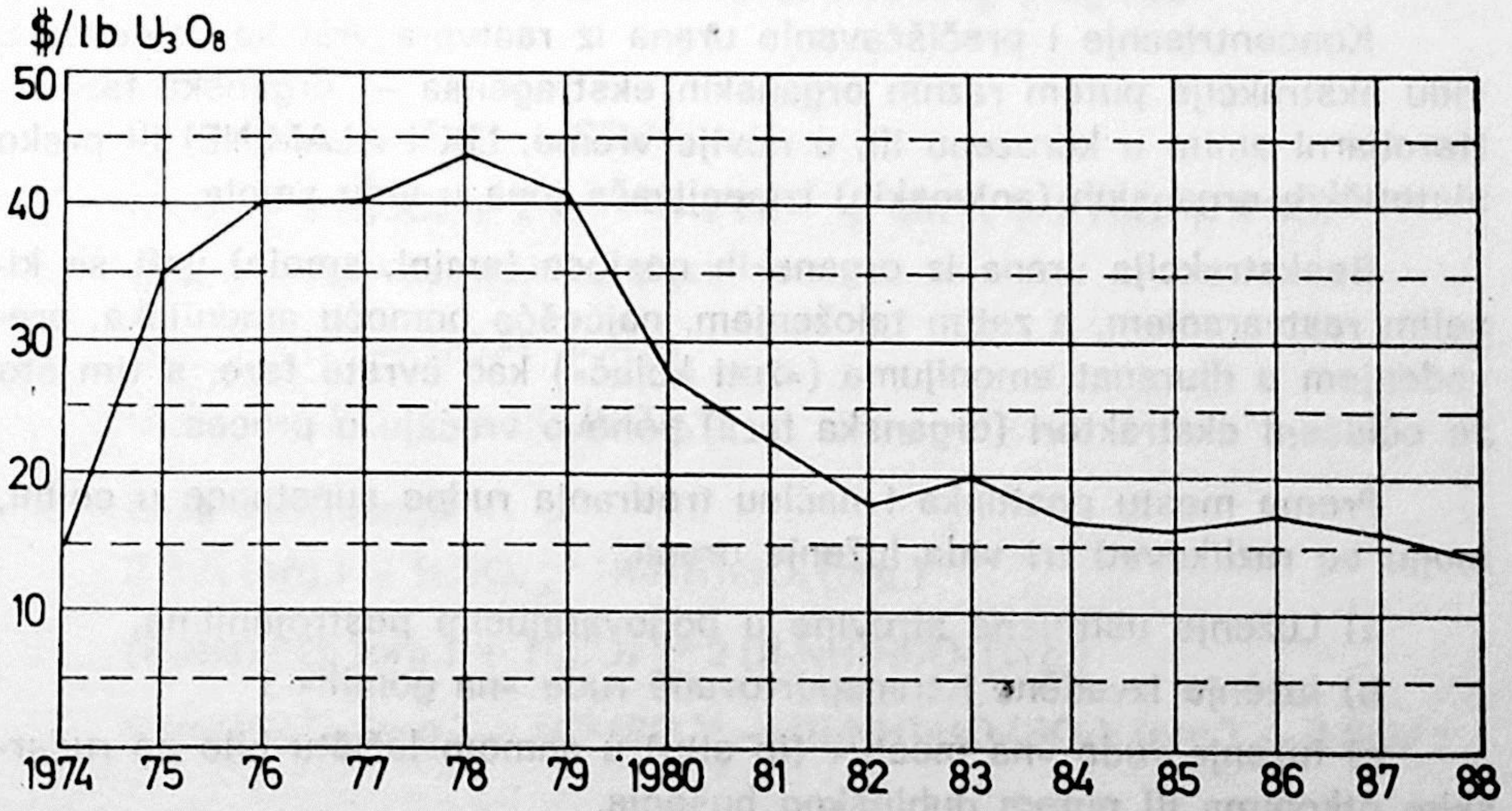
Sl. II.2.
Pregled proizvodnje urana u zemljama sveta tržišne ekonomije [28].

dova u svetu). U momentu pisanja ove knjige nije se raspolagalo sređenim podacima o kretanju istraživanja i proizvodnje urana u svetu posle Černobiljske katastrofe u proleće 1986. godine, ali je poznato da je gradnja novih nuklearnih elektrana u svetu tržišne ekonomije praktično stala. To se, kako izgleda, ne odnosi na istočnoevropske zemlje i Kinu, na koje, prema jednoj proceni, otpada oko 20% ukupne proizvodnje urana u svetu.

II.3.9. Tržište i cene urana

Uran je relativno kasno postao tržišna sirovina, mada ni danas to nije u pravom smislu reči, naročito kada se radi o razmeni između određenih geopolitičkih grupacija u svetu. Uranom je uvek dirigovao njegov strateški značaj kao energetske sirovine prvog reda, a naročito kao sirovine za atomsko oružje, mada u drugoj polovini osamdesetih nastupa era smanjivanja stokova nuklearnih bojevih glava.

Na sl. II.3 prikazano je kretanje cena koncentrata urana (U_3O_8 u koncentratu) za poslednjih 15 godina, sa veoma upadljivim bumom u drugoj polovini sedamdesetih, koji je kulminirao izgradnjom novih nuklearnih elektrana. Posle učestalih akcidenata i problema sa stokiranjem radioaktivnog otpada, sledi veliki pad narudžbina za nove nuklearne elektrane u svetu, pa se cene relativno brzo vraćaju na nivo iz 1974. godine, koji se održava već punih sedam godina. Interesantno je da je upravo u vreme opadanja cena došlo do gotovo naglog porasta proizvodnje urana (sl. II.1), ali očigledno sa manjim troškovima (prerada bogatije rude, uran kao sporedni proizvod i sl.). Međutim, već sredinom osamdesetih počinje trend opadanja proizvodnje, a svakako i potražnje, uz stabilizaciju cena na relativno niskom nivou.



Sl. II.3.
Kretanje cena urana prema Nuexico (Nuclear Exchange Company) iz Engineering and Mining Journal.

II.4. EKSPLOATACIJA I IZDVAJANJE URANA

Eksploatacija ruda urana nije uslovljena nekim izrazitim specifičnostima izvan uobičajenih rudarskih metoda, bilo da se radi o podzemnom ili površinskom načinu otkopavanja, sem što se, naročito kod prvih, preduzimaju posebne mere zaštite od radioaktivnog zračenja, o čemu će biti reči o posebnom poglavlju o zaštiti (IV.3).

Izdvajanje urana iz rude vrši se isključivo hidrometalurškim postupcima, pri čemu se oni odvijaju u dva osnovna stepena: prvi je luženje odnosno prevođenje urana iz čvrste faze (iz rude) u rastvor, a drugi je koncentrisanje rastvora i izdvajanje urana kao čvrste faze [18].

Luženje se odnosi prvenstveno na okside urana i može se vršiti u kiselinama ili u alkalnim rastvorima. Kiselo luženje vrši se danas gotovo isključivo sumpornom kiselinom, u prisustvu oksidansa, kao što su pirolu-zit (MnO_2), vodonik peroksid (H_2O_2), gasoviti kiseonik (O_2), zatim joni ClO_3, Fe^{3+}, VO^{2+} i drugi. Oksidans je potreban za prevođenje jednog dela urana u vidu nerastvornog U^{4+} u rastvorni oblik U^{6+}. Rastvaranje (luženje) oksida odvija se po sledećoj reakciji:

$$UO_3 + H_2SO_4 = UO_2SO_4 + H_2O,$$

$$UO_2 + H_2SO_4 + 1/2\,O_2 = UO_2SO_4 + H_2O.$$

Luženje alkalnim rastvorima, najčešće sa Na_2CO_3, u prisustvu oksidansa, odvija se po sledećoj reakciji:

$$UO_2 + 3\,CO_3^{2-} + H_2O + 1/2\,O_2 = UO_2\,(CO_3)_3^{4-} + 2\,OH^-.$$

Koncentrisanje i prečišćavanje urana iz rastvora vrši se najčešće u vidu ekstrakcije putem raznih organskih ekstragensa — organska faza — (tercijarni amini u kerozenu ili, u novije vreme, LIX i ALAMINE) ili preko sintetičkih organskih (anjonskih) izmenjivača jona u vidu smola.

Reekstrakcija urana iz organskih nosioca (amini, smole) vrši se kiselim rastvaranjem, a zatim taloženjem, najčešće pomoću amonijaka, prevođenjem u diuranat amonijuma (»žuti kolač«) kao čvrste faze, s tim što se očišćeni ekstraktori (organska faza) ponovo vraćaju u proces.

Prema mestu postupka i načinu tretiranja rudne supstance u celini, mogu se razlikovati tri vida luženja urana:

a) Luženje usitnjene sirovine u odgovarajućim postrojenjima,

b) luženje izvađene i transportovane rude »na gomili« i

c) luženje rude »na mestu« (in situ) u samom ležištu bilo na rudarskim otkopima ili putem dubinskog bušenja.

Ovi načini luženja prikazani su na raznim primerima eksploatacije ležišta urana, koja su puštena u redovnu proizvodnju ili su u pripremi.

II.4.1. Luženje usitnjene rude

Primer **kiselog luženja** vidi se iz postupka u prvom rudniku urana sa kompletiranom preradom u Australiji — Ranger (Rendžer), uvedenom u redovnu proizvodnju tokom 1984. godine. Ovde su utvrđene sigurne rezerve od 52.878 t U_3O_8 sa sadržajima 0,33% (za prvu kategoriju rude) odnosno oko 0,1% (za drugu kategoriju), a u toku prve godine rada proizvedeno je zamašnih 3.036 t U_3O_8 [19].

Ruda iz ovog ležišta se prethodno usitnjava na oko 0,17 mm, pa se u vidu pulpe prebacuje u odgovarajuće zatvorene cilindrične sudove (»paćuke«, njih deset u nizu) sa vazdušnim mešanjem, gde se luženje vrši sa sumpornom kiselinom početnog pH 1,6—1,8, uz grejanje, sa dodatkom piroluzita, usitnjenog na minus 0,74 mm. Ovaj oksidans prevodi prisutno gvožđe u rudi kao sulfid u trovalentno stanje (Fe^{3+}), što je neposredni faktor oksidacije urana. Proces luženja urana uz dopunsku oksidaciju traje 29 sati. Posle luženja vrši se taloženje čvrste faze (jalovine), postupkom protivtočnog zgušnjavanja, koja se kasnije kao otok neutrališe se krečom i odvodi na jalovište. Obogaćeni rastvor iz zgušnjavanja se dalje razbistrava izdvajanjem ostatka suspendovanih čestica, a uran, prisutan u rastvoru se zatim izdvaja dodavanjem kerozina, u mešačima-odvajačima u četiri stupnja u seriji, gde se tečne faze intenzivno mešaju tokom 45 sekundi. Obogaćeni organski rastvor se zatim izdvaja i uvodi u sledeću bateriju od četiri (manjih) mešača, gde se vrši »skidanje« urana reversnim putem (menjanjem pH), tako da se dobija jako obogaćeni kiseli rastvor, iz koga se uran obara, dodatkom amonijaka, pri pH 7,6, u vidu amonijum diuranata. Posle centrifugiranja, žuti kolač se kalciniše na 700°C i dobija se tamnozeleni oksid formule $2\,UO_3 \cdot UO_2$ odnosno U_3O_8, čistoće oko 98%, kao finalni proizvod rudničko-prerađivačkog kompleksa Ranger. Hemizam celokupnog procesa do diuranata vidi se iz sledećeg pregleda:

Luženje

$$Fe + H_2SO_4 \rightarrow Fe^{2+} + SO_4^{2-} + H_2$$

$$MnO_2 + 2\,H_2SO_4 + 2\,Fe^{2+} \rightarrow 2\,Fe^{3+} + Mn^{2+} + 2\,H_2O + 2\,SO_4^{2-}$$

$$UO_2 + 2\,Fe^{3+} \rightarrow UO_2^{2+} + Fe^{2+}$$

$$UO_3 + 2\,H^+ \rightarrow UO_2^{2+} + H_2O$$

$$UO^{2+} + 3\,SO_4^{2-} \rightarrow UO_2(SO_4)_3^{4-}$$

Faza ekstrakcije

$$2\,R_3N\ (org.) + H_2SO_4 \rightleftarrows (R_3NH)_2SO_4\ (org.)$$

$$(R_3NH)_2SO_4\ (org.) + H_2SO_4 \rightleftarrows 2\,(R_3NH)HSO_4\ (org.)$$

$$2\,(R_3NH)_2O_4\ (org.) + UO_2(SO_4)_3^{4} \rightarrow (R_3NH)_4UO_2(SO_4)_3\ (org.) + 2\,SO_4^{2-}$$

Faza skidanja (stripping)

$$4\,NH_3 + (R_3NH)_4UO_2(SO_4)_3 \rightarrow UO_2SO_4 + 4\,R_3N + 2(NH_4)_2SO_4$$

Taloženje diuranata

$$2\,UO_2SO_4 + 6.NH_4OH \rightarrow (NH_4)_2U_2O_7 \downarrow 2\,(NH_4)_2SO_4 + 3\,H_2O$$

Ovde treba napomenuti da je ovo proces koji se najviše primenjuje u svetu, pa slično tome i sa rudom urana iz ležišta Žirovski Vrh u Sloveniji. Sadržaj urana u ulaznoj rudi kontroliše se na rudnicima prolazom svake transportne jedinice sa rudom (vagonet, kamion i sl.) kroz »vrata« sa gama detektorima, kojima se preko gama zračenja (približno) određuje koncentracija urana.

Pedesetih godina u Francuskoj su vršeni opiti mehaničke-radiometrijske pretkoncentracije rude urana metodom komad-po-komad (caillou à caillou) provođenjem komada rude veličine 5—10 cm trakom preko gama detektora, podešenog da pri određenom nivou radioaktivnosti aktivira ručicu za uklanjanje ili propušta komade rude.

Alkalnim luženjem dobija se uran iz poznatog ležišta Lodève u permskim peščarima na jugu Francuske [3]. Ovde se ruda usitnjava na 0,06—0,16 mm, zatim se vrši prethodno luženje natrijum karbonatom u autoklavima, na temperaturi od 140°C, pri pritisku od 600 kPa, uz oksidiranje gasovitim kiseonikom, sa dodatkom kreča. Na taj način izdvaja se rastvor sa oko 70% celokupnog sadržaja urana u rudi. Otok sa preostalim uranom prevodi se u drugi stepen luženja sa istim uslovima pritiska i temperature, sa visokim koncentracijama natrijum karbonata, uz dodatak siderita kao katalizatora, čime se dobija daljih 22% urana, tako da je ukupno iskorišćenje iz rude 92%. Rastvor se dalje tretira odstranjivanjem karbonata sumpornom kiselinom, a obaranje urana se vrši natrijum hidroksidom. Koncentrat se ovde ponovo rastvara sa H_2SO_4 pri pH 2,5, da bi se izdvojio prisutni cirkonijum, a uran se zatim definitivno obara dodatkom vodonik peroksida, pri pH 3. Iz ovog procesa kao sporedan proizvod dobija se isto tako i kristalni natrijum sulfat (glauberova so).

II.4.2. Luženje na gomili i na mestu

U rudniku Egnju Lejk (Agnew Lake) u Kanadi, gde se eksploatišu uranonosni prekambrijski kvarcni konglomerati, vrši se kako luženje na gomili, tako i na mestu, počev od 1976. godine [1].

Luženje na mestu vrši se na oborenoj rudi u jami, sa sadržajem oko 0,05% U_3O_8. Ovde je međutim samo 30% urana u rastvornom šestovalentnom obliku (glavni rudni mineral je uranotorit), pa se zaostali veći deo urana oblika U^{4+} oksidiše u prisustvu bakterije *Thiobacilus ferrooxidans*. Ova inače odavna poznata bakterija vrši ustvari oksidaciju pirhotina i pirita u rudi, stvaranjem jona Fe^{3+}, koji dalje vrši oksidaciju urana. Oborena ruda (upotrebljena količina eksploziva »Anfomet« ili »Hydromet« je 0,8 kg po toni rude) se škropi sumpornom kiselinom pH 1,5 putem perforiranih cevi, a rastvor, koji sadrži oko 0,3% U_3O_8, odvodi se na dalju preradu.

Veći deo oborene rude (dve trećine) iznosi se međutim na površinu, gde se vrši luženje na gomili, pri čemu je ruda prethodno drobljena do minus 7 cm. Ovako usitnjena ruda se zatim ravnomerno raspoređuje preko polivinilske prostirke, koja je prethodno prekrivena slojem peska debelog

pola metra, kao zaštita od oštećenja. Površina na kojoj se vrši luženje na gomili zahvata 5—6 ha, sa oko 1,5 miliona tona rude, a kiselina se isto tako posipa preko perforiranih cevi kao i u rudniku. Uran se ovde izdvaja iz rastvora primenom smola-jonoizmenjivača i kada je razmena urana izvedena do kraja, skidanje sa smole vrši se na uobičajeni način, ispiranjem jakom sumpornom kiselinom. Obaranjem amonijakom, povećavanjem pH do 4,5, a zatim oslobađanjem od tečne faze, dobija se žuti kolač kao finalni proizvod (proces je detaljnije opisan u prethodnom primeru rudnika Ranger).

Opiti kiselog izdvajanja urana vršeni su isto tako na rudi iz ležišta urana Zletovska reka u Makedoniji, sa sadržajem urana 0,08%*. Delimično usitnjena ruda lužena je jakom sumpornom kiselinom (6—8% ili pH oko 0,25), na temperaturi 20—40°C, tokom 6 časova, pri čemu je izluženo 90—95% od celokupnog urana u rudi. Ovo ležište ima dobre uslove za luženje na gomili, ne samo zbog dobre luživosti rude, već i zbog povoljnih uslova otkopavanja (jedan deo inače homogenog štokverknog rudnog tela je iznad nivoa izvoznog potkopa, a drugi je na relativno maloj dubini), mada bi se ruda morala transportovati nekih 10—15 km do dovoljno prostranih ravnih površina za izvođenje procesa luženja na gomili.

U SAD, koje su među prvim proizvođačima urana u svetu, oko 19% proizvedenog urana dobija se metodom in situ (49% konvencionalnim metodama, a 32% kao sporedni proizvod većinom iz fosfata, zatim iz rudničke vode, luženjem bakrovih jalovišta i sl.), mada se izričito ne navodi koliko se vadi u rudničkoj proizvodnji, a koliko preko bušotina [30].

Luženje na mestu preko bušotina se u zadnje vreme u svetu sve više primenjuje zbog manjih troškova u odnosu na prethodno opisane načine, naročito kada se radi o rudama sa niskim sadržajima urana. Ova metoda je u osnovi jednostavna, tako da se u jednoj bušotini ubrizgava tečnost za luženje, a u drugoj odnosno nizu okolnih bušotina, na odstojanju od par desetina metara, crpi se obogaćeni rastvor, koji se dalje obrađuje na već poznati način.

Radovi na ispitivanju ove metodologije započeti su u SAD ranih šezdesetih godina [12], mada su već postojala izvesna korišćena iskustva na istraživanju i eksploataciji nafte. Osnovni parametri koji uslovljavaju primenu ove metode su protočnost (propusnost) ležišta na cirkulaciju tečnosti, poroznost stena, dubina rudnog tela, sadržaj metala, rastvorljivost rudnih i pratećih minerala, nivo podzemne vode, strukturna obeležja i dr. Poznavanje ovih parametara važno je za izbor, pre svega, lužećeg agensa (kiseli, alkalni, koncentracija, vrsta oksidansa i sl.), zatim uređaja (pumpe, zacevljenje), kao dalje prerade obogaćenog rastvora.

Ovaj postupak pretpostavlja ubrizgavanje rastvarača i oksidansa pod pritiskom većim od hidrostatičkog pritiska na datoj dubini, kao i stvaranje podpritiska u kolekcionim bušotinama, tako da protok rastvora mora da bude dovoljan u smislu ekonomičnosti, imajući u vidu pre svega količinu rastvorenog urana. Ispitivanja u tom smislu treba započeti još u fazi istraživanja ležišta, korišćenjem istražnih bušotina za sve navedene opite. Poseban problem predstavlja visoka korozivnost rastvarača, pa se svi uređaji koji dolaze u neposredan kontakt sa njim, u prvom redu pumpe, zatim

---

* Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd.

ceo bušaći pribor, moraju praviti od adekvatnog antikorozivnog materijala (nerđajući čelik, fibergas, polivinil hlorid i dr.).

Kombinacije rastvarač-oksidans se isto tako moraju pažljivo odabrati. Tako na pr. gasoviti kiseonik, koji je favorizovan zbog višestruko niže cene od peroksida, može da spreči cirkulaciju tečnosti kroz rudno telo. Isti efekat može da ima suvišak jona SO_3 ili CO_2, koji izazivaju taloženje gipsa odnosno kalcita. Mogu najzad nastati i problemi oko zagađivanja akifera, mada neka iskustva pokazuju da se jednom centralnom injekcionom bušotinom okruženom sa na pr. četiri crpne bušotine na povoljnom odstojanju, stvara efikasna zatvorena cirkulacija primarnog i obogaćenog solventa. Opasnosti se rađaju i usled mogućeg prskanja uređaja i cevi pod pritiskom, sa nekontrolisanim izbijanjem agresivnog solventa. Sve to zahteva učešće i saradnju specijalizovanih i iskusnih stručnjaka raznovrsnih profesionalnih opredeljenja.

U Australiji je početkom osamdesetih bilo u pripremi za eksploataciju metodom luženja na mestu jedno manje ležište urana (Honeymoon — Hanimun, oko 150 km SZ od Broken Hilla), sa predviđenom godišnjom proizvodnjom do 450 t žutog kolača [23]. Subhorizontalno rudno telo nalazi se u peščarima na dubini od nešto preko 100 m, a zahvata površinu od 24 ha. Luženje će se vršiti zakiseljenom vodom uz dodatak peroksida (H_2O_2), sa odstojanjem proizvodnih od injekcione bušotine 15—40 m. Dalja prerada obogaćenog rastvora vršila bi se na već prikazan način kod kiselinskog postupka. Ovde se isto tako predviđa potpuna rehabilitacija terena sa ekološke tačke gledišta, posle završetka eksploatacije.

LITERATURA

[1] Agnew Lake mines: Taking giants steps in solution mining. Engineering and Mining Journal, Novembar 1978, p. 158—161.

[2] **Antonović A.**, 1978: Ležišta urana i torijuma u svetu sa osvrtom na odgovarajuće tipove u Jugoslaviji. Radovi Geoinstituta, sv. 12, Beograd, p. 153—190.

[3] **Antonović A., Filipović V.**, 1977: Neki aspekti geologije, petrologije, geohemije i rudonosnosti kenotipnih vulkanita Jugoslavije. Radovi Geoinstituta, sv. 11, Beograd, p. 1—25.

[4] **Bariand P., Cesborn F., Geffroy J.**, 1978: Les mineraux, leurs gisements, leurs asociations (2). Edition du BRGM, Meung-sur-Loire, p. 298.

[5] **Beus A. A., Grigorjan S. V.**, 1975: Geohimičeskie metody poiskov i razvedki mestorožđenij tverdyh poleznyh iskopaemyh. »Nedra«, Moskva.

[6] **Bowie S. H. U.**, 1970: World uranium deposits. IAEA Panel on uran. explor. geology, Vienna.

[7] **Burger J. R.**, 1984: Exploration roundup. Engineering and Mining Journal, February, p. 9.

[8] Cigar Lake uranium reserves (Panorama). Mining Magazine, March 1985.

[9] **Dahlkamp F. J.**, 1980: Typology and geographic/geotectonic distribution of uranium deposits. Revue de l'Institute Français du pétrole, vol. XXXV, No. 3, p. 499—535.

[10] **Durrance E. M.**, 1986: Radioactivity in geology — principles and applications. Ellis Horwood Ltd., Halsted Press (John Wiley & Sons), p. 441.

[11] **Gangloff A.**, 1958: Caractères geologiques des principaux gisements du monde. Note C. E. A, n. 251, Journees d'informations sur l'industrie de l'uranium.

[12] **Huff R. V., Davidson D. H., Banghaman D., Axen S.**, 1978: Technology for in sity uranium leaching. Mining Engineering, February, p. 163—166.

[13] **Jankovlć S.**, 1965: Ležišta urana u Jugoslaviji. Tehnika No. 5, p. 877—884.

[14] **Langmuir D.,** 1978: Uranium solution — mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. Geochym. et Cosmochym. Acta, June, p. 547-569.

[15] **Nininger R .D.,** 1956: Minerals for atomic energy. D. Van Nostrand Comp. Inc., Princeton, New Jersey, p. 399.

[16] **Nininger R. D.,** 1974: The world uranium supply challenge — an appraisal. IAEA Sympos. in Athens, 183/42, Vienna, p. 3—18.

[17] **Omaljev V.,** 1988: Raspodela radioaktivnih i alkalnih elemenata u granitoidnim stenama Bukulje. Radovi Geoinstituta, sv. 21, Beograd, p. 125—148.

[18] **Pacović V .N.,** 1980: Hidrometalurgija. »Štampa, radio, film«, Bor, p. 398.

[19] Ranger uranium mine. Mining Engineering, Nov. 1985, p. 392—403.

[20] **Roubault M.,** 1958: Géologie de l'uranium. Masson et Cie, Paris, p. 461.

[21] **Rowntree J. C., Mosher D. V.,** 1976: Case history of the discovery of the Jabiluka uranium deposits, east Alligator River region, Northern Territory of Australia. IAEA-SM-208/58, Explor. of. uranium ore deposits, Vienna, p. 551—573.

[22] **Sobotkovič E. V., Bartnickij E. H., Cjonj O. V., Kononeiko L. V.,** 1982: Spravočnik po izotopnoj geohimii. Energoizdat., Moskva, p. 241.

[23] South Australian uranium deposit to be mined by in-situ leaching. Mining Magazine, March 1981, p. 201—205.

[24] **Suttil K. R.,** 1987: Olympic Dam heading for 1988 startup. Engineering and Mining Journal, Nov., p. 36—38.

[25] **Terehov V. Ja.,** 1978: Mineralogija i geohimija urana. Geol. razv. inst. im. S. Ordžonikidze, Moskva, p. 80.

[26] **Terehov V. Ja., Bajuškin I. M., Egorov N. M.,** 1982: Mineralogija i geohimija redkih i radioaktivnih elementov. Geol. razv. instit. im. S. Ordžonikidze, Moskva, p. 95.

[27] Update on Olympic Dam (Panorama). Mining Magazine, Jan. 1985, p. 5.

[28] Uranium: ressources, production et demand. Raport OCDE-AIEA, Paris, 1986, p. 470.

[29] **Wenrich K. I., Sutphin H. B.,** 1987: Lithotectonic control necessary for formation of a uranium-rich, solution-collapse breccia-pipe province, Grand Canion region, Arizona. IAEA Technical committe meeting, Vienna.

[30] **White G.,** 1986: Uranium. Engineering and Mining Journal, March, p. 64—65.

[31] **White L.,** 1986: Uranium mining is alive and well in France. Engineering and Mining Journal, Aug., p. 26—29.

[32] **Ziegler V.,** 1974: Essai de classification metallo-tectonique des gisements d'uranium. IAEA Symp. in Athens, 183/16, Vienna.

GLAVA III

METODE ISTRAŽIVANJA URANA

III.1. KRATAK ISTORIJAT ISTRAŽIVANJA NUKLEARNIH SIROVINA

Pod pojmom nuklearnih sirovina podrazumeva se u prvom redu uran kao glavno gorivo u nuklearnim procesima, zatim znatno podređeniji torijum, kao i neki drugi materijali, koji se koriste gotovo isključivo u tehnici nuklearnih reaktora. Ovde će biti reči samo o istraživanju urana i torijuma, kao nuklearnih sirovina sensu stricto i to u prvom redu urana.

Uran je prva i jedina sirovina u novijoj istoriji čovečanstva koja je gotovo u celom svetu istraživana organizovano na državnom nivou i gde je stepen istraženosti, uporedo sa razvojem tehnike i metodologije istraživanja, doživljavao neviđen uspon. Ovakav interes izazvan je pre svega zbog značaja urana kao izuzetne strategijske sirovine za proizvodnju super oružja, a zatim i kao novog masovnog energetskog izvora. Brzom visokom stepenu istraženosti doprinela je i izvanredna detektabilnost urana.

Uran kao elemenat otkriven je 1789. godine (M. H. Klaproth) u pehblendi Jahimova u Čehoslovačkoj (do prvog svetskog rata poznatog kao St. Joachimstal u tadašnjoj Austrougarskoj), ali je kao metal izdvojen tek 1841. godine (E. Péligot). Jahimovo je ujedno i prvi rudnik urana u svetu, ali je ukupna proizvodnja na pr. u 1880. godini iznosile svega 5 tona. Uran se tada upotrebljavao za proizvodnju jarko žute ili oranž boje (uranati natrijuma i kalijuma), za bojenje stakla i emajla (gleđi).

Novi potsticaj uran je dobio otkrićem radioaktivnosti, zapravo saznanjem da se radijum može koristiti u medicini za zračenje pojedinih vidova malignih tumora. Lečenje raka na ovaj način započeto je već 1910. godine i uranove rude počele su da se vade u većim količinama, pošto je za dobijanje jednog grama radijuma trebalo preraditi tri tone metala. Zato su ponegde ostale tone »otpadaka« u vidu jedinjenja urana, koja su postala dragocena sirovina za izradu prve atomske bombe. Gram radijuma je, istina, predstavljao veliku količinu, ali su potrebe bile sve veće, pa se odmah pristupilo otvaranju drugih rudnika širom sveta.

U Evropi se, pored Jahimova, uran odnosno radijum dobijao još iz dve lokalnosti. To su rudnici kalaja u Kornuolu (Cornwall) u JZ Engleskoj, gde je pehblenda vađena kao uzgredan proizvod (korišćena od 1878—1909), a zatim rudnik urana Urgkheirisa (Urgeiriça) u Portugalu, koji je tada ustvari bio drugi rudnik radijuma u svetu, odmah iza Jahimova, otvoren 1913. godine.

Od rudnika radijuma (urana) izvan Evrope najbogatiji je bio Šinkolobve (Shinkolobwe) u provinciji Katanga u tadašnjem Belgijskom Kongu (danas Zaire), koji je od ranije bio poznat kao rudnik bakra. Uran je tamo

otkriven 1915. godine, dok je već 1921. godine bio najveći pojedinačni proizvođač radijuma u svetu. Jedino ležište radijuma (urana) u SAD bio je tada Front Rendž (Front Range) u Koloradu. I najzad, poslednji rudnik radijuma (urana) koji je otvoren pre rata (1931) je Eldorado (Eldorado mine) sa naseljem Port Radium, koje je tada niklo na obali Velikog Medveđeg jezera u severnoj Kanadi. Treba još spomenuti da je nešto radijuma (urana) izvađeno iz lokalnosti Tjuja Mujun kod Fergane, današnje Kazaške SSR, 1904. godine.

Pored ovih rudnika, pre drugog svetskog rata bile su poznate mnogobrojne pojave uranovih minerala širom sveta, kao na pr. u Španiji, Francuskoj (Autun, po kome je nazvan mineral autunit), Nemačkoj, Bugarskoj (Buhovo, Strelča), južnoj Australiji (Radium Hill), južnoj Africi (u rudnicima zlata Witwatersrand) i drugde.

Torijum nije imao gotovo nikakvog praktičnog značaja pre ovog rata pa i kasnije, mada ostaje kao značajna rezerva, jer se može oplođavati u uran 233, kao treći materijal za masovnu proizvodnju električne energije, pored urana 235 i plutonijuma 239, čak i efikasnije od ovog zadnjeg.

Odmah posle završetka drugog svetskog rata počinje neviđena potraga za uranom, koja se donekle može uporediti sa »zlatnom groznicom«, pa je u SAD i nazvana »potera za zlatom 1949« (the gold rush of 1949). U velikom broju zemalja, bez obzira na društveno uređenje, država preuzima sve ingerencije istraživanja urana i svega što se odnosi na nuklearnu energiju uopšte, osnivajući odgovarajuće državne organizacije, najčešće pod nazivom komisije ili komesarijati. Od ovih su u javnosti najviše poznati Atomic Energy Commission u SAD (od 1948. godine) i Commissariat a l'Énergie Atomique — CEA u Francuskoj (od 1946. godine). Slična ustanova formirana je istovremeno i u Jugoslaviji, mada pod konspirativnim imenom (Uprava za koordinaciju rada naučnih instituta pri Predsedništvu vlade FNRJ, 1948. godine), dok je Savezna komisija za nuklearnu energiju osnovana 1955. godine.

Ove institucije, naročito kod velikih sila, imale su direktno pod sobom ili su vršile nadzor nad celokupnom aktivnosti vezanom za razvoj nuklearne energije, počev od geoloških istraživanja nuklearnih sirovina, eksploatacija i ekstrakcija urana do izotopskog obogaćivanja ^{235}U i izrade gorivnih elemenata odnosno do reaktorske tehnike. Pri tome su se manje-više tesno preplitali vojno i mirnodopsko korišćenje nuklearne energije, mada je u početku ovo prvo bilo daleko dominantnije. Na istom koloseku našli su se i razvoj hemijskih, izotopskih i drugih analiza, zatim razvoj prospekcionih metodologija, proizvodnja adekvatnih uređaja i dr.

Posle stagnacije tokom posleratnih godina hladnog rata, znatna promena u ustrojstvu i pristupu istraživanjima urana nastupa otopljavanjem međunarodnih odnosa, kada dolazi do međusobnih otvaranja, koja se, između ostalog, manifestuju održavanjem prve konferencije za mirnodopsku upotrebu atomske energije u Ženevi 1955. godine. Već 1958. godine održana je i druga konferencija sa istom tematikom, a bila je na pragu i era reaktorske tehnike za proizvodnju sve deficitarnije električne energije. Istovremeno su počeli da pristižu školovani kadrovi, razvijene zemlje su široko otvarale vrata posetama stručnjaka, posebno iz nerazvijenih zemalja, pa su čak formirani i centri za obuku kadrova za istraživanje nuklearnih

sirovina, kako za domaće tako i za inostrane polaznike, u čemu je nesumnjivo prednjačila Francuska. Na tržištu su se najzad pojavili najsavremeniji tipovi potrebnih uređaja, u prvom redu detektora radioaktivnosti raznih vidova.

Cela ova izmenjena situacija dovela je do velikog poleta istraživanja urana i torijuma u svetu, tako da su već polovinom šezdesetih godina bila u glavnim crtama formirana savremena saznanja o geologiji nuklearnih sirovina kako u teoretskom smislu tako i u pogledu poznavanja glavnih uranonosnih područja u svetu. Izuzetak je i dalje veće područje Azije, severno od Himalaja, pored dela istočne Evrope, o čijoj se uranonosnosti vrlo malo zna. U međuvremenu se nastavlja tradicija međunarodnih skupova, sve više specijalizovanih, posebno o metalogeniji, geologiji i metodama istraživanja urana, u vidu simpozijuma ili okruglih stolova, sada pod okriljem Međunarodne agencije za atomsku energiju u Beču (International Atomic Energy Agency — IAEA). U pojedinim zemljama se održavaju kursevi za obuku kadrova u raznim disciplinama istraživanja urana, koji se isto tako organizuju od strane IAEA, kao na pr. u Škofjoj Loki (Jugoslavija) 1980. i 1984. godine.

Osamdesetih godina već su ogromne teritorije širom sveta pokrivene raznim vidovima prospekcije, prvenstveno aero gama ili gama spektrometrije. I dalje se vrše spektakularna otkrića sve bogatijih i većih ležišta urana sa novim stotinama hiljada tona urana, ali u većim dubinama, od čega treba spomenuti Sigar Lejk u Kanadi i Olimpik Dem u Australiji. U SAD se na pr. godišnje izbuši na hiljade kilometara bušotina samo na istraživanju urana. Jer, bez obzira na sva nepovoljna iskustva sa korišćenjem nuklearne energije, zamena za uran kao sve značajnijeg izvora energije u svetu još se ne nazire.

Jugoslavija se u potpunosti uklapala u ovu sliku i bila je jedna od zemalja u kojoj je intenzivno istraživan uran, a koja se uključila i u međunarodnu aktivnost u tom smislu, bilo u vidu obučavanja kadrova ili istraživanja urana u drugim zemljama. Ovde treba isto tako navesti interesantan podatak da je pedesetih godina u ovoj zemlji prospekcija urana omasovljena na taj način, što su uključeni ljudi svih profesija, koji su bili u bliskom kontaktu sa terenom (šumari, lovci, seoski učitelji i dr.). U tu svrhu u Elektronskoj industriji u Nišu (tada RR zavodi) izrađen je gotovo u celosti u sopstvenoj proizvodnji mali portabilni. ali za svoje minijaturne dimenzije vrlo efikasan Gajger-Milerov detektor (uključujući i samu GM cev), nazvan »Lovac«, po čemu je i ovaj vid potrage nazvan »lovac-prospekcija«. Njime je 1956. godine otkriveno manje ležište urana Iverak u SZ Srbiji.

III.2. RADIOMETRIJSKE METODE

Radiometrijske metode baziraju na detekciji jonizujućeg zračenja, bilo pojedinih vrsta zraka odnosno čestica, ili ukupne aktivnosti radioaktivnih tela. Ovo se pre svega odnosi na gama zrake, obično zajedno sa beta česticama s jedne strane i na alfa zračenje s druge strane. Neutroni imaju u zadnje vreme sve veće učešće (preko nekih transurana sa spontanom fisijom) u detekciji urana.

U okviru ovih, dominiraju gama-radiometrijske metode, bilo da se radi o detektovanju i dešifrovanju skupnog zračenja ili o diskriminaciji energetskih nivoa odnosno selektivnom detektovanju urana, torijuma i kalijuma, preko odgovarajućih radionuklida. Ovom metodom, a naročito u ovom drugom slučaju, moguća je i neposredna terenska kvantitativna odredba pojedinih elemenata (pri raznim koncentracijama). U svakom slučaju, gama-radiometrijom dolazi se u neposredan, pravolinijski kontakt sa radio nuklidima, na većem ili manjem rastojanju. Ovaj dodir može da bude blokiran, delimično ili potpuno, tankim humusnim ili stenskim pokrivačem, reda veličine 0,5 m, koji može da spreči detektabilnost gama zraka koji može poticati od bilo koga radionuklida u prirodi.

Alfa-radiometrijske metode baziraju prvenstveno na detekciji gasa radona (emanacije), bilo da potiče od urana 238 (^{222}Rn) ili torijuma (^{220}Rn ili »toron«). Radon 219 (»aktinon«) kao produkt uran-aktinijumovog niza (^{235}U) nema praktičnog značaja. Ovo je posredna metoda detekcije, koja može da ukaže na udaljene izvore emanacije, na tzv, skrivena orudnjenja urana, ali isto tako i na početne faze deformacija zemljine kore, kao osetljivih predvesnika zemljotresa.

Beta zračenje, samo za sebe, nije imalo posebnog značaja za istraživanje nuklearnih sirovina, sem što je određen tip detektora, tzv. Gajger-Milerov brojač (danas u prospekciji uglavnom zamenjen scintilacionim brojačima) ujedno i beta i gama detektor. Za detekciju svih vrsta zračenja koriste se, uostalom, isti principi (jonizacija gasa i eksitacija odnosno luminiscencija raznih materijala).

III.2.1. Gama radiometrijske metode

Najveći obim istraživanja nuklearnih sirovina obavlja se, kako je rečeno, primenom gama radiometrijskih metoda, što se, pre svega, odnosi na terenska istraživanja. Ove čine osnovu svakom traganju za uranom i može se reći da u početnom stadijumu gotovo nema drugog izbora, do sistematskog merenja gama radioaktivnosti u fazi tzv. regionalne gama radiometrijske prospekcije. Izbor vrsta i detaljnosti metoda daljih istraživanja zavisi od rezultata prethodne prospekcije, koja podrazumeva selekciju i prethodnu proveru anomalija gama radioaktivnosti, o čemu će biti reči u daljim poglavljima.

Gama radiometrijske metode mogu se primeniti ne samo kod traganja za uranom kao sirovine, već i za druga geološka istraživanja, uključivši i detekciju kalijuma i torijuma, kao indikatora drugih mineralnih sirovina ili raznih geoloških fenomena.

III.2.1.1. DETEKTORI GAMA ZRAČENJA

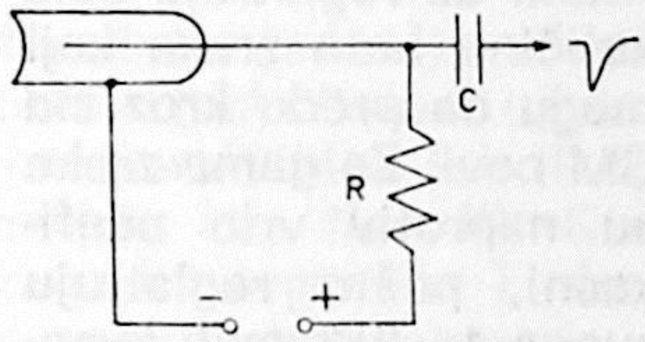
Ovde će prvenstveno biti prikazani principi detekcije gama zračenja, dok su pojedini modeli uređaja i način rada dati u posebnom dodatku na kraju knjige.

Uređaji za merenje gama radioaktivnosti u geologiji odnose se na brojače, pošto registruju (broje) impulse struje, koja je posredno izazvana prodorom gama kvanta (nekad i beta elektrona) u detektor. Detekcija gama zračenja bazira uglavnom na dva osnovna fizička fenomena: jonizacija ga-

sova i eksitacija detekcione, najčešće čvrste sredine. U oba slučaja krajnji ishod procesa je električna struja, koja se može meriti, a koja je proporcionalna broju upadnih zraka i njihovoj energiji.

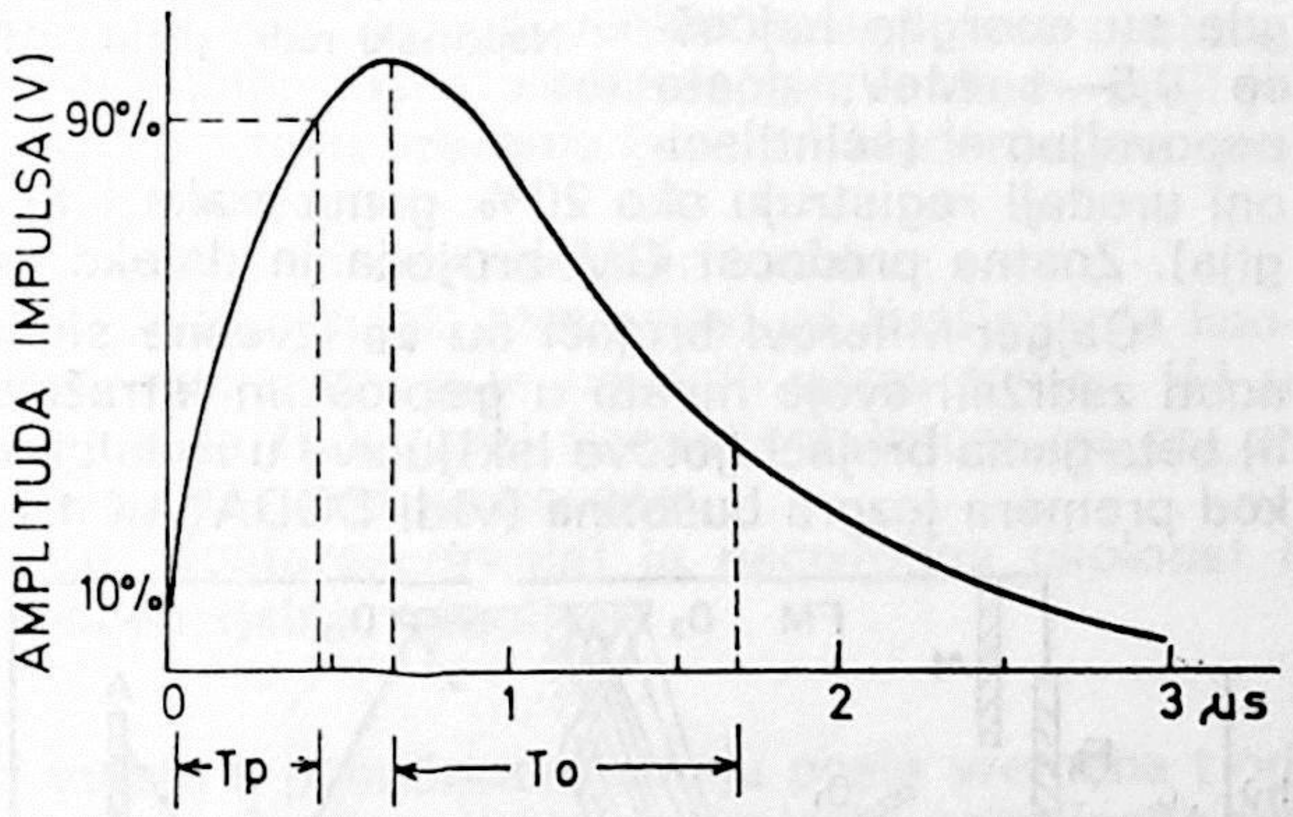
Gasni ili jonizacioni brojači

Princip rada gasnih detektora, kojih ima više tipova, sastoji se u fenomenu jonizacije gasova kroz koje prolazi jonizujuće zračenje, u konkretnom slučaju gama fotoni ili beta elektroni. U geologiji se koristi isključivo Gajger-Milerov (Geiger-Müller) ili kraće — GM brojač. Osnovni elemenat ovog brojača je detekciona komora, najčešće u vidu zatvorenog cilindra, obično od stakla, sa unutrašnjom metaliziranom površinom, koja služi kao jedna od elektroda (katoda). Duž ose cilindra postavljena je žica (od volframa) koja služi kao anoda. Cilindar je ispunjen smešom inertnog gasa (argon, neon) i pare neke organske materije (etil alkohol) ili halogena, obično broma.



Sl. III.1.
Šema strujnog kola GM brojača.

Princip rada je složen jer su impulsi posledica celog niza procesa jonizacije, do koje dolazi prolaskom gama fotona ili alfa i beta čestica kroz brojač. Tom prilikom od katode prema anodi kreće elektron, jako ubrzan u snažnom polju oko anode i udarom jonizuje atom i stvara jonski par, a znatno sporiji (teži) pozitivni joni kreću ka katodi (omotaču). Ubrzo oba oslobođena elektrona dobijaju novo ubrzanje i vrše ponovnu jonizaciju sa oslobađanjem sledeća dva elektrona itd. Tako se u jednom milionitom delu sekunde stvara tzv. Taunsendova (Townsend) lavina od oko 10^7 elektrona, nastalih samo od jednog elektrona. Lavina se gasi usled prisustva para alkohola odnosno broma u gasu u komori.



Sl. III.2.
Oblik naponskog impulsa iz brojača.

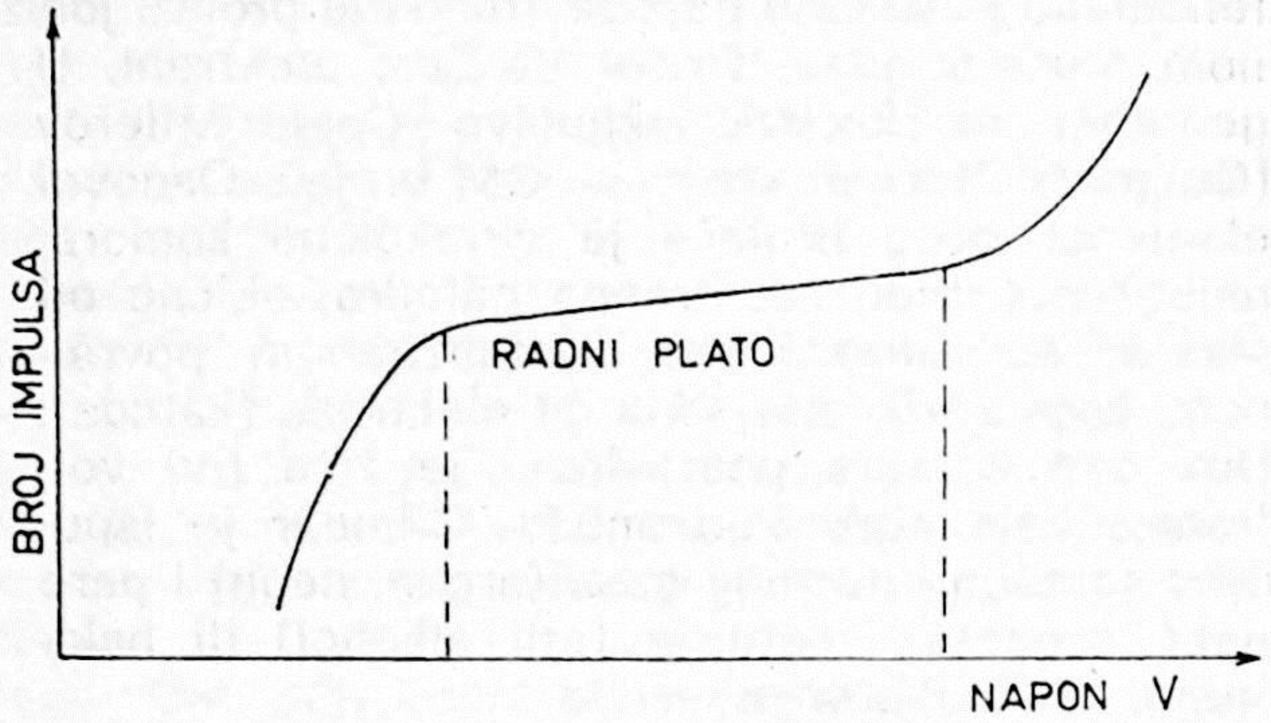
Električno kolo (sl. III.1) se u osnovi sastoji od otpornika (R) i kondenzatora (C), a proizvod RC je konstanta, čija je dimenzija sekunda (otpor R u omima je po definiciji V/A, a kapacitativnost u faradima je C/V, pa je $RC = C/A = s$). Vreme pražnjenja kondenzatora ($t = RC$) za GM brojače je reda 10^{-5} s.

Karakter promene impulsa, uključivši porast (T_p) i opadanje (T_o), prikazan je na sl. III.2. Porast je obično $3—5 \times 10^{-6}$ s (kod scintilometra* je

---

* Ispravniji naziv je »scintilacioni brojač«.

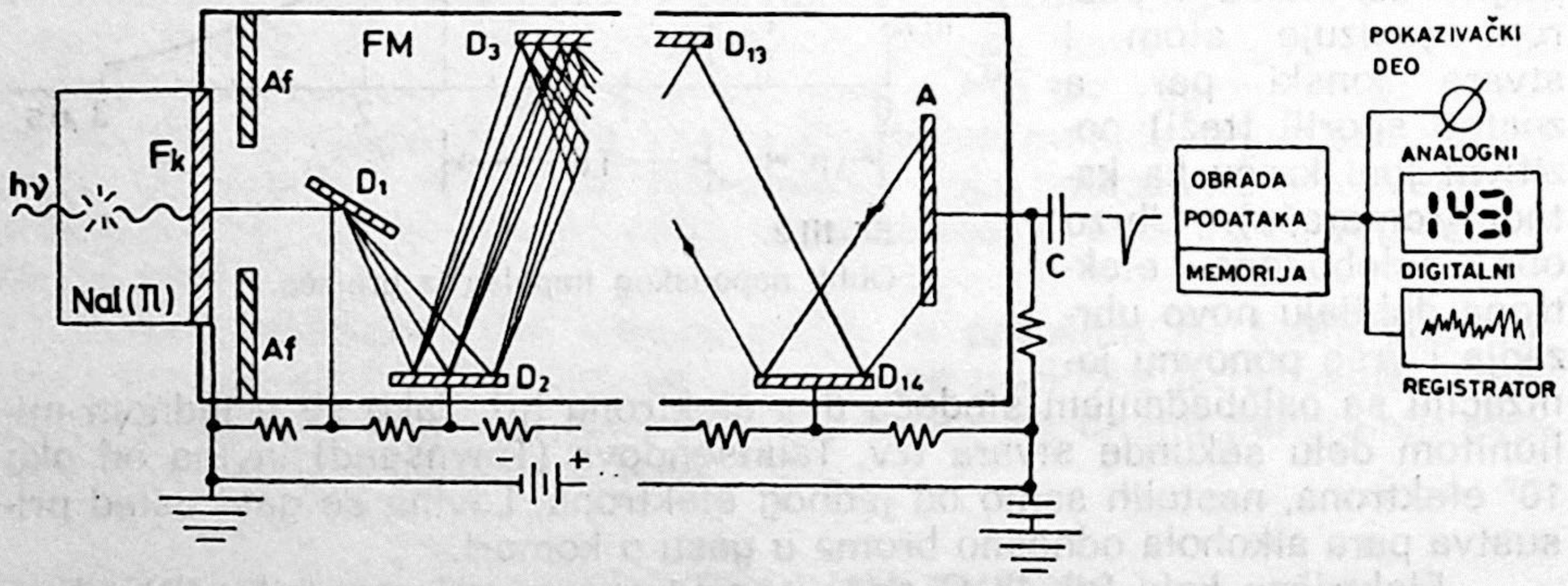
0,01—0,2$\times 10^{-6}$ s), a opadanje oko 2×10^{-4} s (kod scintilometra 1—2$\times 10^{-6}$ s). Radni napon GM brojača zavisan je od tzv. platoa (stalnost broja impulsa u rasponu napona) i za alkoholni brojač kreće se od 800——1000 V, a kod halogenih 150—500 V (sl. III.3).



Sl. III.3.
Naponski radni plato GM brojača.

Gajger-Milerovi brojači su dosada najefikasniji detektori beta elektrona, jer mogu teoretski da registruju celu količinu beta zraka koji mogu da prođu kroz zid GM cevi. Za gama zrake su naprotiv vrlo neefikasni, pošto registruju svega 1—2% ovih kvanta, pri čemu je efikasnost proporcionalna sa porastom energije, što je za prirodne izotope, na pr. u uranovom nizu, gde su energije najčešće 0,5—1 MeV, dosta nepovoljno (scintilacioni uređaji registruju oko 20% gama zraka i to pretežno onih niskih energija). Znatna prednost GM brojača je daleko niža cena od scintilacionih.

Gajger-Milerovi brojači su za izvesne slučajeve detekcije radioaktivnosti zadržali svoje mesto u geološkim istraživanjima, i to bilo kao gama ili beta-gama brojači gotovo isključivo u rudnicima ili na raskopima odnosno kod premera jezgra bušotina (vidi DODATAK 1.).



Sl. III.4.
Pregledna šema scintilacionog brojača (sonda i registratorski sklop)
NaI(Tl) — kristal (scintilator), Fk — fotokatoda, Af — fokusna anoda, D_{1-14} — dinode, A — sabirna anoda, C — kondenzator, i — izlazni (negativni) impuls.

Scintilacioni brojači

Scintilacioni uređaji (detektori — brojači) nade na principu svetlucanja (scintilacije prouzrokovane ekscitacijom) koje jonizujuća zračenja

svih vidova (alfa, beta i gama) izazivaju u pojedinim materijalima. Ovde je reč o detekciji gama fotona putem tzv. scintilometara, koji se prvenstveno koriste za prospekciju, potisnuvši GM brojače, od kojih su daleko osetljiviji (oko 20 puta). Ovi brojači isto tako znatno brže reaguju na promene intenziteta zračenja, sa mogućnošću registrovanja znatno većeg broja impulsa u jedinici vremena. Kako se impulsi menjaju ne samo prema fluksu već i prema energijama, sa ovim uređajima je moguće i kvantitativno merenje zračenja (gama spektrometrija), o čemu će biti reči kasnije.

Scintilacioni brojač sastoji se u osnovi iz dva dela: jedan je scintilaciona sonda u kojoj se nalazi luminiscentni detektor (scintilator) i fotomultiplikator (umnoživač svetlosti) a drugi je registratorski blok (sl. III.4).

Scintilatorske osobine ima veliki broj materijala kao NaI, KI, CsI, Ge(Li), HP Ge (germanijum visoke čistoće), zatim neke organske i plastične materije, čvrste i tečne, pa čak i gasovi. Za gama scintilacione brojače najčešće se koristi monokristal natrijum jodida aktiviran talijumom (zbog povećanja broja Z). Ovaj materijal je higroskopan i mora da bude dobro zaštićen. Kristal cezijum jodida (sa talijumom) ima bolje performanse od NaI(Ta) pošto nije higroskopan niti lomljiv, a ima i bolje karakteristike razlaganja spektra, ali je znatno skuplji (kristal čini najveću stavku u ceni uređaja). Slične karakteristike, ali sa znatno većim razlaganjem spektra, ima dioda Ge(Li), samo što se stalno mora hladiti tečnim azotom. Bolji je HP Ge jer se mora hladiti samo u toku merenja (ustvari hlađenje pre merenja, pa može biti portabilan za teren).

Efikasnost scintilatora sastoji se od sledećih osobina:

1. Broj fototna (n_o) koji emituje scintilator zavisi od koeficijenta konverzije (K), odnosno od pretvaranja energije upadnih gama fotona (E) u energiju izlaznih svetlosnih fotona (E_f). Ovaj koeficijent iznosi na pr. za NaI(Tl) 8%. za razliku od svega 4% kod antracena.

2. Produženo svetlucanje (fosforescencija) je nepovoljna okolnost i ono je izraženo u vidu eksponencijalne relacije:

$$n = Ne^{-t/Ts}$$

gde je n — broj atoma koji ostaju u pobuđenom stanju posle vremena t od upada gama fotona; Ts je vremenska konstanta — trajanje scintilacije od maksimalnog (ukupnog) broja fotona N, do slabljenja emisije na jednu trećinu. Za NaI(Tl) je $Ts = 2{,}5 \times 10^{-7}$ s, a kod organskih scintilatora je svega 10^{-9} s.

3. Ostale karakteristike scintilatora su prozračnost, kao i talasna dužina svetlosti koju isijava. Kod NaI(Tl) talasna dužina emisije svetlosnih fotona spada u ultraljubičasti deo spektra ($\lambda = 4{,}0—4{,}5 \times 10^{-7}$ m). Da bi se povećala emisija rasutih fotona, kristal se oblaže reflektujućom belom materijom, obično na bazi Mg, Ca ili Ti.

4. Osetljivost scintilatora zavisi najzad od njegove zapremine, koja teoretski nije ograničena, ukoliko je to tehnički (i ekonomski) ostvarljivo. Kod portabilnih detektora u primeni je optimalna zapremina kristala od 75 cm^3 (4,5 kubnih inča).

Fotomultiplikator je ustvari komponenta scintilacionog brojača, čije je otkriće, a naročito usavršavanje početkom pedesetih godina omogućilo masovnu upotrebu ovog detektora. To je ustvari specijalna elektronska cev (sl. III.4) čiji je balon optički spojen sa scintilatorom (preko premaza

savršeno providne silikonske masti). Na samom početku fotomultiplikatora nalazi se fotoelektrična ćelija ili fotokatoda, koja se sastoji od tankog, poluprovidnog filma fotoosetljive materije, najčešće $SbCs_3$ (ili Li-Sb jedinjenja), koja emisiju svetlosnih fotona pretvara u primarnu emisiju elektrona. U svom daljem putu snop elektrona iz fotokatode, fokusiran preko odgovarajuće anodne elektrode, pada na sistem naspramno poređanih površina, tzv, dinoda, koje vrše emisiju umnoženih sekundarnih elektrona. Oblik i geometrija rasporeda dinoda, kojih ima obično 10—13, može da bude različita (na sl. III.4 prikazan je jedan od sistema). Završna elektroda je anoda, na koju upada umnožena struja elektrona.

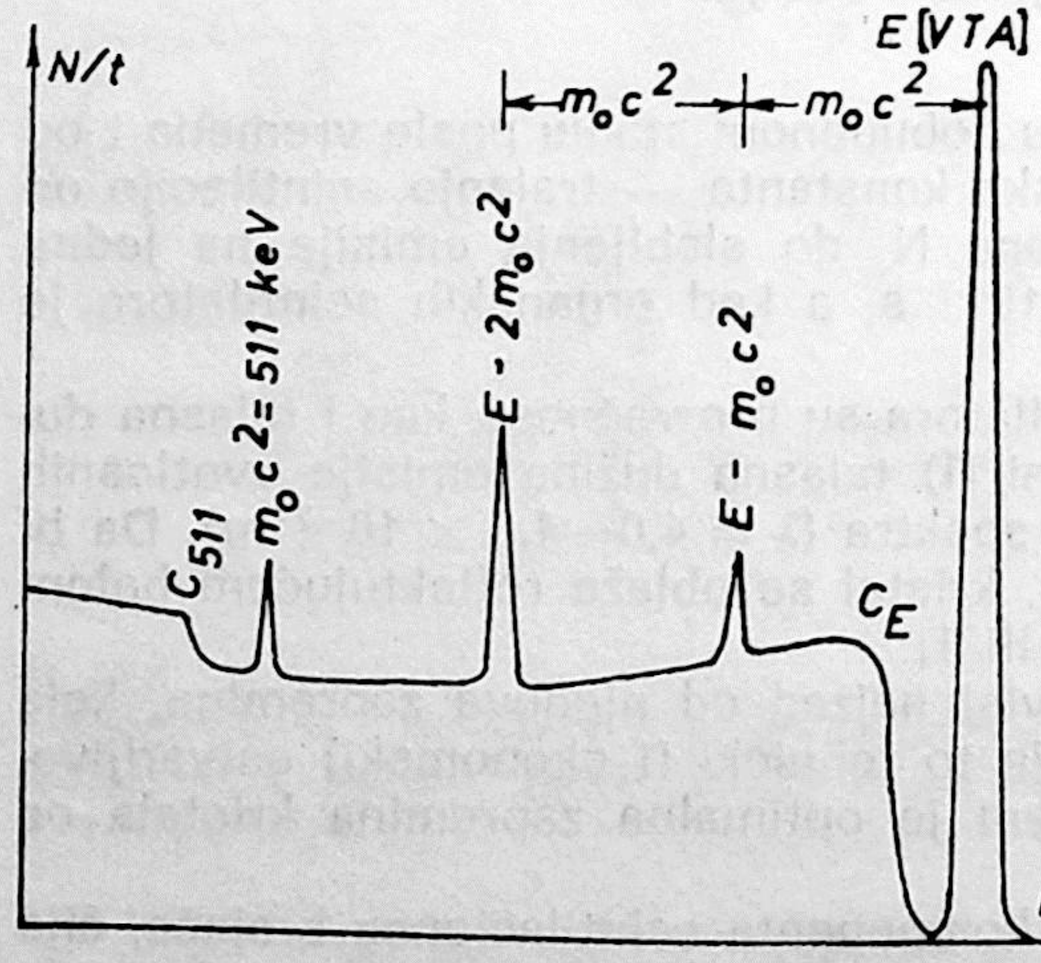
Osetljivost fotomultiplikatora odnosno fotokatode izražava se kao struja u amperima po lumenu* (lm) svetlosnog izvora (pobuđenog kristala) i kreće se u opsegu 50—100 μA/lm ili više (za plavo odnosno ljubičasto osetljive fotokatode). Fotokatoda mora izričito da bude osetljiva na spektar izlaznih fotona iz scintilatora.

Faktor multiplikacije M zavisi od koeficijenta umnožavanja elektrona (jedan elektron upadom na dinodu izbija 3—4 drugih elektrona) dignutog na stepen m, koji znači broj dinoda. Na taj način dobija se vrednost M od oko 10^5—10^8.

III.2.1.2. GAMA SPEKTROMETRIJA

Pod gama spektrometrijom se podrazumeva merenje nivoa gama zračenja odnosno energija pojedinih linija gama spektra, koji odražavaju efekte interakcija gama fotona (kvanta) u scintilatoru.

Gama kvant izaziva u scintilatorima, na pr. u kristalu NaI, iste efekte kao i u svakom drugom materijalu, čija izraženost zavisi kako od karaktera materijala (broj Z) tako i od energije kvanta (fotona). To su već opisani efekti stvaranja parova, komptonov efekat i fotoefekat (I.1.3.5, **Gama zračenje**), koji se, svaki za sebe, različito manifestuju u zavisnosti od navedenih uslova.



Sl. III.5.
Spektralna funkcija Ge-detektora za energiju $E > 2\,mc^2$ [17].
$C_{511, E}$ — Komptonova ivica, VTA — vrh totalne apsorpcije

---

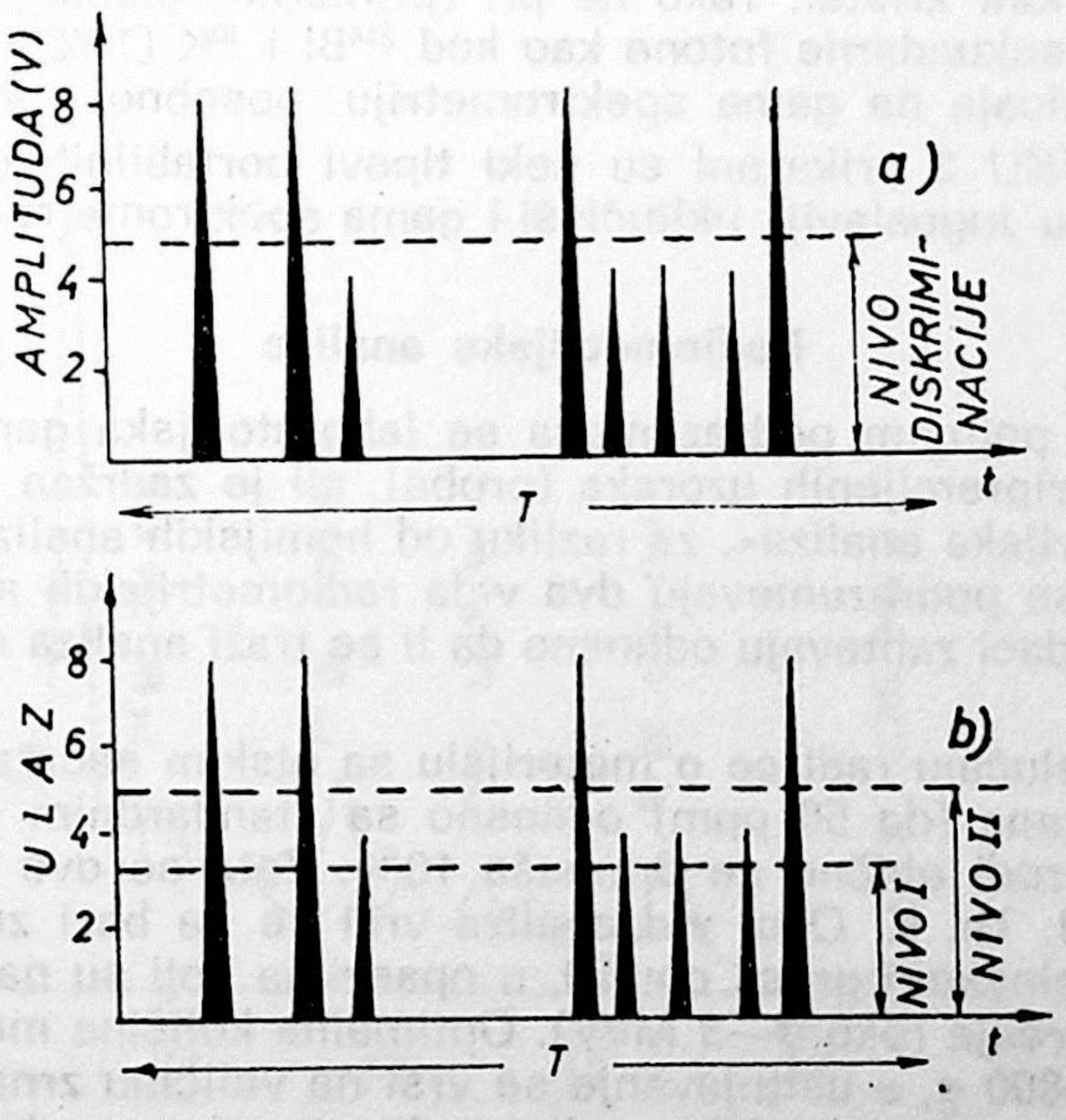
* Lumen označava osvetljenje koje u svim pravcima odašilje tačkasti svetlosni izvor jačine 1 kandele (1 lm = 1 cd x 1 sr).

Stvaranje parova elektron-pozitron manifestuje se kao dva pika $m_oc^2 = 0{,}511$ MeV, ali samo kod energija fotona preko 2 m_oc^2 (energija anihilacije), (sl. III.5).

Komptonov efekat izaziva rasipanje širokog intervala elektrona različitih energija, zajedno sa oslabljenim gama kvantima, koji formiraju krivu sa blagim usponom do naglog prekida (Komptonova ivica, C_E na sl. III.5, KI na sl. III.7c). Ovaj efekat je izraženiji kod srednjih energija zračenja i manjih kristala u odnosu na fotopik, tako da se kod zapremine kristala od jednog litra sasvim gubi.

Fotoefekat najviše dolazi do izražaja kod niskih energija gama zračenja i u materijalima sa visokim Z, zbog čega su i pikovi nižih energija, između ostalog, izraženiji od viših (sl. III.7a, b, d). Fotopik ustvari je sasvim određena linija spektra, koja se usled pratećih efekata odslikava kao amplitudna kriva, gde maksimum intenziteta zračenja označava vrh amplitude (totalne apsorpcije, na sl. III.5). Zato je ovaj efekat podesan za merenje u spektrometriji. Ovde se javljaju i drugi, manje značajni efekti, kao što je na pr. zračenje unazad (RU na sl. III.7c), koje potiče od indukovanog zračenja iz opreme sonde, koje je u stvari rentgensko zračenje, kao i ono iz olovne obloge i sl.

Raščlanjavanje impulsa različitih energija zračenja (amplituda), koji odgovaraju određenim energetskim linijama spektra gama zračenja, karakterističnim za svaki radionuklid, vrši se putem amplitudnih diskriminatora i analizatora, kao i višekanalnih analizatora. To su po pravilu koincidentni uređaji, koji na izlazu registruju impulse koji se ponavljaju u jednoj vremenskoj sukcesiji.



Sl. III.6.
a) Integralni diskriminator, b) jednokanalni analizator (prema [37]).

Kod integralnog diskriminatora postoji određeni energetski nivo diskriminacije, označen na ordinati, za sve impulse — apscisa na sl. III.6a. Kod jednokanalnog (diferencijalnog) analizatora može se vršiti selekcija impulsa između dva nivoa diskriminacije (sl. III.6b), a taj raspon se ponekad naziva prozor (ne treba izgubiti iz vida da su amplitude pikova na sl. III.6 okrenute u odnosu na sl. III.7 u smislu zamene apscise i ordinate).

Prozor može da se pomera kod merenja raznih nivoa energije, što zahteva veoma mnogo vremena, pa se za laboratorijska merenja primenjuju daleko skuplji i složeniji, ali neuporedivo brži višekanalni analizatori sa više hiljada kanala veoma uskih opsega, koji vrše diskriminaciju, klasifikaciju i registraciju svih impulsa (**Radiometrijske analize** u daljem tekstu).

Terenska merenja

U portabilne (terenske) gama spektrometre ugrađuju se svega četiri odnosno tri fiksna kanala: jedan ze celokupno gama zračenje, a ostala tri za kalijum, uran i torijum. Obično se uzima ukupni energetski opseg od 0,41—2,81 MeV, a unutar toga, za kalijum 1,37—1,57 MeV, za uran 1,66—1,86 MeV i za torijum 2,41—2,81 MeV [10]. Treba imati u vidu da ^{40}K ima samo jedan pik od 1,46 MeV, da je za uran karakterističan pik 1,746 MeV (^{214}Bi), a za torijum 2,615 MeV (^{208}Tl, vidi tabelu u poglavlju IV.5). Međutim, gama spektar ^{214}Bi kreće se u rasponu od 0,27—2,2 MeV, a spektar ^{208}Tl počinje približno isto od 0,25 MeV, tako da delimično dolazi do preklapanja ili stripinga (stripping [10]; DODATAK 2). Do sličnog preklapanja dolazi i usled Komptonovog rasejavanja koje nastaje u samom izvoru zračenja, kod interakcije sa slojem neposredno ispod površine, pre upada zraka u detekcioni kristal. Tako na pr. (primarno) gama zračenje ^{208}Tl od 2,61 MeV daje sekundarne fotone kao kod ^{214}Bi i ^{40}K (1,76 i 1,46 MeV), što ima znatnog uticaja na gama spektrometriju, posebno u kanalima K i U.

U DODATKU 2 prikazani su neki tipovi portabilnih gama detektora koji se koriste u Jugoslaviji, uključivši i gama spektrometre.

Radiometrijske analize

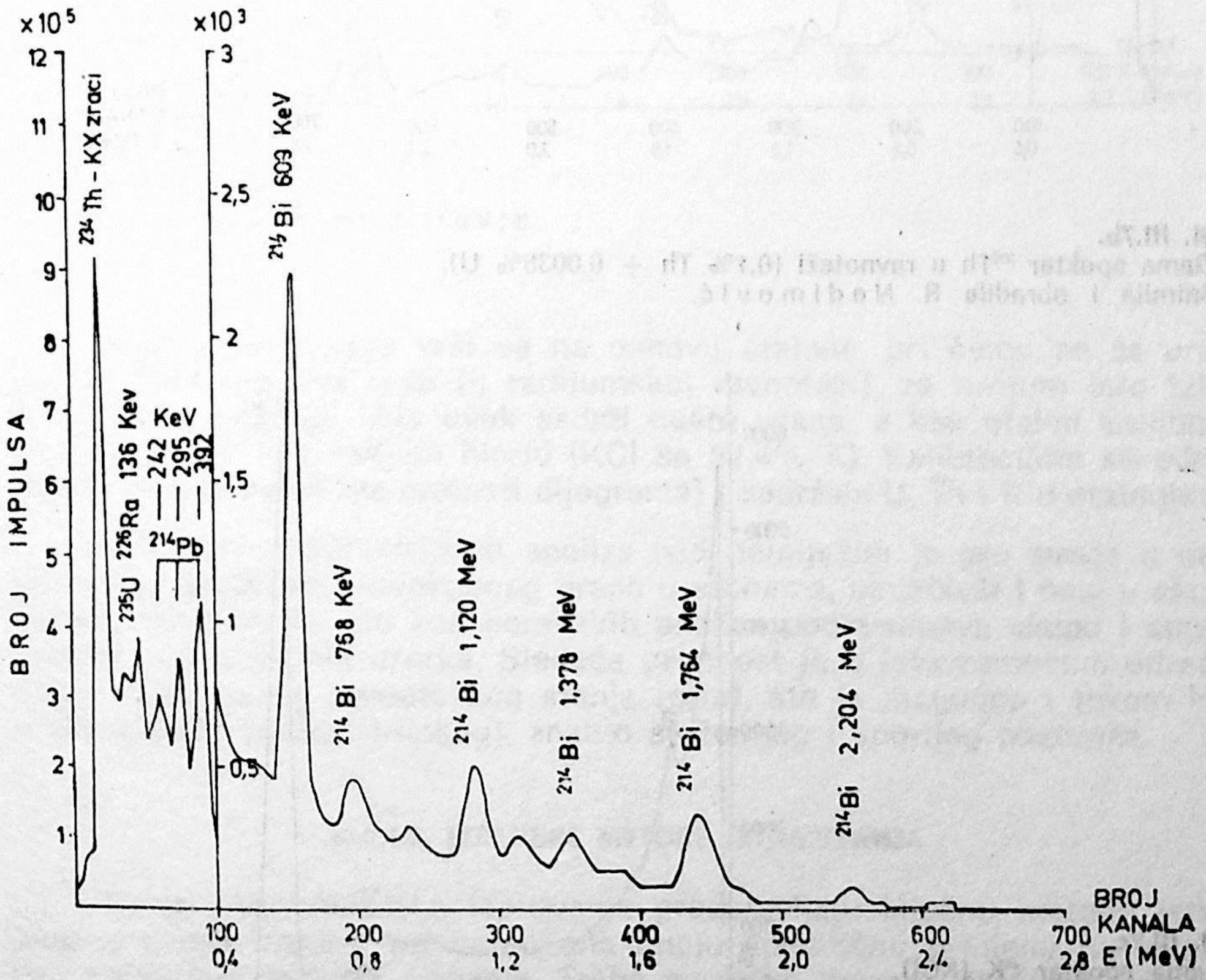
Pod ovim pojmom podrazumeva se laboratorijska gama spektrometrijska analiza pripremljenih uzoraka (proba), ali je zadržan već odomaćeni izraz »radiometrijska analiza«, za razliku od hemijskih analiza radioaktivnih elemenata. Tu se podrazumevaju dva vida radiometrijskih analiza, u zavisnosti koji se podaci zahtevaju odnosno da li se traži analiza stena ili rudnog materijala.

U prvom slučaju radi se o materijalu sa niskim sadržajima urana (do 20 ppm) i torijuma (do 50 ppm) odnosno sa standardnim sadržajem kalijuma, koji u prirodi obično ne premaša 10%. Zato se ove zovu radiometrijske anlaize U, Th, K. Ovaj vid analiza vrši se na bazi zračenja visokih energija (na engleskom gross count), u opsezima koji su navedeni u odeljku **Terenska merenja** (oko 0—3 MeV). Optimalna količina materijala za ovu analizu je 500—800 g, a usitnjavanje se vrši na veličinu zrna 30—80 meša.

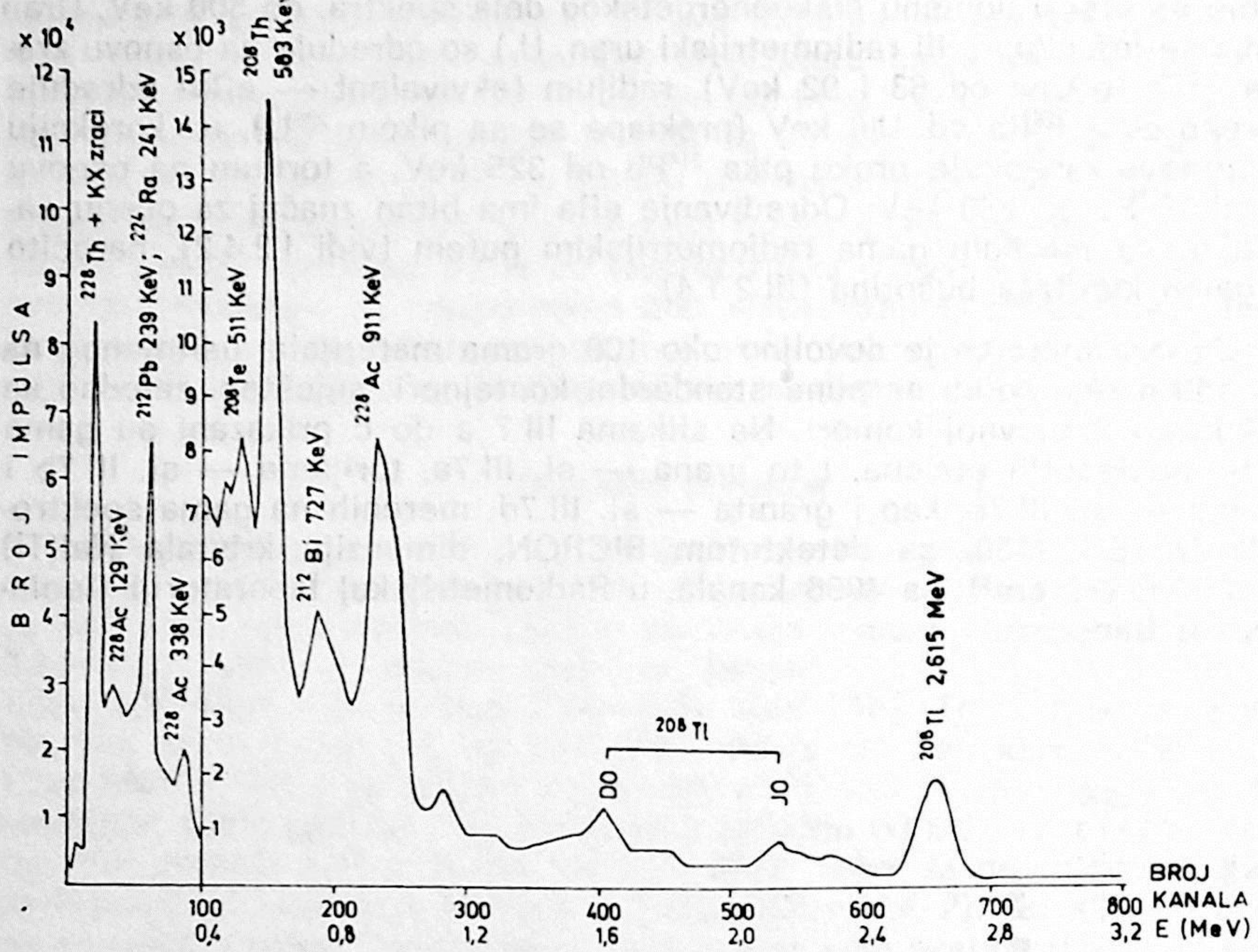
Drugi vid radiometrijskih analiza odnosi se na rudni materijal, sa povećanim sadržajem urana, radijuma i torijuma, pri čemu se radijum izražava kao ekvivalentna količina urana, u ravnoteži sa radijumom (odnos je

1 g Ra prema 2,9 × 10^6 g U). Zato se ove nazivaju analize U, eRa, Th i određivanje se vrši u domenu niskoenergetskog dela spektra, do 500 keV. Uran (naziva se još ukupni ili radiometrijski uran, U_r) se određuje na osnovu zračenja ^{234}Th (pikovi od 63 i 92 keV), radijum (ekvivalent — eRa) određuje se preko pika ^{226}Ra od 186 keV (preklapa se sa pikom ^{235}U), uz korekciju Komptonove raspodele preko pika ^{214}Pb od 325 keV, a torijum na osnovu zračenja ^{212}Pb od 239 keV. Određivanje eRa ima bitan značaj za ocenu sadržaja urana merenih gama radiometrijskim putem (vidi I.2.4.2), naročito kod gama karotaža bušotina (III.2.1.4).

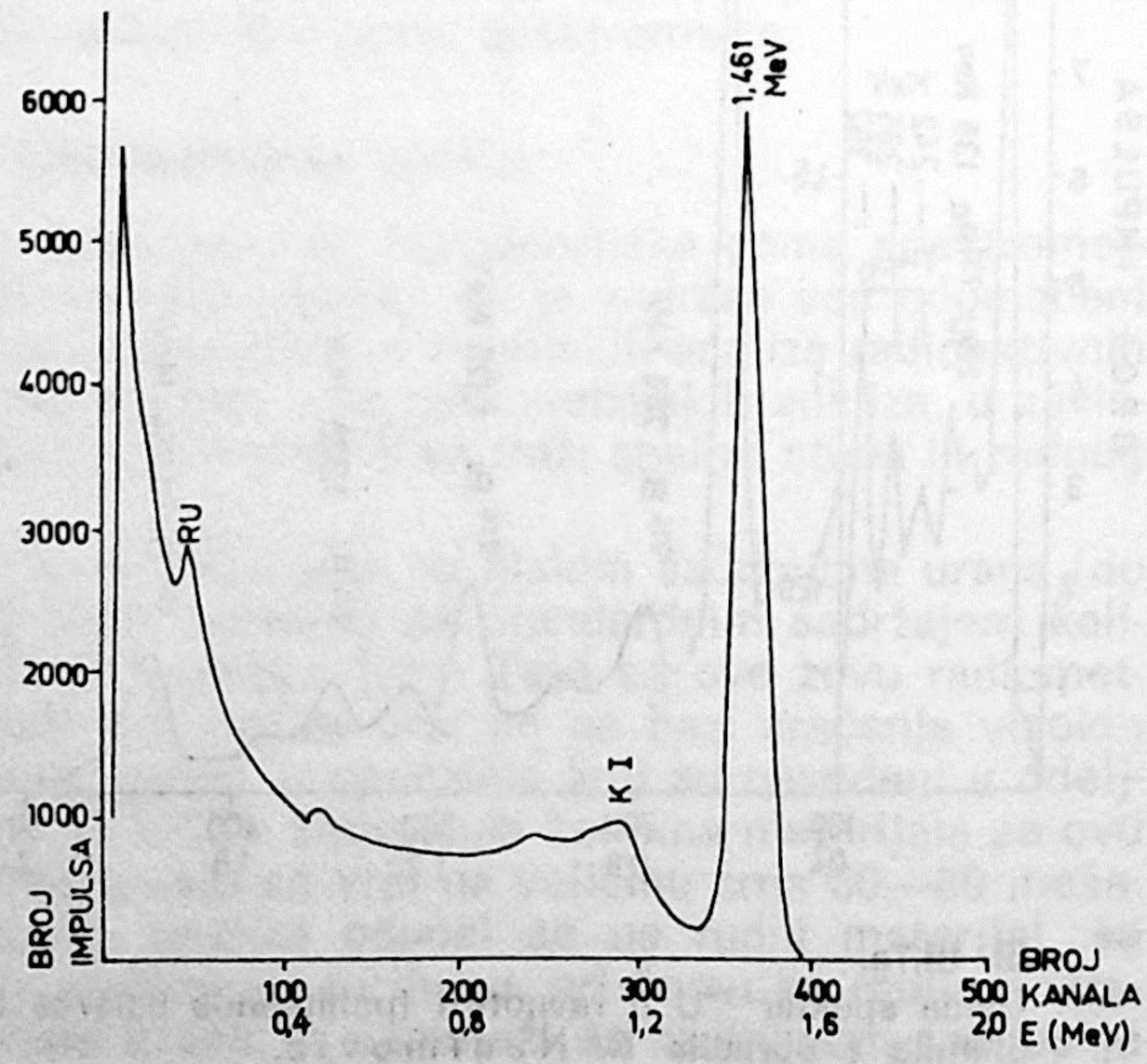
Za ova merenja je dovoljno oko 100 grama materijala, usitnjenog na 100—150 meša, kojim se pune standardni kontejneri, smešteni zajedno sa detektorom u olovnoj komori. Na slikama III.7 a do c prikazani su gama spektri pomenutih etalona, i to urana — sl. III.7a, torijuma — sl. III.7b i kalijuma — sl. III.7c, kao i granita — sl. III.7d, merenih na gama spektrometru ORTEC 7450, sa detektorom BICRON, dimenzije kristala NaI(Tl) 4'' × 4'' (3290 cm^3), sa 4096 kanala, u Radiometrijskoj laboratoriji Geoinstituta u Beogradu.



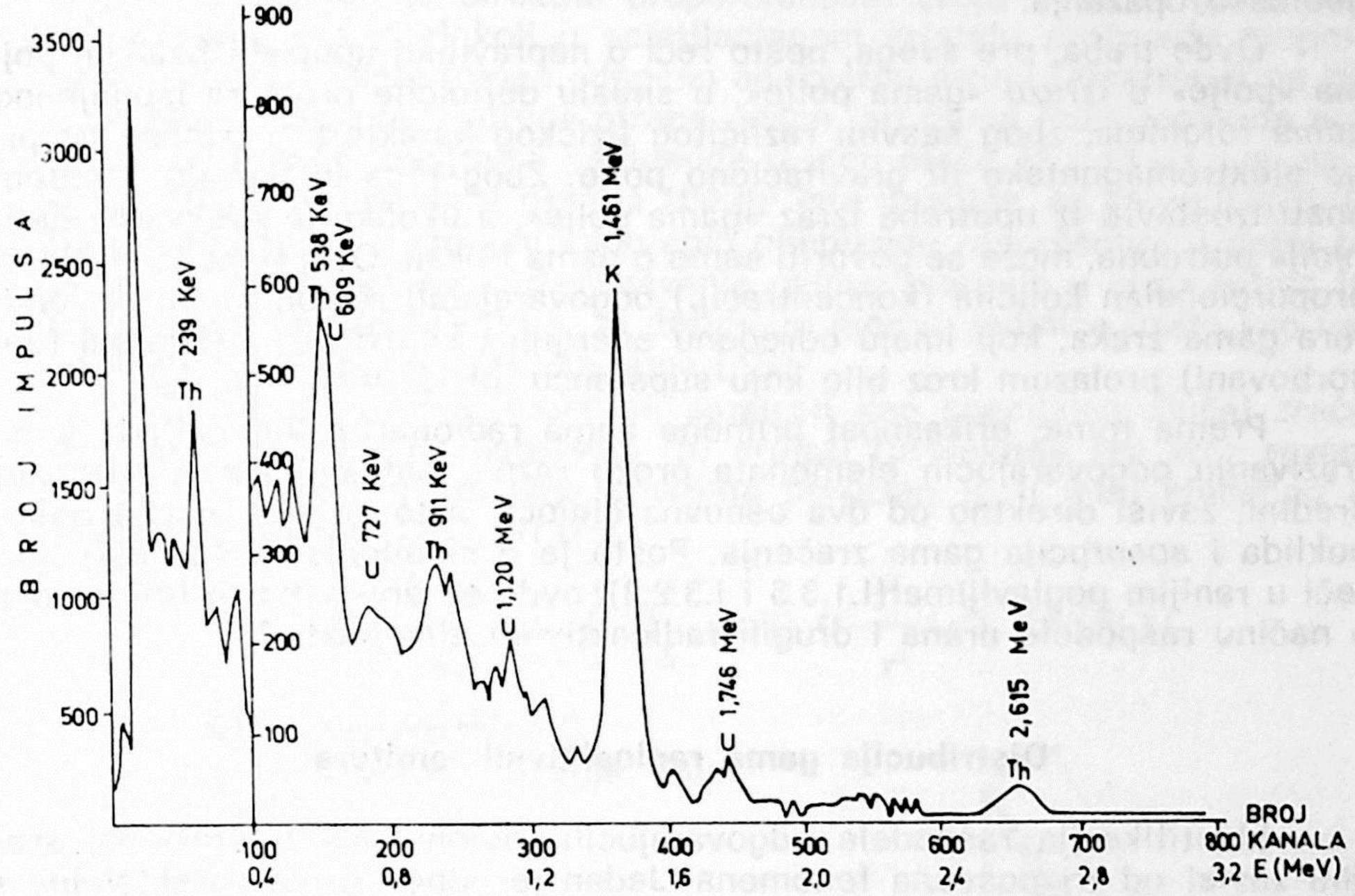
Sl. III.7a.
Gama spektar ^{238}U u ravnoteži (pehlblenda 0,047% U).
Snimila i obradila R. Nedimović.



Sl. III.7b.
Gama spektar ^{232}Th u ravnoteži (0,1% Th + 0,0035% U).
Snimila i obradila R. Nedimović.



Sl. III.7c.
Gama spektar ^{40}K (KCl).
RU — rasejavanje unazad,
KI — Komptonova ivica.
Snimila i obradila R. Nedimović.



Sl. III.7d.
Gama spektar granita.
Snimila i obradila R. Nedimović.

Kalibracija pikova vrši se na osnovu etalona, pri čemu se za uran uzima čista uranova ruda (u radijumskoj ravnoteži), za torijum isto tako torijumova ruda, ali koja uvek sadrži nešto urana, a kao etalon kalijuma služi hemijski čist kalijum hlorid (KCl sa 52,4% K). Kalibracijom se određuje odnos impulsa (na ordinati dijagrama) i sadržaja U, Th i K u etalonima.

Prednost radiometrijskih analiza nad hemijskim je pre svega u mogućnosti određivanja celokupnog urana u stenama, uključivši i onaj u akcesornim mineralima, što kod hemijskih analiza podrazumeva skupo i sporo totalno razgrađivanje uzorka. Sledeća prednost je u istovremenom određivanju radijumskog ravnotežnog stanja (eRa), što je mogućno i tokom hemijskog (alfa radiometrijskog), znatno složenijeg i sporijeg postupka.

III.2.1.3. TERENSKE METODE ISTRAŽIVANJA

Gama radiometrijska ispitivanja predstavljaju ključnu metodu istraživanja urana uopšte, pri čemu ona imaju specifičnu primenu na terenu kao neizbežan početak traganja. Treba međutim ponovo istaći da primena ove metode na terenu ne može da pruži odgovarajuće rezultate, bez stalnog i neposrednog kontakta sa celokupnim geološkim ambijentom. Treba isto tako imati u vidu da se prospekcijom ne traži samo uran, pa se radio-

metrija, makar i sasvim posredno, može iskoristiti i za mnogobrojna druga geološka opažanja.

Ovde treba, pre svega, nešto reći o nepravilnoj upotrebi fizičkog pojma »polje« u izrazu »gama polje«, u smislu definicije prostora ispunjenog gama fotonima, zbog sasvim različitog fizičkog karaktera u odnosu na pr. na elektromagnetsko ili gravitaciono polje. Zbog toga bi trebalo u potpunosti izostaviti iz upotrebe izraz »gama polje«, a ukoliko je adekvatna definicija potrebna, može se govoriti samo o gama fluksu. Ovaj fluks je direktno proporcionalan količini (koncentraciji) odgovarajućih radionuklida kao emitera gama zraka, koji imaju određenu energiju i koji bivaju oslabljeni (apsorbovani) prolazom kroz bilo koju supstancu, uključujući i vazduh.

Prema tome, efikasnost primene gama radiometrijskih metoda u istraživanju odgovarajućih elemenata preko raznih radionuklida u prirodnoj sredini, zavisi direktno od dva osnovna činioca, a to su distribucija radionuklida i apsorpcija gama zračenja. Pošto je o slabljenju (apsorpciji) bilo reči u ranijim poglavljima (I.1.3.5 i I.3.2.3), ovde će prvenstveno biti govora o načinu raspodele urana i drugih radioaktivnih elemenata.*

Distribucija gama radioaktivnih emitera

Identifikacija raspodele odgovarajućih radionuklida u prirodnoj sredini zavisi od tri posebna fenomena. Jedan je odnos gama detektabilne i korisne komponente, drugi je količina korisne komponente u odnosu na »normalnu« distribuciju, a treći je geometrija distribucije radiokomponente u istraživanom prostoru.

U prvom slučaju radi se o fenomenu ravnoteže, o čemu je već bilo reči (odeljak I.2.4.2). Ovaj fenomen ima poseban značaj u određenim labilnim odnosno nestabilnim terenima u regionalno-geološkom smislu, kao što su na pr. mladi orogeni pojasevi u domenu Alpa, Karpata, Pontida, Kordiljera i sl. Zato će pitanje ravnoteže, čiji uzroci ustvari dosežu domen geohemijskih poremećaja, biti tretirano u više navrata u daljem tekstu.

Ocena distribucije određenog radioelementa (radionuklida) bilo kao indikatora specifičnih geoloških procesa ili kao korisne supstance zavisi od mnogih činioca. Ako je reč o uranu kao sirovini, onda je to pitanje geološko-ekonomskih kriterijuma, gde je radiometrija samo jedan, prevashodno analitički činilac. Zato se u okviru (regionalne) gama radiometrijske prospekcije provera anomalija smatra kao neizostavna faza ovih istraživanja, pri čemu procena (ocena i provera) baziraju na jednoj empirijskoj uslovnoj granici odakle treba ili ne treba ići sa daljim istraživanjima. To je najosetljiviji momenat, kada sve veći značaj dobivaju geološka obeležja terena i iskustvo istraživača, pa i takve »transegzaktne« kategonije, kao što su instinkt i sl. To je donekle objašnjeno u poglavlju II.1, gde je bilo reči o veoma složenim i teško predvidljivim procesima orudnjavanja uranom. Postoji, naravno, uvek mogućnost vraćanja na određene, ranije napuštene anomalije, pa i ponovljene prospekcije, što se često čini.

---

* U geološkoj literaturi je često u upotrebi izraz »radioaktivni elemenat«, koji je fizički neprihvatljiv, jer se može govoriti samo o radionuklidima, mada je vrlo racionalan, kada je reč o razmatranju geoloških fenomena.

Intenzitet gama zračenja (izražen u impulsima u sekundi ili u drugoj prigodnoj jedinici) je direktno proporcionalan broju upadnih gama fotona (istog nivoa energije) koji u scintilacionom kristalu proizvedu proporcionalan broj svetlosnih fotona odnosno adekvatnu struju (elektrona) na izlazu iz fotomultiplikatora. S druge strane, jedan isti gama fluks može da potiče na pr. od jednog kilograma pehblende u vidu ploče $15 \times 15 \times 1$ cm, sa oko 80% U_3O_8, kao i od ploče granita 100 m² iste debljine, sa samo 0,05% U_3O_6 (što opet odgovara jednom kilogramu pehblende raspršenom u datoj ploči stene). Zato se prilikom izračunavanja uslova merenja u obzir uzima izvor zračenja ne kao tačka (što je za definiciju mernih jedinica uzeto kao uslov, poglavlje I.3), već kao deo površine (ΔS).

Zračenje površine može se smatrati kao specijalan slučaj zračenja tela, koje na putu do detektora (p) prolazi (projektuje se) kroz ravan ds (sl. III.8). Intenzitet zračenja površine prikazan je u vidu sledećeg dvostrukog integrala ([16], VI.24):

$$I = \frac{K \cdot Q \cdot \rho}{\mu_1} \int_{-a}^{+a} \int_{-\delta}^{+\delta} e^{-\mu_v \cdot r} \frac{H}{r^3} \, dx \, dy \quad \text{(III.1)}$$

x i y — dimenzije površine S

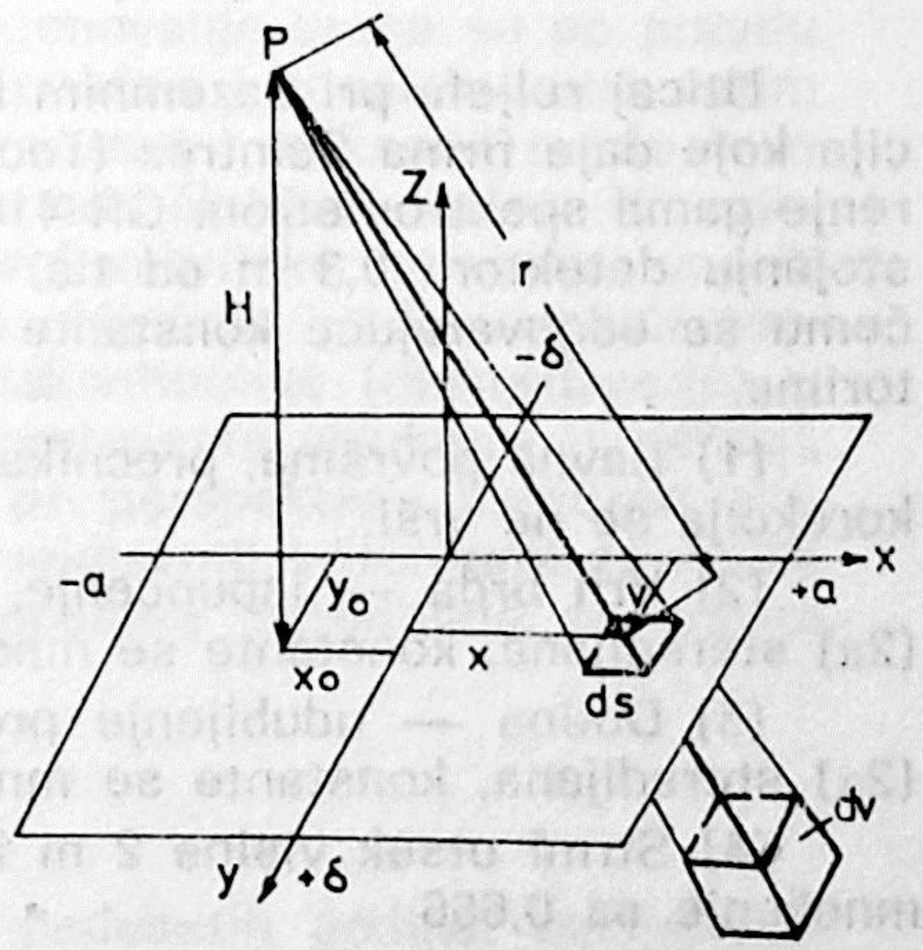
K — konstanta gama zračenja (odeljak I.3.2.3)

$Q = \frac{q}{p}$ je sadržaj radioaktivne materije g/g stene,

ρ je gustina stene (rude) g/cm³,

μ_1 je koeficijent apsorpcije (slabljenja) gama zraka u radioaktivnom sloju,

μ_v je koeficijent apsorpcije (slabljenja) gama zraka u vazduhu (Sl. 1.10).



Sl. III.8.
Ekvivalentnost zračenja tela i površine

Prilikom detekcije radioaktivnih supstanci na terenu sa izraženim reljefom dolazi do deformacije gama fluksa ne samo usled varijacije sadržaja radioaktivnih materija, već i zbog promena prostornog rasporeda ovih izvora zračenja. Pri tom se javljaju razlike u fluksu gama fotona koji upadaju u detektor (u smislu rasejavanja), kao i usled različite apsorpcije u vazduhu. Efekat razlike u geometriji dolazi do izražaja više kod pešačke prospekcije, a naročito kod merenja u zatvorenoj prostoriji, u jami na primer, gde se dimenzija 4π svodi na 2π upotrebom ekrana od olova.

Na osnovu formule III.1. izračunate su vrednosti intenziteta gama polja površina određenih dimenzija, za razna odstojanja H (visine), u procentima u odnosu na intenzitet fluksa na visini od 1 m od centra površine

(Tabela III.1). Vrednosti u tabeli mogu biti izražene bilo u impulsima u sekundi (i/s) ili drugim jedinicama.

Tabela III.1 — Korelacija γ zračenja prema visini i površini

Visina H (m)	Dimenzije površina m			Tačkasti izvor
	1000 x 1000	100 x 200	20 x 20	
1	100	100	100	100
10	90	82	36	1,0
40	67	42	3,5	0,06
60	56	26	1,6	0,03
100	39	13,5	0,4	—
150	27	6,0	—	—

Gornja tabela se odnosi uglavnom na prospekciju iz vazduha i ukazuje na optimalne visine letenja, o čemu će biti reči u sledećem odeljku.

Uticaj reljefa na nazemna merenja

Uticaj reljefa pri nazemnim merenjima ogleda se, na osnovu instrukcija koje daje firma Scintrex (Technical report No. 17, June 1977) za merenje gama spektrometrom GR 410, sa kristalom veličine 3'' × 3'', pri odstojanju detektora 0,3 m od tla, na nekoliko osnovnih oblika reljefa, pri čemu se odgovarajuće konstante koriguju množenjem odgovarajućim faktorima.

(1) Ravna površina, prečnika 3 m ili više, geometrija 2π steradijana, korekcija se ne vrši.

(2) Vrh brda — ispupčenje, prečnika pri vrhu 1 m, geometrija 2/3 (2π) steradijana, konstante se množe sa faktorom 1,5.

(3) Dolina — udubljenje prečnika 15 m ili manje, geometrija 4/3 (2π) steradijana, konstante se množe sa 0,75.

(4) Strmi otsek visine 2 m ili više, geometrija 3/2 (2π) steradijana, množenje sa 0,666.

Ove korekcije važe isto tako za sva merenja radioaktivosti pod navedenim uslovima geometrije reljefa. U rupi ili u rudarskoj jami, gde je geometrija 4π steradijana, vrši se množenje sa 0,5.

Regionalna gama radiometrijska prospekcija

Regionalna gama radiometrijska ispitivanja imaju po pravilu širi značaj nego što je otkrivanje orudnjenja urana ili drugih radioaktivnih elemenata, pošto daju uvid u generalnu distribuciju prirodne radioaktivnosti na velikim površinama, koje u pojedinim zemljama obuhvataju čak celu državnu teritoriju. Izbor načina izvođenja ovih ispitivanja i gustine opažanja zavisi od mnogih činioca, kao što su geološki, topografski, geomorfološki, geopolitički, demografski, klimatološki i dr. Najoptimalniji vid regionalnih ispitivanja ove vrste je prospekcija iz vazduha, korišćenjem pogodnih vaz-

duhoplova, helikoptera ili aviona. U mnogim zemljama, naročito ranijih godina, korišćena su vozila za tzv. autoprospekciju, pri povoljnim morfološkim i komunikacijskim uslovima. U Francuskoj je na pr. prvo započeta helikopterska prospekcija, pa je napuštena zbog opasnih zapreka (šumske žičare, dalekovodi i sl.), a najvećim delom je izvođena pešačka, delom i autoprospekcija, ustvari improvizovana sa portabilnim scintilometrom (otkriće orudnjenja urana kod Lodeva). Nekad se, kada je reč o prospekciji iz vazduha, istovremeno vrše više vidova ispitivanja, kao radiometrijska, geomagnetska (totalni intenzitet polja), pa i elektromagnetska ispitivanja.

Gustina opažanja je praktično ista kao i za sve druge mineralne sirovine, ali se razlikuje u zavisnosti od vrste prospekcije i postavljenih zahteva. Opažanja se uvek vrše kontinualno duž maršruta čije rastojanje može jako da varira, u zavisnosti od namene, od 0,15—8 km. Mreža je pravilna (paralelne, po pravilu pravolinijske maršrute) jedino kod aeroprospekcije, dok je pešačka prospekcija obično prilagođena reljefu, sa maršrutama duž grebena i potoka.

Vrlo često, regionalnom gama radiometrijskom prospekcijom se pokrivaju samo tzv. perspektivni tereni, a selekcija se vrši prema opšte usvojenim kriterijumima, koji se odnose na određene geotektonske ili stenske jedinice (formacije). Povoljne sredine za deponovanje urana su po pravilu klastični sedimenti kontinentalnog porekla (peščari i konglomerati), zatim kiseli i internedijarni, prvenstveno alkalni intruzivi i vulkaniti, a isto tako i sve stenske jedinice gde se mogu očekivati crni škriljci i fosfati. U regionalno-geološkom pogledu najpovoljnije su prekambrijske formacije, uzevši u obzir gornje litološke kriterijume, gde se uključuje i odgovarajući geotektonski kriterijum, kao što je poznati diskontinuitet (diskordancija) u vreme pre oko 1,5 milijardi godina, zatim prstenaste strukture u Kanadi, arhajski konglomerati i dr. U Evropi su na pr. perspektivni hercinski granitoidi i permski pešari i sl. Ovo su samo najglavniji kriterijumi za velika svetska ležišta, što ne isključuje mnoge dodatne kriterijume za ležišta urana skromnijih dimenzija.

Prospekcija iz vazduha

Prospekcija iz vazduha je, počev od pedesetih godina, daleko najrašireniji vid regionalne gama radiometrijske prospekcije. Nesumnjiva prednost ovog vida prospekcije je brzina rada i sveobuhvatnost prostora, izuzev ekstremno razuđenih planinskih regiona. Mišljenja su podeljena u odnosu na nedostatke, prvenstveno kada je reč o optimalnoj visini leta, maksimalnoj dozvoljenoj brzini vazduhoplova i sl., što je opet uslovljeno osetljivošću detektora (veličina detekcionog kristala na pr.), inertnošću zapisa itd. Nema sumnje da je korišćenje helikoptera koji leti na visini obično do 50 m, brzinom oko 100 km/h, sa neuporedivo većim manevarskim mogućnostima prilagođavanja reljefu, povoljnije od aviona, koji obično leti na visinama preko 100 m, brzinom najmanje 150 km. Izbor vazduhoplova zavisi od mnogo faktora, s obzirom da i u okviru regionalne prospekcije postoje velike varijacije u stepenu detaljnosti. Kod istraživanja manjih kompleksa perspektivnih površina, gde se mogu očekivati ležišta urana, svakako je najpovoljnije korišćenje helikoptera, ali i tu postoje ograničenja, naročito u urbanim ili industrijskim sredinama (visoke građe-

vine, dalekovodi), kao i u uslovima eksploatacije šuma (žičare i dr.). U Kanadi je početkom sedamdesetih inaugurisan desetogodišnji program prospekcije urana na kanadskom štitu, po maršrutama na 5 km, pri visini leta od 120 m, upotrebom kristala zapremine 50 litara [6]. U SAD su vršeni eksperimenti sa upotrebom filtera koji tokom leta hvataju ^{214}Bi iz vazduha i odmah ga analiziraju, uz upotrebu baterije kristala ukupne zapremine preko 54 l [8].

Treba najzad reći da su ove dileme za većinu zemalja, koje drže do istraživanja urana, uglavnom završene. Ovde ipak postoji izvesna prelomna tačka između prospekcije izvršene merenjem celokupne gama radioaktivnosti i ponavljanja, na istoj površini, prospekcije spektrometrijskom tehnikom, odnosno celishodnosti uvećanja inače ne malih troškova, s obzirom na verovatnoću otkrivanja novih pojava i ležišta urana.

Ovde će biti dat kratak pregled postupka i primene aerogama radiometrijske prospekcije, koja inače zahteva mnogo više prostora, s obzirom da se radi o visoko specijalizovanoj tehnici, što je izvan domena ove knjige.

Aerogama radiometrija uključivši i gama spektrometriju, bazira na istim principima prikazanim u odeljcima III.2.1.1. — 2.1.2, kao i u DODATKU 2 — opis uređaja GR-410, što će biti ukratko ponovljeno.

Aerogama radiometrija (spektrometrija) bazira na merenju gama zračenja viših energija, obično iznad 0,1 MeV (na engleskom gross-counting, za razliku od tottal-counting ili ukupnog zračenja). Ovo zračenje se najvećim delom sastoji od zračenja tla (95%), koje je i glavni cilj merenja, a ostalo se odnosi na kosmičko zračenje, zatim zračenje detektora i najzad zračenja čvrstih produkata raspada radona u vazduhu, ponekad veoma promenljivog intenziteta. Zračenje tla dolazi do detektora oslabljeno zbog apsorpcije u vazduhu, što zavisi samo od visine, ako se zanemari promena gustine vazduha na malim visinama. Glavni faktor osetljivosti uređaja, pored visine leta, je zapremina detektorskog scintilatora (obično kristala NaI), koja u avionskim uređajima dostiže 50 i više litara. Sledeća osobina uređaja treba da bude što manja inercija zapisa, važna kod većih brzina leta. Opseg prozora je isti kao što je navedeno kod opisa rada sa uređajem GR-410 (DODATAK 2). Za definitivnu obradu podataka potrebno je određivanje fonskog zračenja, što je isto tako prikazano uz opis rada uređaja GR-410.

Poseban momenat za primenu uređaja za gama spektrometriju, uključivši i aerogama spektrometriju, koji u suštini nije bitan za izvođenje ovog vida prospekcije, zbog velike neodređenosti interpretacije podataka, jeste kalibracija uređaja u smislu pretvaranja impulsa/sekunda u sadržaje (%, ppm ili g/t). Za kalibraciju aero uređaja potrebni su posebni etaloni u vidu ravnih betonskih ploča sa tačno određenim sadržajima sva tri radioelementa, koji su obično sačinjeni od prirodnih materijala (za kalijum — kalijski feldpat, za uran — uranova ruda u ravnoteži i za torijum — monacitski pesak). Dimenzije ovih, po pravilu kvadratnih ploča su 5—10 m, debljine (zasićenja) 0,5 m, a poseduje ih relativno mali broj zemalja [21]. Ovde se određuju i neophodne korekcione konstante, kao »stripping« (preklapanje gama spektara različitih izotopa) i osetljivost detektora.

Pre razmatranja i interpretacije zapisa, treba naglasiti važnost precizne navigacije, naročito u uslovima veće brzine leta i teže prepoznatljivih geografsko-topografskih elemenata.

Zapis radioaktivnosti sva četiri kanala, koji se vrši kontinualno na specijalnoj traci, i to za ukupno zračenje, kalijum, uran i torijum, podvrgava se korekcijama, koje se sastoje od oduzimanja fonskog zračenja, svođenja na istu visinu leta (na osnovu preciznih altimetara), anuliranje inercije zapisa, ujednačavanje zapisa (čišćenje od slučajnih fluktuacija) i sl. Ovako obrađen zapis, što je efikasno moguće izvesti jedino kompjuterskom obradom, nanosi se na kartu odgovarajuće razmere (obično 1:50.000 — 1:100.000, u zavisnosti od gustine maršruta), na osnovu čega se iscrtavaju konturne linije. Na taj način je dobijen osnovni dokumenat u vidu olea za sva četiri kanala, koji je spreman za interpretaciju i proveru, kako je prikazano u sledećem odeljku.

Ovde treba još napomenuti da se od 1980. godine u Jugoslaviji vrši rutinska aerogama spektrometrijska prospekcija [20], sa uređajem firme Geometrics GR-800D i detektorom koji se sastoji od baterije sa 14 kristala dimenzije $10 \times 10 \times 14$ cm, ukupne zapremine oko 51 litar.

Ocena i provera anomalija gama radioaktivnosti

Ocena i provera anomalija radioaktivnosti uopšte, a posebno gama radioaktivnosti, predstavlja centralni i ključni akt u istraživanju ne samo urana kao sirovine, već i svih radioaktivnih elemenata odnosno izotopa kao raznih geoloških pokazatelja. Pošto se najveći obim prospekcije radioaktivnih materijala obavlja gama metodom iz vazduha, ovo poglavlje će uglavnom biti orijentisano u tom smislu, mada su principi ocene i provere isti za sve vidove gama radiometrijske pa i druge prospekcije.

Ocena i provera su u stvari nerazdvojni deo jednog istog postupka valorizacije mernih podataka registrovanih detektorima gama zračenja u tlu, s tim što se ocena obavlja u kabinetu, a provera na terenu.

a) Ocena anomalija gama radioaktivnosti

Osnovno pitanje ocene predstavlja pojam anomalije gama zračenja u prirodnoj sredini. Gama fluks zavisi od mnogo faktora, kao što su koncentracija radionuklida, udaljenost detektora od izvora zračenja, distribucija i energije gama zračenja glavnih gama emitera, reljef, stepen pokrivenosti (humus, vodene površine) itd.

Pod anomalijom gama zračenja podrazumeva se odstupanje, najčešće pozitivno, od nekog srednjeg odnosno fonskog nivoa. Zato je pojam anomalije uopšte dovoljno rastegljiv, isto kao i pojam fona, koji je ustvari odraz zračenja jednog površinskog sloja stene, debljine obično par desetaka centimetara, pri čemu je sa same površine zračenje najintenzivnije (apsorpcija vazduha uzima se kao konstanta). Pošto su koncentracije i vrste radionuklida (samim tim i energije zračenja) varijabilne, bez nekih zakonitosti, to je i pristup oceni uglavnom empirijski, uprkos primeni raznih matematičkih, uglavnom statističkih metoda.

Elementarni grafički izraz anomalije, koja je registrovana na pr. kao zapis mernog uređaja, jeste tzv. pik određene amplitude, koji se uzdiže iznad srednjeg ili fonskog nivoa. Određivanje fona vrši se obično za jednu litološki manje-više homogenu sredinu i tim je više otežano što je sredina heterogenija. Kao fon uzima se obično aritmetička ili medijanska sredina

svih impulsa na određenoj (izabranoj) površini. Jedna od metoda kategorizacije visine (amplitude) pika odnosno anomalije (što se na planu odražava kao konturna linija) jeste standardna devijacija (δ — srednje kvadratno odstupanje). Tako se na pr. dodavanjem srednjoj ili fonskoj vrednosti, 1δ, 2δ ili 3δ dobijaju tri konturne linije, od kojih je prva »prag anomalnosti«, druga »anomalija« i treća »sigurna anomalija«. Ova i druge metodologije su predmet razmatranja mnogobrojnih radova bilo o primeni matematičkih metoda u geologiji ili o geohemijskim ili geofizičkim ispitivanjima, pa ovde neće biti ponovo komentarisane.

Mnogobrojna iskustva, ne samo kod ocene anomalija gama polja, ipak ukazuju da matematički kriterijumi izmiču egzaktnoj proceni, tako da se ne jednom pokazalo da je »sigurna« anomalija bila »lažna« (vidi dalji tekst ovog poglavlja), a da je neka anomalija, koja se jedva »provukla« kao takva, otvorila put ka velikim koncentracijama tražene supstance. Zato se može reći da je povlačenje granice razdvajanja i definicije fona i anomalije prevashodno empirijska kategorija, koja se često puta ceni na osnovu iskustva.

Generalno uzev, može se reći da je malo sveopštih recepata za ocenu anomalija i da sve zavisi od mnogo okolnosti, regionalnih i lokalnih, što čini kriterijume veoma složenim. Ocena pa i provera anomalija gama radioaktivnosti kao i drugih prospekcionih fenomena uopšte, zahteva objedinjavanje najšire game geoloških znanja, pri čemu akcenat može da bude, u zavisnosti od geološkog karaktera sredine, na sedimentološko-biostratigrafskoj ili petrološko-mineraloškoj orijentaciji, uz dovoljno poznavanje geohemijskih i geofizičkih metoda izučavanja. Odlučivanje o većim zahvatima je vezano za materijalne troškove, mada su mogući i »promašaji«, koji su neizostavni pratioci prospekcije uopšte, što se može desiti i najiskusnijim istraživačima.

Ocena anomalija gama radioaktivnosti zavisi od sledećih činioca:

(1) Opšti geološki karakter terena i u vezi sa tim očekivani tipovi uranovih orudnjenja.

(2) Geomorfološki karakter terena, pri čemu se prvenstveno misli na stepen razuđenosti reljefa, zatim na stepen pokrivenosti i karakter pokrivača.

(3) Vid prospekcije i karakter anomalija gama radioaktivnosti.

(1) *Geologija terena i rudna tela*

Veoma je širok izbor kriterijuma koji zavise od geološke građe terena. To se pre svega odnosi na dva osnovna tipa mogućih uranovih orudnjenja: konkordantni ili delimično konkordantni (penekordantni — penekonkordantni), vezan obično za sedimentne tvorevine, kao i diskordantni, žični ili diseminacioni, vezan obično za magmatogene tvorevine. Sledeći kriterijum je stratigrafsko-geotektonski, koji ukazuje na značajne, ponekad i bitne razlike na pr. između prekambrijskih i mlađih tipova orudnjenja. Ovde treba imati u vidu da u jednom jedinstvenom geostrukturnom području ne treba očekivati veliko obilje tipova ekonomski značajnih uranovih orudnjenja. U evropskim uslovima na pr. u potpunosti odsustvuju orudnjenja vezana za prekambrijske komplekse, koja čine oko polovine svetskih rezervi urana.

Kada je reč o sedimentnim tipovima na pr. u Evropi, onda se misli s jedne strane na orudnjenja urana u kontinentalnim permokarbonskim, permskim i permotrijaskim peščarima, najčešće poznatim kao »crveni peščari«. Uranonosni su isto tako manje-više izolovani tercijarni baseni, obično molasnog karaktera, sa terigenim priobalnim sedimentima uz obilje biljnih ostataka donesenih sa kopna. U svim ovim sedimentnim sredinama uran je naknadno (infiltraciono) unošen preko podzemnih tokova voda, iz relativno bogatih izvora u bližoj ili daljoj okolini, kao što su granitoidni masivi ili kristalasti škriljci kiselog karaktera. U Švedskoj su pak poznati staropaleozojski crni škriljci, za koje su vezane ogromne količine urana niskog sadržaja, singenetskog marinskog porekla i postanka, slično fosfatima, kojih praktično nema u Evropi. Ukoliko uranonosni sedimenti nisu intenzivnije poremećeni (urbani), onda su anomalije gama radioaktivnosti po pravilu slabije izražene, niti čak moraju da budu neposredni indikatori orudnjenja. Zato se provera ne ograničava samo na anomalije, već na širi prostor, pri čemu bitan značaj ima dubinsko bušenje, efikasno i ekonomski opravdano (što po pravilu znači najveći broj bušotina bez jezgrovanja). Treba imati u vidu da se ovde radi najčešće o niskosadržajnim malim i srednjim ležištima urana, na granici rentabilnosti u datom ekonomskom trenutku (osamdesete godine). Ovde, naravno, ima izuzetaka kao što je na pr. ležište kod Lodeva (Lodève) u južnoj Francuskoj i još po neko u tercijarnim basenima. Na osnovu izloženoga može se zaključiti da ovakve terene treba proveravati (dubinski) i kada nema zapaženijih anomalija gama radioaktivnosti.

Diskordantna, žična ili žičolika orudnjenja urana u evropskim uslovima su najčešće direktno, ređe indirektno vezana za granitoidne masive, znatno ređe za vulkanite. Anomalije gama radioaktivnosti su obično markantnije i po pravilu direktno ukazuju na orudnjenja urana (izdanke), ali više u uslovima razuđenog reljefa i razbijenog pokrivača. Ovde dolaze do izražaja raznovrsnost anomalija, kao na pr. onih ocenjenih kao »stenske anomalije« o čemu će biti reči u daljem tekstu. Ovde je svakako neophodna selekcija anomalija za proveru, mada je potvrđeno iskustvo da se posle jedne kampanje provere vrši ponovna ocena s tim što se neke ranije odbačene anomalije predviđaju za proveru.

Kada je reč o geotektonsko-stratigrafskom karakteru terena, treba imati u vidu da je u mlađim ubranim regionima (Alpidi, Kordiljeri) perspektiva nalaženja većih i bogatijih ležišta urana manja od na pr. hercinskih granitoida i pojaseva zapadne i SZ Evrope. Zbog toga su u ovim prvim potrebni blaži kriterijumi selekcije i rigoroznija provera, naravno uz veće rizike, što se ekonomski nepovoljno odražava.

(2) *Reljef i stepen pokrivenosti*

Ova dva fenomena su obično međuzavisna, tako da je kod ravnih terena stepen pokrivenosti daleko veći, pa je ovde gama prospekcija po pravilu daleko manje efikasna (mada ne i sasvim neprimenljiva), nasuprot razuđenom reljefu, gde je pokrivač nehomogen i razbijen, zapravo prosečen duž vodenih tokova, a anomalije su neposredniji pokazatelj orudnjenja. Kod ravnih i pokrivenih terena sa malo izdanaka, bez obzira na geološki karakter sredine, svaka pa i najslabija anomalija dolazi u obzir za proveru. Ovde

se, međutim, više mora voditi računa o geološki potencijalnoj uranonosnosti.

(3) *Karakter anomalija gama radioaktivnosti*

Kod ocene anomalija gama radioaktivnosti treba imati u vidu pre svega način na koji je izvedena prospekcija, pri čemu se s jedne strane ima u vidu da li se radi o opažanjima iz vazduha, iz kola ili pešački, a s druge strane o primeni jednokanalnih ili višekanalnih uređaja (gama spektrometrija). Prospekcija iz vazduha daje regularnu i ravnomernu sliku gama fluksa i zahvalna je za upoređivanje sa geološkom kartom, što olakšava selekciju. Iskusna posada, naročito ako u njoj učestvuje geolog, sa dobrom geološkom kartom, može još u toku leta da vrši ocenu anomalija. Ovakav način rada primenjivan je šezdesetih godina u aerogama radiometrijskoj prospekciji Jugoslavije (merenje celokupnog zračenja iz helikoptera) i dao je dobre rezultate. Pešačka prospekcija ima pak prednost što je kontakt sa terenom neposredan, pa se selekcija anomalija može vršiti prethodnom proverom. Upotrebom gama spektrometrije preliminarna ocena anomalija gama zračenja je znatno olakšana, pri čemu naročito dolazi do izražaja raznovrsnost primene.

Za ocenu karaktera anomalija od značaja su geološka karta terena kao i morfologija pikova. Ocena i izbor anomalija za proveru vrši se kombinacijom oba pokazatelja, a počinje analizom konfiguracije pika, pri čemu se misli ne samo na geometriju zapisa (profil maršrute), već i konfiguraciju izolinija na tlocrtu (planu). Postoji jasno pravilo da je oštriji (uži i viši) pik, odnosno polje gusto okontureno izolinijama radioaktivnosti, dobar pokazatelj boniteta anomalije (uza sve napred navedene ograde). Treba ipak naglasiti da je za tačniju ocenu najmerodavniji zapis (sa svim prethodnim korekcijama, u prvom redu visine) odnosno profil na kome se sa mnogo više suptilnosti može oceniti karakter anomalije. Sledeći korak je striktno upoređenje slike izogama sa geološkom, u prvom redu litološkom ili litofacijalnom kartom, što je od posebnog značaja, jer ova zadnja istovremeno ukazuje i na mogući fon gama zračenja. Manje izraženi (kontrastni), široki pikovi, koji se poklapaju sa određenim masama stena sa prevashodno (ili provereno na primercima) višim koncentracijama radioaktivnih elemenata nazivaju se »s t e n s k e a n o m a l i j e«, što se još bolje uočava kod gama spektrometrije. U ovom zadnjem slučaju, kada »stenska anomalija« potiče prvenstveno ili samo od urana, ne bi se smela olako izuzeti od provere. Kontrastnost stenskih anomalija više dolazi kod mešanih magmatsko-sedimentnih kompleksa ili kada se kod magmatskih kompleksa javljaju kisele i bazične stene. Kod sedimentnih stena kontrastnost je manje uočljiva i najveća je kod upoređivanja krečnjaka sa niskim koncentracijama i glinovitih stena sa višim koncentracijama radioaktivnih elemenata.

Poseban fenomen koji donekle može imati veze sa prethodnim, su tzv. »l a ž n e a n o m a l i j e«. Odmah treba reći da stenska anomalija postaje lažna kada se na pr. radi o malom proboju granita ili riolita u dijabaznoj ili serpentinitskoj osnovi. Ovako izraziti kontrasti dolaze do izražaja i u drugim slučajevima, čak i kod primene gama spektrometrije, naročito kada se radi o koncentracijama radijuma bez ili sa malo urana, koje uranov kanal podjednako registruje (^{214}Bi kao potomak ^{226}Ra). Veliki izbor

primera »lažnih anomalija« je područje centralne Sahare u Libiji, gde je vršena provera anomalija aerogama spektrometrijske prospekcije [12]. U ovom inače prostranom i neporemećenom području isključivo sa sedimentnim stenama, postoje dva vida »lažnih anomalija«, kada su u pitanju koncentracije urana. Jedan od ovih su tzv. sepke, gde se slivaju vode od retkih kiša, nanoseći kalijumove soli (koje mogu pak da budu i ekonomski značajne), nekad i sa slabim koncentracijama urana, koje oštro odskaču na fonu slabe radioaktivnosti okolnih sedimenata. Drugi vid potiče od koncentracija akcesornih minerala sa većim sadržajima urana i torijuma, najčešće od cirkona. Ovde se može navesti još jedan način pojavljivanja »lažnih anomalija« vezanih za koncentraciju torijuma uz limonit na starim kopnenim površinama. U Jugoslaviji se mogu isto tako navesti primeri lažnih anomalija, većih ili manjih razmera. Kao prvi primer može se navesti područje radioaktivnog izvora Majur-Slatina (sl. III.10), kao tipična radijumska anomalija. Koncentracija akcesornih minerala u rečnom nanosu uzrok su prostrane anomalije otkrivene auto prospekcijom duž korita Bele reke na severnim padinama Cera; ova tipična »linijska« (maršrutna) anomalija uokvirena je na karti koncentričnim konturnim linijama, pa je ispala kao anomalna površina. Ova lokalnost vidi se na sl. III.13 u SZ delu terena, gde je u koritu Bele reke bez izdanaka izmerena relativno visoka radioaktivnost — 60—100 i/s — nasuprot okolnim pokrivenim površinama sa svega 40 i/s. Travertini Niške banje imaju povećanu radioaktivnost (oko 2 pC/kgs) usled povećanog radijuma. Najtipičniji primer lažne anomalije nastao je rasejavanjem radioaktivnih nuklida, u prvom redu ^{137}Cs, posle Černobiljske havarije. O mogućim radionuklidima koji se mogu naći u prirodi kao izvor lažnih anomalija, bilo je reči u I. Glavi, odeljak 2.3.3. Na kraju treba imati u vidu da se pojam lažne anomalije pretežno odnosi na aerogama radiometriju, dok je gama spektrometrijskom prospekcijom selekcija ipak potpunija.

b) Terenska provera anomalija

Pre pristupa proveri anomalija gama radioaktivnosti može se ukazati potreba za bližom identifikacijom anomalija na terenu, što je slučaj kod prospekcije sa bržim vazduhoplovom (avionom) i sa veće visine, obično usled veće inercije zapisa i nemogućnosti vraćanja i izviđanja anomalnog područja, kao što je to slučaj sa helikopterom. Identifikacija je u svakom slučaju jedan vid prethodne provere i svodi se uglavnom na terensko gama radiometrijsko rekognosciranje.

Terenska provera može se izvoditi obično u cilju neposrednog otkrivanja izvora anomalije i njegovog značaja odnosno planiranja daljih istražnih radova, ukoliko se nađe da izvor anomalije može ukazati na značajnije koncentracije urana. Ima međutim područja gde mnoštvo manjih anomalija čak i posle pozitivne provere ne znače mnogo same za sebe. To su anomalije obično »tačkastog« karaktera, i svode se na sasvim lokalizovane partije obično sekundarnih minerala urana, koje ne ukazuju na bilo kakav neposredan trag (strukturu, sloj ili slično). U tom slučaju treba doneti odluku da se na tom terenu izvrše mnogo obimnija i skupa istraživanja, pošto se najveći obim, po pravilu, odnosi na bušenje (u ovim slučajevima se primenjuje jeftinija verzija bušenja bez jezgrovanja). Iskustvo govori

da obilje anomalija gama radioaktivnosti koje su vezane za pojave urana, ukazuje na mogućnost otkrivanja ekonomskih koncentracija urana. Ova situacija se odnosi uglavnom na područja sa sedimentnim stenama i mogućim odgovarajućim (infiltracionim) orudnjenjima urana. Odluka o daljim istraživanjima donosi se u ovim slučajevima isključivo na osnovu dobrog poznavanja geološke građe terena.

Rutinska terenska provera određenih pojedinih ili grupnih anomalija vrši se istom metodologijom predviđenom u okviru poludetaljnih i detaljnih istraživanja, opisanih dalje u ovom odeljku. Ovde treba nešto podrobnije ukazati na značaj izbora površine za terensku proveru, što isto tako ne zavisi od rasporeda anomalija, već i od pretpostavke o geološkoj sredini kao nosiocu ekonomskih koncentracija urana. Izbor takođe zavisi i od karaktera anomalija, tako na pr. ako se radi o relativno rasplinutim, manje izrazitim anomalijama, kakve se obično dobijaju letovima na većoj visini i većim brzinama, obuhvata se šire područje za proveru (primer — anomalija Stolovac, sl. III.11).

Regionalna pešačka i autogama prospekcija

Pešačka (regionalna) prospekcija primenjuje se u izuzetnim slučajevima, kada izvođenje prospekcije iz vazduha nije uputno, bilo da se radi o malim površinama odnosno visokim troškovima ili postoje zapreke u urbanim sredinama, ali isto tako kada se radi o pokrivenim terenima, gde su anomalna povećanja radioaktivnosti na granici detektabilnosti.

Kao primer može se navesti regionalna pešačka prospekcija, koja je još krajem pedesetih godina izvođena u Francuskoj. Radi se ustvari o dva vida prospekcije, jedna preliminarna, na sasvim nepoznatim terenima, i druga, detaljnija, na perspektivnim područjima.

Prvi vid prospekcije izvođen je duž nepravilnih maršruta, prilagođenih terenu, sa srednjim odstojanjem oko 500 m. Merenja radioaktivnosti su vršena scintilacionim brojačima (111B, američke proizvodnje), a za proveru anomalija korišćen je GM brojač GMT-14, domaće proizvodnje. Kao osnova za zapisivanje opažanja korišćene su topografske karte 1:80.000, uvećane do razmere 1:50.000, a nanošena su samo anomalna povećanja radioaktivnosti uz postojeću geološku osnovu.

U domenu Centralnog granitoidnog masiva, gde su već postojali rudnici urana, izvođen je detaljniji vid prospekcije. Kao osnova korišćene su fotoskice razmere oko 1:10.000. Na ovim terenima blago zatalasanog reljefa maršrute su bile pravolinijske, u domenu sektora 10—20 km², međuodstojanja 200 m. Kao detektori korišćeni su uglavnom GM brojači (AVP-400 i GMT-14). Merenja su vršena postavljanjem detektora na tlo svakih 5 m a zapisivana je srednja vrednost na svakih 100 m kao i svako povećanje radioaktivnosti. Ekipu su sačinjavala dva člana, jedan je obavljao merenje, a drugi je vršio geološka opažanja, koja su isto tako nanošena na kartu. Na mestu povećanja radioaktivnosti, gde je uža okolina detaljnije premeravana, vršeno je otkopavanje malom kombinovanom lopatom-motikom, čime je praktično istovremeno obavljana i provera anomalija.

Na sličan način vrši se geološko-radiometrijsko rekognosciranje i kartiranje, koje izvodi Geoinstitut u Beogradu, s tim što se za opažanje gama radioaktivnosti koriste savremeni scintilacioni brojači, a kao osnova

služi originalna topografska karta razmere 1:10.000, o čemu će biti više reči u odeljku o poludetaljnoj i detaljnoj gama radiometrijskoj prospekciji. Primer otkrivanja jednog ležišta urana pešačkom prospekcijom u Sloveniji (Žirovski vrh) prikazan je u sledećem tekstu (2).

Autogama prospekcija bi bila neka kombinacija vazdušne i pešačke prospekcije, s tim što se analogija sa prvom odnosi samo na korišćenje sličnih detekcionih uređaja. Ovaj vid prospekcije se navodi više kao istorijska karika u prospekcionoj tehnici istraživanja urana, nego kao mogućnost današnje primene, prevaziđene drugim uslovima i tehnikom.

Prospekcioni uređaj, ugrađen u vozilo, sličan je onom za prospekciju iz vazduha, s tim što nema potrebe za tako velikim kristalima. To su praktično nazemna opažanja, pod povoljnim uslovima, sa detektorom postavljenim na visini oko 2 m od tla, sa konstantnim zapisom nivoa radioaktivnosti. Brzina kretanja vozila je oko 10—15 km/h, obeležavanje položaja vozila vrši se na 0,5—1 km (u zavisnosti od reljefa i stepena prepoznatljivosti) istim znacima na topografskoj karti i lenti, na bazi prepoznatljivih orijentira (raskrsnice, oštre krivine puta, mostovi i sl.). Selekcija i provera anomalija se vrši istovremeno, bilo ponavljanjem auto-maršruta ili pešačkim detaljisanjem portabilnim uređajem, što je znatna prednost u odnosu na aeroprospekciju. Dalja provera se vrši na već iznesen način.

Autoprospekcija može dosta efikasno da se vrši na improvizovan način standardnim terenskim scintilometrima (GR-110, SPP 2 NF i dr.) na što ukazuju i sami proizvođači ovih uređaja. Potrebna je samo spora vožnja, kao i kod standardne autoprospekcije, a detektor treba da je izvan vozila da bi se izbegla apsorpcija lima vozila. Isto tako treba podesiti i zvučni signal na svaki lokalni fon. Na ovaj način otkriveno je poznato ležište urana Lodev u permskim peščarima južne Francuske.

Primeri provera i otkrića nekih ležišta i pojava urana

U ovom pregledu prikazani su pojedini karakteristični primeri otkrića ležišta urana i rezultati provera pojedinih anomalija gama radioaktivnosti. To su ležišta Jabiluka (Australija), Žirovski Vrh (Slovenija), Zletovska Reka (Makedonija), zatim anomalije Majur-Slatina kod planine Cer u zapadnoj Srbiji i u istočnoj Srbiji.

1) Ležište Džabiluka (Jabiluka) u Australiji

Otkriće ovog ležišta [30], čije su rezerve činile oko 15% rezervi urana u svetu (170.000 t U_3O_8), sa srednjim sadržajem 0,25%, predstavlja vrlo poučan primer primene raznovrsne metodologije i mogućih zamki i zabluda u primeni isključivo radiometrijskih metoda prospekcije.

U severnom delu Australije (Northern Territory), južno od grada Darvina (Darwin) još 1949. godine otkriveno je ležište urana Ram Džangl (Rum Jungle). Tokom 1969. godine započeta je prospekcija prostranog perspektivnog područja JI od Darvina zvanog Reka Aligator (Alligator River Region), koje zahvata površinu od oko 20.000 km². Avionskom gama-radiomet-

rijskom prospekcijom (brzina leta 280 km/h, veličina kristala NaI 12—13 litara) otkrivena su prvo (1969) ležišta Rendžer (Ranger, rezerve 100.000 t U_3O_8) i Kungara (Koongarra, 21.000 t U_3O_8), zatim (1970) ležište Nabarlek (10.000 t U_3O_8). Ležište Džabiluka, koje se nalazi u sredini pomenute grupe ležišta, nije tada odkriveno. Ova ležišta nalaze se u domenu kontakta (diskordantog) donje-proterozojskih škriljaca, kvarcita, karbonata i dr. u podini (formacija Kulpin — Koolpin) i naležućih srednje-proterozojskih peščara i konglomerata formacije Kamboldži (Kambolgie). Sledeće godine (1971) uže područje Džabiluka (oko 150 km²) prospektovano je helikopterskom gama-spektrometrijom, sa međuotstojanjem letnih linija 180 m, sa kristalom veličine 5 litara. Tom prilikom otkrivene su neke nove anomalije, ali opet ne u domenu orudnjenja, čak se navodi da su anomalije, nađene prospekcijom iz vazduha, navodile na krive tragove.

Pošto je ovde postojala povoljna geološka situacija (izdanci formacije Kulpin) prospekcija je nastavljena, ovoga puta redom mrežom pešačke gama spektrometrije, koju je izvodio tim od jednog geologa sa jednim ili više tehničara. Tom prilikom je otkrivena jedna nova anomalija, svega dva puta veća od fona, a pogušćavanjem maršruta na 30 m, otkrivena je anomalija vrednosti 8 × fon, a na jednom mravinjaku i 50 × fon. Ovo je bio, kako se pokazalo, trag jednog malog ogranka ležišta, zvanog Džabiluka 1, dok se glavno ležište — Džabiluka 2 (blago nagnuta stratiformna sočiva) nalazilo oko 1 km dalje, ispod pokrivača peščara i škriljaca, debelog oko 50 m, bez ikakvog traga na površini.

Istraživanja su nastavljena bušenjem svrdlom kod nanosa (uglavnom laterita) debljine preko 3 m (ove bušotine išle su negde čak do 20 m) ili raskopavanjem kod tanjeg nanosa. Za traganje ispod pokrivača peščara i konglomerata primenjeno je plitko perkusivno bušenje u kombinaciji sa rotacionim bušenjem sa jezgrovanjem (jedna od ovih bušotina, u kojoj je analizirano jezgro, služila je za kalibraciju karotažne sonde odnosno za utvrđivanje faktora korelacije sadržaja urana i gama karotaža). Sa ovim bušenjem pošlo se od merže 60 × 60 m, koja je zatim pogušćavana, čime je glavnina ležišta okonturena, sa izračunatim rezervama (ruda je bila u ravnotežnom stanju).

Ova lokalnost je bila poligon za primenu mnogih drugih vidova istraživanja, kao što su alfametrija (plastični filmovi), emanometrija, geohemija tla (Mo, Cu, U), merenje žive, aeromagnetometrija, nazemna magnetometrija, geobotanika (geohemija) i dr. Opšta je konstatacija da su ipak najefikasniji bili gama radiometrija u kombinaciji sa bušenjem svrdlom, ali isključivo uz primenu geoloških kriterijuma.

Treba najzad dodati da su na ovom ležištu utvrđene ekonomski značajne koncentracije samorodnog zlata, oko 15 g/t, u paragenezi sa teluridima nikla, kobalta i olova.

2) Ležište Žirovski vrh u Sloveniji

Prospekcija urana u domenu permskih peščara zapadno od Ljubljane bila je podstaknuta otkrićem uranove mineralizacije krajem pedesetih godina u Gredenskim peščarima (Arenaria di Val Gardena) u Italiji, kojima pripadaju i ovi u Sloveniji. Na ovim sedimentima, koji dotada nisu bili is-

traživani, primenjena je pešačka gama radiometrijska prospekcija, pošto se radilo o relativno malim izolovanim površinama, gde nije bilo celishodno vršiti aeroprospekciju. Prospekcija je započeta 1960.* godine na najvećoj masi (oko 60 km^2) kod mesta Žiri, koju napola preseca reka Sora, na zapadnoj polovini, sa relativno gustom mrežom opažanja, 50—100 m odstojanja. Pošto na toj polovini nije nađena ni jedna značajnija anomalija vredna pažnje, mreža opažanja je na istočnoj polovini znatno razređena, tako da su to bile zapravo maršrute duž grebena i potoka, na približnom odstojanju od oko 250—350 m. Teren je ovde jako pokriven humusom debelim najmanje 1 m sa visokom četinarskom šumom. Opažanja su vršena scintilacionim brojačima ukupnog zračenja (tipa 111-C, USA), bez zvučnog alarma. Na retkim prohodnim putevima vršena je improvizovana prospekcija iz kola u sporoj vožnji, sa isturenim brojačem istog tipa, kako je navedeno u prethodnom tekstu o auto-gama prospekciji.

Čim se prešlo na teren ležišta urana, samo u toku jednog dana, čak i sa tako proređenim maršrutama (što je ipak bio nepotreban rizik) otkrivene su dve anomalije. Jedna — ustvari dve jako lokalizovane anomalije na odstojanju od 10 m — nalazila se u humusu, sa intenzitetom radioaktivnosti 6—10 puta većim od fona, dok je druga bila ustvari blok na padini, radioaktivnosti 4—5 × fon, sa sitnim vidljivim sekundarnim mineralima urana. Kopanjem čekićem na prvoj anomaliji, do tridesetak santimetara, radioaktivnost se popela do 30 × fon, još uvek u humusu, bez vidljivog orudnjenja urana, koje se pojavilo tek raskopavanjem na dubini od preko pola metra. Značajno je da su obe anomalije bile na odstojanju većem od 1 km. Ovaj teren je zatim pokriven detaljnijom mrežom gama radiometrijskih merenja, kojim su otkriveni i izdanci orudnjenja urana sa sekundarnim mineralima (autunit, torbernit, renardit i dr.), na ovom inače srednje brdovitom terenu. Raskopavanja ovde nisu bila mnogo uspešna zbog velike debljine humusnog pokrivača, pa se gotovo neposredno prešlo na rotaciono bušenje, a zatim i na podzemne istražne rudarske radove.

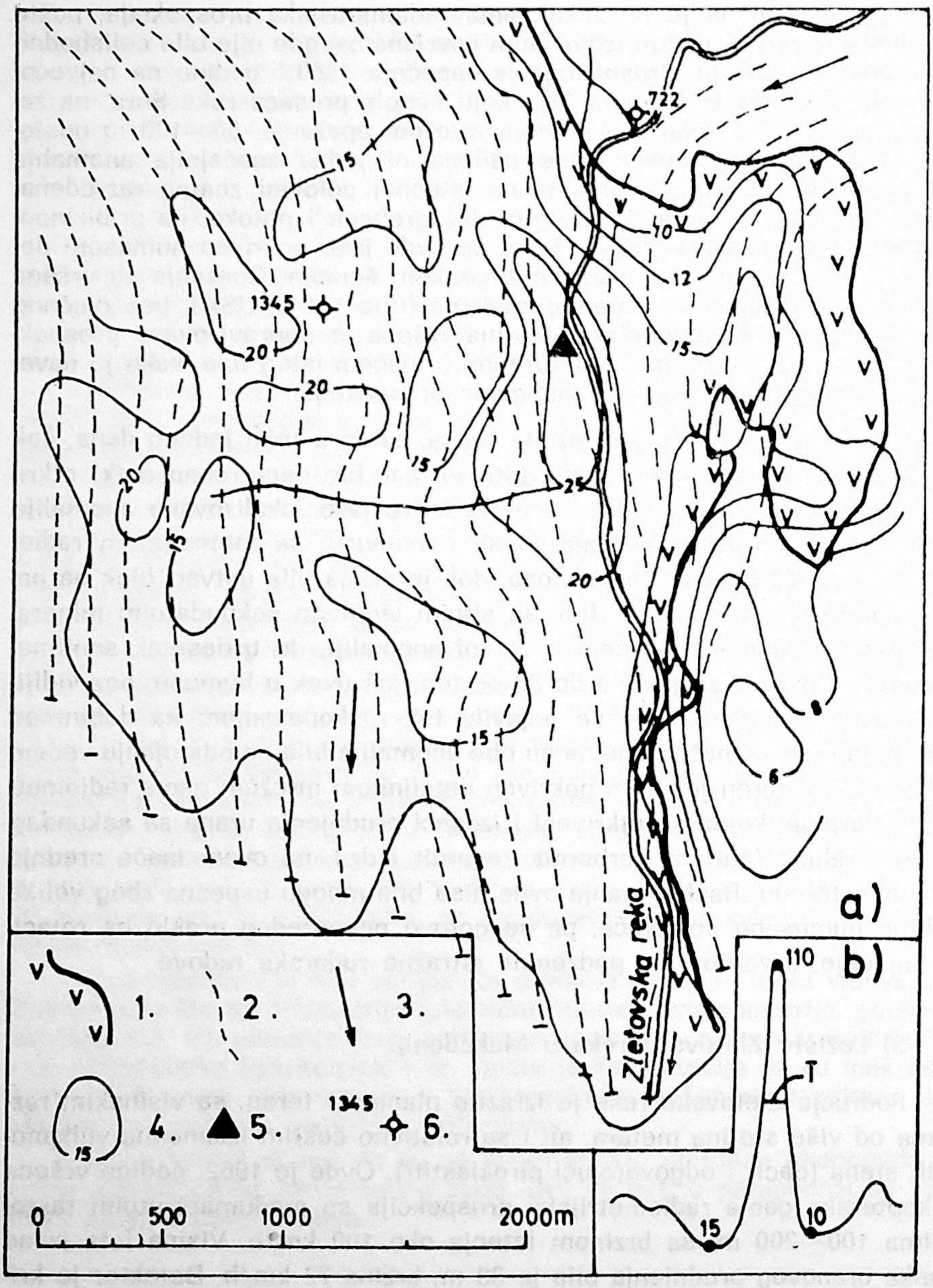
3) Ležište Zletovska reka u Makedoniji

Područje Zletovske reke je izrazito planinski teren, sa visinskim razlikama od više stotina metara, ali i sa relativno čestim izdancima vulkanogenih stena (dacit i odgovarajući piroklastiti). Ovde je 1962. godine vršena helikopterska gama radiometrijska prospekcija sa međumaršrutnim rastojanjima 100—200 m, sa brzinom letenja oko 100 km/h. Visina leta iznad izdanka uranovog orudnjenja bila je 33 m, brzina 72 km/h. Detektor je kristal NaI(Tl) zapremine 2 l.

Registrovan je oštar pik intenziteta 8 pC/kgs (110 μR/h) uz lokalni fon od 0,7—1 pC/kgs (10—15 μR/h), kao što se vidi na sl. III.9.

---

* Geoinstitut, Beograd, »Radovi«, sv. 19.

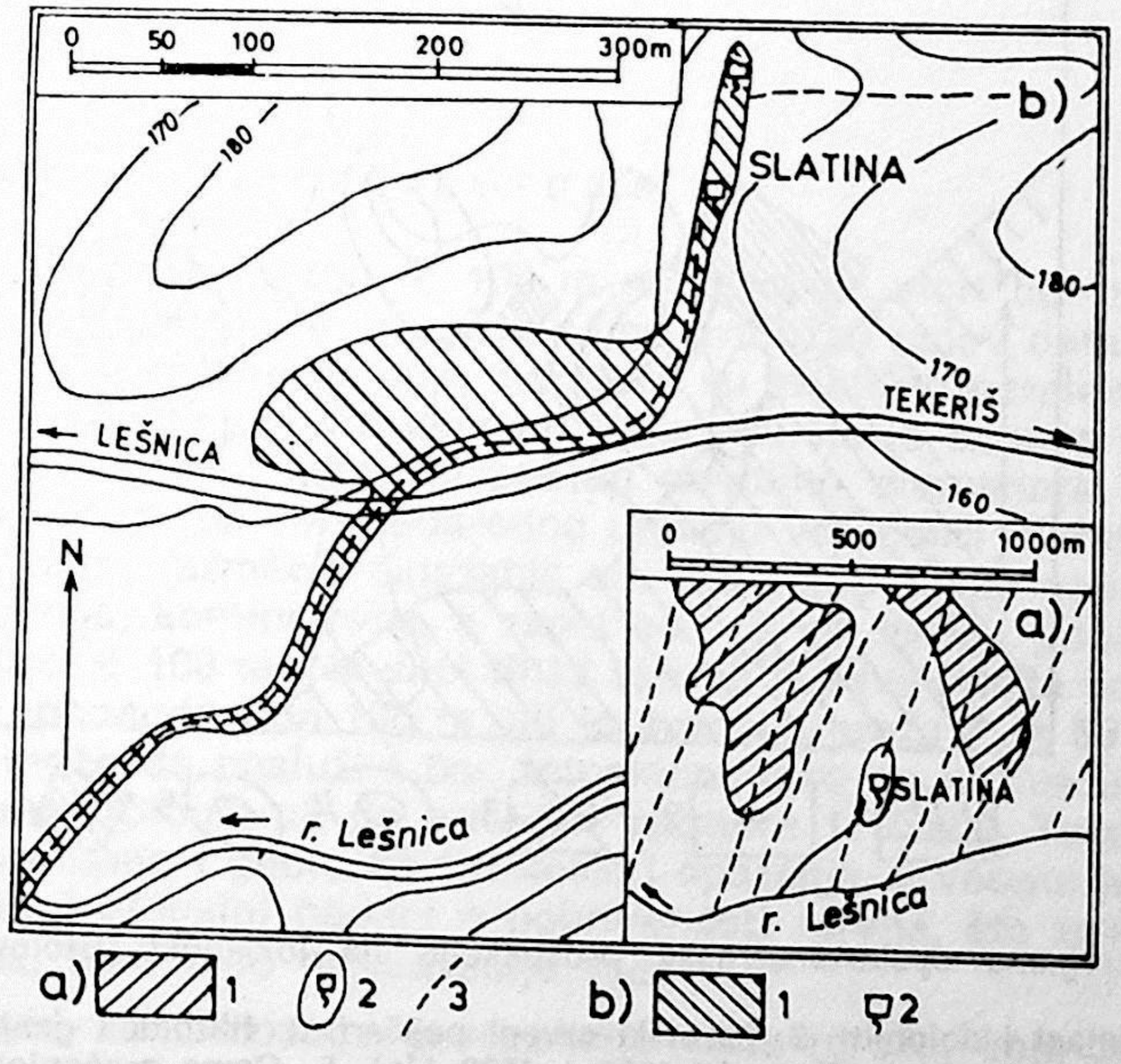


Sl. III.9.
Aerogama radiometrijska anomalija Zletovska reka.
a) Detalj prospektovane površine. 1. Granica vulkanita prema kristalastim škriljcima, 2. letne linije, 3. pravac leta, 4. izorade u μR/h (1μR/h = 0,072 pC/kgs), 5. lokacija U — orudnjenja, 6. kota.
b) Pik gama radioaktivnosti iznad izdanka U-orudnjenja. Brojevi označavaju radioaktivnost u μR/h, T = 3,5 s ili 70 pređenih metara (M. Petrović).

Provera same lokalnosti vršena je detaljnim merenjem gama radioaktivnosti (ukupne), emanacije i sadržaja urana u tlu (metalometrija), na površini od oko 3 ha, po mreži oko 20 × 20 m. Sve anomalne konture ovih ispitivanja su se poklapale, tako da je izdanak okonturen maksimalnom izoradom 36 pC/kgs (500 μR/h), sa najvećim pikom 180 pC/kgs (2500 μR/h), izoemanom 370 Bq/l i konturom sadržaja urana 100 ppm (maksimalno 5000 ppm). Istovremeno je vršeno raskopavanje, a vrlo brzo pristupilo se izradi potkopa i dubinskom bušenju.

4) Radioaktivni izvor Majur-Slatina u Srbiji

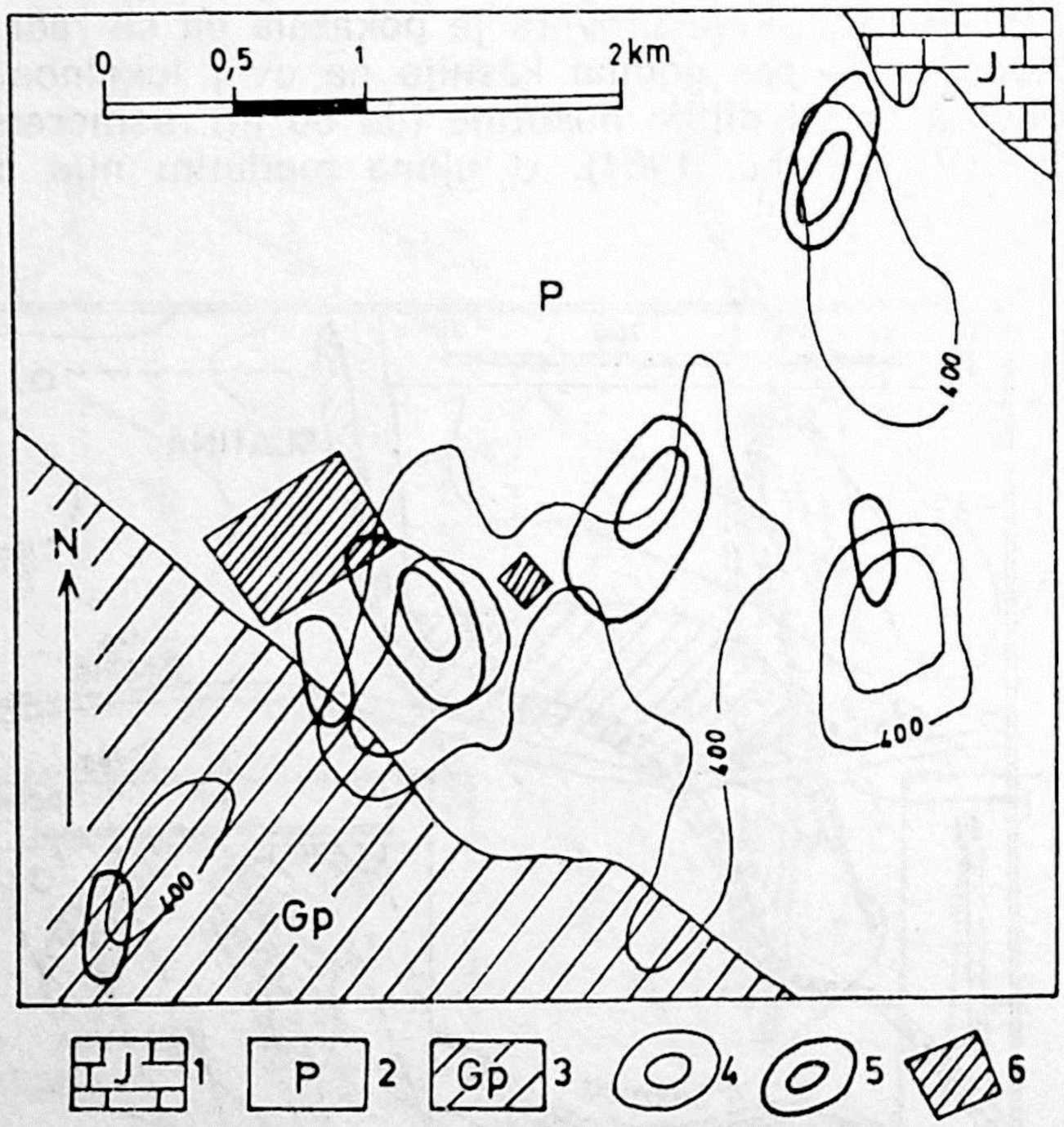
Ovaj izvor, koji se nalazi na južnom obodu planine Cer u SZ Srbiji, kod sela Kamenica, otkriven je prilikom prve rutinske aerogama prospekcije u Jugoslaviji, tokom 1959. godine (M. Petrović). To je bila jedna izrazita anomalija gama radioaktivnosti, koja se jasno isticala u vidu oštrog pika (sl. III.10a). Prva provera je pokazala da se radi o radonskom izvoru — kladencu, a par godina kasnije na ovoj lokalnosti je izvršena detaljnija provera sa tri plitke bušotine (do 50 m), usmerene koso ispod samog izvora (V. Sarić, 1964). U njima međutim nije bilo otkriveno



Sl. III.10.

Radioaktivni izvor Majur-Slatina na južnim padinama planine Cer.
a) Rezultati aerogama prospekcije 1959. g.
1. Polje povećane gama radioaktivnosti (0,85—1,0 pC/kgs), 2. radioaktivni izvor u konturi radioaktivnosti preko 1,4 pC/kgs, 3. letne linije (M. Petrović).
b) Detaljniji primer anomalije.
1. Stvarne konture povećane gama radioaktivnosti u domenu korita i naplavina potoka, 2. izvori (A. Antonović).

bilo kakvo anomalno povećavanje radiokativnosti ili alteracija granitoida kao matične stene. Znatno kasnije, krajem sedamdesetih i početkom osamdesetih, ovde su nastavljena istraživanja, pa je detaljniji premer pokazao da je povećana gama radioaktivnost striktno vezana za područja plavljenja ovom vodom (sl. III.10b). Očigledno da voda nosi samo radijum, sa relativno visokim sadržajem od 0,7 Bq/l (Niška banja oko 0,1 Bq/l), dok je količina radona bila znatno promenljiva, od 800—3600 Bq [28]. Sadržaj urana je bio vrlo nizak, pa je na pr. proba gline, recentno taložene pored kladenca, pokazala sadržaj ekvivalenta radijuma čak 2750 ppm, a urana svega 3 ppm. Ovo je tipičan primer lažne anomalije, koja potiče isključivo od površinski deponovanog radijuma, vezanog za glinovite frakcije u tlu ili sedimentima potoka, pa nije neposredni indikator uranovog orudnjenja. Ovde je kasnije dubokim kosim bušotinama u domenu kontakta granita i sedimenata nabušen dovodni kanal ove vode, o čemu će biti reči u odeljku III.2.2.2.



Sl. III.11.
Anomalije aerogama spektrometrijske prospekcije na lokalnosti Stolovac u istočnoj Srbiji.
1. Jurski krečnjaci i dolomiti, 2. permski crveni peščari, 3. filitoidi i gnajsevi, 4. ukupno gama radioaktivno zračenje (izorade 4000 i 4500 i/s), 5. Gama zračenje urana (izorade 140 i 150 i/s), 6. proverom otkrivena orudnjenja urana.

5) Aerogama spektrometrijska anomalija Stolovac u istočnoj Srbiji

Ova lokalnost, otkrivena 1983. godine, lokalizovana je u formaciji »crvenih permskih peščara« istočno od Paraćina. Ovde se radi o prospek-

ciji iz aviona, sa brzinom leta 180 km/h i visinom leta 100—150 m, po pravolinijskim maršrutama (letnim linijama) konstantnog pravca sever-jug, na pravilnom međuodstojanju od 220 m. Na sl. III.11. prikazani su položaji gama fluksa, ukupnog i uranskog (M. Milojević, I. Kočergin) i lokacije sa povećanim sadržajima urana, naknadno otkrivenim (B. Ilić, 1984). Očigledno je odsustvo preklapanja aerogama anomalija i orudnjenja, što još jednom potvrđuje poznato iskustvo da se prospekcijom iz vazduha, pogotovo sa većih visina, ne mogu dovoljno prepoznatljivo registrovati slabije gama anomalije usko lokalizovanih uranovih orudnjenja, nasuprot većim površinama relativno malih povećanja urana u stenama.

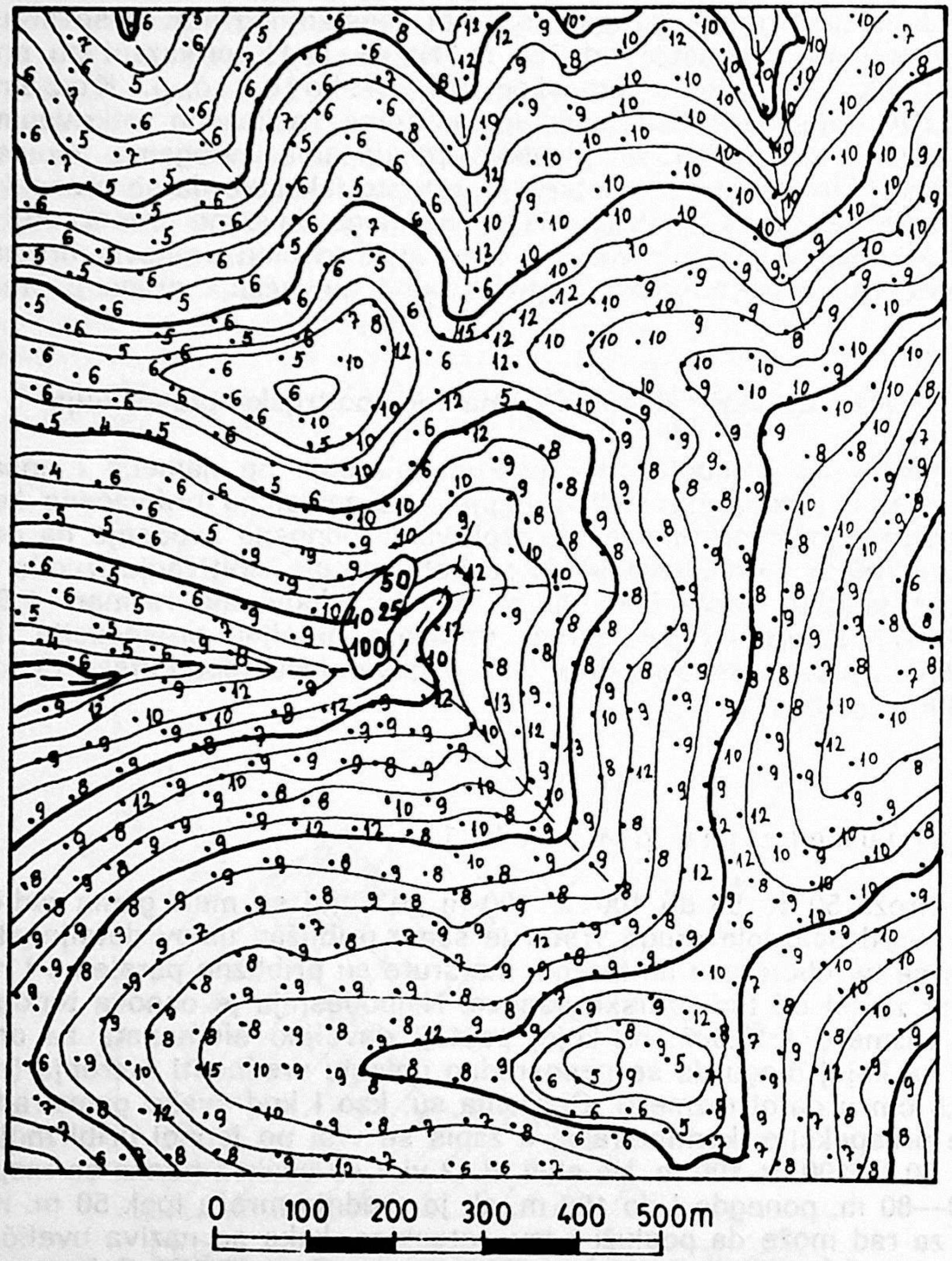
Poludetaljna i detaljna gama radiometrijska prospekcija

Podela na poludetaljna i detaljna merenja ne nameće i apsolutnu preciznost u razdvajanju metodologije, već zavisi od prihvaćene konvencije razgraničenja gustine mreže ispitivanja odnosno svođenje na odgovarajuću razmeru. Uobičajeno je da se poludetaljna ispitivanja izvode uglavnom po gustini mreže 50—100 m, što bi odgovaralo razmeri 1:5000——1:10.000, a svaka gušća mreža označava detaljnu prospekciju ili premer. Ovo naravno ne obavezuje i na odgovarajuću topografsku osnovu za nanošenje podataka.

Poludetaljna prospekcija

Mreža 50 × 50 do 100 × 100 m po kojoj se meri gama radioaktivnost, pored opažanja druge vrste, je samo približan uslov detaljnosti. Ova mreža se ne obeležava na terenu, maršrute su približno paralelne i njihova tačnost zavisi od topografske osnove. Najpodesnija je osnova topografska karta razmere 1:10.000, na kojoj postoji dovoljno elemenata za orijentaciju i na kojoj mogu da se neposredno upisuju vrednosti merenja (na svakih 0,5 cm u datoj razmeri). Opažanja su, kao i kod svake gama-radiometrijske prospekcije, kontinuirana, a zapis se vrši po jednoj približnoj mreži 50 × 50 ili 100 × 100 m. Na slici III.12 vidi se ovakva mreža sa rasponima od 30—80 m, ponegde i do 100 m, ali je srednja mreža ipak 50 m. Kao osnova za rad može da posluži i tzv. fotoskica, kako se naziva uveličan snimak iz vazduha (fotogram), do približne razmere 1:10.000. Tokom premera vrše se istovremeno i geološka (litološka) opažanja, a veoma je uputno da se daju makar i globalni podaci o pokrivenosti terena, što zavisi kako od samog terena, tako i od organizacije rada.

Jedan vid kombinovane prospekcije ređe mreže, koja bi mogla da bude i detaljniji vid nazemne regionalne prospekcije, naziva se **radiometrijsko-geološko rekognosciranje** (za razliku od geološko-radiometrijskog profiliranja, koje se izvodi duž pojedinačnih ključnih profila). U poređenju sa prethodnim vidom prospekcije, ovde se opažanje vrši duž neregularnih maršruta, po pravilu duž potoka i eventualno duž grebena, ukoliko su ogoljeni, zatim duž useka puteva, gde ima izdanaka. Na taj način, međumaršrutno odstojanje je veoma varijabilno, od 100 do 300 i više metara. To se

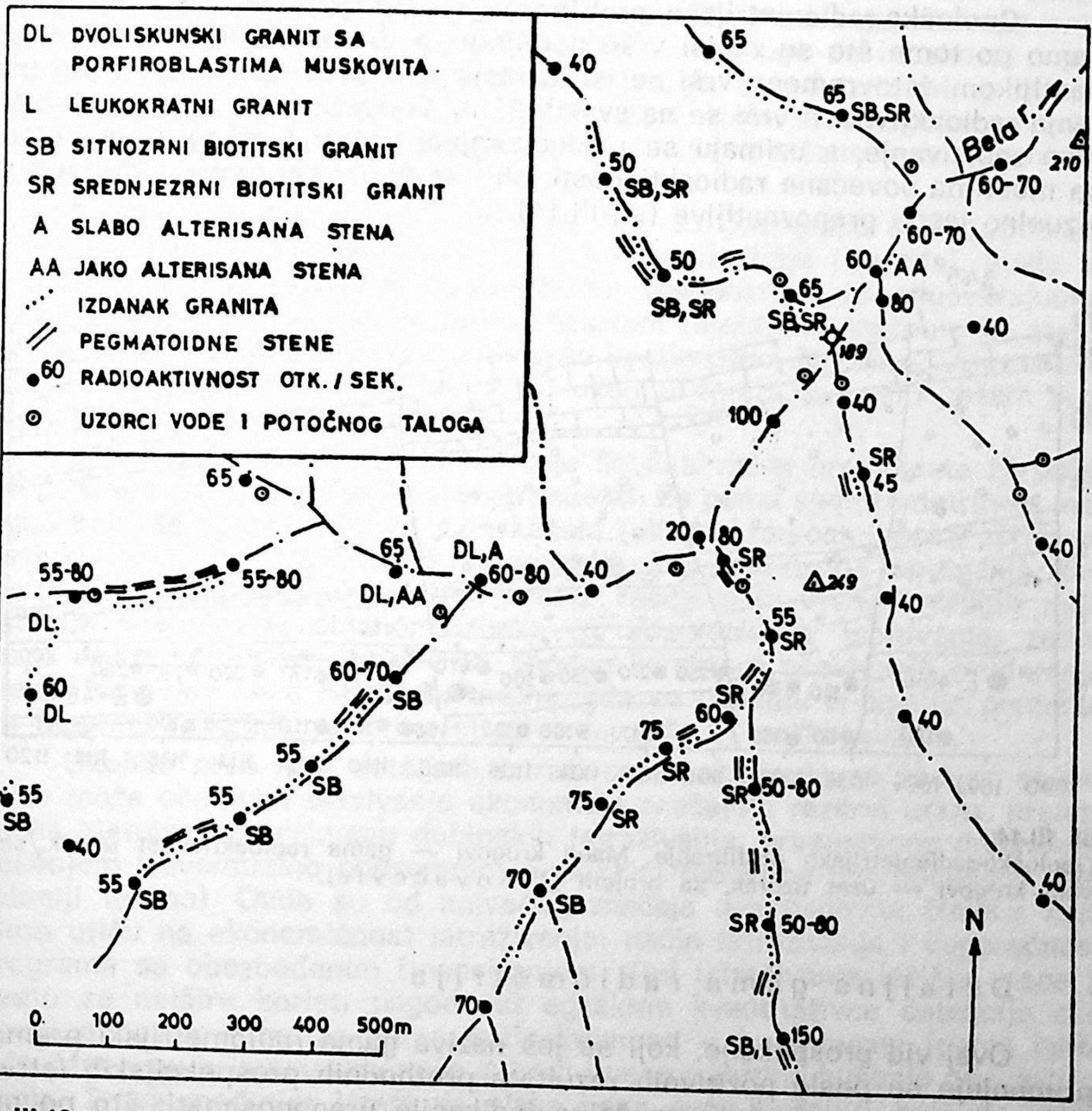


Sl. III.12.
Poludetaljna gama radiometrijska prospekcija.
Brojke označavaju vrednosti u μR/h (1 μR/h = 0,072 pC/kgs).

vidi iz slike III.13, gde je na pr. odstojanje između dva potoka na JZ delu terena čak oko 350 m. U uslovima velikog stepena pokrivenosti terena, čak i u koritu potoka (na pr. u istočnom delu terena sa sl. III.13) može se očekivati da eventualno neko manje ležište urana ostane neotkriveno na tom prostoru. U praksi je pak poznato, nezavisno od veoma male verovatnoće da se ležište nađe u potpunosti van domašaja neposredne detekcije, da stene sa grebena, uključujući i eventualne rudne koncentracije, lako dospevaju do podnožja obodnih potoka kao padinski materijal, koji daje —

kada se radi bar o orudnjenjima urana — lako detektabilan oreol povećane radioaktivnosti.

Kod ovoga vida prospekcije opažanja se isto tako vrše kontinuirano, sa povremenim zapisima, u proseku na 100—200 m, što zavisi isključivo od terenske (geološke) situacije, s tim što se, ukoliko su interesantni fenomeni učestali, opažanja mogu pogustiti. Pored merenja gama radioaktivnosti, opažaju se svi relevantni geološki podaci, prvenstveno litološki sastav, a registruju se posebno pokrivene partije terena. Uzimaju se i uzorci, prvenstveno za određivanje sadržaja radioaktivnih elemenata, alteracije, vrste stena i dr. Uputno je da se ovaj vid prospekcije kombinuje sa određivanjem sadržaja radioaktivnih elemenata u vodama i muljevima (hidrogeohemijska prospekcija), kako je to prikazano na sl. III.13. Ovo je posebno korisno za pokrivene terene, gde se, po pravilu, vrše i raskopavanja, kada poreklo povećane radioaktivnosti nije jasno.



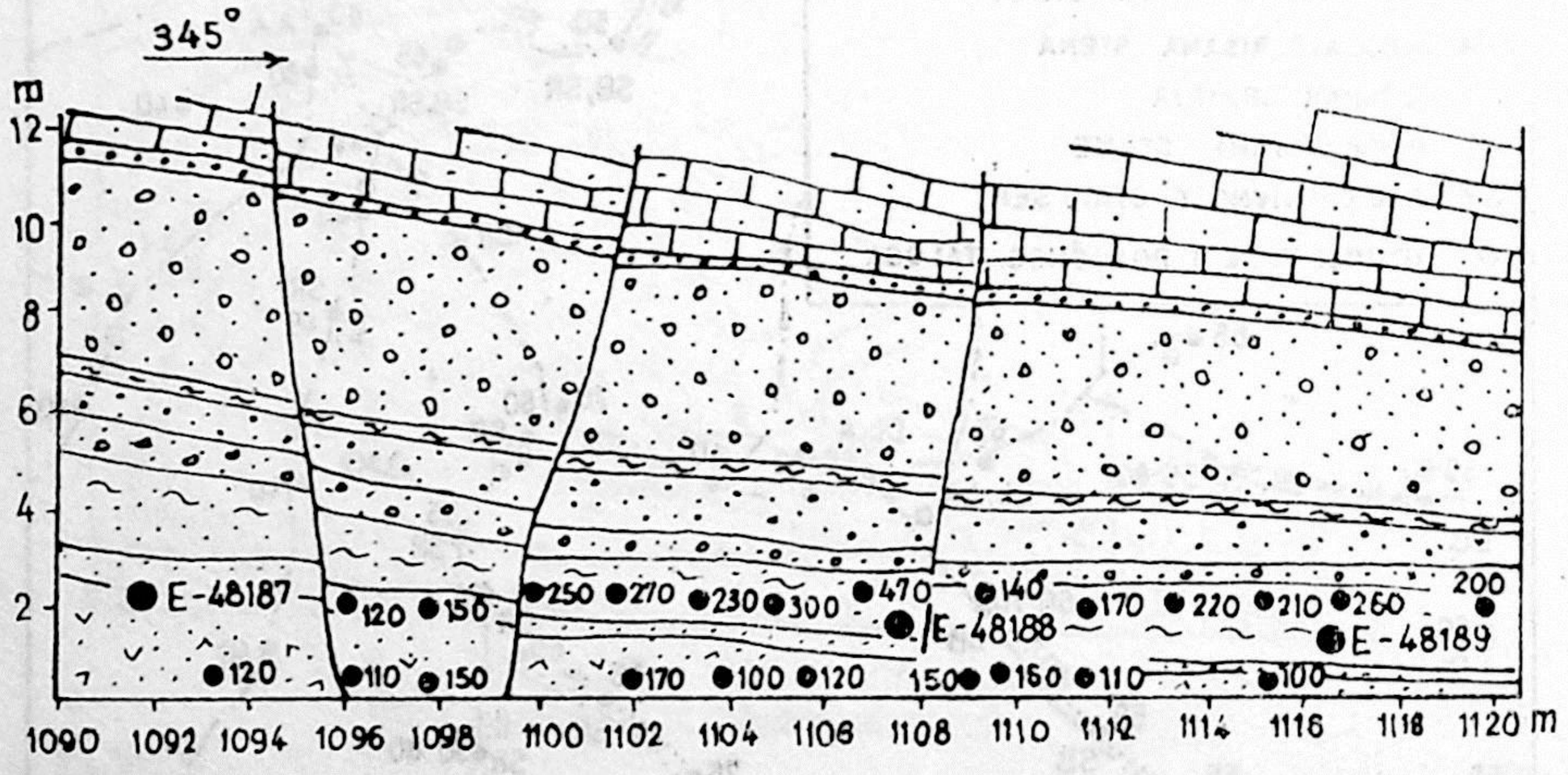
Sl. III.13.
Radiometrijsko-geološko rekognosciranje u gornjem slivu Bele reke, na severnim padinama planine Cer u zapadnoj Srbiji (A. Antonović).

Ovaj vid prospekcije može predstavljati isto tako i najkompletniji postupak za izradu geološke karte 1:10.000, pogotovo što je merenje gama radioaktivnosti u mnogim slučajevima značajan kvalitet više, koji često puta bitno pomaže kod razdvajanja dva vizuelno slična litološka tipa, naročito u uslovima pokrivenosti terena.

Radiometrijsko-geološko rekognosciranje je ustvari najpogodniji vid provere regionalnih (aeroradiometrijskih i drugih) anomalija radioaktivnosti odnosno svuda gde postoje preliminarni podaci o postojanju uranovog orudnjenja.

Ponekad se vrši samo radiometrijsko rekognosciranje u cilju identifikacije aeroradiometrijskih anomalija na geološki monotonim i topografski slabije razuđenim i pokrivenim terenima, gde drugi podaci, osim radiometrije, nemaju bitniji značaj. U ovim slučajevima merenje se vrši po pravilnoj mreži, gustine 50 × 50 m, kako je navedeno u početku ovog odeljka.

Geološko-radiometrijsko profiliranje se razlikuje od rekognosciranja samo po tome što se zapisi vrše detaljnije, a dužina profila se odmerava pantljikom. Istovremeno vrši se iscrtavanje geološkog profila, a zapis merenja radioaktivnosti vrši se na svakih 25 m. O opažanjima se vrši i tekstualno zapisivanje, a uzimaju se i odgovarajući uzorci (probe), prvenstveno na mestima povećane radioaktivnosti, ali i za definiciju stena, ukoliko nisu vizuelno jasno prepoznatljive (sl. III.14).



Sl. III.14.
Geološko-radiometrijsko profiliranje. Manji krugovi — gama radioaktivnost u otk./sek., veći krugovi — uzet uzorak, sa brojem (J. Kovačević).

Detaljna gama radiometrija

Ovaj vid prospekcije, koji se još naziva gama radiometrijski premer, primenjuje se posle pozitivnih rezultata prethodnih prospekcijskih istraživanja, kojima su utvrđene značajne indikacije uranonosnosti, što po pravilu podrazumeva bilo identifikaciju uranovih minerala ili — i izuzetne geološke koincidencije, koje neposredno ukazuju na mogućnost otkrivanja le-

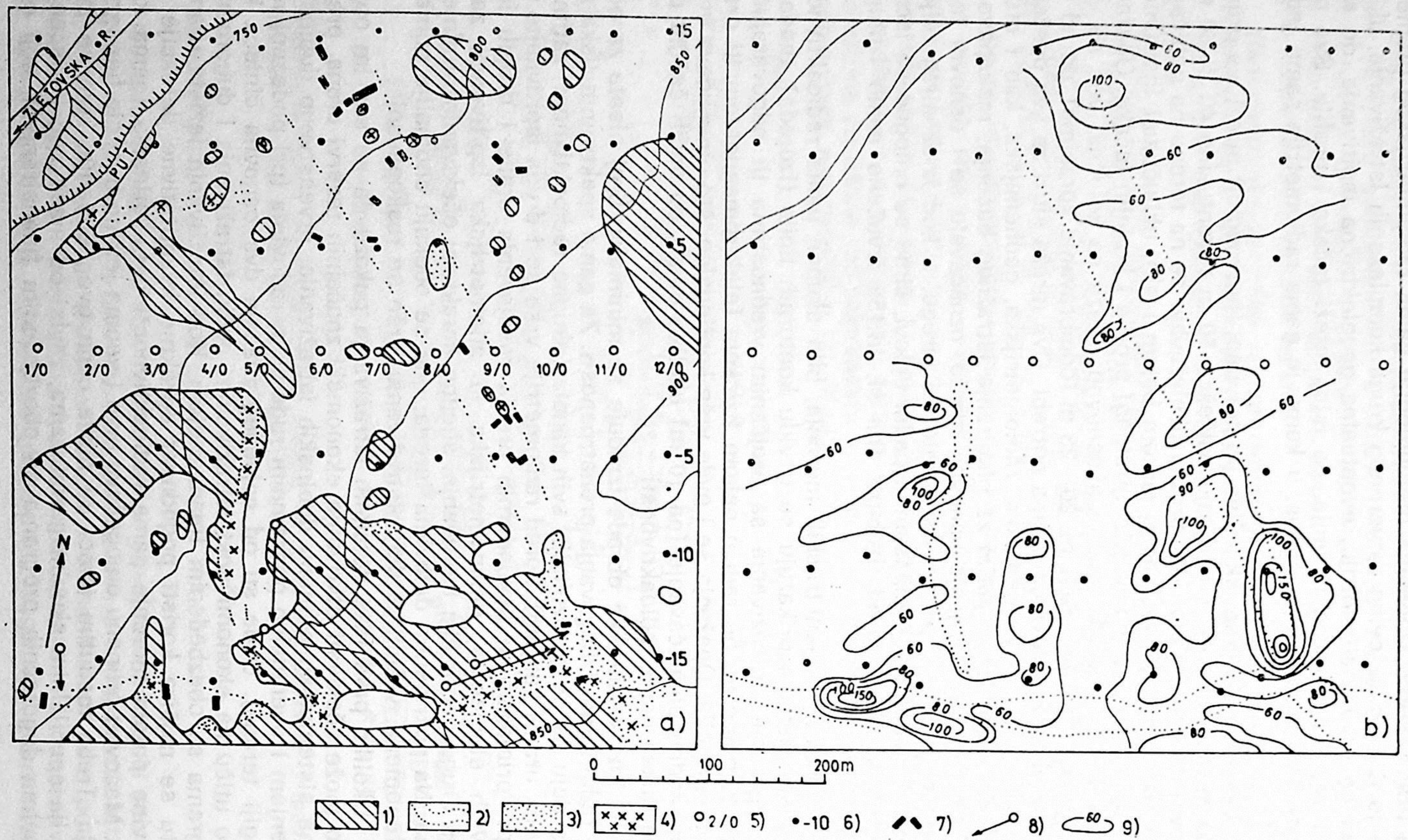
žišta urana. Pored iznošenja metodologije gama radiometrijskog premera, ovde je dat prikaz celog zatvorenog kruga kompleksnih istraživanja, uključujući na pr. metalometriju, eventualna geoelektrična ispitivanja, do raskopavanja i dubinskog bušenja, po istoj mreži tačaka i profila. Sve ove metode čine nerazdvojni ciklus, u kome je gama radiometrija samo jedna karika.

Opažanja se vrše isključivo po pravilnoj (pravougloj) mreži, sa pravolinijskim profilima, na odstojanju najčešće 50 m (eventualno 40 ili 60 m). Osnovne tačke opažanja duž profila obeležavaju se na terenu na uobičajen način (iskolčavanje, markacija jarkom bojom i sl.), uključujući instrumentalno povezivanje osnovnog (centralnog) profila i krajnjih tačaka. Opažanja se isto tako ne svode samo na osnovnu mrežu sa kolcima, već se vrši pogušćavanje radne mreže na 20—25 m (odmeravanje koracima), pored daljih lokalnih pogušćavanja prema potrebi. Ova mreža služi za sva opažanja i merenja kao što su geološka, radiometrijska, geohemijska, kao i druga geofizička ispitivanja, zatim za planiranje istražnog bušenja, raskopavanja i dr. Prilikom postavljanja osnovne mreže, označavaju se i osnovni topografski elementi, u prvom redu potoci i jaruge, a kod izraženijeg reljefa mere se (podesnim kompasom) i padni uglovi, čime se omogućava iscrtavanje makar provizornih izohipsi (na sl. III.15a izvučene samo izohipse na 50 m).

Rezultati radiometrijskih merenja, bilo ukupne gama radioaktivnosti ili spektrometrije, prikazuju se u vidu konturnih linija (izorada), mada bi bilo ispravnije prikazivanje sa brojčanim vrednostima ili odgovarajućim znacima, pošto se ne radi o nekom fizičkom (elektromagnetnom ili gravitacionom) polju. Opažanja se i ovde vrše kontinualno, što omogućava eventualno radno pogušćavanje (na 10 m) ukoliko dolazi do većih češćih promena fluksa gama radioaktivnosti.

U fazi kabinetske obrade izrađuje se minimalan broj oleata za pojedine radove radi izbegavanja prenatrpanosti. Za gama spektrometrijska merenja daju se na pr. izolinije svih kanala (ukupna radioaktivnost, zatim za torijum, uran i kalijum). Pored radiometrije vrše se i druga ispitivanja, kao na pr. primarnih ili sekundarnih oreola rasejavanja urana i drugih indikativnih elemenata, emanometrijska ili alfametrijska ispitivanja, zatim razna druga geofizička ispitivanja, shodno karakteru očekivanih orudnjenja urana. Na pokrivenim delovima terena, gde se očekuju anomalije pomenutih fenomena, važnih za dalja istraživanja, vrše se raskopavanja.

Ukoliko prve faze detaljnih istraživanja pokažu da se sasvim objektivno može očekivati otkrivanje ekonomski značajnih rezervi urana, prelazi se na sistematsku primenu dubinskih istraživanja, prvenstveno dubinskim bušenjem i eventualno podzemnim rudarskim radovima (pri podesnoj morfologiji terena). Ovde su od najvećeg značaja dva osnovna činioca koja bitno utiču na ekonomičnost istraživanja: način istraživanja i dugoročnost programa sa obezbeđenim finansiranjem. Kod istraživanja ležišta urana u svetu se najšire koristi pogodnost egzaktne kvantitativne detekcije ove sirovine putem merenja gama radioaktivnosti u bušotinama (gama karotaž). Masovnu primenu omogućava brzo i veoma jeftino bušenje bez jezgrovanja. Treba međutim istaći da niska cena ovog bušenja, koje se inače obavlja specijalnim skupim garniturama, zavisi od masovnog korišćenja u uslovima dugoročnih programa sa obezbeđenim finansiranjem, koji obez-


ŽELJOVSKA R.
PUT
750
800
850
900
15
5
-5
-10
-15
1/0
2/0
3/0
4/0
5/0
6/0
7/0
8/0
9/0
10/0
11/0
12/0
N
a)
b)
0
100
200m
1) 2) 3) 4) 2/0 5) -10 6) 7) 8) 60 9)

beđuje brzu amortizaciju uređaja. Ovakvo bušenje koristi se inače i kod poludetaljne pa i regionalne prospekcije, naročito u traganju za potpuno skrivenim rudnim telima u uslovima povoljnih i perspektivnih geoloških sredina (najčešće sedimentnih formacija). Može se navesti primer ovakvog bušenja u predelu Arlita u Nigeru, na velikim površinama bez ikakvih neposrednih indikacija urana, gde je bušenje bez jezgrovanja započeto čak po mreži od preko 3 km, gde su izbušene stotine kilometara bušotina, uz veliki finansijski rizik, koji se najzad višestruko isplatilo otkrivanjem nekoliko značajnih ležišta urana, koji se danas intenzivno eksploatišu (ležište Arlit je inače najveći podzemni kop urana u svetu).

Gama sondiranje

Kada se radi o potencijalnim terenima sa kontinualnim humusnim ili drugim pokrivačem, gama radiometrija na površini daje slabe ili ne daje nikakve rezultate, iako se pod pokrivačem mogu nalaziti značajna povećanja radioaktivnosti. Najčešće je međutim dovoljno da se merenjem u rupama ili sondama dubine 0,5—1 m dobije znatno realnija slika o gama radioaktivnosti ispod pokrivača. Rupe do 0,5 m mogu se kopati ručno, ali je za veće dubine potrebno da se rupe buše svrdlima, ručno ili motorno, pri čemu se svakako vodi računa o prečniku sonde. Prednost kopanja rupa je u tome što se ne mora imati posebna sonda, već se mogu upotrebiti standardni terenski radiometri, ali zato dubina predstavlja značajno ograničenje. Najidealnije bi bilo da se rupe buše do stenske osnove, tako da bi postojao jedinstven kriterijum gama radioaktivnosti za sve sonde.

Gustina tačaka je u početku ređa, ali obično ne manje od 50 × 50 m, s tim što se u domenu povećanja gama radioaktivnosti vrši pogušćavanje. Dalji postupak je kao i kod standardnih mrežnih premera.

III.2.1.4. GAMA RADIOAKTIVNI KAROTAŽ BUŠOTINA

Gama karotaž je još jedan primer kvantifikacije gama radiometrijskih merenja, koja su, primenom odgovarajućih uređaja i metodologije, dovedena do takvog stepena, da rezultati merenja izraženi u vidu sadržaja

---

Sl. III.15.

Detaljna prospekcija na lokalnosti Zletovska reka.

a) karta izdanaka sa interpretacijom (A. Antonović),

b) gama spektrometrijski premer (Ž. Damnjanović).

1. Izdanci raznih stena (neraščlanjeno), 2. granice alteracija, 3. izbeljivanje, 4. limonitizacija, 5. osnovni profil, 6. tačke sa kolcima na terenu, 7. raskopi, 8. kose bušotine, 9. Izorade uranovog γ zračenja (i/s).

urana mogu, pod određenim uslovima radioaktivne ravnoteže, da služe za proračun rezervi urana u rudnom ležištu. Gama karotažom se po pravilu meri celokupna radioaktivnost, a primena gama spektrometrije ima opravdanja samo u uslovima mešovitog uranovo-torijumovog orudnjenja, što je obično izuzetno redak slučaj. Primena gama radioaktivnog karotaža uz masovno bušenje bez jezgrovanja, primenom odgovarajuće tehnike za brzo bušenje, čine istraživanje ležišta urana znatno jeftinijim. Gama karotažni uređaji prikazani su u DODATKU 2.

Osnovni uslov da se gama karotažom dobiju tačni ili dovoljno tačni sadržaji urana za ekonomsku procenu jeste da se uran nalazi u radioaktivnoj ravnoteži sa radijumom (što se utvrđuje povremenim analizama jezgra). Treba voditi računa da li je poremećaj u celini jednoznačan ili višeznačan na pr. u korist radijuma (što je nepovoljno) ili zapis pokazuje stalno niže vrednosti nego što je stvarni sadržaj urana (što je povoljno, ali isto tako neobjektivno). Češći je slučaj da se ravnoteža menja od bušotine do bušotine, ili čak u pojedinim intervalima u samoj bušotini, u plusu i minusu, a da krajnji bilans pokazuje ravnotežno stanje. U ovom drugom slučaju treba utvrditi za koliki minimum pokazatelja odnosno bušotina i za kolike minimalne dimenzije bloka se može računati srednji sadržaj urana na osnovu gama karotaža, a da se ne unesu pogrešni (jednoznačni) rezultati.

Gama karotaž podrazumeva tri osnovne operacije, jedna je kalibracija sonde, druga je merenje i treća je interpretacija mernih podataka.

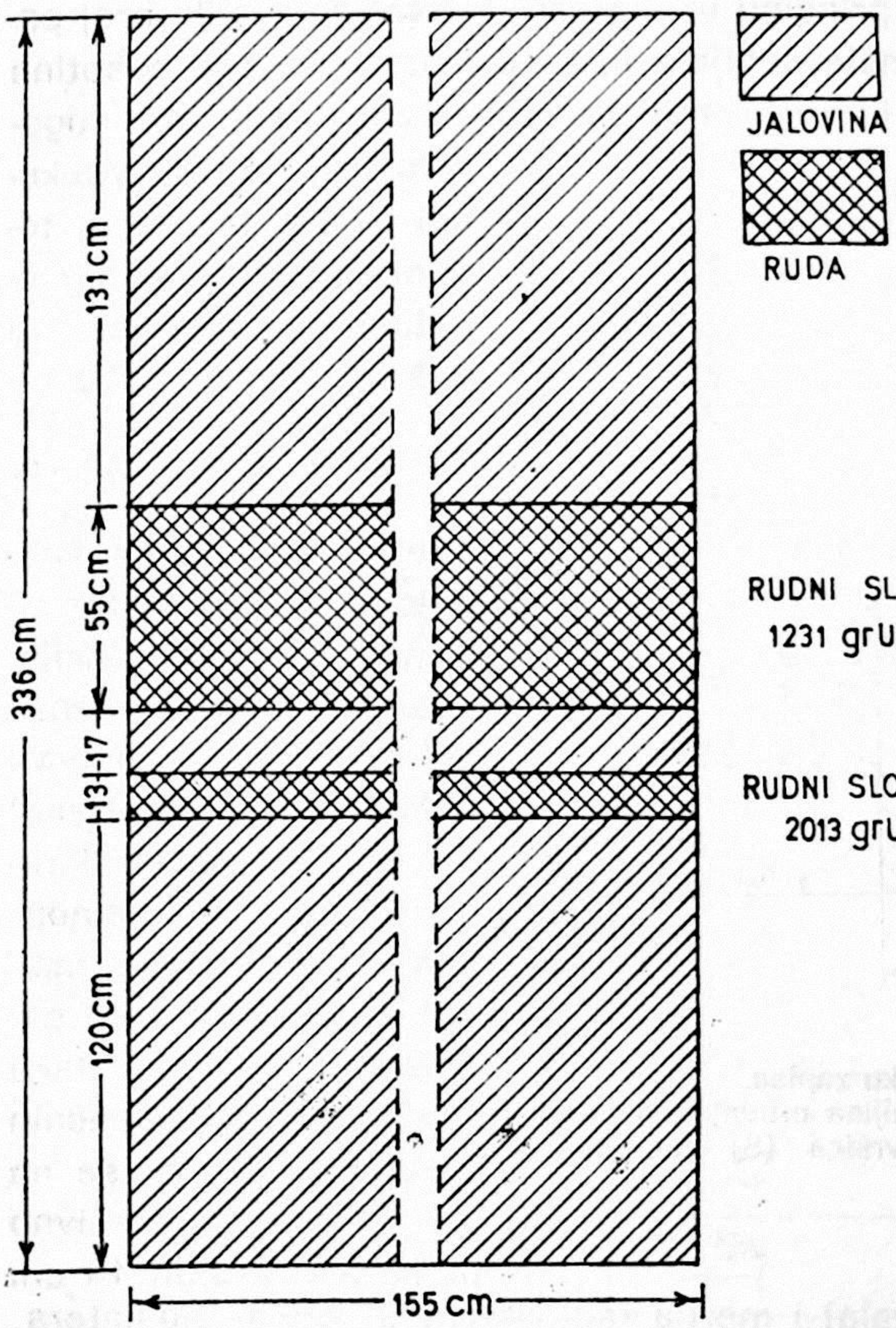
K a l i b r a c i j a s o n d e odnosi se na utvrđivanje faktora kalibracije koji predstavlja odnos sadržaj/broj otkucaja, što se može izraziti i kao ppm eU*: i/s. Za novije uređaje (sonde) daje se fabrička kalibracija, kao na pr. za sve modele Mount Sopris, navedene u prethodnom odeljku, gde faktor kalibracije iznosi:

$$K = \frac{1\%\ eU}{20.000\ i/s}$$

Kalibracija je izvršena sa etalonima na poznatom poligonu kod Grand Junction-a (Grand Džankšn) u SAD. U praksi Geoinstituta u Beogradu, fabrička kalibracija se povremeno proverava prema etalonu koji je formiran na rudniku urana Žirovski vrh u Sloveniji (sl. III.16). Ovaj faktor važi za suvu bušotinu bez obložne kolone (zacevljenje), što znači da se vrši korekcija za debljinu zida obloge i debljinu vode u međuprostoru između

---

* Izraz eU — ekvivalenat urana ukazuje samo da je sadržaj urana određivan posredno, preko gama radioaktivnosti, što se može izostaviti kada se zna da se radi o gama karotažu.



Sl. III.16.
Presek cilindričnog etalona sa rudom urana za sonde gama karotaža (Gorenja Vas).

sonde i zida bušotine (obloge). Korekcija se vrši prema linearnom koeficijentu apsorpcije ili slabljenja (I.1.3.5 — Gama zračenje). Postoje tačno izračunate vrednosti za standarde kolone, pa tako i one u upotrebi u Geoinstitutu* u Beogradu, gde su debljine kod najčešće korišćenih kolona 3,5 mm i 4,5 mm, a odgovarajući koeficijenti apsorpcije su 1,37 odnosno 1,5 (37% i 50%).

Za sondu koja je korišćena u Geoinstitutu šezdesetih godina (sovjetske proizvodnje) vršena je prethodna kalibracija prema izvoru zračenja rdijuma i pretvaranje impulsa u μR/h, a zatim je određivan faktor kalibracije prema etalonima urana, koji je iznosio 115 μR/h = = 100 ppm U.

Merenje karotaža prikazano je u DODATKU 2 kod opisa mernih uređaja, tako da nema potrebe za dodatnim objašnjenjima.

Interpretacija mernih podataka prema dijagramu zapisa odnosi se na izračunavanje sadržaja urana. Verodostojnost gama karotaža zavisi, pored pomenute radioaktivne ravnoteže, još od karaktera distribucije urana u steni, poroznosti (gustine), sadržaja vlage, rednog i atomskog broja elemenata u sastavu stene-nosača urana (najbliže ^{27}Al), zacevljenosti (bilo je reči u prethodnom tekstu), debljine i položaja rudnog intervala i dr.

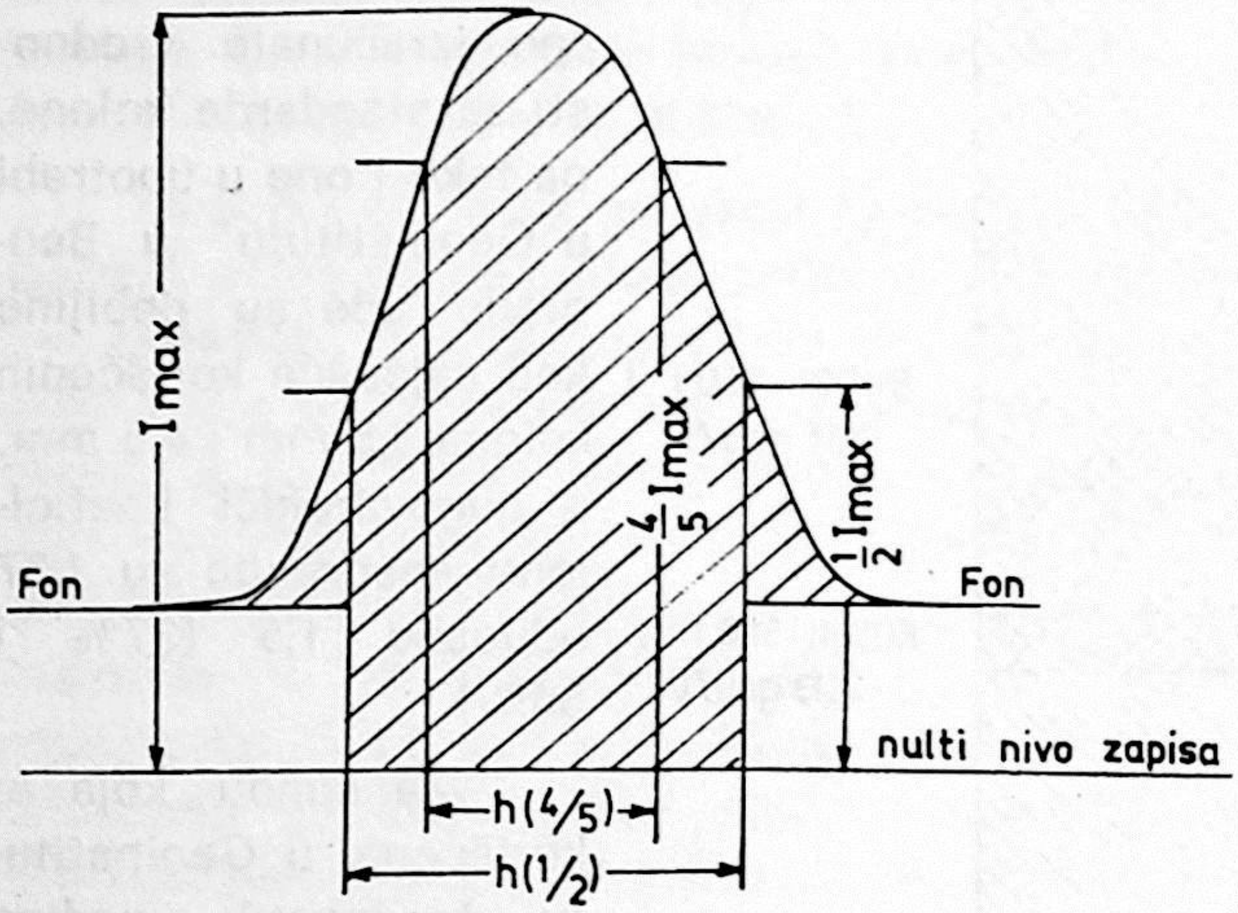
---

* Svi podaci o praksi Geoinstituta izneseni ljubaznošću N. Simić i M. Kneževića.

Distribucija urana se u principu uzima kao (beskrajno) veliki broj paralelnih slojeva (beskrajno) male debljine ili — u odnosu na osu bušotine — visine Δh, od kojih svaki ima drugačiji sadržaj urana q, koji pak odgovara broju impulsa/sekundi φ. Na taj način totalni intenzitet celog orudnjenog intervala u bušotini bio bi [27]:

$$I^{o} = K \sum_{i=-\infty}^{+\infty} C \cdot \varphi_{oi} \cdot \Delta h_i \cdot q_i$$

gde je K — faktor kalibracije, a C — faktor ispravke za zacevljenje, vodu isl. Totalni intenzitet predstavlja ustvari jedinstven (integrisan) pik, iscrtan na traci registratora (ili memorisan kod digitalnog zapisa). Ovaj jedinstven pik dobio bi se isto tako spajanjem pojedinačnih vrednosti, ako bi se na pr. sonda sukcesivno pomerala svakih 10 cm (Δh, ne manje od dužine kristala) i merila radioaktivnost preko indikatora. Ovaj način karotaža, kakav je rađen u vreme kada su registratori sa trakom bili retkost, ni po čemu se ne razlikuju, izuzev po sporosti, od zapisivanja na traci, pa i od kompjuterizovanog digitalnog registrovanja zračenja.

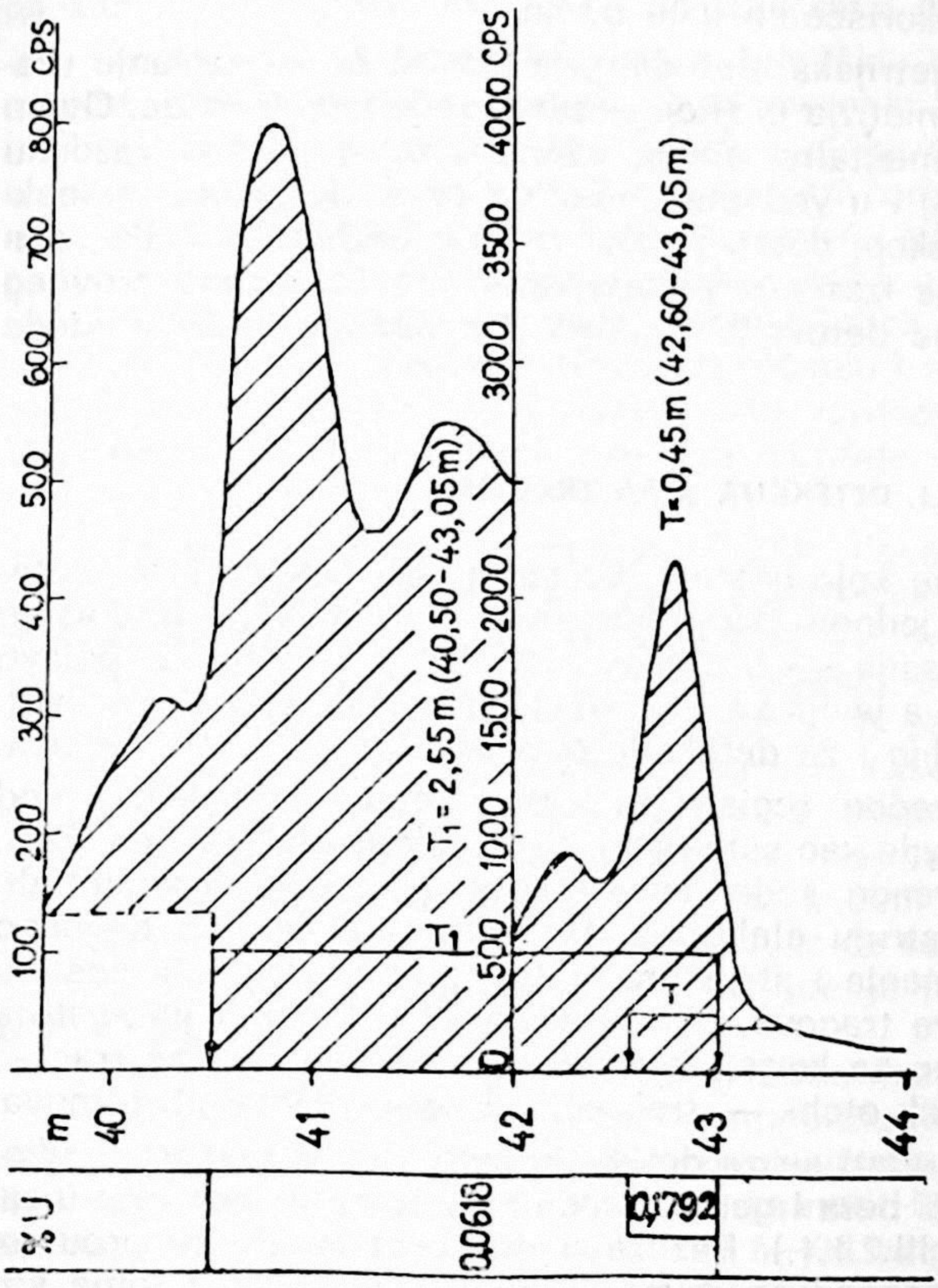


Sl. III.17.
Način izračunavanja urana prema piku zapisa.
I_{max} — intenzitet zračenja, h — debljina orudnjenog intervala, šrafirano — integrisana površina (S) za debljinu $h_{1/2}$.

Na sl. III.17 prikazan je idealan pik zapisa gama radioaktivnosti, koji bi odgovarao sloju sa homogenom koncentracijom urana debljine h, pri čemu je kristal detektora uzet kao tačka, a pomeranje sonde dovoljno sporo da se može zanemariti minimalna inercija zapisa.

Interpretacija bazira na jednakosti dužine intervala h sa širinom pika na visini 1/2 I_{max} (najčešći slučaj) ili 3/4 I_{max} (kod tankih i vrlo bogatih intervala). Na taj način sadržaj (q) iznosi:

$$q = I_{max} \cdot h \cdot K \cdot \mu_{o.k} \cdot \mu_v$$



Sl. III.18.
Zapis gama karotaža sa promenom opsega merenja (karotažni uređaj model II). K = 1%/20.000 i/s, $\mu_{o.k.}$ = = 1,3689 (interpretisao M. Knežević).

Izraz $I_{max} . h$ znači integrisanu površinu S dimenzije i/s.m, odakle se dobija srednji intenzitet I = S/h. Na taj način sadržaj urana (%) ima značenje:

$$q = I \cdot K \cdot \mu_{o.k} \cdot \mu_v$$

gde je vrednost K ranije navedena (1%/20.000 i/s), isto kao i $_{o.k}\,\mu_v$ (koeficijenti apsorpcije obložne kolone odnosno vode). Na sl. III.17 prikazan je gore opisan princip dobijanja površine S, a na sl. III.18 dat je konkretan primer izračunavanja sadržaja u orudnjenom intervalu u bušotini.

U nekim izuzetnim slučajevima u bušotinama se može pojaviti radon, koji osetno utiče na karotažni zapis, ali se može lako prepoznati po relativno zaobljenim linijama, bez uočljivih pikova. U tom slučaju bušotina se ispira i ponovo karotira.

III.2.2. Alfa radiometrijske metode

Alfa radiometrijske metode, koje baziraju na detekciji alfa zračenja (čestica), imaju znatno ograničeniju primenu od gama radiometrijskih metoda. Uprkos ograničenosti dometa alfa čestica, čija je detektabilnost izražena u gotovo neposrednom kontaktu emitujuće materije i detektora, ova metoda je u zadnje vreme čak dobila u zamahu. Da paradoks bude veći, alfa radiometrijska metoda ima, u izvesnim aspektima, čak i karakter daljinske detekcije (u najširem smislu), jer se navode dometi otkrića skrivenih rudnih tela čak i na 200 m ispod stenskog pokrivača. Treba odmah reći da se ova metoda skoro u celosti odnosi na detektovanje radona odnosno ^{222}Rn i ^{220}Rn (»toron«), pod zajedničkim nazivom »emanacija«. U znatno manjoj meri primenjuje se i za određivanje radijuma (^{226}Ra), prvenstveno u vodi. Prirodni (neizazvani) tragovi alfa čestica u pojedinim mineralima

koriste se isto tako i za odredbe apsolutne starosti, pored mnogobrojnih drugih izotopskih metoda, korišćenih u tu svrhu.

Najstarija alfa radiometrijska metoda, primenjena za istraživanje uranovih orudnjenja, je emanometrija ili (neposredna) radonova metoda. Ovom metodom određuje se momentalno stanje sadržaja ovog gasa u vazduhu (u tlu ili iznad površine tla) i u vodama. Jedan od prvih detektora radioaktivnosti uopšte — elektroskop, dobro poznat iz svih udžbenika fizike, služio je za merenje jonizacije izazvane prvenstveno alfa česticama. Novijeg su datuma metode vizuelne detekcije tragova alfa čestica, zatim metode aktivacije i sl.

III.2.2.1. DETEKCIJA ALFA ZRAČENJA

Poznate su dve pojave koje nastaju prolazom alfa čestica kroz materiju, a koji su posledica jednog istog fenomena narušavanja spoljašnje ljuske atoma. To su eksitacija — izbijanje spoljnjeg elektrona uz pojavu fotona, a kao sledeća pojava javlja se jonizacija (stvaranje jonskih parova). Ove dve pojave služe ujedno i za detekciju odnosno brojanje alfa čestica.

Eksitacija se neposredno registruje preko fotona, isto kao i kod gama zračenja, samo što ovde kao scintilator služi obloga cink sulfida (ZnS, Ag) u unutrašnjosti otvorenog suda, ispred koga se nalazi fotomultiplikator, koji daje merljivu struju elektrona. Upadom alfa čestica odnosno eksitacijom se isto tako menja i struktura materije kroz koju alfa čestica prolazi, što ostavlja vidljive tragove, čija je brojnost u funkciji intenziteta alfa zračenja. Ovaj fenomen se koristi kod metode tragova (»alpha track«) ili tragova nagrizanja (»track etch« — trek eč) odnosno plastičnih filmova.

Fenomen jonizacije koristi se za detekciju svih vidova zračenja radioaktivnih izotopa, uključujući beta i gama zračenje, o čemu je bilo reči u ranijem tekstu (GM brojač, III.2.1.1.). Razlika u detekciji jonizacije prouzrokovane alfa česticama u odnosu na druge vidove zračenja je u tome što se materija koja daje zračenje mora unositi u jonizacioni prostor, umesto da samo zračenje prodire kroz zidove komore. Osnovu detekcije i ovde čini ponašanje statičkog elektriciteta u jonizovanom gasu u komori, najčešće vazduhu. Pomenuti uređaj za merenje jonizacije — elektroskop odigrao je nezamenljivu ulogu u pionirskim poduhvatima otkrivanja i izučavanja radioaktivnosti i sada pripada istoriji. Drugi uređaj je elektrometar, koji ustvari predstavlja kondenzator sa elektrostatičkim nabojem oba pola, razdvojenih vazduhom (za razliku od elektroskopa, gde se listići razdvajaju zbog jednoznačnog naboja). Stepen jonizacije ogleda se u pražnjenju kondenzatora. U SSSR su pedesetih godina konstruisani veoma uspešni kondenzatori, koji su dalje usavršavani i bili u praktičnoj upotrebi, kao na pr. emanometar SG-11 i to kako za terenska ispitivanja, tako i kao laboratorijski uređaj za ispitivanje radona i radijuma u vodama, koji je šezdesetih godina uspešno korišćen u Jugoslaviji (sl. 3.4, DODATAK).

Alfa zračenje se može detektovati i fiksiranjem čvrstih produkata raspada radona bilo u apsorbujućoj materiji, kao na pr. aktivni ugalj ili na površini raznih metala. Prednost ove metode je u tome što je energija alfa zračenja potomaka veća od samog radona, mada se ravnoteža radona i potomaka uspostavlja tek posle 3 sata, kada imamo i maksimalne koncen-

tracije. Očitavanje intenziteta zračenja meri se bilo posebnim uređajem ili na samom detektoru, što zavisi od izabranog sistema.

Posle više decenija iskustva i tehničkih unapređenja, danas se primenjuju dve osnovne metodologije za merenje koncentracije radona (^{220}Rn i ^{222}Rn). Jedna od metoda je merenje uzorka vazduha sa radonom neposredno po uvođenju u zatvorenu komoru, pri čemu je vreme merenja kratko, reda nekoliko minuta. Druga osnovna metoda odnosi se na dugotrajno izlaganje aktivirajućih materijala dejstvu radona u prirodnom ambijentu, najčešće u tlu, obično 1—30 dana. Postoje razne varijacije ove metode, poznate najčešće po komercijalnim (zaštićenim) nazivima, kao na pr. pomenuti »trek eč« (track etch), zatim »alfa kartice« (Alphacards), alfametrija (Alphameter) i sl. Uređaji i pribor za merenje, kao i način merenja prikazani su u DODATKU 3.2.

Za merenje radona u vazduhu i vodi odnosno radijuma u vodi podjednako se primenjuju elektrometrijski i scintilacioni uređaji, s tim što su scintilacioni detektori osetljiviji za laboratorijska merenja radona i radijuma u vodi. Treba isto tako reći da se u oba slučaja merenja mogu vršiti statički, na jednokratnom uzorku vakuumiranjem, ili protočno, cirkulacijom gasa (vazduha sa radonom) kroz mernu komoru. Oba merenja se vrše sa istim uređajem, jedino što se koristi komora sa jednim ili dva otvora za uvođenje gasa. Za merenje radona u vazduhu tla, ovaj se direktno uvodi u komoru, dok se za merenje radona ili radijuma u vodi koriste dodatni uređaji za degazaciju vode (barboteri i sl.), koji služe da se radon iz vode zahvati unešenim vazduhom i prebaci u komoru, gde je postupak merenja isti (vidi DODATAK 3.1.).

Kod merenja radona (emanacije) treba imati u vidu da celokupna količina radona (^{222}Rn) nastalog u nekom mineralu ili steni ne odlazi, pa se procenat radona koji beži naziva koeficijent emanacije. Ovi koeficijenti su različiti za razne materijale i iznose za karnotit 6—32%, sfen oko 9%, pehblendu 0,06—16,6 %, zatim za granit 6—33%, granodiorit 17—40%, gnajs 1—14%. Za stene u celini ovaj koeficijent iznosi srednje oko 5%, a za tlo 40% (peskovito tlo samo 10%, a sa vodom još je niži) [8].

III.2.2.2. POGODNOSTI I NEDOSTACI PRIMENJENIH METODA

Upoređenjem svih navedenih metodologija detektovanja radona ne dolazi se do apsolutne prednosti bilo koje od njih, uzimajući u obzir sve uslove merenja, uključivši geopolitičke i ekonomske i dr.

Da bi se razumele mogućnosti primene pojedinih metoda treba poznavati zakonitosti kretanja radona, uz vazduh i druge gasove ili kao samostalnog gasa, u stenama, tlu i vodi, uticaj atmosferskih uslova i dr. Radon je najteži od svih plemenitih gasova, ali se i na njega odnose osobine izuzetne sposobnosti migracije koje važe za ove gasove.

U poređenju sa kiseonikom, azotom i vodonikom, radon se bolje rastvara u vodi, a koeficijent rastvorljivosti je obrnuto proporcionalan temperaturi: na 37°C je 0,17, a na 0°C je čak 0,51 [22]. Od gasova najčešće prisutnih u zemljinoj kori jedino je CO_2 rastvorljiviji od radona. Zbog toga se radon često nalazi u vodama koje su glavni agensi dugog transporta ovoga gasa, naročito u podzemnim vodama, pri čemu, u posebnim uslovima tran-

sport radona ide i do više kilometara. Navedena osobina izuzetne migrativnosti omogućuje da se radon relativno lako i brzo kreće kroz stene koje se smatraju impermeabilnim za fluide, kao što je na pr. škriljac, ništa sporije nego kroz peščar, čak — izgleda — i brže. Zbog relativno kratkog poluraspada (3,8 dana) najveći domet radona u homogenim stenskim masama bio bi 10 m, iznad koga se teoretski ne može detektovati, ako bi se kretao isključivo kao gas. Na kretanje radona i drugih gasova kroz relativno čvrste stene utiču razni faktori, kao što su razlika u temperaturi i pritisku nižih i viših nivoa, otvaranje pukotina u fazama tektonskog širenja stenskih masa, difuzni pritisak gasova i dr. [11]. Koncentracija radona u rastresitom tlu zavisi isto tako od mnogo faktora, od kojih su najznačajniji promene atmosferskog pritiska, razlike temperature tla i vazduha, vlažnost, brzina vetra i dr.

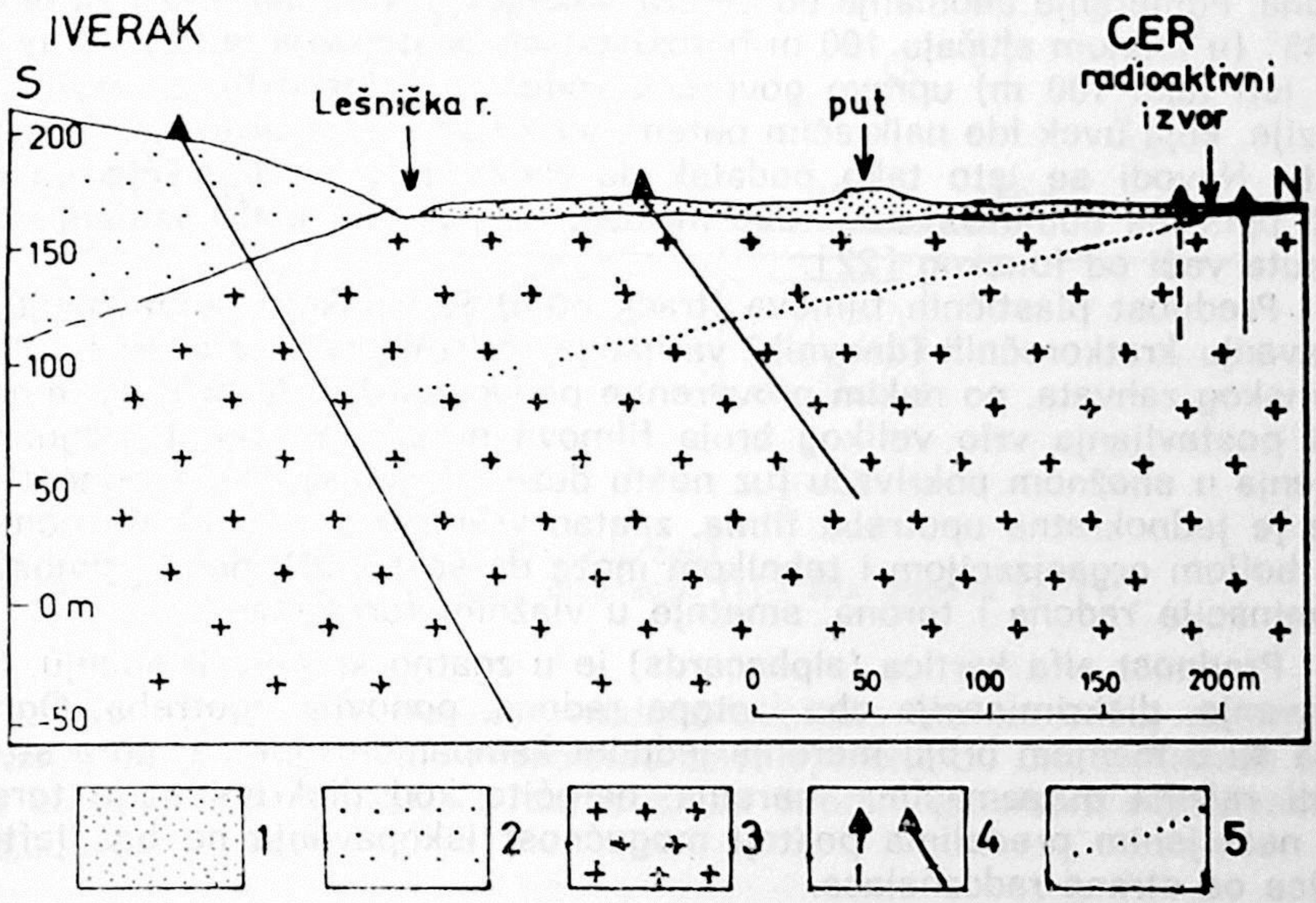
Glavni kanali dovoda radona su, obično uz druge fluide, najčešće sa podzemnim vodama, rasedne pukotine. Poznato je na pr. da pri seizmičkim aktivnostima, a naročito kod predseizmičkih napona, dolazi do otvaranja rasednih i drugih pukotina i do povećanja koncentracija radona, što je važan faktor u kratkoročnoj prognozi zemljotresa, što svakako zahteva stalno praćenje u seizmički aktivnim područjima.

Neposredan predak radona (^{222}Rn) — radijum (^{226}Ra), koji je isto tako detektabilan preko alfa zračenja, količinski obično nije proporcionalan svom potomku, zbog razlike u migrativnosti. Kao što je poznato, radijum pripada grupi zemnoalkalnih elemenata, zajedno sa kalcijumom, stroncijumom i barijumom, sa kojima, naročito sa prvim, se najčešće veže. Ovaj elemenat se isto tako obara uz hidrokside gvožđa i mangana, a koji pak rado idu uz minerale glina, što — s druge strane — ima značaj za formiranje tzv. lažnih anomalija gama radioaktivnosti kod prospekcije urana (III.2.1.3, Ocena i provera anomalija, a — 3).

Fonske koncentracije radona u tlu i vodama su uvek lokalnog karaktera i zavise najčešće od stenske podloge. Prema iskustvima radonove prospekcije u Jugoslaviji (Geoinstitut, Beograd) srednje fonske koncentracije radona u tlu kreću se od 4—40 Bq/l (za upoređenje sa starim jedinicama vidi I.3.1.). U toku prospekcionih ispitivanja izdanskih voda na području granitoidnog masiva Cera i pribrežnih tercijarnih sedimenata Iverka u SZ Srbiji početkom osamdesetih godina (S. Pokrajac) nađene su sledeće fonske vrednosti u izdanskim vodama: radon 9—11 Bq/l, radijum 0,06—0,09 Bq/l (uran 0,5 mg/t), a slični sadržaji su nađeni i u površinskim tokovima. Merenja radona vršena tokom 1982. godine na istom terenu, u vodama iz potoka, izvora i bunara kretala su se od 7,69—773,56 Bq/l (M. Jauković, 13 analiza).

Kod ocene anomalnosti sadržaja radona u vodama, osnovno je pitanje koliko je ovaj gas, prenošen podzemnim tokovima, indikator za skrivene (ekonomski značajne) koncentracije urana. Na ovo pitanje se može odmah odgovoriti: ako nisu poznati kanali za dovod, a to su po pravilu razlomne strukture, onda je odgovor kategorički negativan, pogotovo što kanal može da ima karakter teško shvatljiv kao kategorija tektonskih struktura. Kao ilustraciju treba navesti slučaj izvora (kladenca) Majur-Slatina, o kome je bilo reči u odeljku III.2.1.3 (sl. III.10). Južno od ovog izvora na oko 250 m izbušena je kosa bušotina u pravcu severa (sl. III.10b i III.19), a na 40 m

dubine presečen je podzemni tok ove izdani, pa je voda pokuljala iz bušotine, a izvor je presahnuo. Bušotina je kasnije zaptivena, a voda se vratila u kladenac. Na sl. III.19 vidi se da je na istom profilu izbušena još jedna kosa bušotina oko 200 m dalje od prve, ka jugu, koja nije izazvala bilo kakav poremećaj u količini vode iz izvora. Na taj način, podzemni kanal koji hrani izvor ide pod veoma blagim uglom ka tercijarnim sedimentima, gde se inače nalaze veće koncentracije urana, ali najmanje 1 km udaljenih od izvora. Ovde se teško može zamisliti odgovarajuća razlomna struktura tako blagog nagiba, koja bi omogućila formiranje ovog kanala, pogotovo što je kanal presečen samo u jednoj bušotini od ukupno šest, računajući i tri plitke bušotine oko samog izvora. Merenjima 1978. godine količina radona u izvoru bila je 3600 Bq/l dok je ponovnim merenjem 1982. godine radona bilo tek 774 Bq/l. Sadržaj urana je bio relativno nizak [28].



Sl. III.19.
Geološki profil u domenu radioaktivnog izvora Majur-Slatina.
1. Aluvijalni nanos, 2. miocenski klastiti, 3. granitoidi, 4. bušotine, 5. dovodni kanal za vodu izvora (A. A n t o n o v i ć).

Radonova metoda ili emanometrija je najbrža i najjeftinija od ostalih, ali na terenima sa relativno tankim (do 0,5 m), a pogotovo nekontinualnim pokrivačem, ona daje praktično iste rezultate kao i gama radiometrija. Efekat emanometrije je veći na blago razuđenim terenima sa manje-više kontinualnim pokrivačem 2—5 m, pri čemu treba imati u vidu da je granični fon detekcije radona najčešće 5 Bq/l.

Prospekcione metode određivanja koncentracije radona preko direktnog merenja alfa zračenja na mestu imaju prednosti nad emanometrijom u smislu bolje detektabilnosti radona. Ono što je zajedničko za varijacije ove metodologije jeste mogućnost detektovanja ekonomski značajnih

koncentracija urana na neuporedivo većim dubinama od radonove metode, tako da se u literaturi navode čak dometi od 200 m, dok se dubine od 50—100 m smatraju optimalnim. Ovaj na izgled paradoksalni fenomen, s obzirom na pomenuti krajnji mogući domet radona na granici detektabilnosti od 10 m, ima svoga objašnjenja, koje se sastoji u sledećem. Pre svega, nije radon kao takav isključivi faktor transporta, već su to minimalne količine urana, koje su se od nekog ležišta u dubini popele vertikalnim transportom vode, bilo procesima sezonskih varijacija (lateritizacija, kalkretizacija i sl.) ili uobičajenim uzgonima usled razlike u uslovima PT, duž raznih razlomnih struktura. Pripovršinske minimalne koncentracije urana nisu dovoljne da daju radonove ili gama radiometrijske anomalije, ali zato dugotrajnim, čak višenedeljnim izlaganjem detektora, uticaj radonovog alfa zračenja zadobija znatno veću kontrasnost u odnosu na fonski nivo. Ovde je isto tako moguć i vodeni transport samog radona, koji je brži od difuzije radona. Pomeranje anomalija od centra orudnjenja u dubini, čak i za naklon od 45° (u jednom slučaju 100 m horizontalnog odstupanja od ležišta na dubini isti tako 100 m) upravo govore o vodenom transportu, za razliku od difuzije, koja uvek ide najkraćim putem, jer ne zavisi od strukturnih pogodnosti. Navodi se isto tako podatak da rudno telo sa sadržajem urana 2000 ppm, na dubini od 150—200 m, daje na površini u tlu sadržaj urana tri puta veći od fonskog [22].

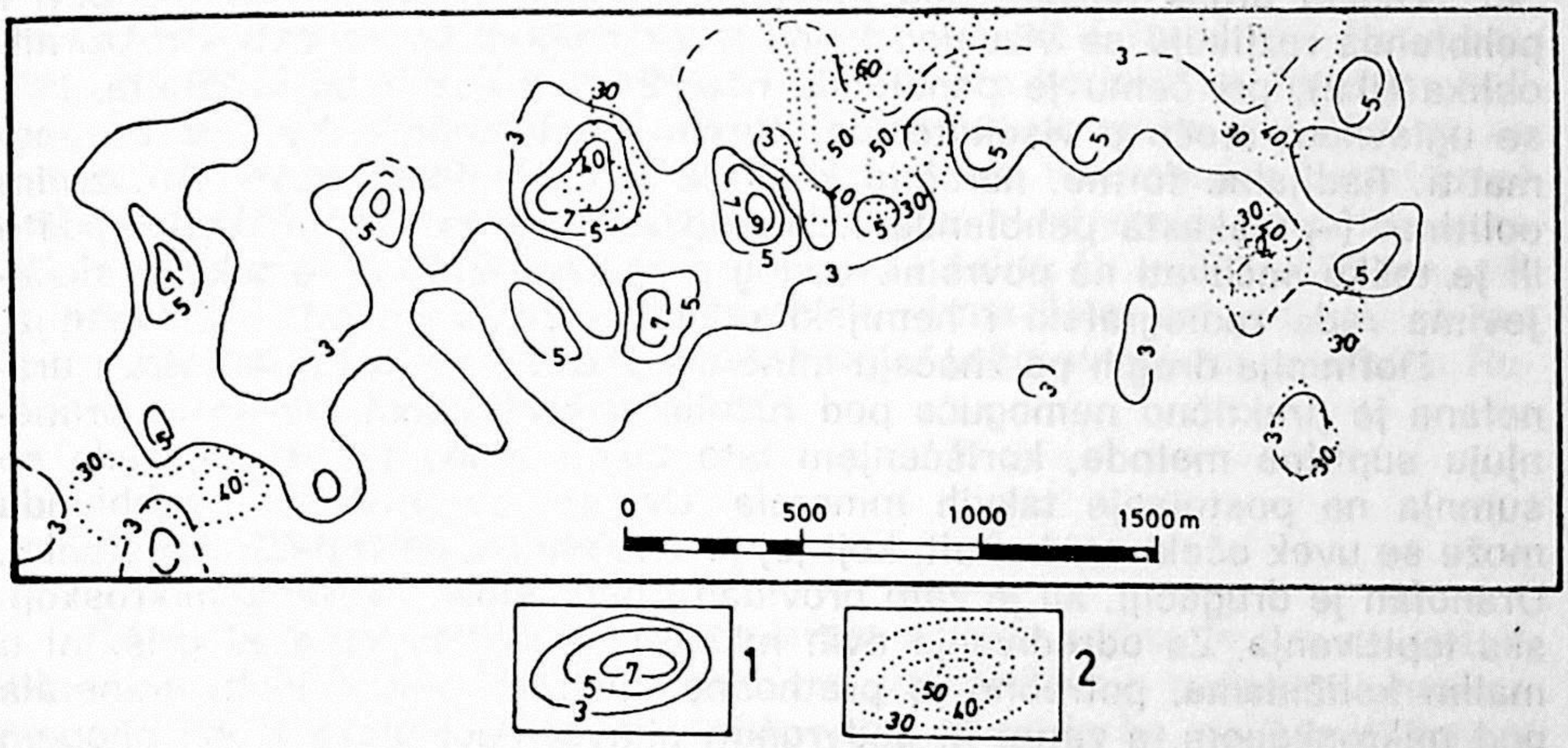
Prednost plastičnih filmova (track etch) je u lakom postavljanju, izbegavanju kratkoročnih (dnevnih) varijacija sadržaja radona u tlu i velikog dubinskog zahvata, po nekim proverenim podacima do 130 m [32], mogućnost postavljanja vrlo velikog broja filmova odjednom, kao i mogućnost merenja u snežnom pokrivaču (uz nešto duže izlaganje). Nepogodnost metode je jednokratna upotreba filma, znatan vremenski razmak do očitanja (što boljom organizacijom i tehnikom može da se skrati), nemogućnost diskriminacije radona i torona, smetnje u vlažnim terenima.

Prednost alfa kartica (alphacards) je u znatno kraćem izlaganju, lako očitavanje, diskriminacija oba izotopa radona, ponovna upotreba. Ograničenja su u manjem broju merenja jednom kampanjom, jer se mora strogo voditi računa o razmacima merenja, naročito kod diskriminacije torona, a u naseljenim predelima postoji mogućnost iskopavanja ne baš jeftinih kartica od strane radoznalaca.

Prednost upotrebe alfametra je u direktnom i promptnom očitavanju intenziteta zračenja i velikoj osetljivosti, a glavna nepogodnost je visoka cena, zbog čega se unapred mora obezbediti vrlo veliki obim merenja radi amortizacije investicije. Kraća ekspozicija (2—3 sata) verovatno ograničava dubinu zahvata, mada nedostaju podaci o upoređivanju rezultata sva četiri vida ispitivanja (trek eč, alfametrija, alfa kartice, emanometrija).

Upoređivanje metoda emanometrije i plastičnih filmova (track etch) vršeno je na dve lokalnosti u SAD [11]. Jedna od tih je Grant Mineral Belt u državi Novi Meksiko, gde orudnjenje u vidu sloja u peščarima, debljine 3 m, sa 0,34% U_3O_8, na dubini od 100 m, daje anomaliju alfa tragova tri puta veću od fona. Veoma iscrpna eksperimentalna merenja vršena su na drugoj lokalnosti, Front Range (Front Rendž) u državi Kolorado, gde se nalazi bogato žično orudnjenje urana u eksploataciji, sa sadržajem urana 0,7%. Ove uranonosne žice pokrivene su debelim koluvijalnim pokrivačem, tako da gama radiometrija, kako iz vazduha tako i na zemlji nije dala ni-

kakve indicije orudnjenja. Tu je zatim vršena geohemijska prospekcija tla uz biogeohemijska i geobotanička ispitivanja, geohemija SO_3, emanometrija i prospekcija alfa tragova (track etch). Od svih metoda jedino su zadnje dve pokazale bilo kakve indicije koje bi odgovarale orudnjenjima urana ispod pokrivača, s tim što je metoda alfa tragova bila neuporedivo indikativnija (sl. III.20).



Sl. III.20.
Područje rudnika urana Front Range (Colorado).
Uporedni pregled merenja metodom emanacije (1) i alfa tragova (2) [11].

Novi trendovi u detekciji radona svakako idu ka većoj osetljivosti uređaja, pa je firma Pylon Electronic Development Co Ltd iz Kanade ponudila emanometar PMT-EL sa fantastičnom donjom granicom osetljivosti od ~ 0,005 Bq/l [45].

III.3. MINERALOŠKE I HEMIJSKE METODE

Ovde se radi prvenstveno o laboratorijskim detekcionim metodama za uran izvan radiometrijskih metoda. One se, u osnovi, mogu podeliti na dve grane, mineraloškU i hemijsku, mada se delimično preklapaju, pa su prikazane i jednom poglavlju.

III.3.1. Mineraloške metode

Ove metode odnose se na određivanje uranovih minerala laboratorijskim putem, mada ima načina da se određeni uranovi minerali masovno detektuju na terenu (fluorescencija), o čemu će biti reči u daljem tekstu. Za ova ispitivanja primenjuju se uglavnom konvencionalne mineraloške me-

tode, kao što su rudna mikroskopija, mikroprob-fluorescentna i mineraloška analiza, a u manjoj meri i neke specifične metode.

Rudnomikroskopska ispitivanja uranovih minerala opisana su u odgovarajućim priručnicima za ovu metodu i ovde će biti reči samo o nekim specifičnostima, koje treba pobliže razmotriti. Interesantno je, pre svega, da najznačajniji rudni mineral urana nije dovoljno jasno definisan, bar što se tiče njegovih varijeteta — oksida.

Oksidi urana poznati pod imenima uraninit (nasturan, na ruskom) i pehblenda razlikuju se vizuelno i pod mikroskopom na osnovu strukturnih oblika (II.2), pri čemu je pehblenda neuporedivo češća od uraninita, koji se uglavnom sreće u visokotemperaturnim orudnjenjima, kao što su pegmatiti. Radijalne forme, naročito kada se radi o mikroskopski sitnozrnim oolitima (»praškasta pehblenda«), znatno su teže za identifikaciju, pošto ih je teško sačuvati na površini rudnog preparata. Zato se u takvim slučajevima rade radiografski i hemijski otisci, o čemu će biti reči kasnije.

Definicija drugih po značaju minerala urana — silikata kofinita i uranofana je praktično nemoguća pod rudnim mikroskopom, pa se tu primenjuju suptilne metode, korišćenjem isto tako rudnog preparata, kada se sumnja na postojanje takvih minerala. Ustvari, uz praškastu pehblendu može se uvek očekivati kofinit, koji joj je vrlo sličan, po izgledu i postanku. Uranofan je drugačiji, ali je zato providan i nepodoban za rudno-mikroskopska ispitivanja. Za određivanje ovih minerala, naročito kada su prisutni u malim količinama, potrebno je prethodno iniciranje »sumnjivih« minerala pod mikroskopom, a zatim ih podvrgnuti aktivacionoj metodi pod snopom elektrona ili rentgenskih zraka (»mikroprob«). Ako se ovi minerali mogu izdvojiti u čistom stanju, dovoljnom za hemijsku analizu, identifikacija je sasvim pouzdana, mada se to može retko ostvariti.

Kada se sumnja na postojanje uranovih minerala bilo u ridnom preparatu ili na bilo kojoj ravnijoj površini odlomljenog primerka, tačne lokalizacije mogu se vršiti radiografskim i hemijskim otiscima.

Radiografski otisak dobija se izlaganjem fotografske emulzije celokupnom zračenju. Za radiografiju je potrebna potpuno ravna površina, kao što je rudni preparat. Prvo se preparat pritisne uz emulziju (na crnoj podlozi), a zatim se vrši kratko osvetljavanje da bi se dobila kontura preparata, što omogućava lakšu lokalizaciju radioaktivnih partija. Kada se koristi običan fotografski film izlaganje je vrlo dugo, obično mesec dana (dužina se približno određuje na osnovu prethodnog merenja radioaktivnosti površine preparata), a kada se upotrebi rentgenski film vreme izlaganja je znatno kraće.

Hemijski otisak se vrši bilo na fotopapiru (prethodno aktiviranom u fiksiru) ili na običnom belom papiru. Papir se prethodno namoči azotnom kiselinom (20% HNO_3), pa se površina koja se ispituje prisloni uz papir i drži pritisnuta najviše do 30 sekundi. Na papir se zatim deluje rastvorom kalijum fero cijanida (5% $K_4Fe(CN)_6$). Uran, koji je prenet na papir, oboji se izrazitom smeđom bojom (nešto tamnija »sijena«), dok se gvožđe, kao najčešće prisutan metal, obično kao pirit, oboji jasno plavom bojom (»pariska plava«). Bakar, koji isto tako može biti prisutan, daje ružičastu boju.

Prednost radiografskog otiska je u tome što identifikuje svaki radioaktivni mineral, dok se hemijskim otiskom registruje uglavnom pehblenda i to ona praškasta, koja se najlakše rastvara. Radiografski otisak međutim

zahteva mnogo vremena, posebne kasete zaštićene od svetlosti, pa i posebne razvijače ukoliko se dobavi rentgenski film, nasuprot hemijskom otisku, koji se dobija za par minuta, uz malo pažnje zbog rada sa kiselinom.

Obojeni sekundardni minerali se mogu identifikovati vizuelno prema boji i drugim fizičkim osobinama, što se naročito odnosi na autunit (intenzivno limun-žute liske) i torbernit (jarkozeleni kristalići). Za najčešće bojene sekundarne minerale urana, karnotit i tjujamunit, koji se obično intenzivno žute do narandžaste boje, karakteristična je hemijska odredba vanadijuma. Mnogi uranovi minerali (naročito autunit i torbernit) fluoresciraju pod dejstvom ultraljubičastih zraka, koji se koriste sa filterom radi eliminacije vidljivog dela spektra (koji se sasvim ne može prigušiti, pa se obično vidi slaba ljubičasta svetlost). Portabilnom lampom (sa baterijama) može se vršiti noćna prospekcija fluorescentnih minerala, naročito autunita (λ = 400—500 nm, pik na 405 nm), kao i šelita (λ = 500—550 nm, pik na 525 nm), zatim i nekih drugih minerala. Firma Scintrex nudi portabilnu lampu Luminex LG-2, a UV lampu proizvodi i Laboratorija za geofiziku Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu.

III.3.2. Hemijske metode

Pod hemijskim metodama u najširem smislu podrazumeva se detekcija urana praktično na sve ostale načine, uz korišćenje razlaganja materijala, gde se ne koriste efekti radioaktivnosti. Ovde treba razlikovati pojam g e o h e m i j s k e m e t o d e koji se ne odnosi na vidove detekcije, već na način traganja (prospekciju). O metodama geohemijske prospekcije biće reči kasnije.

Hemijska analiza urana vrši se kako na čvrstim matenijalima (stene, ruda, muljeviti talozi i dr.) tako i u vodama, a podrazumeva tri faze kod čvrstih proba odnosno dve faze kod proba voda. Prva faza se sastoji u razlaganju čvrste probe i prevođenju u rastvor, druga faza podrazumeva pripremu i specifičnu obradu rastvora odnosno suvog ostatka, a treća faza uključuje merenje na fluorimetru, po čemu se metoda naziva fluorimetrijska (metodu je razvio i uveo u svetsku praksu P. S a v i ć, poznati jugoslovenski naučnik — fizikohemičar).

Prevođenje čvrstog uzorka u rastvor vrši se potpunim razlaganjem kiselinskim postupkom, sa smešama koncentrovanih kiselina, obično HNO_3 i HCl, kao i za sve druge analize, uključivši i drugih elemenata (Cu, Pb, Zn, Mo i dr.) primenom adekvatnih metoda (atomska apsorpcija i sl.). Ovde se razlikuju postupci za analizu visokosadržajnih proba ruda, sa sadržajima urana na pr. iznad 100 g/t, od tzv. geohemijskih proba, gde su najčešći sadržaji urana ispod 10 g/t.

Kod visokosadržajnih proba rastvor se uparava i suvi ostatak žari u platinskom čančiću određenog oblika, uvek istih dimenzija za sve analize. Posle hlađenja dodaje se određena doza posebnog karbonatsko-fluoritskog topitelja (obično 3 g), pa se smeša ponovo žari do potpunog topljenja (650°C). Na taj način se dobijaju pastile uvek istog oblika, koje se dalje tretiraju na fluorimetru.

Kod geohemijskih proba, postupak sa rastvorom je drugačiji zbog neophodnosti da se uklone primese teških metala koji guše ionako sla-

bašnu fluorescenciju malih koncentracija urana, a koje se ujedno ovim postupkom povećavaju. To se vrši preko hromatografskog papira (vrsta filterskog papira) i posebnog ekstraktora (tributil fosfat), koji u vertikalno postavljenom odresku papira, zamočenom donjim krajem u rastvor, selektivno raspoređuje pojedine sastojke na taj način što se na vrhu nađe samo uran. Ovaj deo papira se otseca, suši, sagoreva i žari, a zatim je postupak isti kao i kod prethodnih proba, do finalne pastile.

Probe voda se prethodno koncentrišu uparavanjem na taj način što se prema sredini vertikalno postavljenog hromatografskog papira postavi izvor infracrvenog zračenja (horizontalni grejni štap uz seriju proba) tako da kroz papir prođe znatno više vode nego obično. Dalji postupak je isti kao kod prethodnih proba.

Samo analiziranje vrši se u florimetru pobuđivanjem fotonske emisije bilo ultraljubičastim svetlosnim izvorom u vidu cevne živine lampe (sa filterom) ili preko laserskih impulsa male talasne dužine. Merenje intenziteta pobuđene emisije vrši se na isti način kao kod scintilacionih radiometara (gama i alfa zračenja) uz pomoć fotomultiplikatora, koji daje merljivi tok struje. Baždarenje očitavanja vrši se preko etalona sa poznatim koncentracijama (pripremljenog na isti način kao i ostale probe), a očitavanje koncentracije probe vrši se prema jednostavnoj formuli $S=xN/E$, gde je x konstanta očitanja, N — očitanje uzorka, a E — očitanje etalona. Ako se uračuna i vrednost očitanja čistog papira B (fon), onda imamo konačnu formulu $S=x(N—B)/E$.

Ovde su date samo osnovne operacije postupka, neophodne za razumevanje i ocenu prednosti i nedostatka ovakve analize, dok se za detalje valja obratiti specijalizovanijoj literaturi i priručnicima [35].

Ovaj postupak se sastoji, kao što se vidi, iz mnogobrojnih operacija, pa je potrebna maksimalna pažnja, naročito pri velikim serijama, što se inače uvek radi, da bi se održali isti uslovi. Ovo se posebno odnosi na geohemijske probe, čvrstih uzoraka i vode, gde postoje dodatne, osetljive operacije odstranjenja gasioca i pretkoncentracije, koje nisu uvek precizno kvantifikacione. Zato se preporučuje da se istovremeno vrši dvostruko analiziranje jedne iste probe, s tim što se kod razlika od preko 20% analiza ponavlja.

III.3.3. Druge metode određivanja sadržaja urana

Najveća odstupanja u određivanju sadržaja urana javljaju se, kako je izneto u prethodnom poglavlju, kod proba sa minimalnim sadržajem, zbog složenosti operacija i raznih smetnji. Zato se uvek tragalo za novim jednostavnijim i osetljivijim metodama, nasuprot uveliko primenjivanim radiometrijskim i hemijskim analizama, naročito za geohemijske probe. Posebnu pažnju zaslužuju dve metode, čiji su principi odranije poznati, a čije je uvođenje u praksu zavisilo od rešavanja nekih tehničkih problema. Te metode su neutronska aktivacija i rentgenska fluorescencija (tzv. mikroprob analiza) o kojoj je bilo reči ranije, kod mineraloških analiza.

Neutronska aktivacija, koja se naziva i tehnika tragova fisije, najosetljivija je od svih ostalih metoda, pošto je na pr. za analizu vode dovoljna samo jedna kap i jedna operacija merenja, uz mnogo veću tačnost određi-

vanja sadržaja. Analiza se vrši na taj način što se kap vode upari, pa se suvi ostatak, praktično nevidljiva prevlaka, izloži u nuklearnom reaktoru dejstvu (termalnih) neutrona. Proba se zatim dovodi u kontakt sa filmom sličnim (ili istim) kao za merenje alfa tragova (metoda track etch), tako da neutronski fluks iz ^{235}U u probi, pobuđen neutronskim bombardovanjem u reaktoru, ostavlja tragove isto kao i alfa čestice, koji se zatim broje. Za dobijanje koncentracije urana daje se i formula za izračunavanje [38]:

$$C = \frac{T \cdot M}{N_A \cdot V \cdot \delta_f \cdot \Phi \cdot E}$$

gde je T — ukupan broj tragova, M — masa urana (238), N_A — avogadrov broj ($6{,}02 \times 10^{23}$), V — zapremina kapljice (25 μl), δ_f — presek urana za fisiju ($4{,}2 \times 10^{-24}$ cm^2), φ — doza neutrona (5×10^{16} neutrona/cm^2) i E — efikasnost registrovanja, nagrizanja i brojanja tragova. Donja granica detektabilnosti urana pri tim uslovima je 10^{-8} g/l ili 10 μg/l, a veća osetljivost se može postići većom količinom (kapljicom) vode.

Nepodobnost ove inače izvanredno tačne metode je zavisnost od reaktora, što je ponekad skopčano sa velikim gubitkom vremena, bilo zbog udaljenosti terena ili zbog režima rada reaktora, zauzetosti i dr. Ovaj problem je u zadnje vreme sa uspehom rešen upotrebom nuklida kalifornijuma 252 (^{252}Cf), u kome se vrši spontana fisija, zbog čega odaje snažan fluks brzih neutrona (1 mg daje $2{,}43 \times 10^9$ n/s). Na taj način dovoljna je količina od 0,1—0,5 mg ovog nuklida za obavljanje funkcije reaktora (ista količina se koristi i kod karotaža bušotina, s tim što se registrovanje vrši direktno, odgovarajućim brojačem). Teškoća je međutim kako u visokoj ceni ^{252}Cf (1 milion US dolara za 0,1 g [18]), a zatim, najviše, zbog ograničenja proizvođača (u prvom redu SAD), imajući u vidu sasvim realne mogućnosti upotrebe ovog radionuklida za proizvodnju atomskog oružja. Izvesna nepodobnost ovog izvora neutrona je i relativno kratak poluživot od svega 3,6 godine. U SSSR postoji komercijalna ponuda (iz 1983. godine) za gama karotažni uređaj na bazi kalifornijuma, tipa IKN-3 do IKN-6, ali se kao primena navodi bušenje za fluorit, fosfate, boksit i sl. (»Rudogeofizika« pri Ministerstvu geologii SSSR).

Metoda rentgenske-fluorescentne analize zahteva čvrstu probu od samo 5 g, usitnjenu na —100 meša. Osetljivost zavisi od brzine merenja, tako da je za 2 sekunde merenja donja granica sadržaja urana 14 g/t, za 20 s — 4,3 g/t, 100 s — 1,9 g/t, 400 s — 1,0 g/t i 1000 s (17 min.) — 0,6 g/t [15].

III.4. GEOHEMIJSKA PROSPEKCIJA URANA

Ovaj vid prospekcije zasnovan je kako na hemijskoj tako i na radiometrijskoj (alfa) detekciji radionuklida i to ^{238}U, ^{226}Ra i ^{222}Rn od uranovog niza, kao i ^{220}Rn (toron) od torijumovog niza. Ova metoda ne može se isto tako izdvajati kako od radiometrijskih vidova prospekcije, uključivši i gama radiometriju, tako i od geohemijskih ispitivanja drugih elemenata, ali ni

od drugih konvencionalnih prospekcionih metoda (daljinske detekcije, primenjene geofizike).

Geohemijska prospekcija urana, kao i drugih elemenata, podrazumeva istraživanje oreola rasejavanja — gasnih, vodenih i mehaničkih. Pošto je o ispitivanju gasnih oreola (radona) bilo reči u prethodnom poglavlju, dalje izlaganje odnosi se na ispitivanje prvenstveno vodenih oreola rasejavanja.

Ovaj način prospekcije urana odnosi se najvećim delom na traganje preko površinskih, tekućih i stajaćih, kao i izdanskih voda. Pored urana, radijuma i radona, obično se određuju i drugi elementi odnosno anjoni i katjoni, zatim i drugi pokazatelji (pH, Eh, elektroprovodnost, tvrdoća i sl.). Uz vode značajnu, zapravo ravnopravnu ulogu imaju finozrni (muljeviti, glinoviti) talozi u pomenutim vodenim sredinama, kao dugotrajniji i intenzivniji absorbenti urana i drugih pratećih metala, na pr. Pb, Zn, Cu, Mo i dr.

III.4.1. Hidrogeohemijska prospekcija urana

Ovaj vid prospekcije često se izvodi paralelno sa gamaradiometrijskom prospekcijom iz vazduha sa kojom daje komplementarne rezultate, a polazi u osnovi od osobine urana da ostaje dugo rastvoren u običnim, neutralnim vodama (pH = 6,5—7). To navodi na pretpostavku da površinske i izdanske vode mogu da nose oreole povećanih sadržaja urana, koji se mogu pratiti i dovesti barem do područja sa potencijalnim orudnjenjima urana, ako ne i do samih ležišta.

Uranohidrogeohemijska prospekcija je posebno primenjiva na velikim prostranstvima pokrivenim jezerima i baruštinama, gde se, po pravilu, ne mogu očekivati bolji rezultati od gamaradiometrije (spektrometrije) iz vazduha. Često puta, ovakve prostrane, slabo naseljene ili nenaseljene teritorije mogu imati debele fluvioglacijalne (u severnim zemljama) ili lateritske (u tropskim područjima) pokrivače, koji isto tako predstavljaju neprobojne ekrane gama zračenju.

Mnogobrojni eksperimenti i iskustva su pokazala da je, pored mnogobrojnih pratećih komponenti (elemenata, jedinjenja i gasova), uran sam po sebi najbolji prospekcioni kriterijum.

Prospekcija ovako regionalnih razmera danas je uveliko prevaziđena u većini evropskih zemalja, naročito u onim sa razuđenijim reljefom, gde je gama-radiometrija, pogotovo gama-spektrometrija iz vazduha dala mnogo konkretnije rezultate. Ovde je međutim još uvek primenjiva poludetaljna uranohidrogeohemijska prospekcija, sa određivanjem samo urana (eventualno radona i radijuma) u vodama i muljevitim talozima, naročito u uslovima prostranijih površina pokrivenih humusom i vegetacijom.

U **Kanadi** je sedamdesetih godina sproveden program rekognosciranja urana (Uranium Reconnaissance Program) aero-gama i geohemijskim metodama u okviru nacionalnog programa geohemijskog rekognosciranja [1]. Mreža oprobavanja nije bila pravilna i fiksna i zavisila je od karaktera probe. Utvrđeno je na pr. da su sedimenti u centru jezera najhomogeniji i reprezentuju sadržaj urana u celom jezerskom basenu (radi se o malim jezerima, površine obično 3—4 km²). Na taj način odstojanje između ovih

proba iznosilo je 2—5 km ili, srednje, jedna proba na 10—15 km² (5 kvadratnih milja). Ova gustina se isto tako odnosi na uran u vodama jezera. Za rečne tokove (vode i sedimenti) gustina proba je veća, dok je za prospekciju urana i pratećih elemenata u tlu vršena u poludetaljnim razmerama, oko 150—200 m, što bi na pr. za jugoslovenske prilike još uvek imalo regionalan karakter. Radon se smatra manje stabilnim pokazateljem, pa je i gustina proba morala biti veća. Analizirani su i prateći elementi u vodi, sedimentima i tlu, sa istom gustinom kao i za uran. Rezultati regionalne prospekcije prikazivani su sa odgovarajućim grafičkim simbolima na kartama razmere 1:250.000, dok je na preglednim kartama razmere 1:1,000.000 kretanje sadržaja prikazano izolinijama. Tokom 1972, 1974 i 1975. godine ovom prospekcijom pokriveno je oko 200.000 km² i konstatovano je da se oko 80% anomalija poklapa sa aeroradiometrijskim. Pre i tokom ove prospekcije vršena su obimna izučavanja ponašanja urana i pratećih elemenata, naročito u jezerskim vodama i sedimentima.

U **Jugoslaviji** hidrogeohemijska prospekcija bila je sastavni deo regionalne prospekcije urana, uporedo sa aerogama radiometrijom, ali je isto tako i samostalno izvođena, mada najčešće na terenima koji su ranije bili pokriveni aerogama merenjima. Ova prospekcija (S. Konjević, S. Pokrajac) je po pravilu obuhvatala izdanske vode, podrazumevajući analize proba voda i muljevitog taloga u izvorima. Metodologija je obuhvatala veliki broj analiza po probi, a gustina tačaka je svakako bila dirigovana postojećim izvorima ili drugim vidovima izdani, s tim što je gustina bila veća na topografski razuđenim terenima, a manja u ravničarskim predelima, gde su često dominirali bunari. U svakom slučaju gustina se kretala 1—5 proba na 1 km².

U vodama su analizirani, pored urana, radijuma i radona, još sadržaji Ca, Mg, Na, K, Si, zatim anjoni HCO_3, SO_4 i Cl, kao i gasovi CO_2, O_2 i H_2S, uglavnom postupkom tzv. skraćenih analiza. Pored ovih utvrđivani su tvrdoća i elektroprovodljivost vode, kao i pH i Eh. Količina probe za sve ove analize iznosi obično dva litra, a kao ambalaža služe plastične (polietilenske) boce koje se održavaju čiste po uobičajenom postupku, s tim što se pre uzimanja uzoka obavezno isplaknu istom vodom. Boce se pune do samog vrha, po mogućnosti bez vazdušnog mehura. Zbog analiza radona neophodno je zapisivati tačno vreme uzimanja proba, a ne treba posebno isticati da se ove analize moraju vršiti blagovremeno, vodeći računa o kratkom polursapadu radona. Detalji ovih postupaka nalaze se u podrobnijim uputstvima, posebno u sovjetskoj literaturi [13].

Probe muljevitih taloga (sedimenata) obično iznose par stotina grama i uzimaju se i drže u običnim plastičnim kesicama. Proba treba da sadrži što više finozrne komponente, koja se kasnijim sušenjem i prosejavanjem jedino analizira. U ovim talozima analizirani su, pored urana još i Pb, Zn, Cu, Mo, V i S. Pored ovih taloga, kao čvrste probe uzimaju se reprezentativni tipovi stena, po jednoj neobaveznoj retkoj mreži (jedan uzorak na 5—10 km² ili ređe) u kojima se određuju sadržaji U, Th i K (radiometrijska analiza U, Th i K), da bi se dobila predstava o opštem stenskom fonu. Ovaj podatak je bio neophodan i u vreme kada je vršena aerogama-radiometrijska prospekcija ukupnog gama zračenja.

Rezultati hidrogeohemijske prospekcije urana prikazivani su na kartama razmere 1:50.000 u vidu kružnih grafičkih simbola, podeljenih na četiri

dela, sa posebnim oleatama za svaku osnovnu komponentu. Simboli označavaju koeficijent anomalnosti (sadržaj/fon), izdvojeni u 6 gradacija, prvo prema kvadrantima, tako da puni krug čini najveće anomalne sadržaje, zatim sve manje — 3/4, 1/2 i 1/4 kruga, pa prazan krug i najzad tačka, koja označava fonski sadržaj.

U okviru detekcije urana nije neophodno da na svakoj tački vode budu tako svestrano analizirane. S druge strane, koncentracije urana u tekućim vodama su veoma promenljive u zavisnosti od klimatskih varijacija (sezonske padavine), što sa potočnim sedimentima ipak nije slučaj. Stoga bi u jugoslovenskim uslovima glavni vid uranohidrohemijske prospekcije trebalo da bude određivanje urana (pa i nekih glavnih pratećih elemenata) u ovim sedimentima.

Na nekim uranonosnim područjima u Jugoslaviji vršen je i program uže, specijalizovanije prospekcije u poludetaljnim razmerama, gde je vršeno analiziranje tekućih voda i muljevitih taloga uglavnom samo na uran, što je imalo karakter direktnog traganja za povećanim koncentracijama urana. Kao primer može se uzeti obod granitoida Cera (neki detalji prikazani na sl. III.10 i III.19), gde je uzeto 60 proba voda i taloga iz svakog potoka, koji teku uglavnom paralelno, na međuodstojanju od 0,5—1 km. U vodama potoka, naročito sa Iverka, koji se ulivaju u rečicu Lešnicu, određivan je uran, zatim električna provodljivost, pH i Eh, a u talozima samo uran. Fonski sadržaj urana u vodama iznosio je 1,2 mg/l, za razliku od rezultata regionalne hidrogeohemijske prospekcije izdani na istom području, kada je fonski sadržaj urana bio 0,45 mg/l. Sadržaj urana u talozima kretao se uglavnom 1,5—3 g/t. Jedini izrazito anomalni sadržaj urana od 22 mg/l u vodi i 55 g/l u odgovarajućem sedimentu nađen je u jednom potoku (Ravni potok) koji drenira jednu poznatu lokalnost slabijeg uranovog orudnjenja (oko 300 g/t), a koja je otkrivena pešačkom gama-radiometrijskom prospekcijom.

III.4.2. Mehanički oreoli rasejavanja urana

Ispitivanje mehaničkih oreola rasejavanja urana spada u konvencionalne geohemijske metode kao i za sve druge elemente. Potočni i drugi muljeviti talozi, kao svojevrsni mehanički oreoli, prikazani su u prethodnom odeljku. Primarni oreoli urana (u stenama) mogu se identifikovati uglavnom gama radiometrijskim merenjima, pogotovo gama spektrometrijom. Zato se u okviru ovih ispitivanja mogu uzeti u obzir uglavnom sekundarni mehanički oreoli (u tlu) i to kao vid detaljne prospekcije, zajedno sa drugim pratećim elementima (metalometrija). Razmere mreže i gustina uzoraka su kao i kod ostalih vidova prospekcije, (gama radiometrija, emanometrija i dr.).

III.5. OSTALE METODE ISTRAŽIVANJA URANA

Ovde se podrazumevaju najraznovrsnije metode, bilo direktne, kao što je helijumova, kao proizvoda nuklearnog raspada urana (isto kao i radon) ili mnoge indirektne metode, kao što su daljinska detekcija ili razne geofizičke metode, koje se koriste za mnoge druge svrhe.

III.5.1. Helijumova metoda

Kao što je poznato, alfa zračenje čine jezgra atoma ^4He, koji se prihvatanjem dva elektrona pretvara u gas helijum, a koji bi, budući da je stabilan, za razliku od radona, trebalo da bude izvrstan indikator uranovih orudnjenja. Teškoća je jedino u načinu analiziranja koje je znatno suptilnije i skuplje od detektovanja radona. Za razliku od radona, u obzir je dolazila samo laboratorijska analiza helijuma u uzorcima vode. Glavni problem predstavlja poznata osobina helijuma da relativno lako difundira kroz zidove staklenih i plastičnih sudova. Analiza se inače vrši putem masene spektrometrije.

Pored urana, helijum je indikator za ležišta nafte i gasa, rezervoara podzemnih običnih i termalnih voda, zatim — slično radonu — služi kao prognostički faktor zemljotresa, a odgovarajući izotopski odnosi koriste se za određivanje apsolutne starosti akvifera.

Danas postoje veoma efikasni uređaji za brze analize helijuma u vazduhu. Tako na pr. poznata kompanija Alphanuclear ima na tržištu minijaturizovan maseni spektrometar, na bazi sličnog uređaja koji je NASA koristila za analizu vanzemaljskih atmosfera — model »1000 Hexagon«, sa donjom granicom osetljivosti 0,001 ppm ^4He [14, 1985]. Sadržaj helijuma u atmosferi iznosi 5,24 ppm.

U SAD su vršeni eksperimenti uporedne primene određivanja radona (metodom alfa tragova) i helijuma u tlu na terenima sa poznatim orudnjenjima urana [26]. Ovaj vrlo instruktivan eksperiment na tri različite lokalnosti različitih sredina i tipova orudnjenja (Copper Mountain u granitima, Spokane Mountain u metamorfitima i Red Desert u peščarima, tipa roll front) u poludetaljnim (probe na 30—100 m) i regionalnim (mreža 350 m) razmerama, pokazao je da nije bilo bitnih razlika u detektovanju »slepih« rudnih tela između obe primenjene metode.

III.5.2. Daljinska detekcija

Pod daljinskom detekcijom podrazumevaju se metode osmatranja sa većih ili manjih visina, pri čemu se sa osmatranim objektom uspostavlja kontakt preko elektromagnetnih talasa počev od optičkog (vidljiva svetlost) područja do infracrvenog pa i milimetarskog radiotalasnog (radarskog) područja. Po tome se ova metoda jedino razlikuje od drugih opservacija iz letilica, kao što su gama radiometrija, magnetometrija i sl. koje se isto tako mogu smatrati daljinskom detekcijom sensu lato.

Daljinska detekcija je inače široko primenjena metoda ne samo u istraživanju raznih mineralnih sirovina, već i bioloških resursa, u ekološkim i mnogim drugim ispitivanjima. Opažanja se vrše sa dva osnovna nivoa odnosno u dve razmere, jedan je orbitalni (veštački sateliti, kao što je poznati LANDSAT), putem skanograma, a drugi je aerofogrametrijski (fotogrami). Orbitalna detekcija se razlikuje od fotogrametrijske i po tome što se skaniranje vrši u različitim spektralnim opsezima, što daje znatno veće mogućnosti kontrasta.

Što se urana tiče, postoje dva fenomena koja bi mogla da ukazuju na njegove koncentracije: jedan je hematitizacija (»ocrvenjavanje«) kao po-

seban vid alteracije kod hidrotermalnih orudnjenja, a drugi je povećanje temperature iznad rudnih tela [25]. U prvom slučaju crvena boja nije konstantna, s jedne strane, a postoje i crvene stene ili ocrvenjavanje izazvano drugim fenomenima. U drugom slučaju mora da postoji ravnomeran toplotni fon (stabilne, relativno suve klimatske prilike), tako da se mogu opažati ovlažene zone u domenu raseda, zatim se mogu razlikovati porozne stene, na pr. peščari u odnosu na glince i sl. Posebno se preporučuje tehnika kontrastnih (potenciranih) boja, gde se jasnije uočavaju temperaturnije razlike tla. Ovo su ipak alternativne indikacije preko drugih fenomena, koji ne moraju da ukazuju na uran. Crno-bele fotografije mogu se koristiti, pored uveliko poznate primene za strukturnu analizu, još i za otkrivanje izdanaka izbeljenih stena (granitoida i vulkanita) kao indirektnog pokazatelja, naročito na humusom pokrivenim terenima.

III.5.3. Druge geofizičke metode

Ovde se radi isto tako o indirektnim, neradioaktivnim metodama, kao i kod prethodno izloženih, čija primena zavisi najčešće od specifičnosti geoloških uslova u kojima se nalaze određeni tipovi uranovih orudnjenja. To su dobro poznate geoelektrične, geomagnetska, gravimetrijska i druge »klasične« geofizičke metode. Na pr. metoda indukovane polarizacije (IP) može biti uspešna ako se koncentracije urana nalaze u asocijaciji sa sulfidima, prvenstveno piritom i markasitom, zatim sa grafitom i u drugim dobro polarizujućim sredinama, pošto oksidi urana i drugi uranovi minerali to nisu. Metoda električne otpornosti primenjiva je za praćenje orudnjenih dislokacija, punjenih kontrastnim materijalima veće ili manje provodnosti od okolnih stena, a isto tako i pojedinih kontrastnih nivoa u sedimentima, ukoliko mogu da olakšaju istraživanja uranovih koncentracija. Ove metode su više ili manje uspešno primenjivane u Jugoslaviji.

Jedna grupa autora iz SAD [34] navodi uspešnu primenu metode dugih radio-talasa (VLF) kod identifikacije nekih uranonosnih struktura, uporedo sa geomagnetizmom, u metamorfitima. Isto tako ukazuje se na identifikaciju orudnjenja urana tipa roll front ispod peščarskog pokrivača u južnom Teksasu, upotrebom osetljivog magnetometra (0,25 gamma), koji može da detektuje i slabije redukcione sredine sa nešto magnetita.

III.5.4. Ostale neimenovane ili nedovoljno razvijene metode

Jedna od češće spominjanih, pa delom i primenjenih originalnih metoda koristi ponzati efekat **termoluminiscencije** bilo kod nekih minerala ili kod veštačkih materija za istraživanje uranovih orudnjenja. Termoluminiscencija nastaje kao posledica oslobađanja energije emisijom elektrona zarobljenih unutar deformisane kristalne rešetke. Ovaj efekat reflektuje uticaje radioaktivnog zračenja (alfa zračenja, sa daleko najvećom energijom), kao i druge termičke uticaje, tokom postojanja minerala. Intenzitet termoluminiscencije menja se skokovito sa porastom temperature zagrevanja minerala, sa karakterističnim pikovima termalnog žarenja (thermal glow tests).

U Geoinstitutu, Beograd, još je 1968. godine konstruisan uređaj za merenje termoluminiscencije, inicirane tokom termalne istorije pojedinih minerala, najčešće karbonata, u domenu hidrotermalnih žica i sličnih orudnjenja, ali opiti dijagnostike termoluminiscencije usled radioaktivnog zračenja nisu vršeni [32].

Ispitivanja termoluminiscencije kvarca i feldspata vršena su na dva lokaliteta sa poznatim skrivenim orudnjenjima urana, jedan ispod diskordatnog peščarskog pokrivača, a drugi u vidu orudnjenih rečnih kanala u peščarima, pri čemu je ispitano par hiljada proba [7]. Ova ispitivanja su pokazala značajnu podudarnost sa podzemnim konturama orudnjenja, ali su najveći intenzitet termoluminiscencije pokazala kod rudnih tela najbližih površini. Ostali podaci su sasvim oskudni da bi se mogao oceniti pravi značaj ove metodologije.

Pored prirodnih, koriste se i veštačke materije kod kojih se lako izaziva termoluminiscentni efekat pod dejstvom alfa zračenja. Firma Westinghaus Electric Corporation (SAD) proizvela je detektore za termoluminiscenciju (Alpha-2TM) u vidu tankog sloja calcijum sulfata (0,076 mm) na teflonskoj osnovi, koji se koristi na isti način kao i plastični filmovi (track etch). Obrnute čaše sa detektorima izlažu se, zakopane u rupama, tokom 30 dana, a zatim se izaziva i meri na termoluminiscentni signal.

Novija geološka i geohemijska ispitivanja vršena u granitoidima Centralnog masiva u Francuskoj [4, 5] ukazala su na značaj gasa CO_2 za preraspodelu i koncentraciju urana u određenim nivoima. Prinos gasa vršen je iz mantije kao posledica pokreta bazične magme duž regionalnih dislokacija, pri čemu se kao poseban indikator javljaju lamprofiri, koji su ujedno nosioci mantijskog kalijuma. Na taj način može se inicirati metodologija ispitivanja inkluzija CO_2 u granitoidima kao jednog od kriterijuma za istraživanje urana. Ima indikacija da ova metodologija, uključujući i ispitivanje karbonata, može da se primeni i na druge metale, kao i na druge sredine osim granitoida.

Za kraj ovoga pregleda ostavljena je prospekciona metoda koja se uvek pominje kada je reč o istraživanju urana i odnosi se na geobotaniku. Ova metoda koristi biljke kao apsorbente urana (pored drugih elemenata) i izgleda da nikada nije masovnije primenjivana, zbog kontroverznih rezultata, koji nisu mogli da se svedu pod bilo kakve egzaktne okvire. Osnovni uslov za primenu metode je da jedna biljna vrsta bude ravnomerno rasprostranjena na velikim površinama (stotine do hiljade kvadratnih kilometara), što je veoma redak slučaj. Uran se koncentriše obično samo u pojedinim delovima biljke, ali ne kod svih podjednako: u nekima je to koren, u drugima lišće ili kora itd. Sve to treba prethodno ispitati uz neizvesne uslove, pre svega terenske, gde je najproblematičnija komponenta eventualnog kontakta biljke (preko tokova podzemnih voda) i koncentracija urana i dr. I najzad, druge prethodno izložene metode su jednostavnije i efikasnije.

III.6. GAMA RADIOMETRIJA U SLUŽBI DRUGIH GEOLOŠKIH CILJEVA

Gama radiometrija, kako obična scintilometrija (ukupna radioaktivnost), tako i gama spektrometrija, može se uspešno koristiti za druge ciljeve u geologiji. Ove mogućnosti otvaraju se, pre svega, zbog različitih

nivoa gama radioaktivnosti u pojedinim tipovima stena ili u istim tipovima stvaranim u različitim geološkm uslovima. Poseban značaj ima distribucija radiogenih elemenata sa određenim radionuklidima, u prvom redu urana, torijuma i kalijuma, koji se mogu lako detektovati i razlikovati portabilnim uređajima na terenu. Ovde se imaju u vidu dva aspekta geoloških ispitivanja i istraživanja: geološko kartiranje i prospekcija drugih mineralnih sirovina.

Kod geološkog kartiranja, naročito u uslovima preovlađivanja humusnog pokrivača, moguće je povlačenje tačnijih geoloških granica između stenskih jedinica sa osetnijom kontrasnošću nivoa gama radioaktivnosti, koja ne bi smela da iznosi manje od 10%, zbog varijacija usled drugih uticaja (kosmičko zračenje, radon u vazduhu i sl.). Gama radiometrijsko razdvajanje može biti korisno i kod nepokrivenih terena, kada je vizuelno opažanje neefikasno usled raznih promena makroskopski sličnih stena. Mogu se kao primer navesti granitoidi i vulkaniti u predelu Zajače u zapadnoj Srbiji, koji su većinom alterisani i teško se mogu vizuelno razlikovati, ali se scintilometrom nedvosmisleno i jasno razdvajaju, zbog razlike u nivou radioaktivnosti od oko 50%. Razlika počev od 10% može se opažati i regulisanjem zvučnog signala, koji emituju svi savremeni portabilni uređaji (DODATAK 2), što znatno olakšava korišćenje ovih uređaja kod geološkog kartiranja. Korišćenje scintilometra u ove svrhe svakako je sve teže kod pokrivača veće i naročito konstantne debljine. Ovde treba pomenuti još jednu moguću smetnju, novijeg datuma, posle černobiljskog akcidenta, zbog lokalnog nagomilanja ^{137}Cs. Ovaj se radionuklid polako premešta u dublje delove tla, ali još uvek može da stvara konfuziju, naročito kod niskih kontrasnosti. U koritima potoka međutim nema više uticaja ovog radionuklida.

Kada je reč o mineralnim sirovinama, gama radiometrijska opažanja se mogu ponekad veoma uspešno primeniti. To se u prvom redu odnosi na fosfate, naročito sedimentnog porekla, gde su praktično nezamenljivi, naročito u uslovima veće pokrivenosti terena. Ova opažanja, primenom isto tako običnih detektora bez razlikovanja spektra gama zračenja, mogu biti vrlo uspešna kod istraživanja retkih zemalja i nekih retkih elemenata, kao što su Nb, Ta, Zr, Hf i dr., koje gotovo redovo prate U i Th. Gama spektrometrija je međutim nezamenljiva kod detekcije kalijske metasomatoze, koja može da bude značajan indikator orudnjenja Pb-Zn i nekih drugih metala. Ovde se isto tako mogu koristiti i rezultati gama spektrometrijske prospekcije iz vazduha, uključivši traganja za kalijumonosnim sedimentima. Markantan su primer nagomilanja kalijevih soli u pustinjskim depresijama (sepke u severnoj Africi, na pr.), koje se na oleti kanala ^{40}K jasno ocrtavaju.

Može se najzad govoriti i o laboratorijskim gama spektrometrijskim analizama (radiometrijske analize U, Th, K) za definiciju određenih litoloških jedinica.

LITERATURA

[1] **Cameron E. M., Hornbrook E. H. W.,** 1976: Current approaches to geochemical reconnaissance for uranium in Canadian shield. IAEA-SM-208/31, Explorat. of uranium ore deposits, Vienna, p. 241—266.

[2] **Bek-Uzarov Đ.,** 1981: Detekcija jonizujućih zračenja. Radioaktivni izotopi I zračenja, knj. I, gl. IV, Inst. »Boris Kidrič«, Vinča — Beograd, p. 85—112.

[3] **Breiner S., Lindof J. T., Kaldenbach R. J.,** 1976: Considerations for airborne radiometric surveys. AIEA-SM-208/34, Explorat. of uranium ore deposits, Vienna, p. 93—105.

[4] **Carrat H. G.,** 1974: Le magmatisme basique comme guide de la distribution des gisements d'uranium des granitoides français. C. R. Acad. Sc., Paris, t. 279, Série D, p. 115—118.

[5] **Carrat H. G.,** 1976: Le rôle de la géochimie de l'uranium et du thorium dans la connaissance et de a distrilbution des gissements uranifères intragranitiques. Mém. h. sér. Soc. géol. de France, No. 7, p. 213.

[6] **Charbonneau B. W., Killeen P. G., Carson J. M., Cameron G. W., Richardson R. A.,** 1976: Significance of radioelement concentration measurements made by airborne gamma-ray spectrometry over the Canadian shield. IAEA-SM-208 Explorat. of uranium ore deposits, Vienna, p. 35—53.

[7] **Charlet J. M., Dupuis Ch., Quinif Y., Bonko Ph., Lair Ph.,** 1982: Natural thermoluminiscence of quartz and feldspars, application of a new method in uranium exploration. OECD/NEA-IAEA sympos. on uranium explorat. methods, Paris, p. 10.

[8] **Durrance E. M.,** 1986: Radioactivity in geology — principles and applications. Ellis Horwood Ltd., Halsted Press (John Wiley & Sons), p. 441.

[9] **Foote R. S., Humphrey N. B.,** 1976: Airborne radiometric techniques in application to uranium exploration. IAEA-SM-208/47, Explorat. of uranium ore deposits, Vienna, p. 17—34.

[10] Gamma-ray surveys in uranium explorations (Darnley A. G., Dodd P. H., Duval J. S., Løvborg L., Stuart D. S. — consultants, Simov S. — sci. secretary). IAEA technical reports ser. No. 186, 1979, Vienna, p. 90.

[11] **Gingrich J. E., Fisher J. C.,** 1976: Uranium exploration using the track-etch method. IAEA-SM-208/19, Explorat. of uranium ore deposits, Vienna, p. 212—227.

[12] **Gojković S.,** 1981: Geological and radiometric checking of airborne uranium anomalies in Ghat region. Unpublished report. IRC, Tripoli.

[13] **Grigorjan S. V., Solovov A. P., Kuzin M. F.,** 1983: Instrukcija po geohimičeskim metodam poiskov rudnyh mestoroždenij. »Nedra«, Moskva, p. 191.

[14] **Hood P.:** Mineral exploration trends and developments. Canadian Mining Journal — Jan. 1985, p. 35, Jan. 1986, p. 37.

[15] **James G. W., Hataway L. R.,** 1976: Recent advances in analytical methods for determining uranium in natural waters and geological samples. IAEA-SM-208/28, Explorat. of uranium ore deposits, Vienna, p. 311—320.

[16] **Kogan R. M., Nazarov I. M., Fridman Š. D.,** 1969: Osnovy gammaspektrometrii prirodnyh sred. Atomizdat, Moskva, p. 468.

[17] **Kukoč A.,** 1985: Spektrometrija jonizujućih zračenja. Radioaktivni izotopi i zračenja, knj. II, gl. III, Inst. »Boris Kidrič«, Vinča — Beograd, p. 63—91.

[18] **Laul J. C.,** 1979: Neutron activation analysis of geological materials. IAEA, Atom. energy review, vol. 17, No. 3, p. 603—695.

[19] **Milojević A. B., Urošević V. V., Kurepa M. V.,** 1963: Principi i metode primene radioaktivnih metoda u industriji. Naučna knjiga, Beograd, p. 290.

[20] **Milojević M.,** 1982: Prikaz metodološkog postupka, prvi put primenjenog u Jugoslaviji pri istraživanju radioaktivnih sirovina iz vazduha i rezultati aerogamaspektrometrijskih istraživanja jugoistočnog dela Stare planine. Radovi Geoinst., knj. 16, Beograd, p. 132—144.

[21] **Milojević M.,** 1985: Radiometrijski kalibracioni etaloni — potreba za njihovom izgradnjom kod nas i postupak izrade. Radovi Geoinst., knj. 18, Beograd, p. 207—217.

[22] **Morse R. H.,** 1976: Radon counters in uranium explorations. IAEA-SM-208/55, Explorat. of uranium ore deposits, Vienna, p. 229—239.

[23] **Nininger R. D.,** 1956: Minerals for atomic energy. D. Van Norstrand Comp. Inc., Princeton, New Jersey, p. 399.

[24] **Novikov G. F., Kapkov Ju. N.,** 1965: Radioaktivnye metody razvedki. »Nedra«, Leningrad, p. 759.

[25] **Offield T. W.,** 1976: Remote sensing in uranium exploration. IAEA-SM-208/15, Explorat. of uranium ore deposits, Vienna, p. 731—744.

[26] **Pacer J. C., Czarnecki R. F.,** 1982: Results of radon and helium surveys at three known uranium occurences. OECD/NEA-IAEA sympos. on uranium explorat. methods, Paris, p. 12.

[27] **Podhalański M.,** 1983: Lectures No. 4 and 6 (in Radiometric logging for uranium, by J. A. Czubek). Lectures of IAEA training course in Škofja Loka, Yugoslavia.

[28] **Protić D., Antonović A.,** 1988: Radioaktivni izvor Majur—Slatina na području Iverka i Cera u zapadnoj Srbiji. Radovi Geoinst., sv. 22, Beograd.

[29] Radioaktivni izotopi i zračenje (grupa autora, glav. ured. I. Draganić), 1962, Naučna knjiga, Beograd.
Knj. I Opšti pojmovi, p. 136.
Knj. II Radne tehnike, p. 353.
Knj. III Primena, p. 240.

[30] **Rowntree J. C., Mosher D. V.,** 1976: Case history of the discovery of the Jabiluka uranium deposits, east Alligator River region, Northern Territory of Australia. IAEA-SM-208/58, Explorat. of uranium ore deposits, Vienna, p. 551—573.

[31] **Roubault M.,** 1958: Géologie de l'uranium. Masson et Cie, Paris, p. 461.

[32] **Simić V.,** 1969: Ispitivanje termoluminiscencije stena i ruda i praktična primena. Radovi Geoinst. No. 5, Beograd, p. 195—202.

[33] **Smith A. Y., Barretto P. M. C., Pournis S.,** 1976: Radon methods in uranium explorations. IAEA-SM-208/52, Explorat. of uranium ore deposits, Vienna, p. 185—211.

[34] **Smith B., Cady J. W., Campbell D. L., Daniels J. J., Flanigan V. J.,** 1976: A case of »other« geophysical methods in exploration for uranium deposits. IAEA-SM-208/44, Explorat. of uranium ore deposits, Vienna, p. 337—351.

[35] **Suschny O.,** 1975: Geochemical analysis for uranium. IAEA/RL/33, Interreg. train. course on uranium geochem. prosp. methods, Škofja Loka, Yugoslavia.

[36] **Tait W. H.,** 1980: Radiation detection. Ruttrwoths & Co (Publishers) Ltd., London.

[37] **Vojinović M.,** 1981: Elektronski uređaji za rad sa brojačima. Radioaktivni izotopi i zračenje, knj. I, gl. V, Inst. »Boris Kidrič«, Vinča — Beograd, p. 113—158.

[38] **Wenrich-Verveek K. J., Cadigan R. A., Felmlee J. K., Reimer G. M., Spirakis C. S.,** 1976: Recent developments and evaluation of selected geochemical techniques applied to uranium exploration. IAEA-SM-208/18. Explorat. of uranium ore deposits, Vienna, p. 267—281.

GLAVA IV

PRIMENA NUKLIDA I JONIZUJUĆIH ZRAČENJA U GEOLOGIJI

IV.1. NUKLIDI IZ PRIRODE I PROIZVODNJE U GEOLOGIJI I DRUGIM DOMENIMA

Granica između radioaktivnih i neradioaktivnih izotopa nije, ma kako izgledalo paradoksalno, dovoljno oštra. Radioaktivnost znači pobuđeno stanje (eksitacija) jezgra, koje se pri tom raspada i prelazi u drugi nuklid. Ovaj novi proizvod raspada može da bude konačan, stabilan izotop ili je i on radioaktivan, pa se dalje raspada, stvarajući niz ili porodicu radioaktivnog raspada sa završnim stabilnim članom (I.2.2). Intenzitet zračenja je direktno proporcionalan broju raspada u jedinici vremena, a obrnuto proporcionalan vremenu poluraspada, što je donekle slučaj i sa energijama zračenja (čestica). Ima nuklida čiji je poluživot (poluraspad) i preko 10 milijardi godina, na pr. ^{50}V — 6×10^{15} g (Tabela IV.5.1) pa je detektabilnost tako slabog zračenja na granici zemaljskog i kosmičkog šuma. Zato još uvek postoji nedoumica u pogledu mogućeg raspada pojedinih nuklida, pa i elemenata u celini, ako ih sačinjava jedan nuklid (na pr. ^{209}Bi).

Granica između »prirodnih« i »veštačkih« radionuklida, kada je reč o prisustvu u prirodi, isto tako nije apsolutna, i zavisi od količina, pošto procesi koji se koriste za proizvodnju veštačkih radionuklida, postoje i u prirodi, često u sasvim zanemarljivom obimu. Ustvari, razvojem masenih spektrometara visoke osetljivosti, naročito za teške nuklide, kao i drugih super osetljivih analitičkih (detekcionih) metoda, otkriveni su u prirodnim sredinama (najčešće u pehblendi) mnogi radionuklidi prirodnih pa i transuranskih elemenata, za koje se ranije nije znalo. Drugo je pitanje dali se pod pojmom prirodnih radionuklida mogu svrstati samo oni koji nastaju tokom (spontanog) raspada, a ne i tokom (prinudnog) cepanja. Posebno je pitanje načina postanka elemenata uopšte, tokom stvaranja vasione i dalje tokom razvoja zvezda. U donjem pregledu dati su grubo generalisani procesi stvaranja elemenata odnosno njihovih nuklida ([2], [12]; [23]).

(1) Kosmološka nukleosinteza (početni stadijum): ^{1}H, ^{2}H (D), ^{3}He, ^{4}He, ^{7}Li (?).

(2) Veoma složeni procesi fuzije, raznih zahvata i drugih transformacija jezgara u raznim fazama evolucije zvezda:

a) Izgaranje* vodonika: ^{3}He, ^{4}He, ^{7}Li, ^{13}C, ^{14}N, ^{15}N, ^{17}O, ^{19}F, ^{21}Ne, ^{22}Ne.

b) Izgaranje* helijuma: ^{12}C, ^{16}O, ^{18}O, ^{21}Ne, ^{22}Ne.

---

* Nuklearna fuzija (na ruskom — горение, na engleskom — burning).

c) Tzv. »s«, »r« i »p« stelarni procesi, pri čemu je »s« s p o r i (s l o w) i dugotrajni (do 10^5 godina) proces zahvata neutrona (n, γ) od strane lakših jezgara (na pr. ^{22}Ne i ^{56}Fe), sa nastajanjem mnogih nuklida, do ^{209}Bi, zatim »r« je veoma b r z i (r a p i d) proces zahvatanja visokog fluksa do 200 neutrona od strane lakih jezgara na pr. ^{22}Ne i ^{56}Fe u roku od najviše 200 s, sa stvaranjem isto tako velikog broja elemenata, uključujući i transuranske (na pr. ^{56}Fe primitkom 200 n prelazi u ^{254}Cf) i najzad »p« proces sa stvaranjem p r o t o n i m a bogatih jezgara — procesi (p, γ) uz emisiju neutrona (γ, n). Procesi r i p nastaju tokom eksplozija super-novih zvezda. Postoje ustvari dve osnovne faze stvaranja nuklida: do ^{56}Fe nuklidi nastaju u egzotermnom procesu, oslobađanjem energije uz sve veće temperature, a nadalje samo uz utrošak energije (endotermni procesi), tako da stvaranjem ^{56}Fe nastaju i svi nuklidi višeg broja A i Z.

Izvan zvezdanih okrilja odigravaju se sledeći procesi nastajanja elemenata odnosno nuklida, neuporedivo manjeg obima:

(3) Dejstvom kosmičkih zraka visoke energije (emitovanih prethodnim procesima) stvara se veliki broj nuklida pre svega u gornjim slojevima atmosfere kao i na planetezimalima. U atmosferi se vrši uglavnom transmutacija azota i argona, a nastaju novi nuklidi kao ^{3}H (tricijum), ^{7}Be, ^{10}Be i ^{14}C po reakciji na pr. ^{14}N (n, p) ^{14}C, zatim ^{6}Li, ^{7}Li i drugi. Na površini meteorita nastaju mnogi nuklidi transmutacijom ^{56}Fe.

(4) Bombardovanjem alfa česticama prvenstveno iz nuklida uranovog niza nastaju reakcije (α, n), (α, p) i (α, t)**, kao na pr. ^{18}O (α, n) ^{21}Ne, ^{7}Li (α, t) ^{8}Be $\rightarrow$ 2p (isto tako ^{3}H$\beta^- \rightarrow {}^{3}$He). Ovaj proces se može na mnogo efektniji način simulirati u akceleratoru, što se koristi za proizvodnju nekih radionuklida.

(5) Spontanom fisijom i dejstvom neutrona stvara se u prirodi izvanredno redak ^{3}H (tricijum) po reakciji ^{6}Li (n, α)^{3}H (ovaj proces primenjuje se za dobijanje tricijuma koji se koristi u tzv. tokamak fuzionim reaktorima [11]. U pehblendi se na taj način stvaraju tragovi fisiogenih ^{89}Sr, ^{90}Sr, ^{36}Cl, gotovo svi radionuklidi joda, plemeniti gasovi Kr, Xe i dr. Ovaj proces se obilato koristi u nuklearnim reaktorima za proizvodnju većine radionuklida po reakcijama tipa (n, p) i n, γ):

$$^{A}_{Z}X + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{A+1}_{Z}X + \gamma \text{ kao na pr. } {}^{59}Co \rightarrow {}^{60}Co \text{ i}$$

$$^{A}_{Z}X + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{1}_{1}p \text{ kao na pr. } {}^{35}Cl \rightarrow {}^{35}S$$

IV.1.1. Nuklidi u geologiji

Veoma je raznovrstan značaj nuklida (izotopa) u geologiji, kako stabilnih tako i radioaktivnih i ogleda se u tri osnovna aspekta: (1) genetski

---

** n — neutron ($^{1}_{0}$n), p — proton ($^{4}_{2}$He), t — jezgro tricijuma ($^{3}_{1}$H).

odnosi, (2) izotopska geohronologija i (3) geotermika prirodne radioaktivnosti. Kod razmatranja izotopskog sastava uputno je koristiti pregled nuklida u tabeli IV.5.1.

IV.1.1.1. IZDVAJANJE NUKLIDA

Uvođenje izotopa, posebno stabilnih, u tumačenje genetskih odnosa u geologiji usledilo je, uporedo sa tumačenjem značaja mikroelemenata ili pratećih elemenata (geohemija), posle saznanja da se u prirodi vrši razdvajanje nuklida jednog elementa pod uticajem određenih fizičko-hemijskih procesa, od kojih se neki koriste i za separaciju pojedinih nuklida u laboratorijskim (industrijskim) uslovima.

Frakcionisanje nuklida bazira, pre svega, na makar i najslabije izraženim razlikama fizičko-hemijskih osobina molekula sa nuklidima, koja je veća kod lakših nego kod težih izotopa (elemenata). Pod izotopnom razmenom podrazumeva se složeni proces koji se može formulisati sledećom jednačinom:

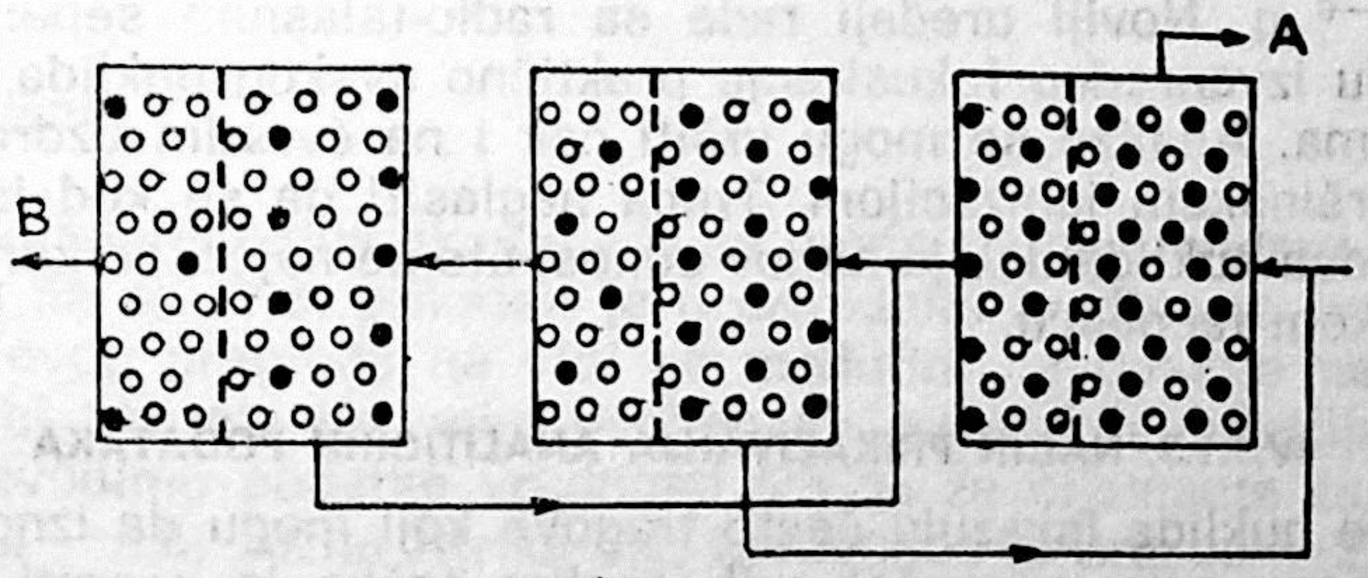
$$aA_1 + bB_2 \rightleftarrows aA_2 + bB_1$$

gde su a i b broj molekula, A i B su molekuli, a indeks 1 za lakši nuklid odnosno indeks 2 za teži nuklid, koji učestvuju u molekulima, kako se može videti iz primera koji se odigrava u prirodi:

$$H_2{}^{18}O + 1/3\ CaC^{16}O_3 \rightarrow H_2{}^{16}O + 1/3\ CaC^{18}O_3$$

pri čemu postoji direktna zavisnost od temperature na kojoj se proces odvija.

U laboratorijskim (industrijskim) uslovima najčešće se primenjuje proces difuzije monoatomnih gasova ili gasovitih jedinjenja (B, C, Ne, Ar, U) ili termička difuzija plemenitih gasova, zatim elektromagnetnih separacija (preko 50 elemenata), elektroliza (^2H). Za industrijsko obogaćivanje fisionog nuklida ^{235}U iz smeše sa ^{238}U najmasovnije se koristi difuzija (sl. IV.1), koja je primenjena još početkom četrdesetih godina u SAD za pripremu prve atomske bombe. U novije vreme uvedena je metoda ultrabrzog centrifugiranja, a pominje se i primena lasera za ova razdvajanja.

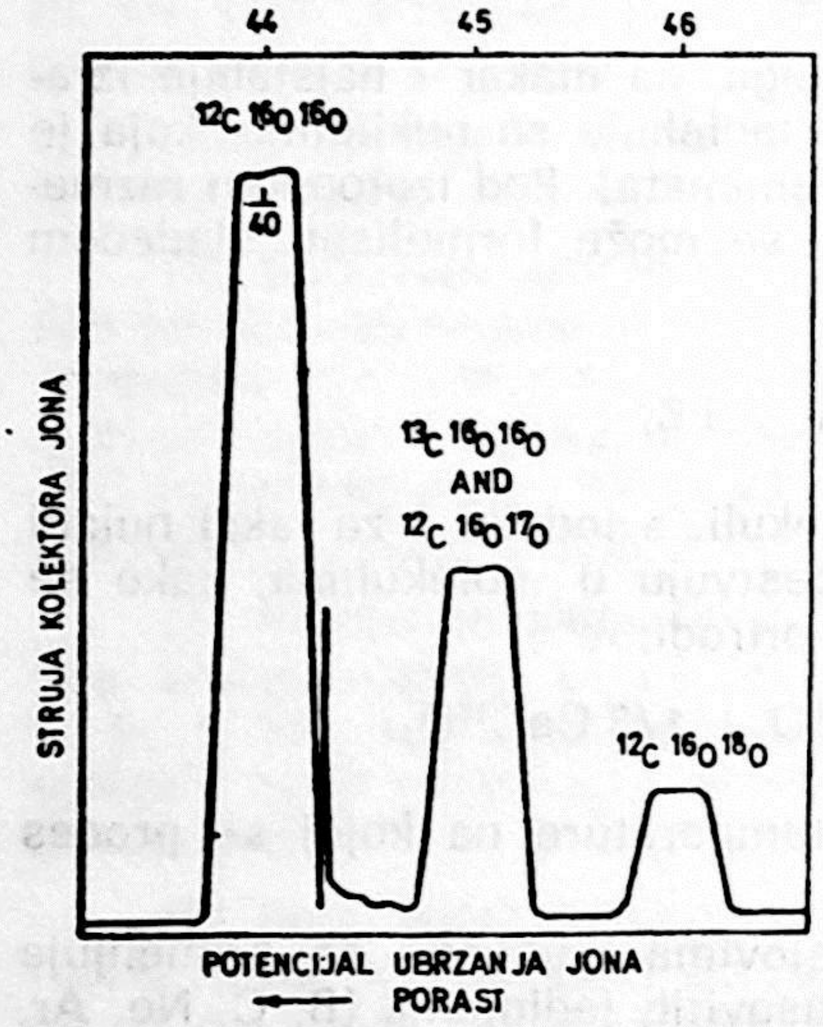


Sl. IV.1.
Kaskadni proces difuzionog obogaćivanja urana.
Crni krugovi — $^{238}UF_6$, beli krugovi — $^{235}UF_6$, A — izlaz osiromašenog urana, B — izlaz obogaćenog urana, crtkasto — membrana za jednosmernu difuziju.

IV.1.1.2. MASENA ANALIZA NUKLIDA

Za geologiju poseban značaj ima analiziranje izotopa (stabilnih i radioaktivnih), koje se vrši prvenstveno metodama masene spektrometrije, pored već opisanih radiometrijskih metoda ili neutronske aktivacije.

Osnovni principi masene analize nuklida baziraju na razlikama kinetičke energije odnosno brzinama kretanja molekula u vakuumu. Pošto ima različitih elemenata sa izotopima iste atomske mase, vrši se prethodno hemijsko razdvajanje elemenata. Analizirana materija se uvek prethodno prevodi u gasovito stanje. Sledeći postupak je jonizacija sa dobijanjem pozitivnih jona (kao nosioca osobina materije), koji se u vidu fokusiranog snopa ubrzavaju u elektrostatičkom polju. Snop se zatim podvrgava dejstvu magnetnog polja, gde se vrši skretanje, pri čemu dolazi do izražaja i centrifugalna sila, tako da se do maksimuma iskoristi različita kinetička energija jona svakog nuklida, što čini i osnovu razdvajanja. Na taj način dobija se dovoljna rezolucija jona sa svakim nuklidom, koji padaju na odgovarajuće senzore, pa se struja jonizacije svakog nuklida (molekula) može meriti putem odgovarajućih amplifikatora. Otuda se ovaj metod naziva spektrometrija, za razliku od masene spektroskopije ili spektrografije. Rezultati analiza se prikazuju dijagramski, gde se na apscisi nanosi razlika potencijala ubrzanja zona, a na ordinati jačina struje izazvane jonima svakog nuklida. Kod izotopske analize ugljenika vrši se na pr. izdvajanje zajedničkih jona CO_2, kao $^{12}C^{16}O_2$, $^{13}C^{16}O_2$, $^{12}C^{16}O^{17}O$ i $^{12}C^{16}O^{18}O$ (sl. IV.2).



Sl. IV.2.
Maseni spektar CO_2 u oblasti masa 44 do 46 (prekid levog pika je usled promene opsega) [22].

Za analize su dovoljne i sasvim minimalne količine materijala, reda veličine 10^{-6} g. Noviji uređaji rade sa radio-talasnim separatorima koji omogućavaju izvanredno fokusiranje praktično svakog nuklida u nezamislivim tragovima. Analize se mogu vršiti čak i na čvrstim uzorcima, što se postiže površinskom jonizacijom. Treba naglasiti da se kod istovremenog fokusiranja dva nuklida dobija njihov odnos, što se najčešće koristi u praksi, sa vrlo velikom tačnošću.

IV.1.1.3. NAČIN PRIKAZIVANJA ANALITIČKIH PODATAKA

Analize nuklida iskazuju često tragove koji mogu da iznose i milijardite delove procenta, a značaj ovih analiza teško je oceniti pojedinačno kada se radi o tako malim varijacijama. Zato se rezultati prikazuju kao odnosi pojedinih karakterističnih nuklida jednog ili dva elementa. Osnovni problem međusobnog upoređivanja rezultata istih analiza sa raznih lokalnosti i sredina rešen je, barem za nekoliko glavnih elemenata, kao što su

vodonik, kiseonik, ugljenik i sumpor, prikazivanjem u odnosu na odgovarajuće etalone*. Ovi etaloni ipak nisu jedinstveni, kako se želelo, pa se čak ni uvek ne navode u literaturi, što je nezgodno, jer poneke laboratorije imaju sopstvene etalone, koji nisu opšte poznati. Izotopski odnosi se označavaju grčkim slovom δ (delta) sa bezdimenzionalnom jedinicom ‰, a računaju se po obrascu:

$$\delta‰ = \frac{R\ \text{uzorak} - R\ \text{etalon}}{R\ \text{etalon}} \times 1000$$

gde je R odnos težeg i lakšeg izotopa jednog elementa. U tabeli IV.1.1. su dati neki od najčešće korišćenih etalona.

Tabela IV.1.I. Etaloni odnosa lakih izotopa

Elementi	Etalon	$^{2}H/^{1}H$ $\times10^{-5}$	$^{13}C/^{12}C$ $\times10^{-5}$	$^{18}O/^{16}O$ $\times10^{-15}$	$^{34}S/^{32}S$
H; O	1)SMOW	15,576		199,34	
	2)NBS-1	15,03		197,74	
	3)NBS-2A	12,92		194,58	
	4)SLAP	8,902		188,39	
C; O	5)PDB		1123,72	200,52	
S	6)CD				22,220

1)Srednja okeanska voda, 2)destilisana voda reke Potomak kod Vašingtona, SAD, 3)sneg iz Jeloustonskog parka u SAD, 4)atmosferski talozi Antarktika, 5)kalcit fosila Bellemnitella americana iz formacije PD (gornja kreda) iz Južne Karoline, SAD, 6)trollit (FeS) iz meteorita Canyon Diablo, Arizona, SAD.

IV.1.1.4. PREGLED IZOTOPSKIH ODNOSA I SADRŽAJA PO ELEMENTIMA**

(1) *Vodonik*

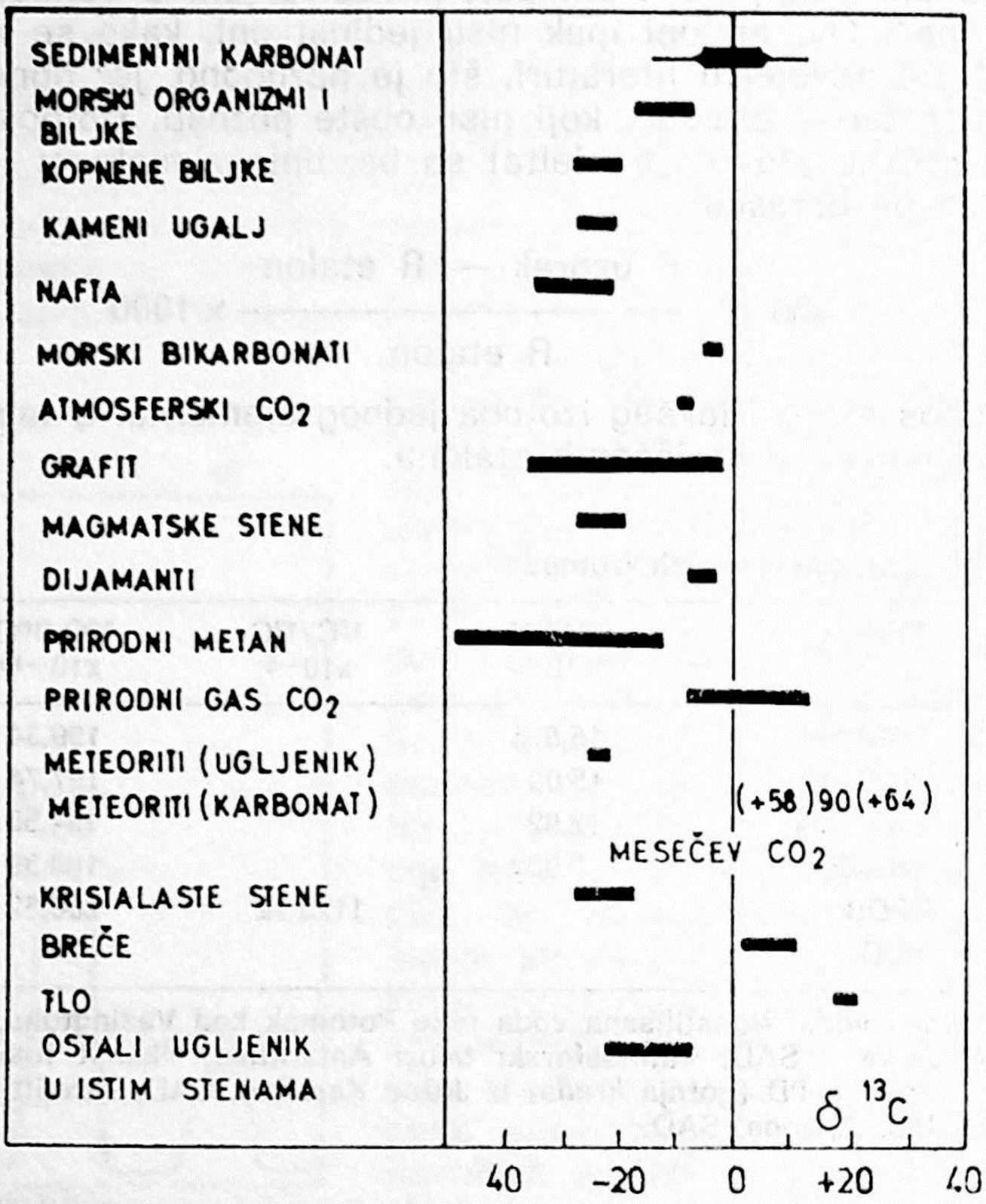
Odnos $^{2}H/^{1}H$ prema etalonu SMOW $\delta^{2}H‰ = 0$ pokazuje velika variranja za meteorske vode od +200 do −350‰, kod sedimentnih stena od −10 do −140, za magmatske i metamorfne stene od −40 do −120, a za vanzemaljski materijal daleko šire raspone u plusu i minusu.

(2) *Ugljenik*

Izotopski sastav ugljenika ogleda se u odnosu na standard PDB prema $\delta^{13}C‰ = 0$, a na sl. IV.3, prikazan je u prirodnim sredinama na Zemlji i u kosmosu. Iz ovog pregleda ne vidi se međutim da postoje neke izrazite razlike koje bi ukazale na neke osobenosti geoloških materijala Zemlje. Ovde ipak navodimo podatke vrednosti $\delta^{13}C‰$ za dijamante različitog porekla: Jakutija −5,8; Južna Afrika 6,2; karbonado iz Brazila −28,0; meteoriti −9,9 do −24,5; kimberliti (grafit) −7,8; meteorit Canyon Diablo (grafit) −6,3 (isto kao iz meteorita Novy Urey); karbonatiti −2,8 do −4,5 [26].

---

* U literaturi se navodi reč »standard« umesto »etalon«, što je jedino pravilno.
** Podaci iz [9; 23; 27] ukoliko nije posebno naznačeno.

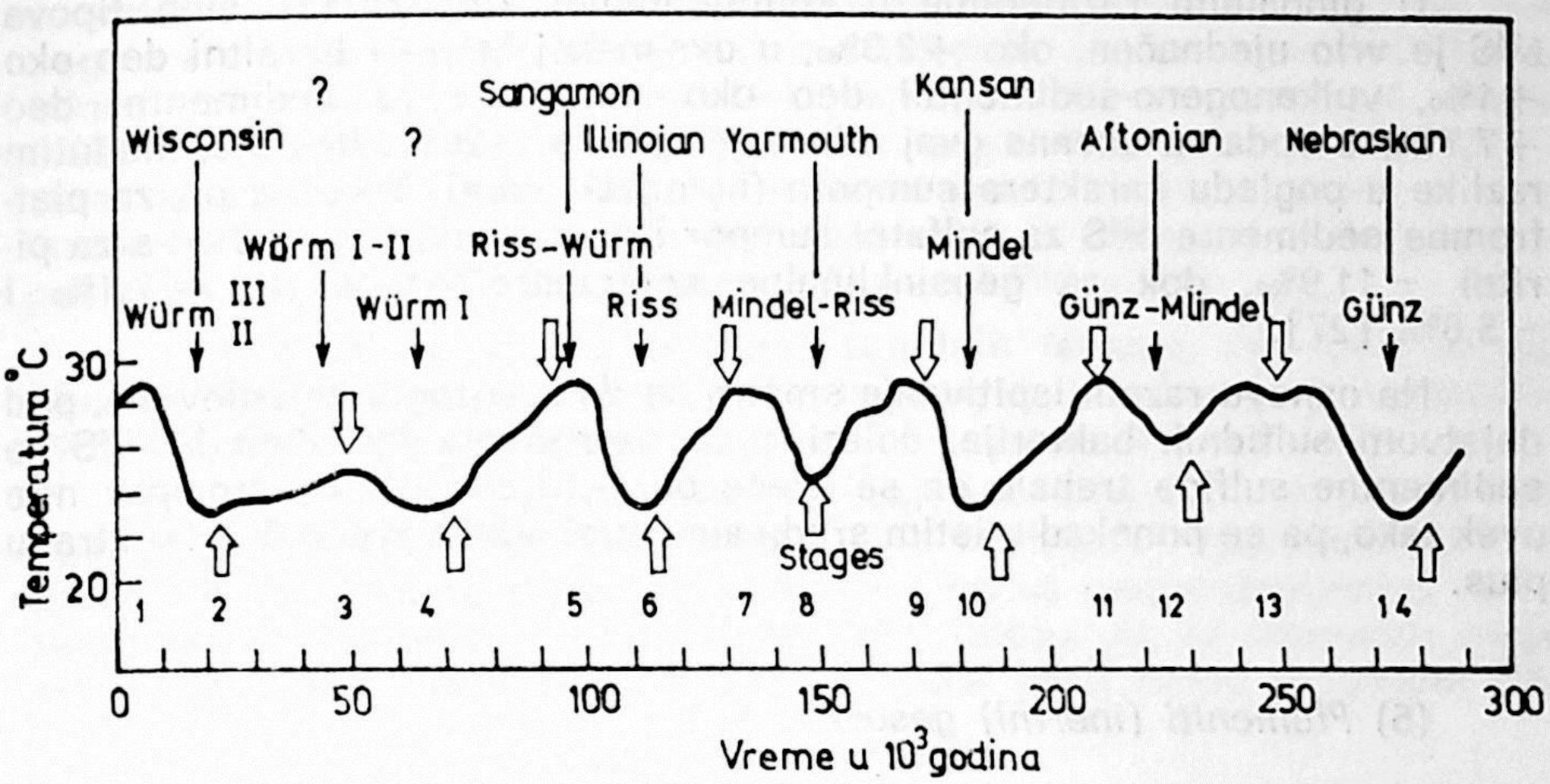


Sl. IV.3.
Izotopski sastav ugljenika ($\delta^{13}C$) na Zemlji i u kosmosu u odnosu na standard PDB [27].

(3) *Kiseonik*

Izotopski odnosi za kiseonik, koji se najčešće računaju prema etalonu SMOW za $\delta^{18}O‰ = 0$ kreću se za meteorske vode $+15$ do -40, za sedimentne stene $+5$ do $+40$, metamorfne stene 0 do $+20$, granitoide -5 do $+15$, bazaltoidne stene u uskom rasponu oko $+4$, za vanzemaljske materijale (meteoriti, Mesec) -3 do $+17$, za ultrabazične stene $+1$ do $+2$, a za neke tercijarne kisele intruzije od -5 do $+12‰$.

U sistemu voda-ugljendioksid-karbonat odnos $^{18}O/^{16}O$ zavisi od temperatura odnosno klimatskih uslova. Promena je minimalna, tako da variranje odnosa iznosi (prema proceni) oko 0,2‰ po stepenu C [23]. Na sl. IV.4, prikazani su kombinovani podaci temperaturnih varijacija tokom pleistocena prema izotopskoj termometriji kiseonika i sunčevog ozračivanja.



Sl. IV.4.
Varijacije temperatura u pleistocenu za niske širine prema izotopskoj termometriji kiseonika (puna linija — Emiliani u [22] i prema sunčevom ozračivanju (strelica nadole — maksimum, strelica nagore — minimum, prema [18]).

(4) *Sumpor*

Odnos $^{34}S/^{32}S$ jedan je od najviše primenjivanih u geologiji, prvenstveno u ležištima mineralnih sirovina.

Jedna analiza raznih tipova sulfidnih ležišta ([27] prema Grinenko et al, 1974) pokazuje sledeće odnose prema $\delta^{34}S‰(CD)=0$ u većem broju sulfidnih ležišta različitih tipova:

I) Cu-Ni ($n = 21$) -3 do $+12$ sa jednim maksimumom na $+1$ i drugim na $+10$.

II) FeS_2 ($n = 47$) maksimum bez mnogo rasipanja na $+10$.

III) Cu-Mo ($n = 34$) jako koncentrisan maksimum na oko 0.

IV) Stratiformna ležišta Cu ($n = 29$) jaka disperzija od $+13$ do -11, sa slabim maksimumima između 0 i $+4$.

V) Stratiformna ležišta Pb-Zn ($n = 41$) jaka disperzija od $+22$ do -11, sa najvećom koncentracijom od $+4$ do $+16$.

Prema nekim ranijim podacima [23] srednji odnosi prema tipovima sulfida su sledeći: sfalerit ($n = 27$) $-0,45$; halkopirit ($n = 26$) $+4,98$; pirhotin ($n = 27$) $-3,14$; galenit ($n = 46$) $+2,26$; pirit ($n = 99$) $-4,93$, a iz istog izvora su i podaci o sulfatima magmatskog porekla (barit) $+20$ ($n = 14$), sedimentima fumarola $-7,59$ ($n = 4$), sekundardnim sulfatima ($FeSO_4$, anglezit) $-0,99$ ($n = 10$), sedimentnim sulfatima (većinom gips) $+22,08$ ($n = 8$) i vulkanskim gasovima 0,00 ($n = 5$).

U žičnom (infiltracionom) ležištu urana u granitu Bukulje, Srbija, analizirano je 6 uzoraka pirita iz bušotina (svi sa preko 300 m dubine) i srednja vrednost $\delta^{34}S$ bila je $+5,777‰ \pm 9$*.

---

* Analizirano u institutu »Jože Štefan«, Ljubljana.

U globalnim razmerama u kontinentalnoj kori Zemlje svih tipova $\delta^{34}S$ je vrlo ujednačen, oko +2,3‰, u okeanskoj kori — bazaltni deo oko +1‰, vulkanogeno-sedimentni deo oko +4,4‰ i za sedimentni deo +7,7‰; u vodama okeana ovaj odnos je čak do +20‰. Postoje, međutim razlike u pogledu karaktera sumpora (hemijski oblik). Tako na pr. za platfromne sedimente $\delta^{34}S$ za sulfatni sumpor iznosi srednje +12,8‰, a za piritni −11,9‰, dok za geosinklinalne sedimente odnosi su +7,1‰ i −5,6‰ [27].

Na osnovu raznih ispitivanja smatra se da u egzogenim uslovima, pod dejstvom sulfidnih bakterija, dolazi do osiromašenja ^{34}S. Zato bi $\delta^{34}S$ za sedimentne sulfide trebalo da se kreće od −10 do −30‰, što ipak nije uvek tako, pa se ponekad u istim sredinama ovaj odnos kreće čak i u stranu plus.

(5) *Plemeniti (inertni) gasovi*

Svi plemeniti gasovi, izuzev radona koji je radioaktivan gas vrlo kratkog života, imaju poseban značaj za genezu i donekle istoriju geoloških materijala i sredina. Ovde navodimo i jedan osnovni podatak o sadržaju (%) pojedinih plemenitih gasova u zemljinoj atmosferi: $He = 5{,}24 \times 10^{-3}$, $Ne = 1{,}82 \times 10^{-4}$, $Ar = 0{,}934$, $Kr = 1{,}14 \times 10^{-4}$ i $Xe = 8{,}6 \times 10^{-6}$.

H e l i j u m ima poseban značaj, jer se sastoji od dva nuklida, do kojih je ^{3}He najvećim delom kosmogenog porekla, dok je ^{4}He većinom radiogen (α-čestice), znatno manje kosmogen. U zemljinoj atmosferi odnos $^{3}He/^{4}He$ je po jednima $1{,}16 \times 10^{-6}$ [20], po drugima $1{,}4 \times 10^{-6}$ [27]. U sunčevom vetru taj odnos je 4×10^{-4}, a u ugljevitim hondritima je $1{,}4 \times 10^{-4}$ [27]. S druge strane, u gvožđevitim meteoritima javlja se značajno povećanje ^{3}He usled dugotrajnog bombardovanja teškim kosmičkim česticama velike energije, pa se odnos $^{3}He/^{4}He$ kreće oko 0,2 [23]. U uranovim mineralima ovaj odnos drastično opada zbog porasta ^{4}He, pa se u uraninitu kreće $0{,}0007—0{,}0009 \times 10^{-6}$, dok je u kvarcu i berilu $0{,}01—0{,}88 \times 10^{-6}$ [27]. U kiselim magmatskim stenama ovaj odnos je oko $0{,}01 \times 10^{-6}$, a u bazitima i ultrabazitima okeanskog dna je oko 1×10^{-6} [3].

N e o n se sastoji od tri stabilna izotopa (u zagradi je % u zemljinoj atmosferi) i to ^{20}Ne (90,51), koji je u celosti kosmogen (primordijalan — početni stadijum kosmogeneze), ^{22}Ne (9,22) većim delom primordijalan, a delom radiogen, uglavnom po reakciji ^{19}F (α, n) ^{22}Ne, dok je ^{21}Ne (0,27), najvećim delom radiogen [3] po reakciji ^{18}O (α, n) ^{21}Ne [23]. Za genetska izučavanja važni su odnosi $^{21}O/^{22}Ne$ i $^{20}Ne/^{22}Ne$. Za atmosferu Zemlje prvi odnos je 0,029, a drugi 9,8 [17]. Za većinu sredina, u kosmosu i na Zemlji, ovi odnosi su bliski zemaljskoj atmosferi: u prirodnim zemnim gasovima (pretežno CO_2) prvi odnos je 0,046 ($n = 22$) dok je drugi blizak 9,8; u bazičnim stenama okeanskog dna prvi odnos je blizak 0,029 a drugi je nešto veći i iznosi 10 [27].

A r g o n se sastoji od tri stabilna izotopa, od kojih ^{40}Ar, koji je radiogenog porekla (jedan od potomaka ^{40}K), daleko preovlađuje (99,6%). Kao karakterističan odnos se uzima $^{36}Ar/^{38}Ar$ (kosmogenog porekla) ili obrnuto, a zatim $^{40}Ar/^{36}Ar$. U zemljinoj atmosferi je $^{36}Ar/^{38}Ar = 5{,}35$, a u me-

teoritima najčešće 0,7 i 2 [27]. U atmosferi Venere ^{36}Ar ima 75 puta više nego u atmosferi Zemlje, gde ga pak ima 165 puta više od atmosfere Marsa; odnos $^{40}Ar/^{36}Ar$ je 1 u atmosferi Venere, 3000 u atmosferi Marsa i 295,5 u atmosferi Zemlje [20]. Inače, argon koji kao gas čini 0,9% zemljine atmosfere, nalazi se u prirodnom gasu (CO_2) 0,05—0,9% i ugljovodoničnom gasu 0,002—0,4%. Povećanje ^{38}Ar u uranovim mineralima je posledica reakcije ^{35}Cl (α, p) ^{38}Ar i ^{35}Cl (α, n) $^{38}K \rightarrow {}^{38}Ar$.

K r i p t o n se sastoji od šest stabilnih izotopa, od kojih je najobilniji ^{84}Kr (57%) i ujedno u celosti kosmogen, a najmanje je zastupljen ^{78}Kr (0,35%). Slabo je frakcionisan i ne daje značajnije pokazatelje odnosa.

K s e n o n ima 9 stabilnih izotopa, sa brojevima A = 124, 126, 128, 130, 131, 132, 134 i 136. Izotop ^{130}Xe nastaje β^- raspadom od ^{130}Te preko ^{130}I i smatra se repernim, pošto je njegova rasprostranjenost ista u zemaljskim i kosmičkim materijalima [27]. Izotopi Xe sa atomskim brojevima 134, 136 i 139 nastaju fisijom iz urana (ovaj zadnji raspadom ^{139}I).

(6) *Stroncijum*

Stroncijum se sastoji od 4 stabilna izotopa sa brojevima A — 84 (0,56%), 86, 87 i 88 (82,56%). Izrazitog radiogenog postanka je ^{87}Sr, koji nastaje raspadom od ^{87}Rb, što služi za odredbu apsolutne starosti stena. Za izračunavanje porekla geoloških materijala od značaja su odnosi, u prvom redu $^{87}Sr/^{86}Sr$, u manjoj meri $^{84}Sr/^{88}Sr$ kao i $^{86}Sr/^{88}Sr$. U prečišćenom metalnom stroncijumu odnos $^{84}Sr/^{87}Sr$ iznosi 0,7119,* $^{84}Sr/^{88}Sr = 0,0068$ i $^{86}Sr/^{88}Sr = 0,1194$ [27]. Odnos $^{87}Sr/^{86}Sr$ može da ima značaj hronomera u kosmosu i na Zemlji i ako se uzme da je prvobitno iznosio 0,6984, onda bi u momentu formiranja zemljine kore pre $4,6 \times 10^9$ g odnos bio 0,699. Ovde je, međutim značajan odnos Rb/Sr, koji za prvobitnu sunčevu maglinu iznosi 0,65, kod hondritskih meteorita je 0,25, kod većine zemaljskih stena je oko 0,03, a kod nekih bazičnih stena sa Meseca je oko 0,002, nasuprot mesečevoj granitskoj breči, gde je ovaj odnos 0,4, što daje povoda za različite interpretacije [27].

(7) *Olovo*

Olovo je posebno interesantno zbog specifičnosti izotopskog sastava gde su ^{206}Pb, ^{207}Pb i ^{208}Pb stabilni, završni članovi uranovog, aktinijumovog i torijumovog niza, mada su ovi izotopi, uključivši ^{204}Pb, isto tako i kosmogenog porekla. Izotopski sastav čistog olova (iz galenita) je: ^{204}Pb — 1,44%, ^{206}Pb — 23,69%, ^{207}Pb — 22,54% i ^{208}Pb — 52,30%, što je, kada je reč o ^{206}Pb i ^{207}Pb, značajna razlika u odnosu na kosmičko olovo (25,1 i 21,1%, vidi tabelu IV.5.1). Tako su odnosi $^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$ i $^{208}Pb/^{204}Pb$ za čisto olovo 14,45, 15,65 i 36,34, dok su za kosmos ovi odnosi 17,68, 14,85 i 36,83; u dva uzorka snega vrednosti ovih odnosa su 18,2, 15,7 i 38,5 [27], a u nekim galenitima su dosta različiti — 13,3, 14,2 i 32,6. U troilitu poznatog meteorita iz Canyon Diabla u SAD (koji služi kao reper

---

* U današnjoj morskoj vodi ovaj odnos je 0,7090 [7].

i etalon za mnoge odnose izotopa) nalaze se najniže poznate vrednosti odnosa: $^{206}Pb/^{204}Pb = 9{,}33$, $^{207}Pb/^{204}Pb = 10{,}20$, $^{208}Pb/^{204}Pb = 28{,}91$.

(8) *Ostalo*

Od ostalih karakterističnih elemenata u novije vreme uzimaju se odnosi izotopa neodima ^{143}Nd i ^{144}Nd, između ukupno sedam izotopa ovog elementa, nastalih u celini u procesu razvoja zvezda (»s« i »r«). Ovi odnosi imaju značaj naročito ako se upoređuju sa odnosima ^{87}Sr i ^{86}Sr. Kao karakteristični uzima se odnos $^{143}Nd/^{144}Nn$ u neosiromašenoj mantiji — 0,51184 i osiromašenoj mantiji — 0,51235, kao i u gornjoj kori — 0,51133 [4].

IV.1.1.5. IZOTOPSKA GEOHRONOLOGIJA

Izotopske geohronološke metode, koje se podrazumevaju kao metode apsolutne geološke starosti (za razliku od relativne — stratigrafske superpozicije) baziraju na fenomenu određenog trajanja raspada jezgra radioaktivnog nuklida. Poluraspad ili poluživot je različit za svaki radionuklid i može se odrediti sa dovoljnom tačnošću čak i kod veoma dugotrajnih nuklida, na pr. 10^{15} i više milijardi godina. Finski geohemičar R a n k a m a izvršio je podelu prema načinu i tačnosti odredbe na dve osnovne grupe starosti [23]:

(1) Tačne starosti, rađene po četiri odnosa: $^{207}Pb/^{206}Pb$, $^{206}Pb/^{238}U$, $^{207}Pb/^{235}U$ i $^{208}Pb/^{232}Th$ i

(2) očigledne (apparent) starosti samo prema jednom od odnosa, bilo da se radi o odnosu $^{40}Ar/^{40}K$, $^{87}Sr/^{87}Rb$ ili $^{207}Pb/^{206}Pb$. Ovde spadaju i tzv. hemijske starosti odnosa U/Pb i Th/Pb.

Tačnost i verodostojnost odredbi apsolutne starosti na osnovu odnosa pojedinih nuklida napredovala je uporedo sa usavršavanjem odnosno povećanjem osetljivosti analitičkih metoda, u prvom redu masene spektrometrije, a zatim nuklearne aktivacije i sl. Ove metode ipak nisu u tolikoj meri egzaktne usled mogućih pomeranja pojedinih nuklida ili elemenata, naročito usled raznih termičkih procesa u zemljinoj kori. Zato je kod metoda uran-torijum-olovo glavno pitanje razdvajanje »radiogenog« od »neradiogenog« olova, što je veoma složen problem. Slično je i kod kalijum-argonove i rubidijum-stroncijumove metode, koje se danas najviše primenjuju, gde svaka dublja termička obrada (metamorfizam), briše prvobitne odnose, naročito kada se radi o gasu argonu. Pored navedenih, u zadnje vreme navode se i odnosi $^{40}Ar/^{36}Ar$ (stabilni izotopi), zatim $^{147}Sm/^{144}Nd$ i $^{143}Nd/^{144}Nd$ (poluraspad ^{144}Nd je $2{,}1 \times 10^{15}$ godina, a ^{147}Sm — $1{,}1 \times 10^{10}$ godina [19].

Ovde treba ipak pomenuti neke druge metode apsolutne starosti, bilo da se radi o nuklidima kratkotrajnog žvota, koje se ne primenjuju u geologiji (^{14}C, poluraspad 5700 godina) ili o nekim neizotopskim metodama, primenljivim u geologiji, kao što su metode nuklearnih tragova, metamiktizacije, termoluminiscencije i dr.

Metoda uran-torijum-olovo

Ova metoda je višestrana, jer bazira na četiri parametra, na osnovu radioaktivnog raspada sva tri glavna niza, pri čemu je stabilni potomak urana 238 (poluživot 4,5 milijardi godina) olovo 206 (25% ukupnog olova), urana 235 (poluživot 710 miliona godina) olovo 207 (21%) i torijuma 232 (poluživot 14 milijardi godina) olovo 208 (52%). Pored ovih izotopa olova postoji i olovo 204 (1,4%) koje nije radiogenog postanka, za razliku od prethodnih koji su delom radiogenog, a delom kosmogenog porekla. Kod sva tri niza raspada, pored olova nastaje i helijum (^4He, koji isto tako može da bude i kosmogen) i to $^{206}Pb + 8\,^4He$, $^{207}Pb + 7\,^4He$ i $^{208}Pb + 6\,^4He$. Cela reakcija odigrava se po poznatom zakonu raspada radioaktivnosti (obrazac I.2.1) iz kojeg se izvode i osnovni obrasci za proračun starosti:

$$^{206}Pb = {}^{238}U\,(e^{\lambda' t} - 1)$$
$$^{207}Pb = {}^{235}U\,(e^{\lambda'' t} - 1)$$
$$^{208}Pb = {}^{232}U\,(e^{\lambda''' t} - 1)$$

Gde su λ', λ'', λ''' odgovarajuće konstante raspada (god.$^{-1}$), koje iznose: $\lambda'_{238} = 1{,}55125 \times 10^{-10}$, $\lambda''_{235} = 9{,}8485 \times 10^{-10}$, $\lambda'''_{232} = 4{,}9475 \times 10^{-11}$, dok je $^{238}U/^{235}U$ (atomski) = 137,88 [27].

Starost na osnovu gornjih obrazaca dobija se neposredno iz obrazaca:

$$t = (1/\lambda')\ln(1 + {}^{206}Pb/{}^{238}U)$$
$$= (1/\lambda'')\ln(1 + {}^{207}Pb/{}^{235}U)$$
$$= (1/\lambda''')\ln(1 + {}^{208}Pb/{}^{232}Th)$$
$$^{207}Pb/^{206}Pb = 1/137{,}88\,[e^{\lambda'' t} - 1)/(e^{\lambda' t} - 1)]$$

Na osnovu ovih obrazaca razvijene su tablice za odnose $^{207}Pb/^{206}Pb$, $^{206}Pb/^{238}U$, $^{207}Pb/^{235}U$ i $^{208}Pb/^{232}Th$, koje se mogu prikazati i dijagramski (sl. IV.5). Ovde treba vršiti ispravke u smislu uticaja neradiogenog olova, koja se vrši na razne načine, prvenstveno preko neradiogenog olova 204, sa raznim modifikacijama.

Tzv. hemijska starost određuje se prema obrascu:

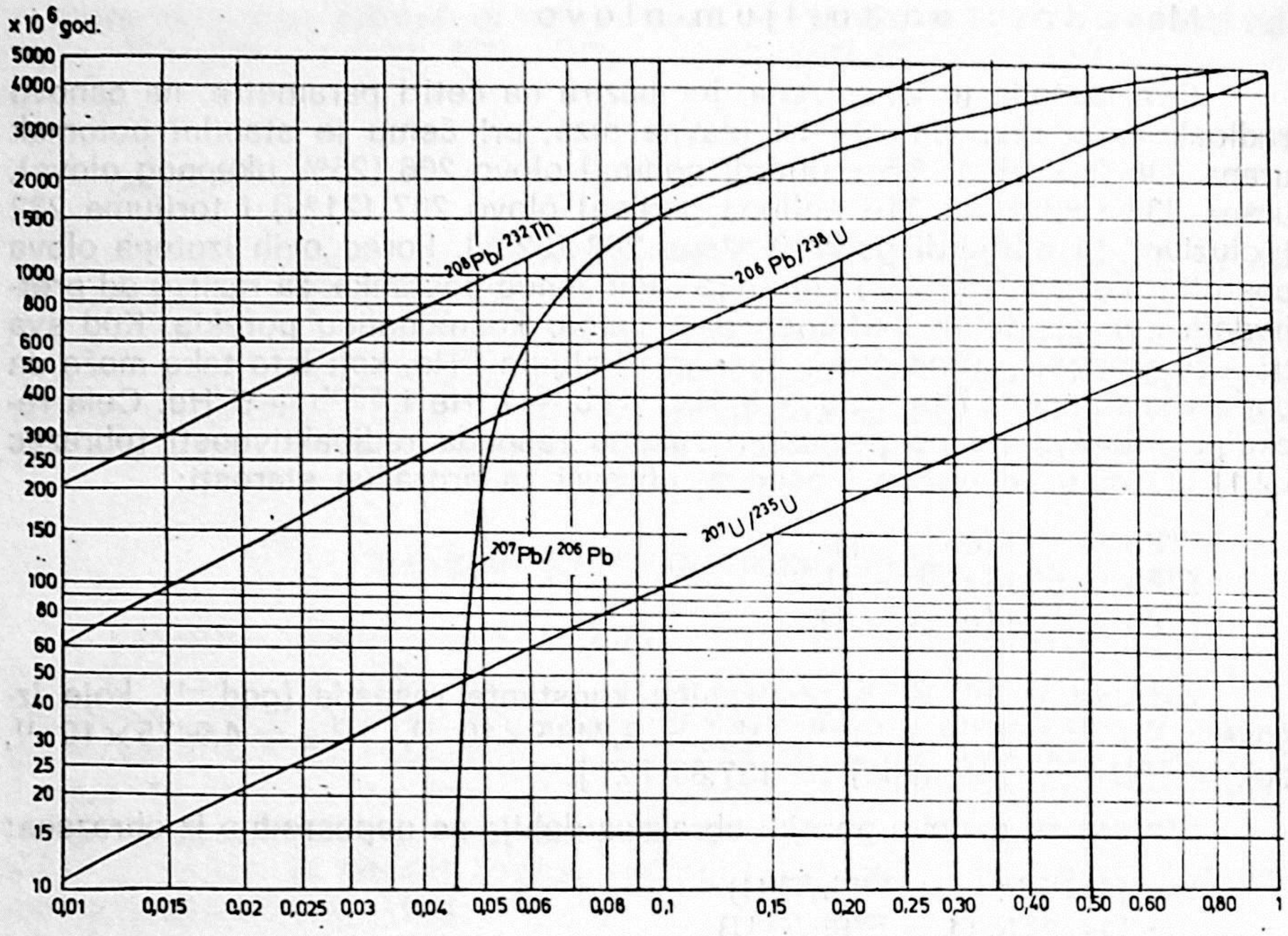
$$t = \frac{7600\ Pb}{U + 0{,}36\ Th} \times 10^6\ g$$

gde se Pb, U i Th određuju hemijskom analizom [22].

Izotopska starost olova u rudi definisana je odnosima:

$$\frac{^{207}Pb/^{204}Pb - 10{,}294}{^{206}Pb/^{204}Pb - 9{,}307}$$

gde je 10,294 prvobitni odnos $^{207}Pb/^{204}Pb$, a 9,307 je prvobitni odnos $^{206}Pb/^{204}Pb$, prema meteoritu Canyon Diablo, zatim prema pojedinačnim odnosima $^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$ i $^{208}Pb/^{204}Pb$ (sl. IV.6). Kao nulte tačke u ovim dijagramima uzeti su sadržaji olova u nekim savremenim dubokomorskim



Sl. IV.5.
Dijagrami proračuna apsolutne starosti metodom U-Th-Pb (prema tabeli u [27]).

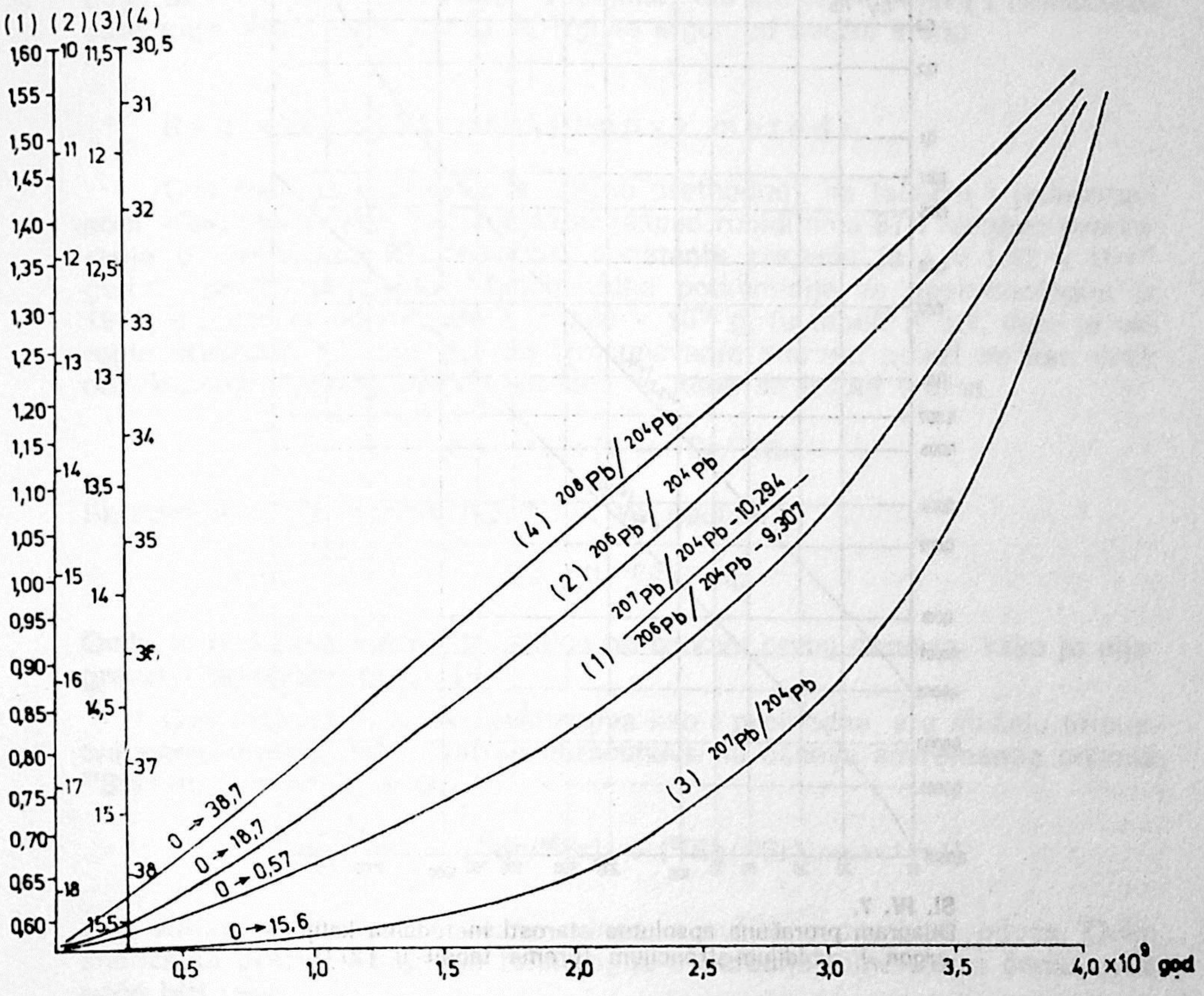
talozima. S druge strane, meteoritsko olovo odgovaralo bi primitivnoj zemljinoj kori u vreme konsolidacije pre $4{,}55 \times 10^9$ godina, što je utvrđeno ispitivanjem velikog broja meteorita.

Kalijum-argonova metoda

Ova metoda bazira na zakonitosti povećanja količine argona 40 u kalijumonosnim mineralima na račun radioaktivnog raspada ^{40}K. Kalijum 40 ima dvojak raspad, tako da preko β^- raspada prelazi u ^{40}Ca, a preko elektronskog zahvata (ez, β^+) u ^{40}Ar, sa konstantama raspada koje se međusobno razlikuju za β^- raspad $\lambda\beta = 4{,}962 \times 10^{-10}$ god $^{-1}$, a za elektronski zahvat $\lambda_e = 0{,}58 \times 10^{-10}$ god.$^{-1}$ ($\lambda_e/\lambda\beta = 0{,}117$). Ove konstante su bitan činilac za tačnu odredbu starosti po ovoj metodi, pa su gornje vrednosti bile preporučene Međunarodnoj potkomisiji za geohronologiju 1976. god. [27], za poluraspad $1{,}25 \times 10^9$ g.*

---

* U svojim ranijim radovima G. Deleon koristio je vrednosti za $\lambda\beta = 4{,}72 \times 10^{-10}$ i $\lambda_e = 5{,}85 \times 10^{-11}$ (neobjavljena doktorska disertacija, 1968, Geoinstitut, Beograd); razlike su zbog uzete vrednosti poluraspada od $1{,}31 \times 10^9$ g.



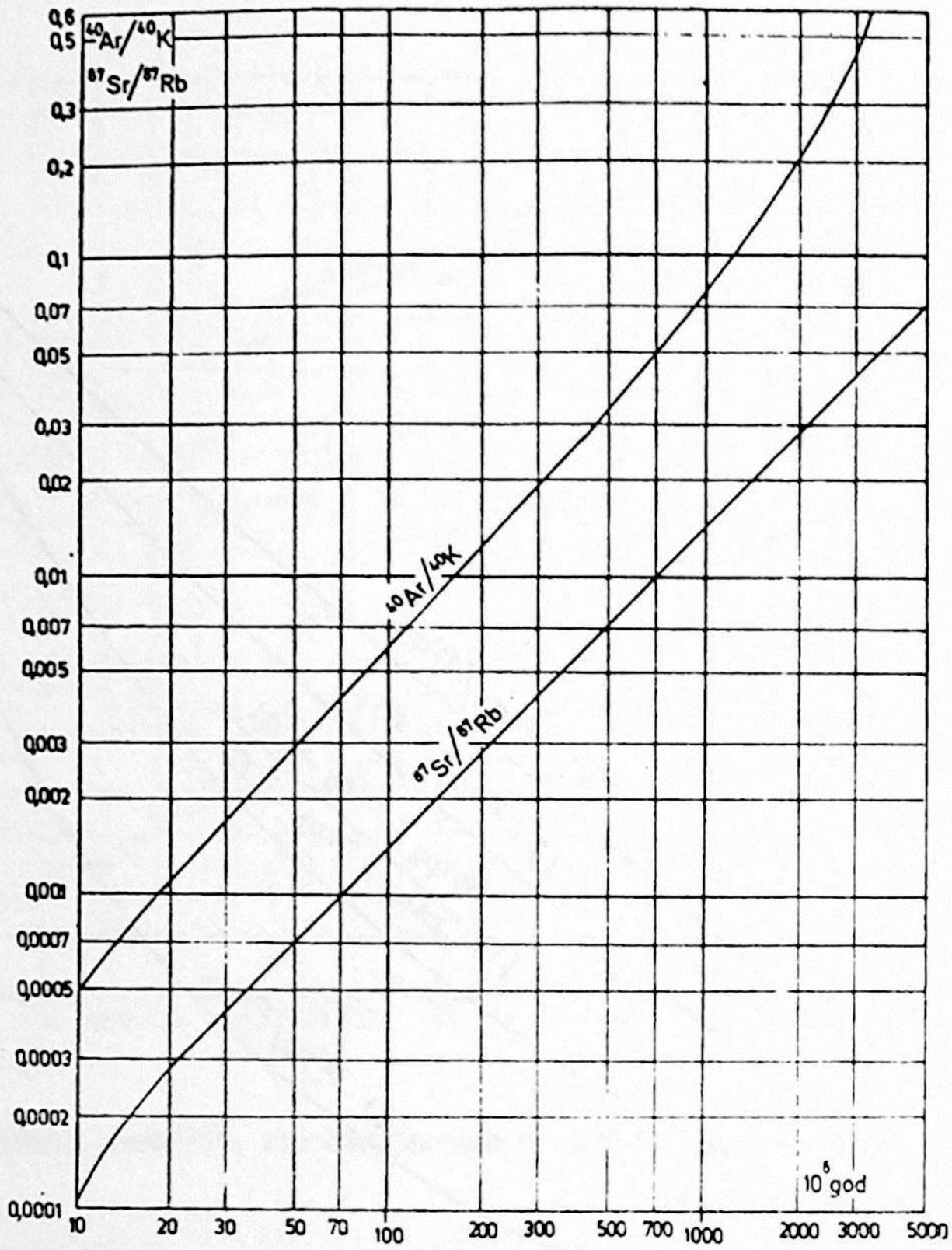
Sl. IV.6.
Dijagrami proračuna apsolutne starosti rudnog olova (prema tabeli u [27]).

Apsolutna starost (u godinama) je u funkciji odnosa

$$^{40}Ar/^{40}K = \frac{\lambda_e}{\lambda\beta + \lambda_e} \cdot e^{t(\lambda\beta + \lambda e) - 1}$$

Na osnovu ovog obrasca i gore naznačenih vrednosti za konstante raspada uspostavljena je detaljna tablica vrednosti t [27], na osnovu čega je izrađen dijagram na sl. IV.7.

Kod ovih analiza treba imati u vidu prisutnost argona 40 iz vazduha, što se koriguje merenjem odnosa $^{40}Ar/^{36}Ar$ u ispitivanom uzorku i upoređivanjem sa istim odnosom u vazduhu (295,5). Ponekad se argon nastao iz raspada ^{40}K označava sa ^{40r}Ar, za razliku od ^{40}Ar iz vazduha. Poseban po-



Sl. IV. 7.
Dijagram proračuna apsolutne starosti metodama kalijum-argon i rubidijum-stroncijum (prema tabeli u [27]).

stupak predstavlja sama analiza kao i specifičnosti pripreme uzorka, što nije predmet ovog napisa.

Kalijum-argonova metoda je jednoznačna i tačna i mogla bi da bude i jedinstvena u određivanju apsolutne starosti, kada ne bi postojale smetnje usled migracije inače lako pokretljivog argona kao gasa. Smatra se da svako magmatsko pregrevanje (metamorfizam ili metasomatoza kao termička prerada) mogu u potpunosti da izbrišu prethodnu istoriju ili da snize vrednosti $^{40}Ar/^{40}K$ u liskunima ili feldspatima, kao glavnim mineralima za odredbu Ar/K starosti [23], pri čemu se kao kritična temperatura može uzeti 400—500°C. S druge strane, smatra se da argon lakše migrira iz liskuna nego iz feldspata, pa se preporučuje posebno analiziranje ovih minerala i upoređivanje rezultata. Zbog svega navedenog, kod izbora sredine i metode za odredbu apsolutne geološke starosti, posebno ako se ima u vidu metoda Ar/K, treba uzeti u obzir celokupnu petrološku sliku procesa koji su učestvovali u definitivnom formiranju magmatskog kompleksa ili druge magmatogene sredine. Ovo svakako ne važi za nemetamorfisane sedimente koji sadrže glaukonit, prema kome se starost može veoma pouz-

dano odrediti. Treba na kraju navesti neka upozorenja, da stena koja je dugo bila izložena površinskim uticajima, kao što su hemijska i mehanička oštećenja, imaju veću šansu da izgube argon od svežih stena.

Rubidijum-stroncijumova metoda

Ova metoda osnovana je, slično prethodnoj, na tačnom i jednostavnom »časovniku« koji čini nuklearni raspad rubidijuma 87 i njegovo pretvaranje u stroncijum 87. Vrednost konstante raspada je $\lambda = 1{,}42 \times 10^{-11}$ god.$^{-1}$ (prema preporuci Međunarodne potkomisije za geohronologiju iz 1976. g.), što bi odgovaralo $T = 4{,}88 \times 10^{10}$ g. (u tabeli IV.5.1, data je okrugla vrednost 5×10^{10} g.). Za izračunavanje starosti polazi se kao uvek od eksponencijalnog zakona raspada, iz koga se izvodi vreme

$$t = 1/\lambda \ln (1 + {}^{87}Sr/{}^{87}Rb)$$

ili, uprošećno za starosti ispod 1×10^9 godina

$$t = 1/\lambda \cdot {}^{87}Sr/{}^{87}Rb$$

Ovde je isto tako priređena tablica na osnovu prvog obrasca, kako je dijagramski prikazano na sl. IV.7.

Ova metoda je široko primenjiva kao i prethodna, a u slučaju prisustva neradiogenog ^{87}Sr, ovaj se obračunava na osnovu savremenog odnosa $^{87}Sr/^{87}Rb$, prema obrascu

$$({}^{87}Sr/{}^{86}Sr)_t = ({}^{87}Sr/{}^{86}Sr)_o + ({}^{87}Rb/{}^{86}Sr)_t \cdot e^{(\lambda_{87} t - 1)}$$

gde sufiks t označava sadašnji odnos, a sufiks o prvobitni odnos. Ovim analizama prethodi suptilna tehnologija separacije minerala, o čemu ovde neće biti reči.

Za ovu metodu mogu se koristiti samo minerali koji ne sadrže stroncijum, koji inače nije tako redak u prirodi. Zato su ovde upotrebljivi minerali sa kalijumom, koji sadrže rubidijum kao primesu oko 1—3% (od toga na ^{87}Rb otpada oko 28%), a to su liskuni (lepidolit, biotit, muskovit) kao i kalijski feldspati. U sedimentnim stenama to su glaukonit i silvin, a mogu se koristiti i crni škriljci kao i finozrne glinonosne stene. Uopšte uzev, podesna je i stena kao celina, ako predstavlja zatvoren sistem, bez donošenja ili odnošenja materijala.

Rubidijum i stroncijum su znatno manje migrativni od na pr. argona, a ne podležu ni migraciji u uslovima alteracionih procesa. S druge strane, potrebna je temeljita termička obrada da bi poremetila njihove odnose. Ova metoda je u principu bolje primenljiva za starije jedinice, u prvom redu prekambrijske, ali savremene separacione i analitičke metode dozvoljavaju uspešno datiranje isto tako i tercijarnih stena. Treba posebno naglasiti da je ova metoda, u kombinaciji i dopuni sa kalijum-argonovom metodom, zasada najpouzdaniji tandem za određivanje apsolutne izotopske starosti u geologiji.

Ostale metode

U okviru ostalih načina može se govoriti o dve grupe metoda geološkog datiranja. Jedna se odnosi na primenu izotopskih odnosa kao kod metoda prikazanih u prethodnom odeljku, mada se u ovom slučaju odnose više na vanterestričke objekte (u prvom redu na meteorite), dok druga grupa obuhvata drugu metodologiju, vezanu za promenu kristalne rešetke minerala, kao što su metamiktizacija, tragovi nuklearnih čestica i sl., o čemu će ovde samo uzgred biti reči, pored nekih kratkoročnih metoda.

U okviru prve grupe alternativnih metoda za odredbe apsolutne starosti (u meteoritima) figurira opet argon, uprkos činjenici da se radi o gasu. Izotopi argona su mešavina zahvaćenih (trapped — uhvaćenih u zamku) spalogenih* i radiogenih produkata, kao i ^{38}Ar nastalog iz reakcije ^{37}Cl (n, γ, β) ^{38}Ar. Odnos svih zahvaćenih izotopa $(^{36}Ar/^{38}Ar)_{tr} = 5{,}35$, a spalogenih $(^{36}Ar/^{38}Ar)_{sp} = 0{,}60$. Na taj način su dobijene starosti nekih meteorita 4,50 — 4,57 $\times 10^9$ godina, a za meteorit Mundabilla čak 6,2 $\times 10^9$ g. [19].

Sledeća izotopska starost vezuje se za odnose $^{147}Sm/^{144}Nd$ i $^{143}Nd/^{144}Nd$ koji imaju linearnu funkcionalnu zavisnost. Smatra se da ovaj sistem ne može da se remeti u uslovima nižeg stepena metamorfizma ili usled hidrotermalne alteracije.

Od ostalih sistema navode se ^{129}I-^{127}I, ^{129}Xe-^{132}Xe, ^{244}Pu-^{238}U i dr.

Metoda tragova nuklearnih čestica (tragova fisije) zasnovana je kako na spontanoj fisiji ^{238}U tako i na izazvanoj fisiji u ovom radionuklidu dejstvom termalnih neutrona. Ovom metodom se mogu rešavati problemi najstarijih epoha, pošto je poluživot fisije čak 8,2 $\times 10^{15}$ godina. Čestice oštećuju kristalnu strukturu ostavljajući tragove, koji se mogu učiniti vidljivim nagrizanjem. Prvo se broje tragovi spontane fisije, pa se oni (zagrevanjem) ponište, a ispitivani uzorak se izlaže izazvanoj fisiji, pa se zatim tragovi ponovo broje. Količina tragova zavisi od količine urana i doze termalnih neutrona, a vreme nastanka minerala dobija se prema formuli

$$t = 6{,}446 \times 10^9 \ln (1 + 7{,}744 \times 10^{-18} \gamma d)$$

gde je γ odnos broja spontanih i indukovanih tragova, a d je doza termalnih neutrona, sve po jedinici površine.

Kratkoročne metode određivanja apsolutne starosti odnose se gotovo isključivo na uranov niz i najčešće obuhvataju vremenski raspon ispod 200.000 godina. Ove metode podesne su za datiranje savremenih marinskih sedimenata i sl., a baziraju na odnosima $^{230}Th/^{234}U$, $^{231}Pa/^{235}U$, $^{230}Th/^{231}Pa$, $^{234}U/^{238}U$.

Metamiktni minerali mogu isto tako da posluže za odredbe najstarijih, prekambrijskih tvorevina, pošto je metamiktizacija najčešće posledica dugotrajnog destruktivnog dejstva alfa čestica na rešetku minerala (metamiktni minerali su amorfni pri ispitivanju difrakcije X-zraka). Metamiktizacija nastaje međutim i zbog drugih uzroka, na pr. kod Nb i Ta oksida je posledica kompleksnog hemijskog sastava, a može se proizvesti i udarnim talasima [7].

---

* Spalacija (spallation) je dejstvo čestica (alfa, protoni, neutroni) vrlo visokih energija, u prirodi poreklom od kosmičkog zračenja, na jezgro.

IV.1.1.6. RADIOAKTIVNOST I TOPLOTA ZEMLJE

Radionuklidi stvaraju toplotu srazmerno energiji zračenja, pa su adekvatno tome alfa emiteri daleko najveći generatori toplote i daju oko 90% radiogene toplote. Količina toplote u jedinici vremena po jedinici mase izračunata je za svaki radionuklid kao što se vidi iz tabele IV.1.2. (prema [23]).

Tabela IV.1.2. Godišnja stopa stvaranja radiogene toplote

Toplotna energija	^{40}K	K	Sm	^{87}Rb	Rb	^{232}Th	^{235}U	^{238}U
J (džul) g^{-1}	0,92	113×10^{-6}	1430×10^{-6}	543×10^{-6}	150×10^{-6}	0,84	18,8	2,98

Najveće koncentracije radionuklida u zemljinoj kori nalaze se u granitoidnim stenama, koje su nosile znatno veće količine ovih nuklida u početnoj istoriji Zemlje, nego danas, što se vidi iz tabele IV.1.3. (prema [22]).

Tabela IV.1.3. Godišnja proizvodnja toplote u granitu od U, Th i K

Izotop	Danas			Pre 3×10^9 godina	
	10^{-6} J/g	%		10^{-6} J/g	%
^{238}U	11,95	42,62	10	18,89	30,64
^{235}U	0,58	0,29		10,95	17,97
^{232}Th	11,45	40,83	8	13,29	21,56
^{40}K	3,84	13,71	5	10,05	29,83
Ukupno	27,82	99,25*	23**	53,84	100,00***

* Ostatak do 100% dopunjavaju Rb (0,6%) i Sm (0,1%).
** Prema [7].
*** Rb i Sm nisu uračunati.

U tabeli IV.1.4, dat je pregled generisanja toplote u svim magmatskim stenama, prema učešću radioaktivnih elemenata (prema [23]).

Podaci o toplotnom protoku za celu zemljinu površinu kreću se, prema raznim izvorima, od 5—6,7 $\times 10^{-6}$ J $cm^{-2}s^{-1}$, pri čemu gotovo da nema razlike između okeana i kontinenata, što je veoma zbunjujući podatak, jer bi po navedenim podacima kontinentalna kora trebalo da daje dva puta više toplote od okeanske kore. Zemlja inače izračuje godišnje 4,8—10 $\times 10^{20}$ J [5; 23], ili tačnije 9,6 $\times 10^{20}$ J [27]. Smatra se da preko termalnih izvora odlazi 1,7 $\times 10^{18}$ J i preko vulkana 2,5 $\times 10^{18}$ J godišnje [16], a na zemljotrese je utrošeno 0,8 $\times 10^{18}$ J [23], što je sve oko 1% ukupnog gubitka toplotne energije Zemlje.

Tabela IV.1.4. Godišnja proizvodnja toplote u magmatskim stenama

Vrsta stene	K 10^{-6} J/g	Th 10^{-6} J/g	U 10^{-6} J/g	Ukupno	Ukupno***
Granitoidi	3,8	12,5	12,5	28,8	23
Intermedijarne stene	2,1	6,3	6,3	14,7	
Bazaltoidi	1,2	1,7	1,7	4,6	5
Ultrabaziti	0,0012	0,17	0,17	0,341	0,08
Kameni meteoriti	0,096	0,063	0,063	0,22	0,15
Stene Meseca:					
Morski bazalti i gabro (16 proba)	0,13**	1,0*	1,0*	2,13*	
Bazalne breče i tlo (15 proba)	0,22**	9,4*	9,5*	19,12	

* Izračunato po podacima [27] na bazi odnosa: 1 ppm U — 2,9 × 10^{-6} J/g; 1 ppm Th — 0,8 × 10^{-6} J/g; 1% K — 0,27 × 10^{-6} J/g.

** Prema [16];*** [7].

Pomenuti podatak o jednakom izračivanju toplote nad kontinentima i okeanom, značilo bi da se ispod (tanke) okeanske kore nalaze kiselije stene, što bi moglo da bude potkrepljeno činjenicom da neki vulkanski kompleksi usred Pacifika (Havaji na pr.) dobrim delom daju intermedijarnu pa i kiselu lavu, ili toplota potiče i iz nekih drugih izvora ili uzroka. U svakom slučaju ne može se prihvatiti pretpostavka da je celokupna toplota Zemlje radiogenog porekla, jer je generacija radiogene toplote mala.

U komentaru porekla unutarnje toplote kosmičkih makrotela P. Savić [24] navodi da bi prema geotermskom stupnju u centru Zemlje trebalo da vlada temperatura od 200.000 stepena, a ona je, prema proračunu na osnovu teorije Savić-Kašanin, 3670 K. Najverovatnije je da se poznati geotermski stupanj odnosi na kontinentalnu (granitoidnu) koru i da odražava najvećim delom radiogenu toplotu, dok je toplota Zemlje u celini, po Saviću, sasvim drugog porekla, zbog trenja faznih površina pojedinih slojeva (sfera) usled različitih rotacija, počev od najdubljeg težišnog sloja (sfere) kao promotora rotacije.

IV.1.2. Proizvodnja i primena radionuklida

Gotovo istovremeno sa otkrićem prirodne radioaktivnosti došlo se na pomisao o njenoj praktičnoj primeni, pa je već u samom početku 20. veka radijum bio korišćen za lečenje raka, a u drugoj polovini ovoga veka počinje masovna proizvodnja radionuklida. Najveći broj radionuklida proizvodi se po reakciji (n, p) ili (n, γ), neutronskim ozračivanjem u reaktoru, ili po reakciji (α, n), (α, p) u akceleratoru (I.1.4 i IV.5, tabela IV.5.1).

Radioaktivni izotopi se danas obilno koriste u mnogobrojnim oblastima čovekove delatnosti, kao na pr. u medicini, biologiji, agronomiji, industriji i dr. i odnose se na sledeća glavna polja primene: razaranje bolesnih ćelija, obeležavanje, analiza elemenata u tragovima, prozračivanje (defektoskopija, merenje debljine), sterilizacija, uticaj na hemijske procese, kalibracija uređaja za merenje radioaktivnosti i dr. Izbor nuklida vrši se prema nameni, pri čemu su od značaja poluživot (poluraspad) nuklida, za-

tim karakter, spektar i energija zračenja, hemijske osobine elementa kome pripada i sl. Primena zračenja vrši se bilo unošenjem ili nanošenjem već gotovog radionuklida ili se ovaj proizvodi na mestu dejstva iz postojećeg elementa neutronskom aktivacijom. Ova aktivacija se vrši bilo unošenjem predmeta u reaktor ili se ozračivanje vrši prenosivim izvorom neutrona (o ^{252}Cf kao snažnom izvoru brzih neutrona bilo je reči u odeljcima I.1.4 i III.3.3).

Za primenu u medicini, kao što je na pr. ozračivanje kanceroznog tkiva, danas se gotovo isključivo koristi kobalt 60 (uređaj za ozračivanje sa ^{60}Co neadekvatno je nazvan »kobaltna bomba«, što se inače odnosi na tzv. »prljavo« nuklearno oružje, sa košuljicom od kobalta, u kome ima ^{59}Co), umesto radijuma, koji je slabiji izvor gama zraka, širokog energetskog spektra.

Obeležavanje u živim organizmima vrši se ubacivanjem odgovarajućeg radionuklida bilo samostalnog ili uz odgovarajući stabilan elemenat kao nosioca, kojim se prate biološki tokovi u ljudskim, životinjskim ili biljnim organizmima. To su najčešće ^{32}P, zatim ^{14}C, ^{45}Ca, ^{42}K, ^{59}Fe, ^{131}I, ^{35}Cl i dr. Najpouzdaniji obeleživači za praćenje tokova podzemnih voda su radionuklidi, obično ^{86}Rb, ^{3}H, ^{24}Na, ^{131}I, ^{82}Br, ^{46}Sc i dr., pošto ne podležu nikakvim promenama hemijskog karaktera. U oba slučaja radi se o nuklidima kratkog života, koji posle najviše mesec dana praktično nestanu. Pritom se, naravno, strogo vodi računa o količinama, naročito kada se radi o čoveku i vodama u slobodnom toku. Za merenje protoka gasova, kao obeleživači služe ^{41}Ar, ^{85}Kr, ^{82}Br ($BrCH_3$) i dr.

U industriji cementa kao obeleživač uzima se ^{42}K (cirkulacija alkalija), u preradi nafte su to ^{46}Sc i ^{144}Ce, a za ocenu homogenosti raznih mešavina u hemijskoj industriji koriste se ^{132}I, ^{56}Mn, ^{24}Na, ^{42}K i ^{137}I, isto tako kratkog ili vrlo kratkog poluraspada.

Obeležavanje mehaničkih komponenti za ocenu habanja vrši se po pravilu neutronskom aktivacijom pojedinih nuklida koji se nalaze u njihovom sastavu. To su pre svega ^{58}Fe (0,33% ukupnog gvožđa), koji prelazi u radioaktivni ^{59}Fe (poluraspad 45 dana), zatim ^{31}P (0,4% u ukupnom sastavu, prelazi u ^{32}P, poluraspad 14 dana) kao i ^{50}Cr (radionuklid ^{51}Cr). Pored ovih, za aktivaciju služe i ostale komponente u čelicima da bi se dobili radionuklidi ^{182}Ta, ^{60}Co, ^{185}W, ^{187}W, ^{65}Zn i ^{14}C. Gotovi izotopi se isto tako mogu nanositi u tankom sloju ili u vidu čepova, što se ređe radi.

Veliku primenu ima jonizujuće zračenje za ocenu ispravnosti metalnih proizvoda ili zavarenih delova (defektoskopija) pri čemu se koriste jaki izvori gama zračenja, kao (najčešće) ^{60}Co, zatim ^{192}Ir, ^{134}Cs, ^{170}Tm i dr. Ipak se danas, gde je to moguće (lakši pristup), radije koriste posebni rentgen aparati, kao generatori veoma »tvrdih« X-zraka, ustvari većih energija nego kod ijednog prirodnog gama emitera, a i rukovanje radionuklidima visoke radioaktivnosti je znatno složenije, zbog posebnih mera transporta i skladištenja.

Od ostalih primena, posebno treba naglasiti sterilizaciju, naročito u medicini, zatim prehrambenih proizvoda, što se sve više koristi. Za kalibraciju mernih uređaja za gama zračenje danas se najčešće koristi ^{60}Co, zbog jednostavnog gama spektra, umesto ranije isključivo korišćenog radijuma, koji je u izvesnom smislu podesniji, zbog gama spektra koji se meri u prirodi.

IV.2. KRATAK PREGLED TEHNIKE NUKLEARNIH ENERGETSKIH REAKTORA*

Nuklearni reaktori se danas koriste širom sveta za proizvodnju električne energije, prvenstveno u zemljama sa deficitarnim drugim masovnim izvorima (hidroenergija, ugalj, nafta). Spontana fisija ili cepanje jezgra nekih nuklida urana ili transurana, pojačana i usmerena posebnom tehnikom, predstavlja osnovni proces rada nuklearnih reaktora. Nuklearna fisija je ogroman izvor energije na bazi transformacije mase u energiju (prema Ajnštajnovoj specijalnoj teoriji relativiteta — $E = mc^2$). Fisibilni uran 235, koji je glavni faktor fisije u većini komercijalnih reaktora u svetu, cepa se u osnovi na dva stabilna izotopa — ^{95}Mo i ^{139}La, mada ukupan bilans obuhvata oko 300 stabilnih i radioaktivnih izotopa (neki su nabrojani na kraju ovog poglavlja). Cepanje jednog jezgra praćeno je emisijom dva neutrona (nešto više, statistički uzev) uz oslobađanje energije od 180 MeV. Ako se u jednom gramu ^{235}U, koji sadrži $2{,}5 \times 10^{21}$ atoma, cepaju sva jezgra, bila bi oslobođena energija od $2{,}5 \times 10^{21} \times 180 = 4{,}4 \times 10^{23}$ MeV ili $7{,}2 \times 10^{10}$ J ($1 \text{ MeV} = 1{,}6 \times 10^{-13}$ J). Poređenja radi, sagorevanje jednog grama uglja srednjeg kvaliteta daje samo 17 J.

Fisija nastaje u tzv. lančanoj reakciji, kada dva izbačena neutrona vrše dalje cepanje jezgara uz oslobađanje četiri neutrona itd. Ovaj proces dešava se međutim pri određenoj količini fisionih jezgara, koja se zove kritična masa, uz vanrednu čistoću materijala.

U nuklearnom reaktoru vrši se kontrolisana delimična lančana reakcija odnosno oslobađanje takve količine toplotne energije, koja može da se transformiše, preko mehaničkog rada, u električnu energiju. U reaktorima se kao gorivo danas najviše koristi ^{235}U, ali sve više i plutonijum 239, i u perspektivi i uran 233, koji su oba proizvodnog porekla. Prirodni uran predstavlja smešu od 99,3% ^{238}U i 0,7% ^{235}U, koji — pod određenim uslovima — može da bude gorivo, ali se najčešće koristi obogaćeni uran, sa oko 3% ^{235}U. U reaktorima sa obogaćenim uranom fisiju vrše usporeni (moderirani) neutroni, nasuprot tzv. brzim ili super brzim reaktorima (briderima), koji rade sa znatno većim sadržajem fisibilnih nuklida (oko 20% smeše ^{235}U i ^{239}Pu i 80% ^{238}U), gde funkciju cepanja jezgra preuzimaju (srednje) brzi neutroni (vidi odeljak I.1.4). Ovi zadnji tipovi reaktora se zovu i oplodni, pošto se u njima stvara mnogo više goriva (na račun ^{238}U ili ^{232}Th) nego što se potroši.

Fisione reakcije u ovim postrojenjima su veoma složeni procesi, koji su ovde prikazani sasvim uprošćeno i pregledno. U reaktorima sa obogaćenim uranom, jezgro ^{235}U cepa se pod dejstvom sporih (termalnih) neutrona, a pošto u fisionim reakcijama nastaju pretežno brzi neutroni, oni moraju da se usporavaju, najčešće običnom vodom (parom) koja cirkuliše između gorivnih elemenata kao hladioc (i prenosioc toplote), ređe teškom vodom (^2H_2O) ili grafitom. Jezgro ^{238}U može isto tako da se cepa, ali isključivo dejstvom brzih neutrona (energije iznad 1,35 MeV) u određenom procentu, dok se drugi deo usmerava na apsorpciju i transformaciju u plutonijum. Zato se konstrukcija brzih reaktora podešava na maksimalnu pro-

---

* Korišćeni podaci [6; 10; 21; 28; 31] kao i iz propagandnih publikacija Electricité de France: Les centrales nucléaires, 1983. i La centrale de Creys-Malville, 1982.

dukciju umereno brzih neutrona (energije počev od 0,5 MeV), ali nikako i nekorisnih sporih neutrona, pa se kao hladioc (prenosioc toplote) koristi metal - natrijum. Ovaj hladioc ima i drugih povoljnih osobina, kao što su velika specifična toplota, visoka tačka ključanja (oko 800°C) i naročito mala apsorpcija neutrona. Bilans neutrona u jezgru brzog (plutonijumskog) reaktora je sledeći: od 100 neutrona 22 odlaze iz centra (oni služe za oplodnju ^{238}U u spoljašnjem omotaču odnosno za produkciju ^{239}Pu), 44 su zahvaćeni bez cepanja jezgra, a svega 34 izazivaju fisiju i to 26,5 u ^{239}Pu, dajući 77,5 novih neutrona, 4,2 u ^{235}U sa proizvodnjom 12 neutrona, a ostalo ide na ^{240}Pu, ^{242}Pu itd.

Druga važna osobina reaktora je specifična snaga (izgaranje ili količina toplote po jedinici mase goriva) koja se može izraziti jedinicom Wh/kg. Tako na pr. reaktori sa prirodnim uranom imaju specifičnu snagu od 0,1 GWh/kg, a brzi ili super brzi reaktori (brideri) — 1,8 GWh/kg. Pored specifične snage, koja zavisi prvenstveno od karaktera goriva, za reaktor odnosno nuklearno energetsko postrojenje je bitna ukupna snaga. Većina nuklearnih elektrana, koje su danas u pogonu, ima snagu od 300—700 MW (elektrana u Krškom, puštena u rad 1981. godine, ima snagu od 625 MW), mada ima dosta reaktora snage 1000 pa i 1500 MW, kao što su na pr. neki brzi reaktori u Francuskoj.

Izbor osnovnog tipa reaktora zavisi od gorivnog ciklusa, gde spada izbor vrste goriva (proces obogaćenja urana ili proizvodnja plutonijuma) prerada u nuklearno čisti metal ili oksid, izrada gorivnih elemenata, prerada i skladištenje isluženog goriva i sl., što u celosti predstavlja vrhunsku tehnologiju.

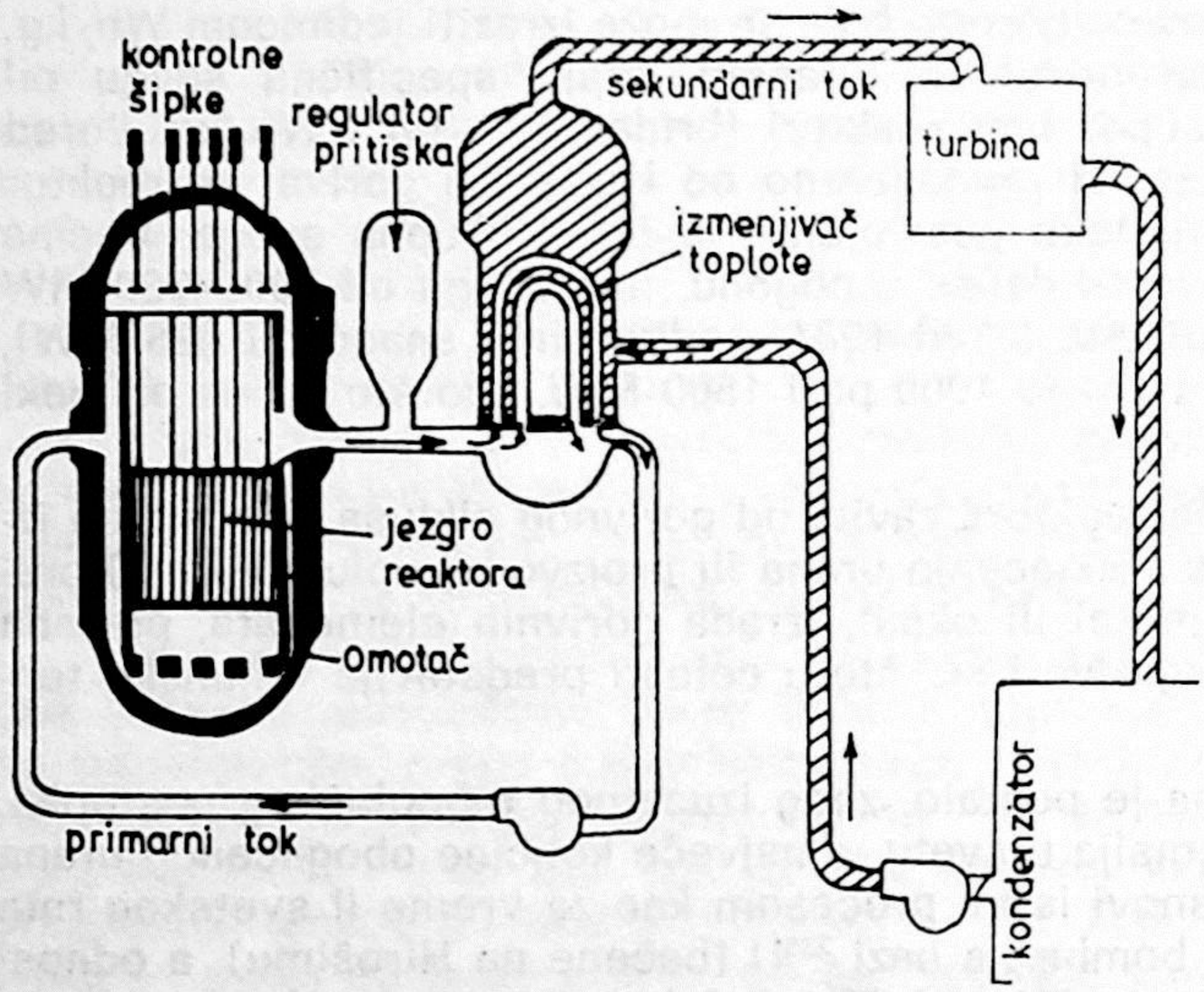
Obogaćivanje urana je postalo, zbog izuzetnog tehnološkog postupka, monopol malog broja zemalja u svetu, a najveće količine obogaćenog urana dobijaju se i danas u osnovi istim procesom kao za vreme II svetskog rata pri izradi prve atomske bombe na bazi ^{235}U (bačene na Hirošimu), a odnosi se na difuziono razdvajanje ^{235}U od ^{238}U (odeljak IV.1.1.1.). Ako se ulazna količina U_3O_8 uzme kao 100, onda proizvedeni gas UF_6 čini 85, a obogaćeni uran za gorivne elemente svega 16, ali je iskorišćenje u reaktoru još manje (svega 1%, dok je ostalo otpad, mada iz njega preradom može da se izdvoji zaostalo gorivo). Postoje i druge tehnike za obogaćivanje urana, na pr. na principu super brzog centrifugiranja i dr.

Posebnu granu nuklearne tehnike predstavlja izrada nuklearno čistih materijala, naročito za gorivne elemente i to kako samog goriva tako i omotača. Gorivni elementi, koji su glavni činioc funkcionisanja reaktora, izrađuju se u obliku šipki, sa omotačem-košuljicom bilo od legura cirkonijuma ili od standardnog nerđajućeg čelika. Gorivo se najčešće izrađuje u obliku malih pastila oksida urana ili plutonijuma (tzv. keramički tip goriva, podesniji od metalnog tipa), koje se mogu lakše dozirati u gorivnim elementima. Broj šipki kreće se od nekoliko stotina do par hiljada, mada se u jednoj šipki može naći više manjih šipki (»igle«), čime se ukupan broj gorivnih elemenata znatno povećava.

Regulisanje režima rada reaktora, podrazumevajući i uključivanje odnosno isključivanje, vrši se, pored doziranja količine goriva, još i posebnim šipkama sa apsorberima neutrona, izrađenim od elemenata (nuklida) sa visokim specifičnim presekom, kao što su kadmijum i bor. Ubacivanjem

ovakvih šipki u reaktor smanjuje se fluks neutrona, pa se može postići i potpuno gašenje reakcije.

Nuklearni reaktor je samo jedan, svakako najvažniji deo energetskog postrojenja, u kome izbor gorivnog ciklusa zavisi od više faktora, od kojih su najbitniji sigurnost, ekonomičnost i strategijska nezavisnost. Pored reaktora, koji podrazumeva i fluid bilo kao prenosnik toplote ili moderator, u sastav postrojenja ulazi izmenjivač toplote, u kome rashladni fluid (tečnost ili gas-para) iz samog reaktora prenosi toplotu, bez neposrednog dodira, na vodu, koja se pretvara u paru za pogon generatorskog sistema (sl. IV.8).



Sl. IV.8.
Šematski prikaz nuklearnog reaktora tipa PWR (prema: Les centrales nucléaires, Electricité de France, 1983).

Radna temperatura reaktora sa obogaćenim uranom, sa običnom ili teškom vodom kao rashlađivačem, obično je 300°C, a kod brzih (super) reaktora ona je znatno viša — oko 700°C. Posebna prednost »brzih« reaktora nad »sporim« sastoji se u tome što se kod njih kao jezgro za oplodnju, pored urana 238, od koga se dobija ^{239}Pu, može upotrebiti i torijum 232, koji se transmutira u uran 233, a to je treći fisioni nuklid, zajedno sa ^{235}U i ^{239}Pu. Značaj sistema ^{232}Th-^{233}U je i u boljem faktoru iskorišćenja, koji je višekratno veći od sistema U-Pu, čime se inače proizvodi oko sto puta više goriva nego što se potroši za njegovo oplođivanje. Ovde treba, međutim, reći da brzi reaktori zahtevaju daleko veću predostrožnost kod rada, zbog visoke specifične snage i brzih postizanja visokih radnih temperatura. Treba isto tako napomenuti da, uprkos neuporedivo boljem iskorišćavanju goriva, što je važno za zemlje sa ograničenim resursima urana i torijuma, postoji i rizik krijumčarenja i zloupotrebe plutonijuma. Najveći stepen izgradnje brzih reaktora u svetu postignut je u Francuskoj, gde se u komercijalnoj proizvodnji električne energije nalazi nekoliko takvih postrojenja, kao »Phénix« (Feniks), »Superphénix« i dr.

Podela reaktora na određene tipove uključuje više veoma raznorodnih karakteristika, a u sam naziv (isto kao i skraćenica) ulaze obično one

manje važne. Najrašireniji tip se naziva, na engleskom jeziku, PWR (P r e s s u r i z e d W a t e r R e a c t o r). To je tipičan reaktor sa obogaćenim uranom (do oko 3% ^{235}U), hlađen i moderiran sa običnom vodom pod visokim pritiskom (ovom tipu pripada i elektrana Krško). Jedna varijanta ovog tipa je BWR (B o i l i n g W a t e r R e a c t o r), koji kao ohlađivač i moderator koristi kipuću vodu, po čemu se gotovo jedino razlikuje od prvog. Za prvi tip ruska skraćenica je VVER, a francuska REP. Od prethodnih se znatno razlikuje tip HWR (H e a v y W a t e r R e a c t o r) ili teškovodni reaktor, sa deuterijumskom vodom kao ohlađivačem i moderatorom. Kao gorivo u njemu se koristi prirodni uran (sa 0,7% ^{235}U), što nije neka izuzetna prednost, pošto su za proizvodnju teške vode potrebne ogromne količine električne energije. Pored teške vode, kao moderator se koristi i grafit, uz gasni ohlađivač i prenosnik toplote. Ovom tipu pripadaju reaktori iz Černobiljskog kompleksa (ruska skraćenica za ovaj tip je RBMK), a slični su reaktori sa engleskom oznakom GCR (Gas Cooled Reactor — gasom hlađeni reaktor), zatim HTGR (High Temperature Gas Cooled Reactor) što bi najverovatnije odgovaralo ruskom RBMK itd.

Sasvim specifičan tip predstavlja reaktor C A N D U (Kandu) kanadske proizvodnje, koji je pre svega oplođivač. U ovome reaktoru se na jezgro urana 238 ili torijuma 232 usmerava snop protona iz akceleratora, energije 1000 MeV, koji udarom u metu proizvodi ogroman fluks neutrona, a koji zatim deluju kao u klasičnom reaktoru. Na taj način se proizvede jedna tona fisibilnog materijala godišnje (^{239}Pu ili ^{233}U), što je dovoljno za daljih 5000 MW, imajući svakako u vidu troškove prečišćavanja goriva, utrošenu energiju akceleratora (300 MW) i dr.

Kod reaktora snage 1000 MW, za tip PWR potrebno je oko 220 t obogaćenog urana godišnje, za BWR oko 200 t, a za HWR oko 160 t prirodnog urana godišnje, ali i ukupna količina od 850 t teške vode (za oko 20—25 godina života reaktora). Treba uzgred napomenuti da se oplodnja ^{238}U u ^{239}Pu vrši i u »sporim« reaktorima tipa PWR, tako da se godišnje dobije 100—150 t plutonijuma, koji se, međutim u većini zemalja (izuzev u Francuskoj) za sada ne prečišćava, već ide u skladište otpada.

Korišćenje nuklearnih rektora se od kraja sedamdesetih i početka osamdesetih godina sve više dovodi u sumnju zbog učestalih akcidenata (a i vrlo skupe izgradnje, u funkciji sve rigoroznijih mera sigurnosti) naročitog posle tragične havrije jednog reaktora u Černobilju 1986. godine, čije je posledice osetila gotovo cela Evropa. Sredinom osamdesetih godina u svetu je bilo u radu 345 nukleannih energetskih postrojenja, sa ukupnom snagom 220.000 MW, najvećim delom instaliranih u SAD, SSSR i Francuskoj (u ovoj zadnjoj zemlji sa učešćem od preko 60% u proizvodnji električne energije). Pored mogućih akcidentalnih situacija, poseban problem predstavljaju radioaktivni »otpaci« u vidu isluženog goriva, koji moraju da budu trajno zaštićeni, kao i celokupna visokoradioaktivna instalacija samog reaktora, posle definitivnog prestanka rada elektrane (oko 25 godina). Sve ovo ima direktan finansijski efekat, koji će pored sve akutnije energetske deficitarnosti s jedne strane i još uvek nedovoljno poznatih dugoročnih bioloških efekata s druge strane, odigrati bitnu ulogu u rešavanju sudbine daljeg korišćenja nuklearne energije. Glavno rešenje moralo bi da bude nova, sigurnija i jeftinija tehnologija korišćenja nuklearne energije, s obzirom da osvajanje novih, čišćih i sigurnijih masovnih izvora energije još nije na

pomolu. Mada zvuči paradoksalno, omasovljenje korišćenja nuklearne energije, uz rigoroznu kontrolu i svetsku standardizaciju mera sigurnosti svakog reaktora, moglo bi da bude spas čovečanstva od ekološke katastrofe koja je na pragu usled pogubnog dejstva izduvnih gasova klasičnih goriva na Zemlju kao planetu.

Na kraju treba reći nešto o radioaktivnim produktima fisije urana, koji su istovetni kako u reaktorima, tako i pri nuklearnim (fisionim) eksplozijama. U procesu fisije, u prvom redu urana 235, nastaje par stotina radioaktivnih i stabilnih izotopa (otprilike pola-pola) [8], koji se grupišu oko dva kulminaciona pika: laki produkti u domenu masenog broja (A) oko 95 (^{95}Mo) kao i teški A 140 (^{139}La). U prvoj grupi najveći značaj po količinama i stepenu radioaktivnosti imaju radioizotopi ^{85}Kr i ^{90}Sr, a zatim ^{91}Y, ^{95}Zr, ^{98}Sr, ^{103}Ru, ^{106}Ru i dr., a u drugoj grupi to su ^{131}I i ^{137}Cs, kao i ^{139}Xe, ^{140}Ba, ^{141}Ce, ^{143}Pr, ^{144}Ce, ^{147}Nd, ^{147}Pm i dr. Na kratkoživeće radionuklide (do 24 h) otpada 52%, oni sa poluživtom do 30 dana čine oko 22%, do jedne godine oko 13%, a na dugoživeće (preko jedne godine) otpada isto tako 13% (ovde spadaju i najštetniji — ^{90}Sr i ^{137}Cs, oba oko 30 godina poluraspada). Tu dalje ima dosta ^{238}U (ustvari glavna masa), zatim ^{235}U i naročito plutonijuma. Od mnogobrojnih stabilnih izotopa neki su navedeni u poglavlju IV.4 (Fenomen Oklo).

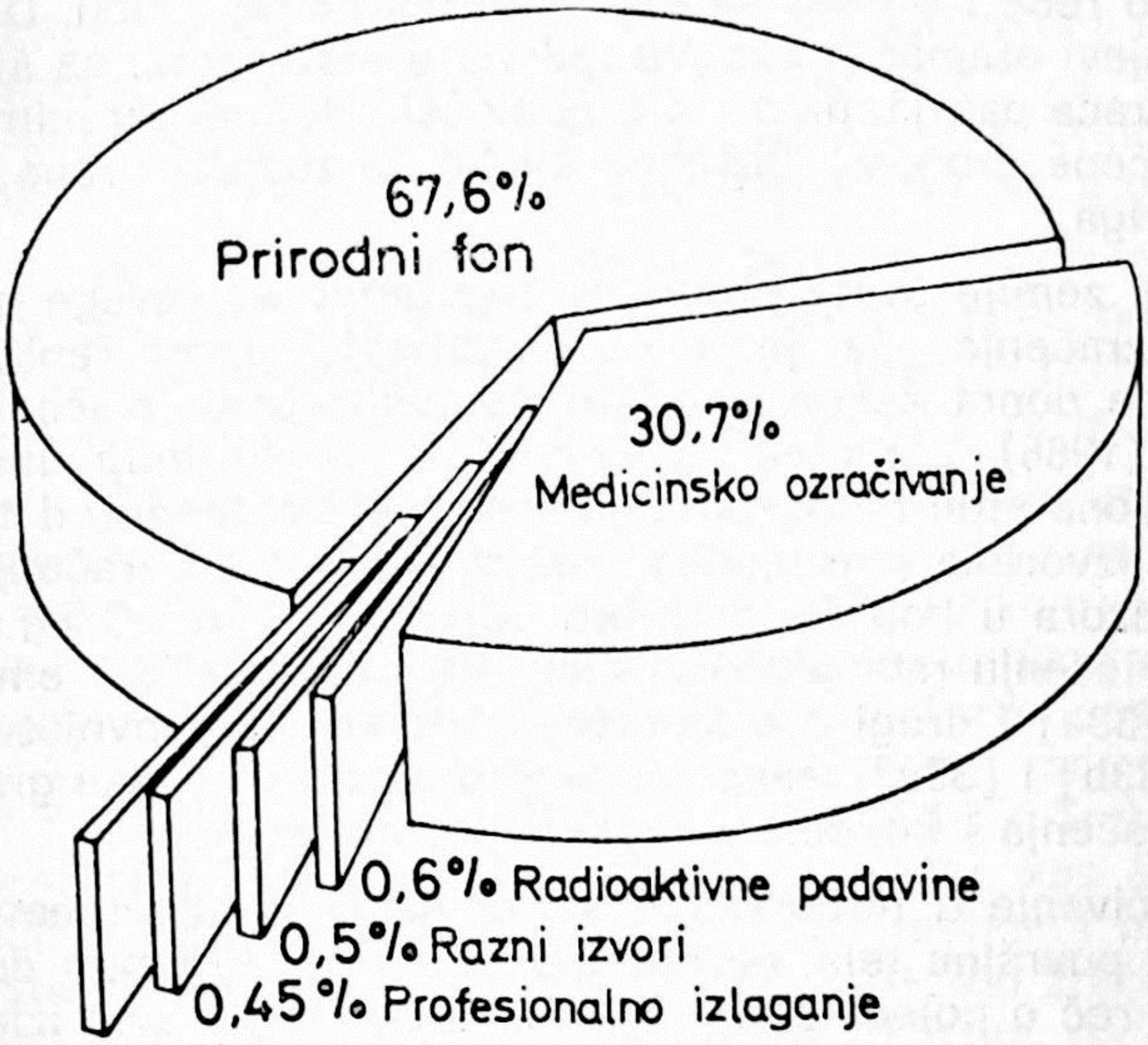
IV.3. ZAŠTITA OD JONIZUJUĆEG ZRAČENJA

Prošlo je relativno dugo vremena posle otkrića radioaktivnosti dok se nije ozbiljnije shvatila štetnost prekomernog izlaganja ljudskog tela jonizujućem zračenju. Izgleda da nisu bile dovoljno upozoravajuće prerane smrti mnogih istraživača radioaktivnosti zbog oboljenja raka, među njima Marije Kiri, Anrija Bekerela i Enrika Fermija, već je trebalo da budu bačene atomske bombe na žive ciljeve u Hirošimi i Nagasakiju, da bi doprle do svesti činjenice o radijacionom ubijanju. Zbog toga upravo odmah nakon završetka rata počinju intenzivna istraživanja efekata jonizujućeg zračenja na ljudski organizam, ali je već tada bilo jasno da se proces oštećenja organizma mora pratiti na duže vremenske staze, čak i kroz više generacija.

Uglavnom su poznate, mada još uvek nedovoljno jasne, okvirne granice »dozvoljene« doze i intenziteta zračenja odnosno količine različitih radioaktivnih materija u organizmu, mada i tu ima dosta varijacija i posebnih uslova. Poznato je na pr. da su ekstremiteti tela (ruke i noge) manje podložni oštećenjima od unutrašnjih organa i da su najosetljivija očna sočiva i organi stvaraoci krvi, a isto tako da je rizik oštećenja organa obrnuto proporcionalan godinama starosti.

Čovek je, ustvari, svakodnevno izložen zračenju, najvećim delom od strane prirodnog ambijenta, kao što su zemljište, zgrade za stanovanje, hrana, pa i sopstveno telo, koje sadrži radioaktivne nuklide, makar u najminimalnijim količinama. Na sl. IV.9 prikazano je srednje učešće faktora normalne ozračenosti čoveka, koje može da varira od slučaja do slučaja. Ljudi koji žive na većim nadmorskim visinama više su izloženi kosmičkom zračenju, zatim u nekim terenima u svetu, pa i u Jugoslaviji (država Kerala u Indiji, površi Posos Kaldasa u Brazilu, neka područja alkalnih stena kod Kumanova i Gnjilana u Jugoslaviji) gde je zračenje zemljišta povećano u

odnosu na uobičajen fon po nekoliko puta, a izuzetno i desetke puta. S druge strane, u Evropi je odmah posle Černobiljskog akcidenta na mnogim površinama intenzitet jonizujućeg zračenja višestruko porastao (u Beogradu, u prvom danu maja 1986. godine preko deset puta u odnosu na prethodni fon). Procenti na sl. IV.9 izvedeni su na osnovu merenih doza ekvivalentnog zračenja u sivertima (I.3). Tako na pr. od kosmičkog zračenja na malim



Sl. IV.9.
Procentualna raspodela ozračenosti čoveka u životnom ambijentu (Radiation — a fact of life, IAEA A-1400, Vienna, 1979).

nadmorskim visinama čovek prima godišnju dozu od 0,5 mSv, od hrane, vode i vazduha oko 0,25 mSv, od rentgenskih pregleda 0,2 mSv itd.

Zaštita od jonizujućeg zračenja podrazumeva preduzimanje mera da se ljudski organizam ne izloži prekomernom zračenju u bilo kom vidu. Postoje u osnovi dve mogućnosti ozračivanja: (1) spoljašnje, prvenstveno od gama zračenja i (2) unutrašnje, od svih vidova zračenja, prvenstveno od alfa i beta čestica. Ovde uglavnom neće biti reči o zračenju drugih teških čestica (neutroni i protoni) sa kojima se čovek sreće samo u izuzetnim slučajevima.

(1) Spoljašnje ozračivanje

Najčešći vid spoljašnjeg ozračivanja sa kojim se čovek može suočiti su jaki izvori gama zračenja, uglavnom manufakturnog porekla, koji se koriste u razne svrhe, kako je to navedeno u tabeli IV.5.1. Kako se uređaji za korišćenje gama zračenja ne mogu dovoljno zaštititi, uvek postoji povećanje nivoa zračenja (nekorisno zračenje), o kome će ovde uglavnom biti reči, pored rizika akcidentalnog ozračivanja. Ovaj zadnji vid se dešava izuzetno retko, mada može biti masovan, kao u slučaju havarija nuklearnih elektrana i, naravno, u slučaju nuklearnog rata.

(2) Unutrašnje ozračivanje

Mogućnost unutrašnjeg ozračivanja je daleko češća i masovnija, mada ne i tako akutna kao u prethodnom slučaju. To se najčešće odnosi na unošenje određenih (dugoživećih) radionuklida preko hrane ili udisanjem. Unošenje hranom je naročito postalo aktuelno posle Černobiljske katastrofe i izazvalo je mnogo čarki u međunarodnom prometu hrane. Mogućnost unošenja udisanjem je znatno ređe i odnosi se najvećim delom na radon. Danas su poznati neki slučajevi stalnog prisustva radona u stanovima, na šta se tek u zadnje vreme obraća pažnja, naročito u geološki rizičnim terenima (granitoidne stene obogaćene uranom). Poseban slučaj su rudnici urana o čemu se vodi posebna briga.

Danas praktično sve zemlje sveta propisuju regulative usmerene na zaštitu od jonizujućeg zračenja, pa je i u Jugoslaviji, pored ranijih propisa [32], 1984. godine donet Zakon o zaštiti od jonizujućeg zračenja [33], a nešto kasnije (1986) i prateći pravilnici o konkretnim merama. U tekstu samog zakona stoji na pr. da trudnice i osobe mlađe od 18 godina ne mogu rukovati izvorima jonizujućeg zračenja, kao i da zračenje na 5 cm od ekrana televizora u boji ne sme biti veće od 0,036 nC/kg.s. Tri pravilnika, jedan o korišćenju radioaktivnih materija i uređaja koji emituju jonizujuće zračenje [33a] i drugi o granicama ozračenja stanovništva iznad određene granice [33b] i [33c], jasno i veoma precizno definišu granične doze jonizujućeg zračenja i količine radioaktivnih materija.

Kao spoljašnje ozračivanje u terapeutske svrhe na pr. podrazumeva se dejstvo do 1 cm ispod površine tela, na površini prečnika 30 cm, a dubinsko do 28 cm. Kada je reč o pojedincima koji su na bilo koji način izloženi zračenju, onda se razlikuju lica koji rade sa izvorima zračenja, kao i »pojedinci iz stanovništva, čije je ozračivanje homogeno i reprezentativno za pojedince koji primaju najveću dozu«. Osim toga, zakonski se razlikuju »stohastični efekti« (gde se pretpostavlja moguće odnosno slučajno zračenje, bez granične doze) i »nestohastični efekti« (akcidentalnog karaktera, sa graničnom dozom). Ovde se najzad uvodi i pojam efektne ekvivalentne doze $H_e = \Sigma_i W_i \cdot H_i$, gde je W_i — faktor štetnosti za pojedine delove tela (i), na pr. za gonade je 0,25 (25%) ili za kosti svega 0,03 (3%), a H_i je srednja ekvivalentna doza, za i-ti deo tela (tkivo).

Za lica koja rade sa izvorima jonizujućeg zračenja, za nestohastične efekte godišnja granična ekvivalentna doza (GGED) ne sme iznositi više od 500 mSv* za sva tkiva (izuzev za očna sočiva i organe stvaraoce krvi, gde je dozvoljena doza 150 mSv godišnje). Za stohastične efekte, u slučaju ravnomernog ozračivanja celog tela GGED iznosi 50 mSv. Za stanovništvo su granične doze znatno manje, tako da je za ravnomerno ozračivanje celog tela (kod stohastičkih efekata) doza 5 mSv godišnje, a ako je zračenje sredine blisko GGED, mora se izvršiti ograničenje, da bi se svelo na srednju godišnju dozu od 1 mSv. Toliko je na pr. zračenje sredine u Njujorku, Londonu i Parizu, a najverovatnije i u Beogradu (sada nešto veće, za oko 30—40%). Izgleda da u pomenutim sredinama sa višestruko većim

---

* Nastradali vatrogasci Černobilja primili su blizu 18.000 puta veću dozu zračenja, oko 1 Sv u jednom satu (prema [1]).

zračenjem rizik oštećenja organizma, prilagođenog vekovnim življenjem u takvom ambijentu, nije veći nego u »normalnim« sredinama.

Kada je reč o radioaktivnim materijama u prometu, one su određenim zakonskim propisom razvrstane po radiotoksičnosti (i još po nekim osobinama, kao poluživot i sl.) u četiri grupe, pa se u prvoj grupi, kao najopasniji, nalaze ^{90}Sr, ^{226}Ra, ^{232}Th, zatim većina transuranskih elemenata, uključivši, pre svega, ^{239}Pu. Iz ovoga se vidi da su to pre svega alfa i beta emiteri, mada je tu i ^{226}Ra, koji je (sa potomcima u ravnoteži) i snažan gama emiter. Izrazito snažni gama emiteri kao ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{22}Na i dr. spadaju u drugu grupu, isto kao i prirodni U, koji je sam po sebi (bez potomaka) slabiji alfa emiter. U trećoj grupi navodi se 88, a u četvrtoj 44 radioizotopa.

Kod uređaja koji koriste zatvoreni izvor zračenja (na pr. »kobaltna bomba« sa ^{60}Co), zračenje na 1 m od obloge (nekorisno zračenje) ne sme preći apsorbovanu dozu od 8 nGy/s (oko 72 pC/kgs ili 260 mGy na godinu, što bi odgovaralo istoj ekvivalentnoj dozi za isto vreme u mSv).

Za otvorene izvore jonizućujeg zračenja uzima se gore navedena podela na četiri grupe, ali se vrši i podpodela na tri klase radova, pa se u I grupi za I klasu radova (sa najvećim rizikom) kao minimalna količina od značaja smatra 3700 Bq (ne tako retka količina radona na jedan litar vode nekih izvora u Srbiji i Makedoniji), a dozvoljena aktivnost na mestu rada je $3{,}7 \times 10^8$ Bq. To znači da se na mestu rada može naći 1 mg radijuma (1 Bq ^{226}Ra je $2{,}72 \times 10^{-11}$ g — tabela I.3.). Treba napomenuti da se ovde predviđaju mere predostrožnosti pri radu, kao što su na pr. hvataljke sa dužim ručicama, s obzirom da 1 mg radijuma u čvrstom stanju (u platinskoj kapsuli) na 1 m odstojanja ima jačinu zračenja od 60 pC/kgs. Zakon isto tako vodi računa i o karakteru zračenja, pa je granica dozvoljene koncentracije na radnoj površini, za alfa emitere 4×10^4 Bq/m², a za beta i gama emitere deset puta više.

Pravilnikom o dozvoljenim granicama kontaminacije čovekove sredine [32] detaljno se navode granične količine svih značajnijih izotopa bilo u Bq u toku godine ili Bq/m³ (m²) odnosno u gramima na godinu ili g/m³ (g/m²) koji se mogu unositi u organizam udisanjem ili preko hrane i vode (ingestijom) ili pak mogu biti prisutni na radnom mestu ili u životnoj sredini. Tako na pr. godišnje količine ^{137}Cs koje se udišu u životnoj sredini ne smeju preći 9000 Bq odnosno koncentracija u 1 m³ može biti do 1,2 Bq. Za ^{238}U dozvoljene količine su u toku godine manje — 300 Bq odnosno 0,03 Bq/m³, zbog toga što se radi o alfa emiteru. Granična koncentracija radona u radnoj sredini je oko 1000 Bq/m³ (u stambenoj zgradi na pr. tek 33 Bq/m³), a u vodi za piće — 7×10^4 Bq/m³ (radna sredina) odnosno 7×10^3 Bq/m³ (životna sredina) ili, u zadnjem slučaju, 7 Bq/l što je čak ispod granice sadržaja u većini izvora u granitskim područjima. Za uran se dozvoljava udisanje u radnoj sredini do 6700 Bq godišnje odnosno koncentracija do 2,6 Bq/m³. Novom verzijom istoimenog Pravilnika [33c] predviđena je nešto drugačija metodologija određivanja graničnih količina svih radionuklida u radnoj i životnoj sredini, kao i u raznim upotrebnim materijalima. Granične tabelarne vrednosti su isto tako delimično izmenjene, tako da su za neke radionuklide ublažene (^{131}I, ^{226}Ra i dr.), ali i drastično pooštrene. Tako je na pr. za ^{238}U umesto 0,03 Bq/m³ dozvoljeno svega 0,005 Bq/m³. Za radon se dozvoljene koncentracije izražavaju »u obliku

inhalirane potencijalne energije alfa čestica« (član 7, [33c]) i to 2×10^{-2} J za kratkoročne potomke ^{222}Rn.

Mere koje se preduzimaju u cilju zaštite od jonizujućeg zračenja mogu biti (1) aktivne i (2) pasivne.

(1) Aktivna zaštita

Pod aktivnom zaštitom se podrazumevaju mere za smanjenje ili sprečavanje jonizujućeg zračenja, ekraniranjem podesnim absorberima ili uklanjanjem izvora zračenja van domena dejstva na ljudski organizam. Tipičan primer aktivne zaštite su rudnici urana, gde se vrše razne radnje za uklanjanje radona, pre svega podesnom ventilacijom, zatim hermetičkim zaziđivanjem svih nefunkcionalnih prostorija i dr. Masovna aktivna zaštita primenjena je i u okolini havarisanog reaktora u Černobilju, skidanjem i uklanjanjem površinskog sloja zemlje sa dugoživećim radionuklidima. Prvi i najhitniji postupak u sličnim slučajevima havarije reaktora ili posle nuklearne eksplozije jeste izbegavanje stajanja pod otvorenim nebom, naročito ako dođe do atmosferskih padavina, ili — ukoliko je to bilo neizbežno — što hitnije kupanje i ispiranje (nezagađenom) vodom tela u svega što će se opet naći u dodiru tela (odeća, obuća i dr.). Isto tako, aktivna zaštita podrazumeva što manje zadržavanje, ukoliko nije moguće potpuno izbegavanje u blizini izvora zračenja.

Sledeći vrlo značajan primer aktivne zaštite su postupci sa nuklearnim otpacima, naročito sa iskorišćenim gorivom nuklearnih reaktora, o čijem je sastavu opširnije bilo reči u prethodnom poglavlju (IV.2). Tretman isluženog goriva se sastoji u privremenom i stalnom odlaganju, što čini rastući problem u uslovima sve većeg gomilanja. Ovaj tretman se u osnovi sastoji u iznalaženju što bezbednijeg načina i mesta za trajno deponovanje (najmanje oko 150 godina, što je vreme svođenja na minimalne, praktično bezopasne količine onih najopasnih radionuklida, kao što su ^{90}Sr i ^{137}Cs). Privremeno odlaganje se obično vrši u krugu elektrana, po pravilu u vodenim basenima, gde se gorivo drži zbog raspada vrlo aktivnih kratkoživećih izotopa. Dalji postupak se obično svodi na pravljenje čvrstih blokova, bilo od (jeftinijeg) betona ili vitrifikacijom (topljenjem sa staklom), što se smatra mnogo povoljnijim, ali i znatno skupljim rešenjem, koje pak nije i apsolutno bezbedno. Trajno pohranjivanje vrši se obično u napuštenim, stabilnim rudničkim prostorijama, gde je cirkulacija podzemnih voda svedena na minimum, kao na pr. u rudnicima soli. Ni ovo se ne smatra sasvim sigurnim, pa se predlaže čak izbacivanje ovih blokova u stabilne orbite oko Zemlje ili bespovratno u pravcu Sunca.

Interesantan je predlog P. Savića [25] da se opasni radionuklidi (»nuklearne štetočine«) inaktiviraju nuklearnom transmutacijom u stabilne izotope gađanjem teškim česticama, protonima i neutronima (u akceleratoru), kao na pr. ^{137}Cs (p, n) ^{137}Ba. Ovaj postupak je tehnički izvodljiv i značajan je što predstavlja trajno i dosada najbezbednije rešenje, mada je i ovde cena koštanja neizbežni faktor izbora.

(2) Pasivna zaštita

Pod pasivnom zaštitom, kada je neizbežan rad sa izvorima jonizujućeg zračenja, podrazumeva se merenje doze zračenja, da bi se tačno odredilo vreme jednokratnog izlaganja dozama iznad dozvoljenog obima. Zato se pod merom zaštite podrazumeva kako merenje stepena radioaktivnosti određenog ambijenta u celini ili nošenje individualnih dozimetara zračenja. U drastičnim slučajevima preduzima se aktivna zaštita evakuacijom. Na granici između aktivne i pasivne zaštite je kontrola ljudske i stočne hrane, čime se, s jedne strane sprečava kontaminacija ljudske hrane, a s druge strane ukazuje na potrebu uklanjanja već kontaminirane ljudske i stočne hrane. Ovo se isto tako odnosi na ograničavanje broja rendgenskih pregleda, naročito za decu i trudnice.

Najveća enigma radioaktivnog zračenja je dugoročno dejstvo u smislu genetskih mutacija, koje bi se objektivno mogle pojaviti posle više generacija, što je teško pratiti i dokazati. Treba, međutim imati u vidu da mutacije vrši svako jonizujuće zračenje, uključivši i svakodnevni ambijent, koji se, po intenzitetu zračenja može i višestruko razlikovati, ako se na pr. uporede ravničarska sedimentna područja, sa niskim sadržajima radioelemenata i niskim fonom kosmičkog zračenja, i planinski granitoidni tereni, sa znatno većim sadržajima urana, torijuma i kalijuma, pored povećanog kosmičkog zračenja. Prema nekim ispitivanjima izgleda da razlike u zdravstvenom stanju stanovništva u oba tipa područja nije bilo.

IV.4. FENOMEN OKLO

Dosije Oklo otvoren je 1972. godine kada je primećen gotovo zanemarujući manjak urana 235 (0,71 umesto 0,72%) u fabrici za separaciju Pieralat u Francuskoj. Ispitivanjem rude iz pojedinih zemalja došlo se do Gabona (centro-zapadna Afrika), a ubrzo i do ležišta Oklo, pa je tako nađeno da ova ruda sadrži svega 0,44% ^{235}U, bar u partijama koje su separisane. Ukoliko se u prvih mah moglo sumnjati da je gubitak posledica greške u tehnološkom postupku, sada je bilo jasno da se radi o sasvim novom, dotada u svetu nepoznatom slučaju, što je moglo da znači jedino da se ^{235}U trošio u procesu fisije.

Tako se došlo do ideje o prirodnom nuklearnom reaktoru, pa su otpočeta veoma obimna ispitivanja i istraživanja, slično »poteri za uranom« početkom pedesetih, ali sada na mnogo višem nivou i iz sasvim drugih razloga: radilo se o izvanrednoj naučnoj senzaciji.

O ovom fenomenu održana su u kratkom roku dva simpozijuma, jedan 1975. godine u Librvilu (Libreville) u Gabonu, pod nazivom »Fenomen Oklo« (Le phonemene d'Oklo [13]), a drugi po temi »Prirodni fisioni reaktori« (Les reacteurs de fission naturels [15]) u Parizu 1977. godine. U dve izdate knjige ukupnog obima od 1400 stranica objavljeno je preko 80 radova od preko 100 autora, uključujući i diskusije okruglog stola, sve zbog jednog ležišta koje zahvata površinu od par hektara, što je verovatno jedinstven slučaj u istoriji geoloških nauka. Poseban značaj ima izraziti multidisciplinaran karakter ovog poduhvata, gde su bili angažovani istraživači raznovrsnih struka, u osnovi iz geoloških, hemijskih i fizičkih naučnih oblasti,

uključivši biostratigrafiju, sedimentologiju, petrologiju, mineralogiju, geohemiju, posebno izotopsku, raznovrsnu analitiku, fiziku nuklearnih reaktora i dr.

Ovde će biti samo izuzetno citirani pojedinačni autori, jer su mnogi fenomeni opetovano obrađivani u mnogim radovima čije pojedinačno citiranje nema svrhe u jednom ovako kratkom prikazu. Osnovni odeljci ovog poglavlja odnose se na geološke aspekte, uključivši geološko-petrološku građu ambijenta i karakter orudnjenja, mineralni i hemijski sastav, geohemiju i fiziku reakcije.

IV.4.1. Geološka građa područja i uranovo orudnjenje

Glavna geološka jedinica u širem području, u kojoj se nalazi orudnjenje urana, naziva se serija ili formacija Francevillien. Ova jedinica pripada srednjoj prekambriji, sastoji se od nemetamorfisanih klastičnih sedimenata, koji leže diskordantno preko granitoidno-kristalaste podloge (granitoidni masiv Chaillu — Šaiju) stare oko 2600 miliona godina. Ova formacija zahvata površinu od oko 35.000 km^2 i ima maksimalnu debljinu od oko 5000 m. U bazi se nalaze peščari pretežno fluvio-deltaičnog karaktera (jedinica FA) debeli oko 1000 m, preko njih leže peščari i peliti sa donjim (bazičnim) vulkanogeno-sedimentnim kompleksom (FB), debljine oko 1500 m, zatim sledi jedinica jaspisa (FC) debela oko 40 m, pa gornji vulkanogeno-sedimentni kompleks (FD) debljine 150—1000 m i najzad jedinice gornjih peščara (FE). Sedimentacija je vršena u uslovima vertikalnih oscilacija sa smenjivanjem dubokovodnih i kontinentalnih sredina. Ovi sedimenti su uglavnom blago ubrani, na istočnom obodu nešto jače deformisani, a orudnjenje se nalazi u jednoj hektometarskoj sinklinali, u blizini strmog tektonskog kontakta sa granitoidima Šaiju. Ova formacija je stara 1800—2000 miliona godina, i probijena je znatno mlađim sijenitima, doleritima i drugim magmatitima.

Orudnjeno područje nalazi se u jugoistočnom delu Gabona na oko tridesetak kilometara severno od grada Fransevila. Ovde se ustvari nalaze tri ležišta urana, udaljena par kilometara jedno od drugog. Ležišta Munana (Mounana) i Bojindzi (Boyindzi) nalaze se najsevernije, u jedinici peščara i pelita (FB), dimenzije oko 160×40 m, a minerali orudnjenja su uglavnom vanadati i fosfati. Oklo se nalazi oko 1500 m južnije, a orudnjenje zaleže u gornjem delu baznih peščara (FA), debljine 4—10 m. Ovde se ustvari nalaze dva različita tipa orudnjenja. Jedan tip predstavlja »siromašno« orudnjenje, sadržaja urana 0,3—0,5%, u silifikovanim peščarima, sa primetnim količinama organske materije i pirita, kao i nešto galenita. Drugi tip se sastoji od vrlo bogate rude sa 5—20% urana (srednje), sa maksimalnim sadržajima čak 65% (u vreme reakcije bilo je i 80% U), bez silifikacije, sa glinovitim gangom, u tzv. crnim peščarima. Debljina orudnjenog intervala je 4—10 m, a bogata ruda se javlja u vidu sočiva dužine 20—40 m. Starost orudnjenja je bila predmet mnogih ispitivanja i najverovatnije je ista kao i sedimenata — oko 2000 miliona godina, o čemu će kasnije biti više reči.

IV.4.2. Mineraloški i hemijski karakter rude urana

Sva ispitivanja rude i ganga polazila su od činjenice da je orudnjenje staro dve milijarde godina, pa je moglo biti izloženo raznim naknadnim uti-

cajima, a posebno u samom početku dugotrajnom dejstvu moćnog fluksa neutrona, što je sve izazvalo razne promene, tako da sadašnje stanje ne odslikava prvobitno ležište, bez obzira što se tu nisu dešavale neke intenzivnije tektonske odnosno metamorfogene deformacije.

Glavni rudni mineral u celom ležištu je kolomorfna pehblenda, koja je u bogatoj rudi delom rekristalisala i pretvorena u uraninit. Organska materija (koje uglavnom nema u bogatoj rudi) je definisana kao zreli kerogen, koji je nastao od bitumije dejstvom alfa zračenja. Rudnomikroskopskim ispitivanjima nađeno je da se kerogen sastoji od uglja (meta-antracita), koksa i bitumije. Poreklo ove materije nije jasno, verovatno je proizvod nafte (materija je slična onoj u znatno mlađem ležištu urana Lodev u Francuskoj, ali se isto tako pretpostavlja prisustvo biljne materije - algi).

Gang bogate rude, gde se jedino javljala reakcija, sastoji se od laminirane filitsko-glinovite smeše, koja ima uslovno dve komponente — »sericitsko-ilitsku« i »hloritsku«. Za ovaj gang je karakteristično otsustvo silifikacije, za razliku od siromašne rude, ili — kako se naziva — postojanje desilifijacije. Poreklo ganga nije jasno, pošto ima teksturu i sastav sedimentne stene, a nalazi se u domenu bogate rude, najverovatnije kontrolisane tektonskim faktorima. Hemijska analiza bogate rude pokazuje sledeće komponente:

UO_2 — 70%	K_2O — 0,3%
SiO_2 — 7,5%	$TiO_2 + MnO + P_2O_5$ — 0,39%
Al_2O_3 — 4,3%	PbO — 6,87%
FeO — 4,3%	H_2O^- — 1,65%
CaO — 3,4%	H_2O^+ — 2,1%
MgO — 1,3%	

Sam gang sadrži znatno više ostalih komponenata izuzev urana i olova, a naročito vode, što je važno za moderaciju, a što je kasnije detaljnije razmatrano. Ovaj gang se nalazi delom u rudi i uokviruje rudna tela, debljine je 0,5—1 m, dok je okolna stena peščar ili breča.

Deponovanje urana u ležištu ima dvojak karakter. »Siromašne« partije (sa oko 0,3% urana), po pravilu se nalaze uz organsku materiju, sa obiljem pirita i ima obeležja orudnjenja »roll«« tipa, a neki autori smatraju da je uran bar delom deponovan sa organskom materijom. Bogate partije izrazito koincidiraju sa razlomima i smatra se, naročito zbog otsustva pirita pa i organske materije odnosno zbog prisustva hematitizacije, da su one deponovane naknadno od strane kiselijih voda, koje su rastvarale uran iz siromašnijih partija, razlažući pritom i pirit, i ponovo ga deponovale nedaleko od prvobitnog orudnjenja.

IV.4.3. Geohemijske karakteristike

Ovde su razmatrana razna ispitivanja uzoraka, naročito posle naknadnih dubinskih bušenja usmerenih prvenstveno na ispitivanje fenomena u zoni reaktora. Ova ispitivanja su bila usmerena na određivanje sadržaja pre svega ^{235}U, zatim stabilnih izotopa — proizvoda fisije (vidi poglavlje IV.3), kao i izotopa — otrova, apsorbenata termalnih neutrona.

Sadržaji ^{235}U u prirodnom uranu iz ležišta Oklo kreću se, u celini uzev, od abnormalnih 0,65% do normalnih 0,72%, ali se u pojedinim delovima spušta i nešto ispod 0,3%. Utvrđeno je isto tako da bogata, visoko sadržajna ruda po pravilu sadrži manje ^{235}U od siromašnije u istim rudnim telima, što je normalno, jer je prag kritičnosti u rudi iznosio 25% urana, ispod koga nije dolazilo do reakcije. Ova obrnuta relacija nije uvek izrazita, jer verovatno ni u svim zonama reakcije fluks neutrona nije bio istovetan. Tako je u jednom delu ležišta sa srednjim sadržajem urana 30% srednji sadržaj ^{235}U iznosio 0,35% (21 proba), a u drugom delu sa 32% U, sadržaj ^{235}U bio je 0,58% (9 proba). Interesantno je da su i probe sa ispod 6% urana imale iste sadržaje urana 235 kao i bogate partije. Kod celog ovog razmatranja treba imati u vidu da je u vreme reakcije (pre dve milijarde godina) u uranu (^{238}U) bilo nešto preko 3% ^{235}U, što je otprilike i odnos u savremenim lakovodnim reaktorima, a isto tako deo urana je pretvoren u olovo. Manjak urana 235 u sadašnjem ležištu glavni je argumenat u prilog fisione reakcije, što je za sada jedinstven fenomen u svetu.

Pored urana 235 sledeći glavni svedoci u prilog prinudne fisije bili bi mnogobrojni stabilni izotopi koji nastaju u tom procesu, a pojedini od ovih su isto tako i apsorbenti neutrona. Uočeno je, međutim da neki od ovih izotopa odnosno matičnih elemenata, kao Mo, Rb, Sr, Ba, Kr, Xe i dr. lako migriraju i ne mogu se smatrati pouzdanim pokazateljima. Nešto stabilniji je karakteristični neodijum (grupa »teških« produkata), čiji je izotopski sastav izučavan u stotinak proba. Nađeno je procentualno učešće koje odgovara fisionim produktima, kako sledi (u zagradi je procenat u neodijumu u prirodi): ^{142}Nd — najčešće 1—8% (27%), ^{143}Nd — 20 do 22% (12%), ^{144}Nd — 28 do 30% (24%), ^{145}Nd oko 16% (8,3%), itd. Migrativnost elementa ne mora, naravno, da znači i pomeranje nuklida.

Najdetaljnije su izučavani, međutim nuklidi rutenijuma (»laka« grupa), koji se smatra gotovo nepokretnim u smislu migrativnosti. Pored detaljnog prikaza procentualnog sastava nuklida neodijuma u uranu rudnika Oklo i upoređenja sa drugim fisionim produktima (Ruffenbach J. C. et al, 204/27, Roth E., et al, 204/25, Frejacques C. et al, 204/24 [13]), rađene su i izotopske analize rutenijuma u velikom broju ležišta urana u svetu, prekambrijske starosti (Maeck W. J. et. al, 119/35 [15]), što je naročito važno, jer isti nuklidi nastaju i spontanom fisijom prirodnog urana (Hagemann R. et al, 119/19 [15]). Ovakva upoređenja nisu, nažalost, urađena i za druge nuklide, što je jedan od propusta u ispitivanjima fenomena Oklo, usredsređenim samo na tu lokalnost. Rutenijum je podesan i zbog toga što se od sedam stabilnih izotopa u prirodnom elementu, kao fisioni produkti javljaju samo četiri izotopa (sa masenim brojevima A 99, 101, 102 i 104, naspram brojeva 96, 98 i 100). Pregled izotopskog sastava prikazan je u tabeli IV.4.1.

Tabela IV.4.1. Sastav izotopa rutenijuma (%)

	^{96}Ru	^{98}Ru	^{99}Ru	^{100}Ru	^{101}Ru	^{102}Ru	^{104}Ru
1. Sastav u prirodi	5,51	1,87	12,72	12,62	17,07	31,61	18,60
2. Spontana fisija ^{238}U (a)			23,5		28,5	31,4	16,5
3. Iz 13 ležišta sveta (srednje 24 proba) (a)			25,3		28,4	30,2	15,0
4. Fisija 93% U 235 +3% U 238 +4% Pu 239 (b)			34,80		29,0	24,55	11,65
5. Fisija U 235 100% (b)			35,65		29,33	24,42	10,60
6. Oklo (srednje 4 analize) (c)			30,7	0,86	29,8	26,1	12,4
7. Oklo (srednje 5 analiza) (d)			30,5	0,89	29,9	26,2	12,5
8. Oklo (srednje 10 analiza) (b)			32,3	~ 0,7	29,43	25,52	12,03

(a) Maek et al. U stavci 3. je sledeći raspored analiza po zemljama: Kanada 14, Australija 6, Zaire 3 i Brazil 1.
(b) Hagemann E. et al.
(c) Ruffenbach C. et al.
(d) Frejaques C. et al.

IV.4.4. Fizički aspekti prirodnog reaktora

Da bi rudne mase u Oklu mogle da prorade kao reaktor, trebalo je da postoje sledeći uslovi kritičnosti rada (Naudet R., Filip R., 204/38 [13] i dr.):

1. Količina urana 235 u prirodnom uranu u vreme stvaranja ležišta Oklo, pa i početkom rada reaktora, bila je nešto preko 3%, što odgovara savremenim lakovodnim reaktorima.

2. Osnovni elementarni (izotopski) sastav ganga nije mogao da ometa rad reaktora. Slabiji apsorbenti su se nalazili uglavnom u tragovima, kao što su vanadijum (200—800 ppm), Cr, Cu, Ni (50—100 ppm), dok su otrovi (jaki apsorbenti), danas prisutni u rudi — bor (20—250 ppm) i retke zemlje (TR 10—30 ppm) isto tako podređeni. Manje važni su litijum (100 ppm), hafnijum (20 ppm) i kadmijum (2—3 ppm). U ovim elementima glavni otrovi su sledeći izotopi: ^{6}Li, ^{10}B, ^{113}Cd, ^{149}Sm, ^{151}Eu, ^{155}Gd, ^{164}Dy, ^{174}Hf i ^{176}Lu (efikasni presek — zahvat termalnih neutrona veći od ^{235}U). Većina pomenutih otrova je relativno lako migrirala, tako da današnji bor ne pokazuje tragove neutronskog zahvata, a s druge strane većina prvobitnih otrova je bila uništena (transformisana) dejstvom neutrona u početnom stadijumu. Neki od njih, kao na pr. kadmijum (^{113}Cd) stvarani su u toku reakcije.

3. Prag za dostizanje kritičnosti reaktora je 25% urana, a u ležištu Oklo česte su partije sa 40—60% U. Treba imati u vidu da je za 2000 miliona godina 26% urana pretvoreno u olovo (od čega je veći deo migrirao, zajedno sa jednim delom urana). Za rudu sa sadržajem urana 30% odnos gang/uran u vreme rada reaktora bio je 1,3, odnosno presek za zahvat neutrona bio je 1000 mm^2/kg U, za 40% urana — 600 mm^2/kg U, a u industrijskom lakovodnom reaktoru taj odnos je 200—300 mm^2/kg urana.

4. Da bi se sprečilo bekstvo neutrona iz sredine reakcije dovoljna je bila debljina (bogate) rude 0,8—1 m.

5. Zadnji osnovni uslov za dostizanje kritičnosti reaktora je usporavanje (moderiranje, termalizacija) neutrona, što se može postići običnom vodom, koja se delom nalazi kao konstituciona voda u gangu (u vreme rada reaktora to je bio filit sa 8—10% vode, a nešto vode bilo je i u porama).

Na osnovu uslova pod navedenim tačkama 1—5 izveden je proračun koji pokazuje da je reaktor u rudnim telima Oklo mogao da radi. Dalja ispitivanja ukazala su da je u četiri rudna tela sa visokim sadržajima urana (preko 20%), čije su dimenzije bile 20—40 m za svako od njih, bilo bar stotinak manjih ćelija koje su predstavljale individualne reaktore (dovoljne dimenzije su bile svega 1—2 m^3) i koje svakako nisu niti istovremeno aktivirane, niti je fluks neutrona bio isti. Kada je reč o fluksu (τ), ovaj se može izračunati iz odnosa $^{235}U/^{238}U$ i drugih parametara, pa je nađeno da pri vrednosti ovog odnosa 0,0046—0,057 za sadržaje urana 23—58% (6 uzoraka), fluks treba da iznosi 1×10^{25} n/m^2, sa prilično termalizovanim spektrom (Ruffenbach J. C. et al [13]). Prema drugom podatku (Frejacques C. et al [13]) $\tau = 0{,}81—1{,}32 \times 10^{25}$ n/m^2, što se sasvim poklapa sa prethodnim. Navodi se isto tako i podatak da je za reakciju dovoljno 0,005 n/kb (neutrona po kilobarnu, 1 barn $= 1 \times 10^{-28}$ m^2), a to je oko 5×10^{21} n/m^2. Na drugom mestu se pominje potpuno ista vrednost dobijena na osnovu tragova fisije u kvarcu, na 0,2—0,5 m od granice zone reakcije. Ovde se isto tako zaključuje da je u reaktorima Oklo bilo stvoreno mnogo tona plutonijuma (^{239}Pu i drugih nuklida), koji je isto tako sagorevao ili se raspadao u ^{235}U, tako da se ciklus obnavljao.

Početak i vreme trajanja rada reaktora takođe su određeni sa dovoljnom tačnošću u odnosu na starost rudonosnog kompleksa i orudnjenja. Starost orudnjenja, određena preko starosti formacije metodama K/Ar i Rb/Sr bila je između 1750 i 2000 miliona godina, prema metodi tragova fisije 1730×10^6, a metodom U-Pb 2060 miliona godina, pa se vrednost od 2000×10^6 godina može uzeti kao najpribližnija. Početak reakcije se bitno ne razlikuje od starosti orudnjenja, što znači da su reaktori počeli da rade ubrzo posle deponovanja urana. Trajanje reakcije je malo rastegljivije određivano. Na osnovu neutronskog zahvata ^{99}Ru, koji prelazi u ^{100}Ru i odnosa $^{100}Ru/^{99}Ru$ ocenjeno je da je reakcija trajala između 500.000 i 800.000 godina, a kao najkraće moguće vreme trajanja navodi se 200.000 godina, što je moguće za neke od mnogobrojnih reaktora.

Prvu ocenu temperature u srcu reaktora dao je francuski mineralog J. G e f f r o y, koji je na osnovu odredbe uraninita, nastalog rekristalizacijom iz pehblende, naveo vrednost od 350°C. U diskusiji povodom raznih referata pominjana je temperatura od 300°C, ali da na zagrevanje nije uticala samo reakcija već i prvobitna velika velika dubina ležišta od 3000—5000 m,

sa pritiscima do 1000 bara, zatim magmatsko zagrevanje na pr. usled proboja dolerita na 150 m južno od ležišta (starog 1000 miliona godina). Petrografi navode podatak da je vršen prelaz ilita tipa 1M u 2M, za šta je potrebna temperatura od oko 250°C, kao i pojavu biotita u gangu što ukazuje na temperaturu od 400°C. Sledeća ocena sledi na osnovu inkluzija slane vode u kvarcu, koje su očigledno nastale posle silifikacije, na osnovu kojih se ceni temperatura čak 450—600°C. Daje se i ocena temperature isključivo prema neutronskoj reakciji na osnovu odnosa $^{176}Lu/^{175}Lu$ na 280°C, a sa kontaminacijom do 10% temperatura bi bila 400°C. Uzgred se izvlači zaključak da je bitumija, određena mikroskopski, došla kasnije, jer bi njena refleksija svetlosti bila jača, ako bi bila izložena temperaturi od najmanje 240°C. Konačno je u završnoj diskusiji na zadnjem simpozijumu [15] ocenjeno da je temperatura morala biti ispod kritične temperature vode i da se održavala na oko 400°C, pri čemu je višak toplote odnošen konvekcijom.

Na kraju treba reći da su, uprkos tome što je dokazano postojanje nuklearnih reaktora u uranovim rudnim telima ležišta Oklo, ostale neke dileme i kontroverze koje se sastoje u sledećem:

— Stvaranje tzv. »reaktorske gline« odnosno pomenutog ganga, koja ima sedimentni karakter, ali se nalazi uz bogatu rudu koja nikako nije sedimentnog porekla, ostaje otvoreno.

— Ispada da je reaktor sam sebi stvarao uslove za rad, naročito odstranjivanjem apsorbenata neutrona, radi postizanja kritičnosti rada, tako da je u pitanju sam pokretač reakcije.

— Ako su bor i sadašnja voda u domenu reaktora, koji nisu bili zahvaćeni neutronima, naknadno uneseni namesto migriranih prvobitnih komponenti, to teško može da se odnosi na gvožđe, koje čini oko 15% ganga, a ono isto tako (^{57}Fe) nije moglo biti u domenu neutronskog fluksa iz reaktora.

Očigledno je da na ovaj fenomen nije definitivno stavljena tačka.

IV.5. TABELARNI PREGLED STABILNIH I RADIOAKTIVNIH IZOTOPA

Ovaj pregled je prikazan u vidu tabele (IV.5.1) sa svim stabilnim izotopima za svaki elemenat kao i sa važnijim radioizotopima. Izbor ovih zadnjih vršen je na osnovu značaja u naučnom i praktičnom domenu prema slobodnoj oceni autora, a na osnovu odgovarajućih literarnih podataka. Za stabilne izotope je dat procentualni sastav, pri čemu je uložen trud da to budu najnoviji i opšte prihvaćeni podaci. Primetno je da neki od izotopa sa navedenim procentualnim učešćem kao stabilan izotop, ipak pokazuje nestabilnost, istina uvek sa veoma dugim vremenom poluraspada, što je navedeno i u tekstu knjige (odeljak I.2.3.1). Za radionuklide su dati najvažniji podaci, kao vreme poluraspada, karakter i energije zračenja.

Tabela je sastavljena na osnovu raznih literaturnih podataka, u prvom redu Table of isotopes [14] i Radiation detection [30]. Treba imati u vidu da je ova tabela namenjena čitaocima knjige da imaju kompletan uvid u odgovarajuće podatke koji se pominju u knjizi, ali nema pretenzija da pruži punu i tačniju informaciju, za koju se čitaoc upućuje na izvornu

literaturu. Ovo se odnosi na pr. za zaokrugljivanje vrednosti energija zračenja na dve decimale, selekciju izraženijih energetskih nivoa, naročito kod gama zračenja, izostavljanje savim niskih energija, prvenstveno u domenu X-zračenja i sl.

Procenti u zagradi uz energije čestica u odgovarajućoj rubrici čine ukupan zbir 100 za sve čestice po raspadu jednog jezgra, uključivši i elektronski zahvat (kod ovog fenomena energija je izražena preko X-zračenja). Kod gama zračenja, u zagradi su dati procenti emitovanih fotona [30], s tim da za svaki zrak određene energije može da se kreće do 100% (vidi ^{60}Co u Tabeli IV.5.1). Kao primese navedeni su radionuklidi koji baznom nuklidu daju značajnu ili glavnu komponentu zračenja. Ista rubrika poslužila je, počev od talijuma, za oznaku alternativnih naziva i pripadnost glavnim nizovima raspada (u prirodi). U zadnjoj rubrici navedeni su ostali (značajniji) radionuklidi, sa vremenom poluraspada u zagradi (uz radionuklid), kao i sa ukupnim brojem izotopa pri dnu (takođe u zagradi).

Tabela IV.5.1. Pregled stabilnih i radioaktivnih izotopa (1)

Z A Elemenat (oznaka)	Obilnost stabilnog izotopa, %	Vreme poluraspada $T_{1/2}$ (1)	Vrste zračenja (2)	Energija zračenja čestica u MeV (% od raspada)	Energija γ zračenja u MeV (% emitovanih fotona)	Primese	Ostali važniji radionuklidi - A($T_{1/2}$) (ukupno nuklida)
1 1 Vodonik 2 (H) 3	98,98 0,0156	12,26 g	β^-	0,0186(100)			(3)
2 3 Helijum 4 (He)	$1,3\times10^{-4}$ ~100						(4)
3 6 Litijum 7 (Li)	7,52 92,47						(5)
4 7 Berilijum 9 (Be)	100	53 d	ez,γ	(100)	0,48(10)		10($2,7\times10^6$ g) (5)
5 10 Bor 11 (B)	19,8 81,2						(6)
6 12 Ugljenik 13 (C) 14	98,89 1,11	5736 g	β^-	0,16(100)			11(20m) (8)
7 14 Azot 15 (N)	99,635 0,365						(8)
8 16 Kiseonik 17 (O) 18	99,757 0,039 0,204						(8)
9 18 Fluor 19 (F)	100	1,9 h	β^+	0,63(100)			(7)
10 20 Neon 21 22	90,51 0,27 9,22						(9)
11 22 Natrijum 23 (Na) 24	100	2,6 g 15 h	β^+,ez,γ β^-,γ	β^+:0,55(90); ez:(10) 1,39(~100)	0,51(od β^+);1,27(~100) 1,36(100);2,75(~100)		(15)
12 24 Magnezijum 25 (Mg) 26	78,99 10,00 11,01						26(21 h) (12)
13 27 Aluminijum (Al)	100						28(2,2m) (13)
14 28 Silicijum 29 (Si) 30	92,23 4,67 3,10						31(2,6g);32(280g) (10)
15 31 Fosfor 32 (P) 33	100	14,3 d 25,5 d	β^- β^-	1,71(100) 0,25(100)			(8)
16 32 33 Sumpor 34 (S) 35 36	95,02 0,75 4,21 0,015	87,2 d	β^-	0,17(100)			37(5m);38(2,8h) (10)
17 35 Hlor 36 (Cl) 37	75,77 24,23	3×10^5 g	β^-,ez	0,71(98); ez(2)			34m(34m);38(37m); 39(56m) (13)
18 36 Argon 38 (Ar) 39 40 41	0,337 0,063 99,600 .	269 g 1,8 h	β^- β^-,γ	0,60(100) 1,20(99);2,5(1)	1,29(99)		37(35d);39(270g); 42(33g) (12)
19 39 Kalijum 40 (K) 41 42 43	93,26 0,012 6,73	$1,27\times10^9$ g 12,4 h 22,2 h	β^-,β^+,γ ez β^-,γ β^-,γ	β^-:1,31(89), β^+: 0,49 (11);ez(0,1) 2,0(18);3,52(82) 0,84(92);1,28-1,83(5)	1,46(10) 1,52(18) 0,37(87);0,40(12); 0,59(11);0,62(80)		44(22m);45(16m) (16)

m Metastabilno stanje jezgra

(1) s - sekunda, m - minut, h - sat, d - dan, g - godina

(2) α - alfa, β^- - elektron, β^+ - pozitron, ez - elektronski zahvat, ip - izomerni prelaz, sf - spontana fisija, γ - gama foton

Tabela IV.5.1. Pregled stabilnih i radioaktivnih izotopa (2)

Z Element (oznaka)	A	Obilnost stabilnog izotopa, %	Vreme poluraspada $T_{1/2}$	Vrste zračenja	Energija zračenja čestica u MeV (% od raspada)	Energija γ zračenja u MeV (% emitovanih fotona)	Primese	Ostali važniji radionuklidi - A($T_{1/2}$) (ukupno nuklida)
20	40	96,94						41(1,3x10^{5}g);49(8,5m)
	42	0,647						
Kalcijum	43	0,135						
(Ca)	44	2,09						
	45		160 d	β^-	0,26(100)			
	46	0,003						
	47		4,5 d	β^-,γ	0,69(82);1,99(18)	0,49(7);0,81(7);1,30 (75)		
	48	0,187						(16)
21	44		4 h	β^+,ez,γ	β^+: 1,5(96);ez(5)	1,15(100)		43(4h);44*(2,4d);46*(20s); 48(1,8d);49(57m)
Skandijum	45	100						
(Sc)	46		84 d	β^-,γ	0,36(100)	0,89(100);1,12(100)		
	47		3,4 d	β^-,γ	0,44(70);0,60(30)	0,16(70)		(18)
22	44		47,3 s	ez,γ	(100);β^+: 1.47(95)[1]	1,16(~100)[1]	^{44}Sc	45(3,1h)
	46	8,2						
Titan	47	7,4						
(Ti)	48	73,7						
	49	5,4						
	50	5,2						(14)
23	47		33 m	β^+,γ	1,65(100)	slabo izražena		49(330d)
	48		16 d	β^+,ez,γ	0,69(50);ez(50)	0,94(8);0,98(100);1,31 (98),2,24(2,4)		
Vanadijum								
(V)	50	0,25	6x10^{15}g	β^-,γ		0,78		
	51	99,75						(10)
24	50	4,35						
	51		27,7 d	ez,γ	(100)	0,32(10)		49(42m)
Hrom	52	83,79						
(Cr)	53	9,50						
	54	2,36						(13)
25	52		5,7 d	β^+,ez,γ	β^+:0,57(28);ez(72)	0,74(85);0,94(93);1,25 -1,33(5); 1,43(100)		51(45m);52*(21m)
Mangan	54		312 d	ez,γ	(100)	0,83(100)		
(Mn)	55	100						
	56		2,6 h	β^-,γ	0,73(16);1,03(29); 2,84(53)	0,85(99);1,81(28); 2,11(16);2,52(1)		(13)
26	54	5,84						
	55		2,7 g	ez	(100)		^{59}Fe	52(8,3h)
Gvožđe	56	91,68						
(Fe)	57	2,17						
	58	0,31						
	59		44,6 d	β^-,γ	0,27(46);0,47(53);	1,11(56);1,29(44)	^{55}Fe	(13)
27	56		78,8 d	β^+,ez,γ	β^+:1,5(18); ez(81)	0,85(100);1,04(14);1,24 (68);1,36(4);1,77(16); 2,02(11);2,60(17):3,20-3,45(1-3)		55(18h);58*(9h);60* (10,7m);61(1,6h)
Kobalt								
(Co)	57		270 d	ez,γ	(100)	0,01(9);0,12(85); 0,14(11)		
	58		71 d	β^+,ez,γ	β^+:0,47(15);ez(85)	0,81(99)		
	59	100						
	60		5,3 g	β^-,γ	0,32(~100)	1,17(100); 1,33(100)		(18)
28	58	68,3						
	59		7,6x10^{4}g	ez	(100)			57(1,5d);65(2,6h); 66(2,3d)
Nikl	60	26,1						
(Ni)	61	1,13						
	62	3,59						
	63		100 g	β^-	0,07(100)			
	64	0,91						(14)
29	63	69,2						
	64		12,8 h	β^-,β^+,ez, γ	β^-:0,57(38);β^+: 0,65(18); ez(44)	slabo izražena		61(3,4h)
Bakar								
(Cu)	65	30,8						
	67		2,5 d	β^-,γ	0,39(56);0,48(23); 0,58(20)	0,09(24)[2];0,18(47);	^{67*}Zn	(16)
30	64	48,6						
	65		244 d	β^+,ez,γ	β^+:0,32(1,5);ez(98,5)	0,51(odβ^+);1,11(51)	^{69}Zn, ^{69*}Zn	62(9,2h);63(38m);67* (9,4m);69*(13,8h);72 (1,9d)
Cink	66	27,9						
(Zn)	67	4,1						
	68	18,8						
	69		57 m	β^-	0,92(100)			
	70	0,62						(22)

[1] od ^{44}Sc; [2] 17% od ^{67*}Zn; * metastabilno stanje jezgra

Tabela IV.5.1. Pregled stabilnih i radioaktivnih izotopa (3)

Z / A / Element (oznaka)	Obilnost stabilnog izotopa, %	Vreme poluraspada $T_{1/2}$	Vrsta zračenja	Energija zračenja čestica u MeV (% od raspada)	Energija γ zračenja u MeV (% emitovanih fotona)	Primese	Ostali važniji radionuklidi - A($T_{1/2}$) (ukupno nuklida)
31 Galijum (Ga) 69	60,2	14,1 h	β^-,γ	0,66(15);0,67(22);0,96(27);1,48(9);2,54(9);3,17(10);drugi(8)	0,60(5);0,63(25);0,83(96);0,89(10);1,05-1,86(4-7);2,20(26);2,49(8);2,51(13)		66(9,4h);67(3,2d);68(1,1h);73(5h) (23)
71	39,8						
72							
32 Germanijum (Ge) 68		288 d	ez	(100)			66(2,5h);68(288d);69(1,7d);71(11,8d);75(1,5h);77(12h);78(1,5h) (26)
70	20,5						
72	27,4						
73	7,8						
74	36,5						
76	7,8						
33 Arsen (As) 73		80 d	ez,γ	(100)	slabo izražena		70(52m);71(2,5d);72(1,1d);75*(1,6ms);77(1,6d);78(1,5h) (25)
74		17,7 d	β^-,β^+,ez,	β^-:0,72(15);1,36(18);β^+:0,91(25);1,51(4);ez(37)	0,51(od β^+);0,59(59);0,63(15)		
75	100						
76		1,1 d	β,γ	0,54-1,85(16);2,41(29);2,97(54)	0,56(46);0,62-2,11(0,2-6)		
34 Selen (Se) 74	0,87	120 d	ez,γ	(100)	0,07-0,10(1-3);0,12(16);0,14(54);0,26(57);0,28(24)[1];0,40(12)	75^*_{As}	72(8,4d);73(7,1h);79($6,5\times10^4$g) (34)
75							
76	9,02						
77	7,58						
78	23,52						
80	49,82						
82	9,19	$1,4\times10^{20}$g					
35 Brom (Br) 79	50,69	1,5 d	β^-,γ	0,44(98)	0,55(72);0,62(43);0,70(27);0,78(83);0,83(24);1,01(2);1,04(29);1,32(28);1,47(17)		75(1,6h);77(2,4d);80*(4,5h);83(2,4h) (31)
81	49,31						
82							
36 Kripton (Kr) 78	0,35						77(1,6h);79(1,4d);81(2×10^5g);83*(1,9h);85*(4,4h);85(10,7g);87(1,2h);88(2,8h) (29)
80	2,27						
82	11,6						
83	11,5						
84	57,0						
85		10,7 g	β^-	0,67(100)			
86	17,37						
37 Rubidijum (Rb) 85	72,17						81(4,7h);82(6,3h);83(86d);84(34d);85*(0,96 μs) (36)
86		18,7 d	β^-,γ	0,69(9);1,77(91)	1,08(9)		
87	27,83	$4,8\times10^{10}$g	β,γ	0,27(100)	0,4		
38 Stroncijum (Sr) 84	0,56	65 d	ez,γ	(100)	0,51(99)[2]	85^*_{Rb}	82(25d);83*(1,1h);87*(2,8h);90(28,8 g);91(9,5h);92(2,7h); (27)
85							
86	9,86						
87	7,02						
88	82,56						
89		50 d	β^-	1,46(100)		89^*_Y	
90		29 g	β^-	0,55(100)		90^*_Y	
39 Itrijum (Y) 87		3,3 d	β^+,ez,γ	ez(~100)	0,39(85)[3];0,48(92);0,51(od β^+)	87^*_{Sr}	84(39m);87*(13h);89*(16 s);92(3,5h);93(10h) (34)
88		106 d	β^+,ez,γ	ez(~100)	0,51(od β^+);0,90(93);1,84(99)		
89	100						
90		2,7 d	β^-,γ	2,27(~100)	slabo izražena		
91		59 d	β^-,γ	1,54(~100)	slabo izražena		
40 Cirkonijum (Zr) 90	51,46						87(2h);89(3,3d);93($1,5\times10^6$ g) (29).
91	11,23						
92	17,11						
94	17,40						
95		65 d	β^-,γ	0,36(55);0,40(45)	0,72(44);0,76(55)	95^*_{Nb}	
95	2,80						
97		17 h	β^-,γ	0,52-1,37(11);1,88(86);ostali(3)	0,25-1,75(1-5);0,74(93)[4]	97^*_{Nb}	
41 Niobijum 93	100	35 d	β^-,γ	0,16(100)	0,77(100)		90(16h);91*(62d);92(10d);94(2×10^4g);95*(3,7d);96(23h);97(1,2h);97*(53s) (39)
95							

[1] 5% od ^{75*}As; [2] od ^{85*}Rb; [3] od ^{87*}Sr; [4] od ^{97*}Nb; * metastabilno stanje jezgra

Tabela IV.5.1. Pregled stabilnih i radioaktivnih izotopa (4)

Z A Element (oznaku)	Obilnost stabilnog izotopa, %	Vreme poluraspada $T_{1/2}$	Vrste zračenja	Energija zračenja čestica u MeV (% od raspada)	Energija γ zračenja u MeV (% emitovanih fotona)	Primese	Ostali važniji radionuklidi - A($T_{1/2}$) (ukupno nuklida)
42 92	14,8						93*(6,9h);93(3500 g)
94	9,3						
95	15,9						
Molibden 96	16,7						
(Mo) 97	9,6						
98	24,1						
99		2,8 d	β^-,γ	0,45(18);1,23(80)	0,04-0,37(1-7);0,740A);[1] 0,78(5);0,14(84)[1]	99^*Tc	
100	9,6						(25)
43 97		$2,6\times10^6$ g	ez,γ	(100)	slabo izražena		93(2,7h);95*(61d);95 (20h);96(4,3d)
Tehnecijum 99^*		6 h	ip,γ	(100)			
(Tc) 99		$2,1\times10^5$ g	β^-	0,29(100)	0,14(88)		
							(30)
44 96	5,5						
97		2,9 d	ez,γ	(100)	0,22(85);0,32(11)		95(1,6h);103*(56m); 105(4,5h);106*(30s)
98	1,9						
Rutenijum 99	12,7						
(Ru) 100	12,6						
101	17,1						
102	31,6						
103		40 d	β^-,γ	0,10(6);0,21(89); 0,71(4)	0,50(88);0,56-0,610-5)	103^*Rh	
104	18,6						
106		1 s	β^-	0,04(100)		106Rh	(27)
45 103	100						
Rodijum 105		1,5 d	β^-,γ	0,25(19);0,26(5); 0,56(75)	0,30(5);0,32(18)		100(21h);101(3,3g);102 (2,9g);103*(57m);105 (1,5d)
(Rh) 106		13,6 s	β,γ	1,98(2);2,42(10); 3,03(8);3,54(79)	0,51(21);0,62(10); 0,87-1,56(0,2-1,5)		
							(38)
46 102	1,0						
103		18 d	ez,γ	(100)	slabo izražena	103^*Rh	100(3,6d);101(8,5h); 111(22m);112(21h)
104	11,0						
Paladijum 105	22,2						
(Pd) 106	27,3						
108	26,7						
109		13,5 h	β^-	1,03(100)	0,09(3,6)[2]	109^*Ag	
110	11,8						(25)
47 105		40 d	ez,γ	(100)	0,06(11);0,28(31); 0,32-0,33(4,5);0,34 (42);0,44(12);0,64 (12);1,09(4)		106*(8,6d);109*(39s); 110(24s);112(3,2h); 113(5,3h)
Srebro 107	51,63						
(Ag) 109	48,17						
110^*		253 d	β^-,ip,γ	0,08(68);0,53(31); ip(1)	0,45-0,62(3);0,66 (94);0,68-0,74(4-16); 0,76(22);0,82(7);0,88 (72);0,94(34);1,38 (26);1,48-1,56(1-14)	110Ag	
111		7,5 d	β^-,γ	0,16-0,79(8);1,03 (92)	0,10-0,[illegible]); 0,34 (6,5)		(45)
48 106	1,25						
108	0,89						107(6,5h);111*(50m); 113*(14s);117(2,5h)
109		1,2 s	ez	(100)	0,09(3,[illegible])[2]	109^*Ag	
110	12,5						
Kadmijum 111	12,8						
(Cd) 112	24,1						
113	12,2	9×10^{15} g	β^-	0,3			
114	28,7						
115^*		44 d	β^-,γ	0,33-0,69(3);1,62(97)	0,16-1,29(0,1-1,8)		
115		2,2 d	β^-,γ	0,58(35);0,62-0,85 (6);1,11(59)	0,03-0,27(1-2,1);0,49 (9,5);0,53(30)		
116	7,5						(35)
49 111		2,8 d	ez,γ	(100)	0,17(91);0,24(94)		108(58m);109(4,3h); 110(1h);114(1,2m);116* (54m);117*(2h)
113^*		1,7 h	ip,γ	(100)	0,39(65)		
Indijum 113	4,3						
(In) 114^*		49,3 d	ez,ip	(4),(96);β^-:1,99(94)[3]		114In	
115^*		4,5 h	β^-,ip,γ	0,84(6);ip(94)	0,35(45)		
115	95,7	$5,1\times10^{14}$ g	β^-	0,48			(57)

[1] Od 99^*Tc; [2] Od 109^*Ag; [3] Od 114In * metastabilno stanje jezgra

Tabela IV.5.1. Pregled stabilnih i radioaktivnih izotopa (5)

Z / A / Elemenat (oznaka)	Obilnost stabilnog izotopa, %	Vreme poluraspada $T_{1/2}$	Vrsta zračenja	Energija zračenja čestica u MeV (% od raspada)	Energija γ zračenja u MeV (% emitovanih fotona)	Primese	Ostali važniji radionuklidi - A($T_{1/2}$) (ukupno nuklida)
50 112	1,01						110(4,1h);117*(14d);
113		115 d	ez,γ	(100)	0,25(2), -		121(1,1d);121*(55s);
114	0,67						125(9,6d);126(~10^5 g)
Kalaj 115	0,38						
(Sn) 116	14,8						
117	7,75						
118	24,3						
119*		245 d	ip	(100)	slaba		
119	8,6						
120	32,4						
121		1,1 d	β^-	0,38(100)			
122	4,56						
123		130 d	β^-	1,4(100)			(41)
124	5,64						
51 121	57,3						116*(1h);117(2,8h);
122		2,7 d	β^-,ez,γ	0,72(4,5);1,41(67); 1,97(26);ez(2,5)	0,55(70);0,7-1,25(0,7-3,7)		118*(5h);119(1,6d); 120(5,7d);126(12,4d); 127(4d)
Antimon							
(Sb) 123	42,7						
124		60 d	β^-,γ	0,21(9);0,61(52); 0,86-1,65(14);2,30 (23)	0,60(98);0,65-0,79 (1-11);0,97-1,44(1-2); 1,69(50);2,09(6)		
125		2,8 g	β^-,γ	0,09(13);0,12(6);0,13 (18);0,30(40);0,44 (7);0,62(13)	0,03-0,38(1-7);0,43(30); 0,46(10);0,60(18); 0,61(5);0,64(11)		(42)
52 120	0,09						118(6d);119*(4,5d);
122	2,50						121*(154d);121(17d);
123*		120 d	ip,γ	(100)	0,16(83)		129*(32d);129(1,2h);
123	0,89	$1,2x10^{13}$ g	ez				131*(1,2d);132(3,2d)
Telur 124	4,60						
(Te) 125*		58 d	ip,γ	(100)	slaba		
125	7,00						
126	18,70						
127*		110 d	β^-;ip,γ	0,72(2,4);ip(97,6)	slabo izražena	^{127}Te	
127		9,3 h	β^-,γ	0,69(97)	slabo izražena		
128	31,70	$1,5x10^{24}$ g					
130	34,50	$2x10^{21}$ g					(42)
53 127	100						121(2,1h);123(13h);
129		$1,6x10^7$ g	β^-,γ	0,15(100)	slaba		124(4d);125(60d);126
Jod 131		8 d	β^-,γ	0,25-0,33(10);0,61 (90)	0,08-0,28(2-6);0,36(82); 0,64-0,72(2-7)		(13d);130(13h);133
(I)							(22h)
132		2,3 h	β^-,γ	0,84(16);1,01-1,26 (18);1,29(18);1,57 (11);1,72(13);2,24(20); ostalo (3)	0,50(5);0,52(16);0,62-0,65(2-14);0,67(99); 0,68-0,73(5);0,77(76); 0,81-0,95(3-18); 1,14-2,00(1-3)		(37)
54 124	0,096						125(17h);127(36d);131*
126	0,09						(11d);135(9h)
128	1,914						
1) 129	26,44						
Ksenon 130	4,08						
(Xe) 131	21,18						
132	26,89						
133*		2,3 d	ip,γ	(100)	slabo izražena		
133		5,3 d	β^-,γ	0,35(99)	0,08(37)		
134	10,44						
136	8,87						(40)
55 133	100						127(5,5h);129(1,3d);
134		2,1 g	β^-,γ	0,09(26);0,66(72)	0,47-0,57(1-14);0,60 (97);0,79(85);0,80-1,36(1-9)		131(10d);132(6,5d);134* (3h);136(14d)
Cezijum							
(Cs) 135		$2,1x10^6$ g	β^-	0,21(100)			(38)
137		30 g	β^-	0,51(95);1,17(5)	0,66(85)[2]	^{137*}Ba	
56 130	0,103						133*(1,6d);135*(1,5d);
131		12 d	ez,γ	(100)	0,12(29);0,13(2);0,22-0,25(3-22);0,37-0,49(1-13);0,50(43);0,58-1,05(1)		137*(2,6m);139(1,4h);
132	0,097						
133		10,8 g	ez,γ	(100)	0,08(34);0,28(7);0,30 (19);0,36(62);0,38(9)		
Barijum							
(Ba) 134	2,42						
135	6,59						
136	7,81						
137	11,32						
138	71,66						
140		12,8 d	β^-,γ	0,47-0,58(34);0,89-1,02(66)	0,03(14);0,16(6);0,30-0,44(3);0,54(24)		(39)

[1] Količina stabilnih izotopa odnosi se na prizemni sloj atmosfere.

[2] Od ^{137*}Ba; * metastabilno stanje jezgra

Tabela IV.9.1. Pregled stabilnih i radioaktivnih izotopa (6)

Z A Elemenat (oznaka)		Obilnost stabilnog izotopa,%	Vreme poluraspada $T_{1/2}$	Vrste zračenja	Energija zračenja čestica u MeV (% od raspada)	Energija γ zračenja u MeV (% emitovanih fotona)	Primese	Ostali važniji radionuklidi - A($T_{1/2}$) (ukupno nuklida)
57 Lantan (La)	138	0,089	$1,1\times10^{11}$ g					133(4h);137(6×10^{4}g); 135(19h);141(3,6h); (26)
	139	99,911						
	140		1,7 d	β^-,γ	1,25–1,30(23);1,36–1,42(50);1,68–2,17(25)	0,33(21);0,49(45);0,82(23);0,87(5);0,92(7);1,60(96);2,52(3)		
58 Cer (Ce)	136	0,196						133(5,4h);134(3d); 135(18h);137*(1,4d); 143(1,4d) (29)
	138	0,254						
	139		137 d	es,γ	(100)	0,17(80)		
	140	88,48						
	141		33 d	β^-,γ	0,44(70);0,58(30)	0,14(48)		
	142	11,07	5×10^{15} g	α	1,83			
	144		280 d	β^-,γ	0,18–0,24(24);0,32(76);2,99(98)[1]	0,03–0,08(1);0,13(11);0,70–2,19(1)[1]	^{144}Pr	
59 Prazeodijum (Pr)	141	100						138 (2h);139(4,5h);144 (17m);144*(7,2m);145 (6h) (24)
	142		19,2 h	β^-,γ	0,59(4);2,16(96);	1,57(4)		
	143		13,7 d	β^-	0,93(100)			
60 Neodijum (Nd)	142	27,13						139*(5,5);140(3,3d); 141(2,4h);149(1,7h) (31)
	143	12,20						
	144	23,87	$2,1\times10^{15}$ g	α	1,83			
	145	8,30						
	146	17,18						
	147		11 d	β^-,γ	0,21–0,36(17);0,80(81);ostalo(2)	0,09(28);0,53(13)		
	148	5,72						
	150	5,60						
61 Prometijum (Pm)	147		2,3 g	β^-	0,22(~100)			143(265d);144(349d); 145(18g);146(5,5g); 148(5,3d);148*(41d) (28)
	149		2,2 d	β^-,γ	0,78(3);1,07(97)	slabo izražena		
	151		1,2 d	β^-,γ	0,85(39);1,03(10); 1,20(11);ostalo(40)	0,10(~4);0,17(~11);0,18(~5);0,27(~6);0,34(~20)		
62 Samarijum (Sm)	144	3,16						151(122g);156(10h); (30)
	146	$<2\times10^{-7}$	1×10^{8} g	α	2,46			
	147	15,07	$1,1\times10^{11}$ g	α	2,23			
	148	11,27	8×10^{15} g	α	1,96			
	149	13,84						
	150	7,47						
	152	26,63						
	153		1,9 d	β^-,γ	0,63(33);0,70(46); 0,80(20)	0,07(4);0,10(28)		
	154	22,56						
63 Europijum (Eu)	151	47,9						147(22d);148(54d);149 (93d);150(36g i 13h); 154(8,5g);155(4,9g) (33)
	152		13 g	β^-,es,γ	0,18–1,48(29);es(71)	0,12(29);0,24(7);0,34(26);0,44(3);0,78(12);0,88(4);0,96(14);1,09(10);1,11(13);1,41(20)		
	153	52,1						
64 Gadolinijum (Gd)	150		$1,8\times10^{6}$ g	α	2,72			146(48d);148(98g); 151(120d);159(18h) (24)
	152	0,20	$1,1\times10^{14}$ g	α	2,14			
	153		240 d	es,γ	(100)	0,07(3);0,08(30);0,10(20)		
	154	2,1						
	155	14,8						
	156	20,6						
	157	15,7						
	158	24,8						
	160	21,8						
65 Terbijum (Tb)	159	100						153(2,3d);154(17h);155 (21h);155(5,3d); 157 (150g);158(150g) (34)
	160		72 d	β,γ	0,44–0,87(98)	0,09(14);0,20(5);0,22(4);0,30(27);0,88(30);0,96(10);0,97(25);1,18(15);1,27(8);1,31(3)		
	161		7 d	β,γ	0,52(100)	slabo izražena		
66 Disprozijum (Dy)	154		1×10^{6} g	α	2,78			159(140d); 165(2,4h); 166(3,4d) (24)
	156	0,057						
	158	0,100						
	160	2,3						
	161	19,0						
	162	25,5						
	163	24,9						
	164	28,1						
67 Holmijum (Ho)	165	100						160*(5h);161(2,5h);163 (~33g);166(1,1h);166* (1200g) (41)
	166		1,1 d	β^-,γ	1,77(52);1,85(47)	0,08(7);1,38–1,75(1–2)		

[1] Od ^{144}Pr; * metastabilno stanje jezgra

Tabela IV.5.1. Pregled stabilnih i radioaktivnih izotopa (7)

Z Element (oznaka)	A	Obilnost stabilnog izotopa, %	Vreme poluraspada $T_{1/2}$	Vrste zračenja	Energija zračenja čestica u MeV (% od raspada)	Energija γ zračenja u MeV (% emitovanih fotona)	Primese	Ostali važniji radionuklidi - A($T_{1/2}$) (ukupno nuklida)
68 Erbijum (Er)	162	0,14						160(1,2d);161(3,2h); 165(10h);171(7,5h); (25)
	164	1,56						
	166	33,4						
	167	22,9						
	168	27,1						
	169		9,4 d	β^-,γ	0,33(42);0,34(58)	slaba		
	170	14,9						
69 Tulijum (Tm)	169	100						163(1,8h);166(7,7h);167(9,2 d);168(93d);171(1,8g);172 (2,6d) (31)
	170		128 d	β^-,γ	0,88(23);0,97(77)	slaba		
70 Iterbijum (Yb)	168	0,135						166(2,4d);177(1,8h); 178(1,2h) (29)
	169		31 d	ez,γ	(100)	0,06(43);0,11(7);0,13(11); 0,18(21);0,20(35);0,31(11)		
	170	3,1						
	171	14,4						
	172	21,9						
	173	16,2						
	174	31,6						
	175		4,2 d	β^-,γ	0,07(10);0,35(3); 0,47(87)	0,11-0,25(C,1-2); 0,28(3);0,40(6)		
	176	12,6						
71 Lutecijum (Lu)	175	97,4						170(2d);171(8d);173(1,4 g);174(3,3g);174*(142d); 177*(161d) (35)
	176	2,6	$2,2\times10^{10}$ g	β^-,ez,γ	β^-:0,6(97);ez(3)	0,098;0,316		
	177		6,6 d	β^-,γ	0,18(12);0,38(7); 0,50(81)	0,11(6);0,21(11)		
72 Hafnijum (Hf)	174	0,16	2×10^{15} g	α	2,5			172(1,9g);178*(31g); 182(9×10^6 g);183(91d) (30)
	175		70 d	ez,γ	(100)	0,09(2);0,34(88)		
	176	5,2						
	177	18,6						
	178	27,1						
	179	13,7						
	180	35,2						
	181		43 d	β^-,γ	0,40(7);0,41(93)	0,13(36);0,14(4); 0,35(16);0,48(78)		
73 Tantal (Ta)	180	0,012	$\sim10^{13}$ g					177(2,3d);178(2,4h);179 (1,7g);88(5d);189(8,7h) (27)
	181	99,988						
	182		115 d	β^-,γ	0,25-0,58(95)	0,07(42);0,10(14);0,15-0,26(3-8); 1,12(35);1,19(6);1,22(27);1,23(2)		
74 Volfram (W)	180	0,13						176(2,3h);177(2,2h); 181(121d) (30)
	182	26,3						
	183	14,3						
	184	30,7						
	185		75 d	β^-,γ	0,43(100)	slabo izražena		
	186	28,6						
	187		24 h	β^-,γ	0,54-0,69(72); 1,31 (26)	0,07(12);0,13(9);0,48(22); 0,51-0,62(1-8);0,69(28); 0,77(4)		
75 Renijum (Re)	185	37,4						180(20h);182(2,7d); 183(71d);184(38d); 184*(169d) (22)
	186		3,8 d	β^-,ez,γ	0,93(21);1,07(74); ez(5)	0,14(9)		
	187	62,6	4×10^{10} g	β^-	0,003			
76 Osmijum (Os)	184	0,018						182(22h);185(94d); 193(1,3d);194(6g) (37)
	185		95 d	ez,γ	(100)	0,12-0,59(3);0,65 (80);0,72-0,88(17)		
	186	1,6	2×10^{15} g	α	2,76			
	187	1,6						
	188	13,3						
	189	16,1						
	190	26,4						
	191		15 d	β^-	0,14(100)	0,13(24)[1]	191^*Ir	
	192	41,0						
77 Iridijum (Ir)	191	37,3						188(1,7d);190(12d); 191*(4,9a);192(74d); 194(19h) (39)
	192		74 d	β^-,ez,γ	0,25(5);0,53(43); 0,67(47);ez(5)	0,21(3);0,30(30);0,31(31); 0,32(83);0,47(47);0,48(3); 0,59(4);0,60(8);0,61(5)		
	193	62,7						
78 Platina (Pt)	190	0,013	$6,9\times10^{11}$ g	α	3,18			191(3d);193(50g); 195*(4d) (36)
	192	0,78						
	194	32,9						
	195	33,8						
	196	25,3						
	197		20 h	β^-,γ	0,45(10);0,64(79); 0,72(11)	0,08(17);0,19(4)		
	198	7,2						

[1] Od 191^*Ir; * metastabilno stanje jezgra

Tabela IV.5.1. Pregled stabilnih i radioaktivnih izotopa (8)

Z Element (oznaka)	A	Obilnost stabilnog izotopa, %	Vreme poluraspada $T_{1/2}$	Vrste zračenja	Energija zračenja čestica u MeV (% od raspada)	Energija γ zračenja u MeV (% emitovanih fotona)	Primese Alternativni naziv	Primese Niz radioakt. raspada	Ostali važniji radionuklidi - A($T_{1/2}$) (ukupno nuklida)
79 Zlato (Au)	195	100	183 d	ez,γ	(100)	0,10(10)			193(17,5h);194(1,6d); 195(183d);196(6,2d);197* (7,8s) (41)
	197		2.7 d	β^-,γ	0,28(1);0,96(99)	0,41(95);0,68(1)			
	198		3,1 d	β^-,γ	0,25(21);0,29(72); 0,45(7)	0,16(40);0,21(9)			
	199								
80 Živa (Hg)	196	0,146							194(260d);195* (1,7d) (46)
	197*		24 h	ez,ip,γ	ez(6,5);ip(93,5)	0,13(32);0,28(5) [1]	197^*_{Au}		
	197		2,7 d	ez,γ	(100)	0,08(19);0,19(1)			
	198	10,02							
	199	16,84							
	200	23,13							
	201	13,22							
	202	29,80							
	203		46 d	β^-,γ	0,21(100)	0,28(81)			
	204	6,85							
81 Talijum (Tl)	203	29,5							199(7h);200(1,1d); 201(3d);202(12,2d); (39)
	204		3,8 s	β^-,ez	0,76(97);ez(3)	slabo izražena			
	205	70,5							
	207		4,8 m	β^-,γ	1,44(~100)	slabo izražena	AcC"	U-Ac	
	208		3,1 m	β^-,γ	1,03-1,07(4);1,28(24); 1,52(22);1,79(50)	0,25(1);0,28(7);0,51 (23);0,58(86);0,86 (12);2,61(~100)	ThC"	Th	
	209		2,2 m	β^-,γ	1,83(100)	0,12(82);0,46(82); 1,57(100)		Am-Np	
	210		1,3 m	β^-,γ	Prisutan u veoma malim količinama		RaC"	U-Ra	
82 Olovo (Pb)	204	1,4							200(21h);201(8h); 202 (~3×10^5g);203(2,2d); 205($1,4\times10^7$g) (39)
	206	25,1							
	207	21,1							
	208	52,4							
	209		3,3 h	β^-	0,63(100)			Am-Np	
	210		22,3 g	β^-,γ	0,01(~80);0,06(~20)	slaba	RaD	U-Ra	
	211		36 m	β^-,γ	0,54(5);0,97(14);1,38(95)	0,40(3);0,43(2);0,83(3)	AcB	U-Ac	
	212		10,6 h	β^-,γ	0,15(5);0,33(82); 0,57(13)	0,24(45);0,30(3,4)	ThB	Th	
	214		26,8 m		0,51(16);0,69(42); 0,74(36);1,03(6)	0,24(7);0,29(17); 0,35(32)	RaB	U-Ra	
83	207		38 s	ec,γ	(100)	0,57(98);1,06(74); 1,77(7)			199(25m);200(35m); 202(1,6h);203(12h); 204(12h);205(14d); 206(6,2d);208($3,7\times10^5$g);210*(3×10^6g) (39)
	209	100							
	210		5 d	(α),β^-	β^-: 1,16(~100)		RaE	U-Ra	
	211		2,1 m	α,β^-,γ	α:6,28(16);6,62(84); β^-: 0,59(slaba)	0,35(13)	AcC	U-Ac	
	212		1 h	α,β^-,γ	α:5,60-5,77(1);6,05 (25);6,09(10);β^-:0,44 -0,74(4);1,52(5); 2,25(55)	0,04(1);0,29-0,45(0,1-0,4); 0,73(7);0,78(1);0,89-1,51(0,2-0,5);1,62(1,5)	ThC	Th	
Bizmut (Bi)	213		46 m	α,β^-,γ	α:5,87(2);β^-:0,32(1); 1,02(31);1,42(66)	0,44(32)		Am-Np	
	214		19,8 m	(α),β^-	β^-:0,42(11);1,02(23); 1,51(18);1,55(15); 1,88(9);2,6(4);3,27(20)	0,27(5);0,61(42);0,77(5); 1,12(14);1,24(5);1,38 (5);1,76(16);2,02(5)	RaC	U-Ra	
84	208		2,9 g	α	5,11(100)				202(44m);203(37m); 204(3,5h);205(1,8h); 206(9d);207(5,7h); 209(102g) (34)
	210		138 d	α	5,30(100)		RaF	U-Ra	
Polonijum (Po)	211		0,56 s	α	Prisutan u veoma malim količinama		AcC'	U-Ac	
	212		3×10^{-7}s	α	8,78(100)		ThC'	Th	
	213		4×10^{-6}s	α	8,38(100)			Am-Np	
	214		$1,6\times10^{-4}$s	α	7,69(100)		RaC'	U-Ra	
	215		0,0018 s	α	7,38(100)		AcA	U-Ac	
	216		0,15 s	α	7,78(~100)		ThA	Th	
	218		3 m	α	6,00(~100)		RaA	U-Rn	
85 Astat	215		1×10^{-4}s	α	Prisutan u veoma malim količinama			U-Ac	208(1,6h);209(5,4h); 210(8,3h);211(7,5h) (29)
	216		3×10^{-4}s	α	7,81(100)			Am-Np	
	218		~2 s	α,β^-	Prisutan u veoma malim količinama			U-Ra	
86 Radon (Rn)	218		0,035 s	α	Prisutan u veoma malim količinama			U-Ra	210(2,4h);211(14,6h); 224(1,8h) (30)
	219		4 s	α,γ	6,42(8);6,55(11);6,82 (81)	0,27(10);0,40(6)	Aktinon	U-Ac	
	220		55 s	α,γ	6,29(~100)	slabo izražena	Toron	Th	
	222		3,8 d	α	5,49(100)			U-Ra	
87 Francijum (Fr)	223		22m	β^-,γ	0,78(3);0,91(15);1,07 (12);1,10(68)	0,05(43);0,08(11); 0,20(14);0,23(4)		U-Ac	210(3,2m);211(3,1m);212 (19m) (29)
88 Radijum (Ra)	223		11,4 d	α,γ	5,53(9);5,60(24);5,71 (53);ostali(14)	0,12(~1);0,14(~3);0,15(~5); 0,27(~14);0,32(~3);0,34(~2,5)	AcX	U-Ac	213(2,7m);227 (42m);230(1,5h) (26)
	224		3,6 d	α,γ	5,45(5);5,68(95)	0,24(4)	ThX	Th	
	225		14,8 d	β^-,γ	0,32(~63);0,39(~37)	slaba		Am-Np	
	226		1600 g	α,γ	4,60(5);4,78(95)	0,186(3,4)		U-Ra	
	228		5,7 g	β^-	0,05(100)		$MsTh_1$	Th	

[1] Od 197^*Au; * metastabilno stanje jezgra

Tabela IV.5.1. Pregled stabilnih i radioaktivnih izotopa (9)

Z A Elemenat (oznaka)	Odnos u prirodi, %	Vreme poluraspada $T_{1/2}$	Vrste zračenja	Energija zračenja čestica u MeV (% od raspada)	Energija γ zračenja u MeV (% emitovanih fotona)	Alternativni naziv	Niz radioakt. raspada	Ostali važniji radionuklidi - A($T_{1/2}$) (ukupno nuklida)
89 225 227 Aktinijum (Ac) 228		10 d 21,8 g 6,1 h	α,γ α,β^-,γ β^-,γ	5,73(9,5);5,79(29);5,82(52);ostale(9,5) α:4,95(1);β^-:0,02(~10);0,03(~35);0,04(~54) 0,45–0,62(16);0,99–1,12(18);0,17(33);1,76(20);2,10(13)	0,6(0,5);0,07(1);0,08(3);0,09(1);0,10(3);0,11(1);0,15(1) slaba 0,13(3);0,12(2);0,21–0,27(4);0,33(5);0,34(15);0,41–0,46(3);0,78–0,84(1–4);0,91(23);0,96(7);0,97(13);1,46–1,64(1–4)	$MsTh_2$	Am–Np U–Ac Th	223(2,2m);224(2,9a);226(29h);229(18) (12)
90 227 228 229 Torijum (Th) 230 231 232 233 234	100	18,5 d 1,9 g 7340 g $7,7\times10^4$ g 1,1 d $1,4\times10^{10}$ g 23,3 m 24,1 d	α,γ α,γ α,γ α,γ β^-,γ α(sf) β^- β^-,γ	5,71(13);5,75–6,04(68);ostale(19) 5,34(28);5,42(71) 4,81–4,89(80);4,96–5,05(13);istale(7) 4,62(23);4,68(76) 0,14–0,21(15);0,30(85) 0,39(23);4,01(77) 1,23(100) 0,10(33);0,19(67)	0,05(~10);0,24(12);0,26(6) 0,08(1,6);0,13–0,22(~0,2) 0,03(~4);0,12(~4) slaba 0,03(~12);0,08(~5) 0,06(6);0,09(3)	RaAc RaTh Io UY UX_1	U–Ac Th Am–Np U–Ra U–Ac Th Am–Np U–Ra	225(8m);226(31m);230(37m) (24)
91 229 231 Protaktinijum (Pa) 233 234^* 234		1,5 d $3,3\times10^4$ g 27 d 1,15 m 6,7 h	ez,α α,γ β^-,γ β^-,γ β^-	ez(99);α:5,69(1) 4,73–4,93(11);4,95–5,06(82);ostali(7) 0,15–0,17(42);0,23–0,26(53);0,53–0,57(5) 2,29(98) Primutah u vrlo malim količinama	0,03(9);0,28(2);0,30(4);0,33(1) 0,07(1);0,09(2);0,30(6);0,31(28);0,34(4);0,37–0,42(0,7–1,7) slabo izražena	UX_2 UZ^2	Am–Np U–Ac Am–Np U–Ra U–Ra	227(38m);228(22h);230(18d);232(1,3d);(237(39m) (21)
92 232 233 234 Uran (U) 235 236 237 238	0,0058 0,715 99,28	72 s $1,6\times10^5$ g $2,5\times10^5$ g $7,1\times10^8$ g $2,3\times10^7$ g 6,7d $4,5\times10^9$ g	α,γ α,γ α,β,γ α,sf β^- α,sf	5,26(32);5,32(68) 4,73–4,78(15);4,82(84) 4,72(27);4,77(73) 4,22–4,37(27);4,40(56);4,56–4,60(7);ostale(10) 4,44–4,49 Prisutan u vrlo malim količinama 4,14(23);4,19(77)	slabo izražena slaba slaba 0,11(2);0,14(11);0,16(5);0,185(54);0,20(5) U_1	U_1 AcU	Am–Np U–Ra U–Ac Am–Np U–Ra	229(58m);230(21d);231(4,2d);232(70s);239(23m);240(14h); (19)
93 237 Neptunijum (Np)		$2,1\times10^6$ g	α,sf,γ	4,64–4,66(9);4,76(8);4,77(25);4,79–4,80(50);4,82–4,87(5)	0,03(12);0,09(13)		Am–Np	234(4,4d);235(1,1m);236(1×10^5 g);238(2,1d);239(2,4d) (20)
94 238 239 Plutonijum (Pu) 240 241 242 244		88 s $2,4\times10^4$ g 6600 g 14,4 g $3,8\times10^5$ g $8,1\times10^7$ g	α,sf,γ α,sf α,sf β^-,sf α,sf α,sf	5,45(29);5,50(71) 5,10(11);5,14(15);5,15(73) 5,12(24);5,17(76) 0,02(100) 4,86(21);4,90(79) 4,54(19);4,59(81)	slaba slaba		Am–U Am–Np	236(2,8s);237(45d);246(11d) (34)
95 241 Americijum (Am) 243		433 s 7370 s	α,sf,γ α,sf,γ	5,39(2);5,44(12);5,48(85) 5,23(11);5,26(88)	0,06(35) 0,07(66)		Am–Np	242*(152s) (28)
96 242 243 Kirijum (Cm) 244 245 246 247 248 250		163 d 28,9 s 18 s 8500 s 4700s $1,6\times10^7$ g $3,5\times10^5$ g $1,1\times10^4$ g	α,sf,γ α,sf,γ α,sf,γ α,sf,γ α,sf,γ α,γ α,sf sf	6,07(26);6,11(74) 5,68–5,74(12);5,78(73);5,99–6,06(13) 5,76(24);5,81(76) 5,31;5,36 5,34(21);5,39(79) 4,82(5);4,87(71);4,82(5);4,87(71) α:5,5(92);sf(8) (100)	slaba slaba slaba 0,133;0,176 slaba slaba			240(27d);242(163d) (23)
97 247 Berkelijum (Bk) 249		1400 s 321 d	α,γ β^-,γ	5,50(7);5,31(45);5,64–5,69(19);5,71(17);5,75–5,79(10) 0,12(100)	0,08(40);0,26(30) slaba			245(4,9d);246(1,8d);248(>9s) (17)

*metastabilno stanje jezgra

Tabela IV.5.1. Pregled stabilnih i radioaktivnih izotopa (10)

Z A Elemenat (oznaka)	Obilnost u prirodi, %	Vreme poluraspada $T_{1/2}$	Vrste zračenja	Energija zračenja čestica u MeV (% od raspada)	Energija γ zračenja u MeV (% emitovanih fotona)	Primese	Ostali važniji radionuklidi - A ($T_{1/2}$) (ukupno nuklida)
98 248		333 d	α,sf	6,26(~100)			
249		351 d	α,sf	5,76(4);5,81(84);5,90-5,94(12)			246(1,5d);253(17,8d)
Kalifor-250		13,1 s	α,sf	5,99(15);6,03(85)			
nijum 251 (Cf)		900 s	α,γ	5,56-5,65(10);5,68(35);5,76-5,81(10);5,85(27);6,01-6,07(15)			
252		2,64 s	α,sf	6,07(15);6,12(82);sf(3)			
254		60 d	sf	(100)			
256		12 m	sf	(100)			(18)
99 252		1,2 s	α,ez,γ	6,48(1);6,56(11);6,63(63);ez(22)	0,78(16)		251(1,4d)
Ajnštaj-253		20,5 d	α,sf,γ	6,29(7);6,63(91)	slabo izražena		
nijum 254 (Es)		276 d	α	6,36-6,42(4);6,43(33)			
255		38 d	α,sf,γ	6,21-6,26(12);6,30(88)			(18)
100 252		1 d	α,sf	7,05(100)			
Fermijum 254		3,2 h	α,sf	α:7,14-7,19(99);sf(1)			253(3d)
(Fm) 256		2,6 h	α,sf	α:6,93(8);sf(92)			
257		100,5 d	α,sf	α:6,52(99,8);sf(0,2)			(19)
101 255		27 m	α,ez	α:7,33(8);ez(92)			258(56d)
Mendelje-256		1,3 h	α,ez	α:7,16-7,23(10);ez(90)			
vijum(Md) 259		1,6 h	sf	(100)			(13)
102 252		2,3 s	α,sf	α:8,41(73);sf(27)			254(55s);256(3,5s)
Nobelijum 255		3,1 m	α,ez	α:7,76-8,11(62);ez(38)			
(Nb) 259		58 m	α,sf	α:7,50(~50);sf(~50)			(11)
103 260 Lorencijum (Lr)		3 m	α	8,03(100)			256(31s) (10)
104 261 Kurčatovijum (Ku)		1,1 m	α	8,28(100)			257(4,5s)
105 262 Hanijum (Ha)		~40 s	α	8,45;8,60(100)			261(1,8s)
Ostali, bezimeni 106 i 107							

LITERATURA

[1] **Anastasijević P., Spasojević D.,** 1986: Uzroci i posledice akcidenta na nuklearnoj elektrani u Černobilju. Nuklearna tehnologija No. 2, Beograd, p. 21—29.

[2] **Anders E., Ebihara M.,** 1982: Solar system abundances of the elements. Geoch. et cosmoch. acta, vol. 46, No. 11, Pergamon Press Ltd, USA, p. 2363—2380.

[3] **Anufriev G. S.,** 1985: Priroda mantijnih inertnih gazov. Sovrem. dannye izotopnoj geohimii i kosmohimii. AN SSSR, »Nauka«, Leningrad, p. 43—71.

[4] **Azbelj I. Ja., Tolstihin I. N.,** 1984: Evolucija silikatnyh oboloček zemli i atmosfery v svete sovremennyh dannyh. 27ij Meždun. geol. kongress, Doklady t. 11, Moskva, p. 123—129.

[5] **Coppens R.,** 1957: La radioactivité des roches. Press universit. de France, p. 126.

[6] **Deplace J.,** 1984: Brzi oplodni reaktori. Nuklearna tehnologija No. 1, Beograd.

[7] **Durrance E. M.,** 1986: Radioactivity in geology — principles and applications. Ellis Horwood Ltd., Halsted Press (John Wiley & Sons), p. 441.

[8] **Frisch O. R.,** 1958: The nuclear handbook. George Nuones Ltd., London.

[9] **Hoefs J.,** 1980: Geohimija stabiljnyh izotopov (Stable isotope geochemistry). »Mir«, Moskva, 1983, p. 198 (prevod).

[10] **Krummerer R.,** 1984: Mešani oksidi U i Pu kao gorivo za brze termalne reaktore. Nuklearna tehnologija No. 1, Beograd.

[11] **Lakičević I.,** 1988: Yu — zvezdani plamen. Galaksija No. 190, Beograd, p. 9.

[12] **Lavruhina A. K.,** 1984: O nukleosinteze veščestva solnečnoj sistemy v svete novyh dannyh ob izotopnyh anomalijah v meteoritah. 27ij Meždun. geol. kongress, Doklady t. 11, Moskva, p. 20—25.

[13] Le phenomene d'Oklo — The Oklo phenomenon. IAEA SM-204, Libreville, 1975, Vienna, p. 646.

[14] **Lederer C. M., Shirley V. S.,** 1978: Table of isotopes. Lawrence Berkeley Lab., Univ. of Calif., Berkeley, Dept. of energy, USA, John Willey and Sons Inc.

[15] Les réacteurs de fission naturels — Natural fossion reactors. IAEA-CEA TC-119, Paris 1977, Vien 1978, p. 754.

[16] **Levinson A. A., Taylor S. R.,** 1971: Moon rocks and minerals. Pergamon Press, p. 222.

[17] **Levskij L. K., Morozova M. M.,** 1985: Rasprostranenost izotopov blagorodnih gazov v protozemnom veščestve. Sovr. dannyue izotop. geohimii i kosmohimii. AN SSSR, »Nauka«, Leningrad, p. 26—42.

[18] **Milankovitch M.,** 1941: Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem. Königlich serbische Akademie, Belgrad, p. 633.

[19] **Niemeyer S.,** 1979: ^{40}Ar-^{39}Ar dating of inclusions from IAB iron meteorits. Geochim. et cosmochim. acta, vol. 43, No. 11, p. 1829—1840.

[20] **Ozima M., Zashu S.,** 1984: Pervičnoe otnošenie $^{3}He/^{4}He$ v zemnih almazah i problema proishoždenija inertnih gazov v planetah zemnoj grupy. 27ij Mežd. geol. kongr., Doklady t. 11, Moskva, p. 87—94.

[21] **Popović D.,** 1978: Nuklearna energetika, Naučna knjiga, Beograd, p. 496.

[22] **Rankama K.,** 1954: Izotope geology, Pergamon Press Ltd., p. 535.

[23] **Rankama K.,** 1963: Progress in izotope geology, John Willey & Sons (Interscience Publishers), New York, p. 705.

[24] **Savić P.,** 1978: Od atoma do nebeskih tela. »Radivoj Čipranov«, Novi Sad, p. 220.

[25] **Savić P.,** 1986: Kako se boriti protiv radioaktivnih štetočina. Nuklearna tehnologija, No. 4, Beograd, p. 6—11.

[26] **Schmidt W., Malzahn H.,** 1980: Industriemineral, Diamant. WEB Deutscher Verlag für Grundsoffindustrie, Leipzig, p. 301.

[27] **Sobotovič E. V., Bartnickij E. H., Cjonj O. V., Konononeiko L. V.,** 1982: Spavočnik po izotopnoy geohimii. Energoizdat, Moskva, p. 241.

[28] **Šećerov M., Miličić M.,** 1965: Naša iskustva u savlađivanju postupka za proizvodnju reaktorskog grafita. Nuklearna energija, No. 4, Beograd.

[29] **Šrajber S. O.,** 1983: Oplodni reaktori. Nuklearna tehnologija, No. 4, Beograd, p. 21—27.

[30] **Tait W. H.,** 1980: Radiation detection. Ruttrwoths & Co (Publishers) Ltd, London.

[31] **Vrhovac V., Ljubiša L., Simonović M.,** 1980: Razvoj i primjena nuklearne energije u energetici Jugoslavije. Savjet. razvoj energet. Jugoslavije, VI-2, Opatija, p. 61.

[32] Pravilnik o maksimalno dozvoljenim granicama radioaktivne kontaminacije čovekove sredine i o vršenju dekontaminacije. Službeni list SFRJ br. 32/79.

[33] Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i posebnim merama sigurnosti pri korišćenju nuklearne energije, Službeni list SFRJ br. 62/84.

[33a] Pravilnik o stavljanju u promet i korišćenju radioaktivnih materija iznad određene granice aktivnosti, rentgen aparata i drugih aparata koji koriste proizvode jonizujućih zračenja i o merama zaštite od tih zračenja. Službeni list SFRJ br. 40/86, p. 1168—1177.

[33b] Pravilnik o granicama iznad kojih stanovništvo i lica koja rade sa izvorima jonizujućih zračenja ne smeju biti izloženi ozračenju i o merenjima stepena izloženosti jonizujućim zračenjima lica koja rade sa izvorima tih zračenja i o proveravanju kontaminacije radne sredine, Službeni list SFRJ br. 40/86, p. 1184—1189.

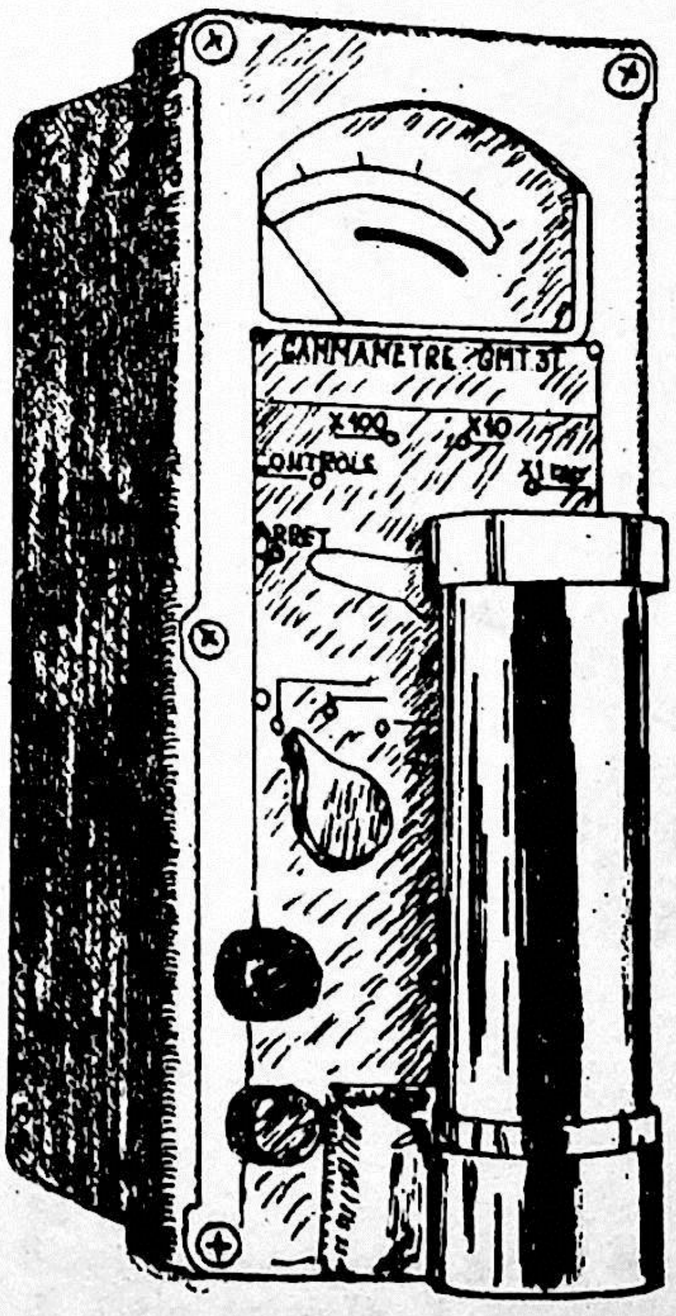
[33c] Pravilnik o maksimalnim granicama radioaktivne kontaminacije čovekove sredine i o vršenju dekontaminacije. Službeni list SFRJ br. 8/87, p. 226—246.

DODATAK

UREĐAJI ZA MERENJE RADIOAKTIVNOSTI I UPUTSTVA ZA RAD

U ovom dodatku prikazani su pojedini standardni tipovi gasnih (jonizacionih) i scintilacionih (monokanalnih i višekanalnih-spektrometrijskih) detektora, kao i portabilnih uređaja za merenje radona, prvenstveno onih koji se koriste u Geoinstitutu u Beogradu ili još nekim sličnim institucijama u Jugoslaviji, a i nekih drugih, naročito novijih modela. Ovde je isto tako prikazan i način rada, prvenstveno prema fabričkim uputstvima, ali su iznesena i izvesna iskustva stečena u Geoinstitutu, tokom više decenija rada.

1. NEKI TIPOVI GM BROJAČA



Sl. 1.1.
Opšti izgled GM brojača GMT 3T.

Jedan od najčešće upotrebljavanih tipova GM brojača je poznati GMT-14, francuske proizvodnje, koji je svojevremeno služio i za prospekciju, kao gama brojač, sa GM cevima ugrađenim u kutiji, ali ima i priključak za beta-gama (ili samo gama) sondu. Danas se proizvodi gotovo istovetni model GMT 3T firme Saphimo-Stel (sl. 1.1), sa sledećim tekstom preporuke u prospektu: »U rudnicima se koristi nisko osetljiva i vrlo robustna GM cev kao gama-metar za lokaciju (rudnih) žica i preliminarno razdvajanje rude«. U Geoinstitutu (Beograd) koristi se priključna beta-gama cev za detekciju i kvalitativno razdvajanje jezgra sa uranovim orudnjenjem. Prednost nad gama brojačima je u tome što može da detektuje i male količine urana sa manjkom radijuma.

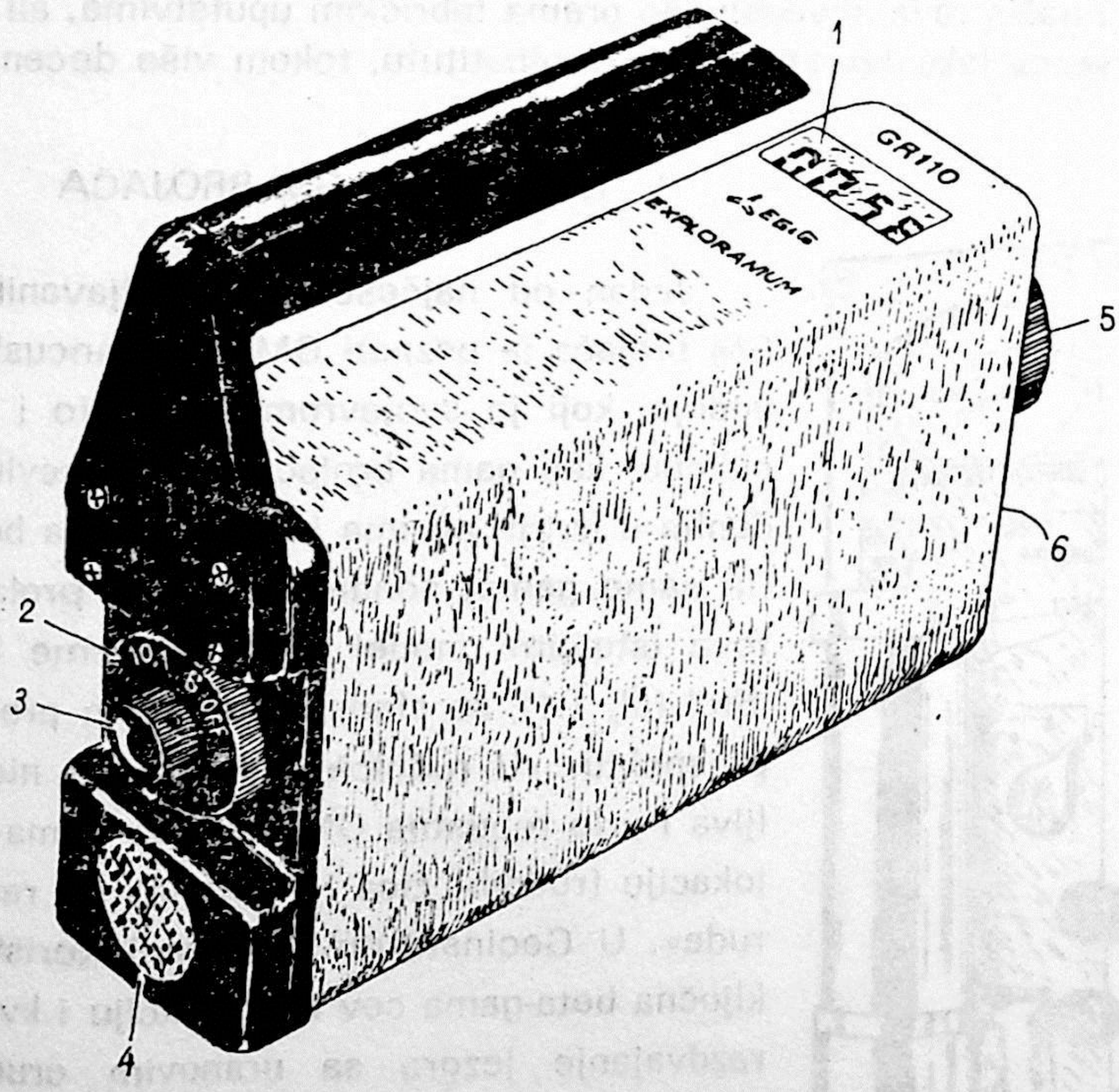
U Jugoslaviji se GM brojači danas proizvode jedino u Geofizičkoj laboratoriji Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu, pod nazivom RA-02 (autor O. Milošević). Uređaj meri beta-gama radioaktivnost sa priključnom GM cevi u opsegu 0,1—6,0 MeV, maksimalno do 1400 pC/kgs. Ranije je proizveden izvestan broj GM brojača RUŽV u rudniku urana Žirovski vrh u Sloveniji.

2. NEKI TIPOVI SCINTILACIONIH DETEKTORA GAMA ZRAČENJA

Prikaz standardnih tipova detektora donekle je otežan čestim inovacijama proizvođača, koje se međutim odnose na pogodnosti za rad (dizajn, smanjenje mase, način očitanja i sl.). Ovde će biti prikazani neki noviji, najčešće korišćeni uređaji, kao što su scintilacioni brojač GR-110 (Geometrics) i SPP 2 NF (Saphimo-Steel, Francuska), zatim gamaspektrometar GR-410 (Geometrics).

Scintilacioni brojač GR-110

To je laki uređaj, mase 1,7 kg sa baterijama (sl. 2.1), kristal NaI je relativno velike zapremine (0,075 l ili 4,5 kubnih inča), četvrtastog pre-

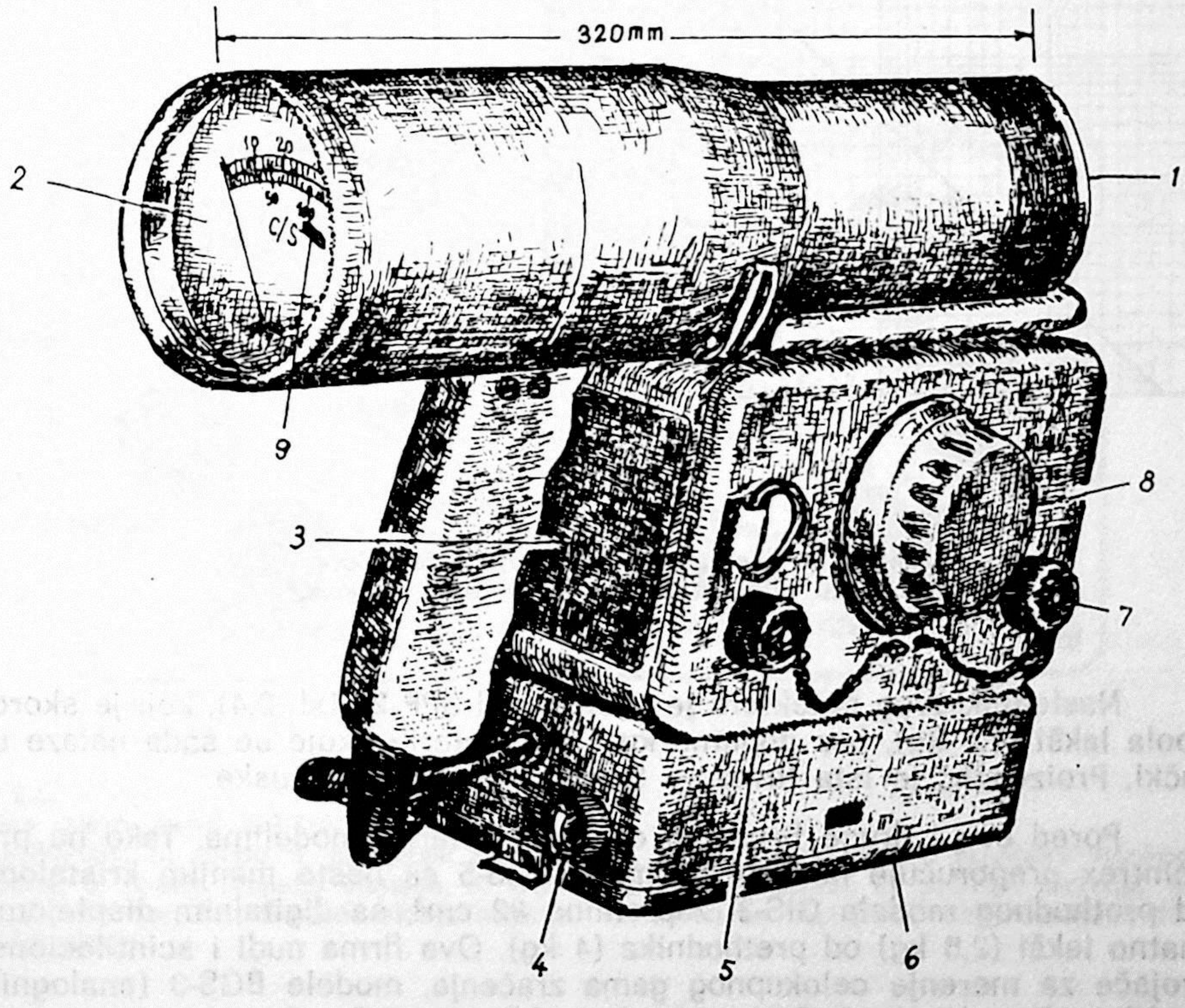


Sl. 2.1.
Opšti izgled scintilacionog brojača GR-110.
1. Displej, 2. dugme za uključivanje i menjanje opsega i vremena merenja, 3. dugme za zvučni signal, 4. zvučnik, 5. poklopac za spremište baterija, 6. prednja strana sa crvenim krugom za postavljanje kontrolnog etalona. Osnovne dimenzije su 18,5×21,5 cm.

seka, što daje niz pogodnosti, sa displejom od tečnog kristala. Očitanje i/s vrši se na tri načina. Prvi je očitanje svake sekunde za energije 0,08—3 MeV, durgo je očitanje svakih 10 s za isti energetski opseg, a treći je za viši nivo radioaktivnosti, očitanje svake sekunde za energetski nivo 0,4—3 MeV. Ima sopstveni etalon za proveru kalibracije, kao i pasoš sa oznakom odnosa CPS i jedinice jačine zračenja (za sve uređaje srednje vrednosti su oko 8,5 i/s za 0,07 pC/kgs.

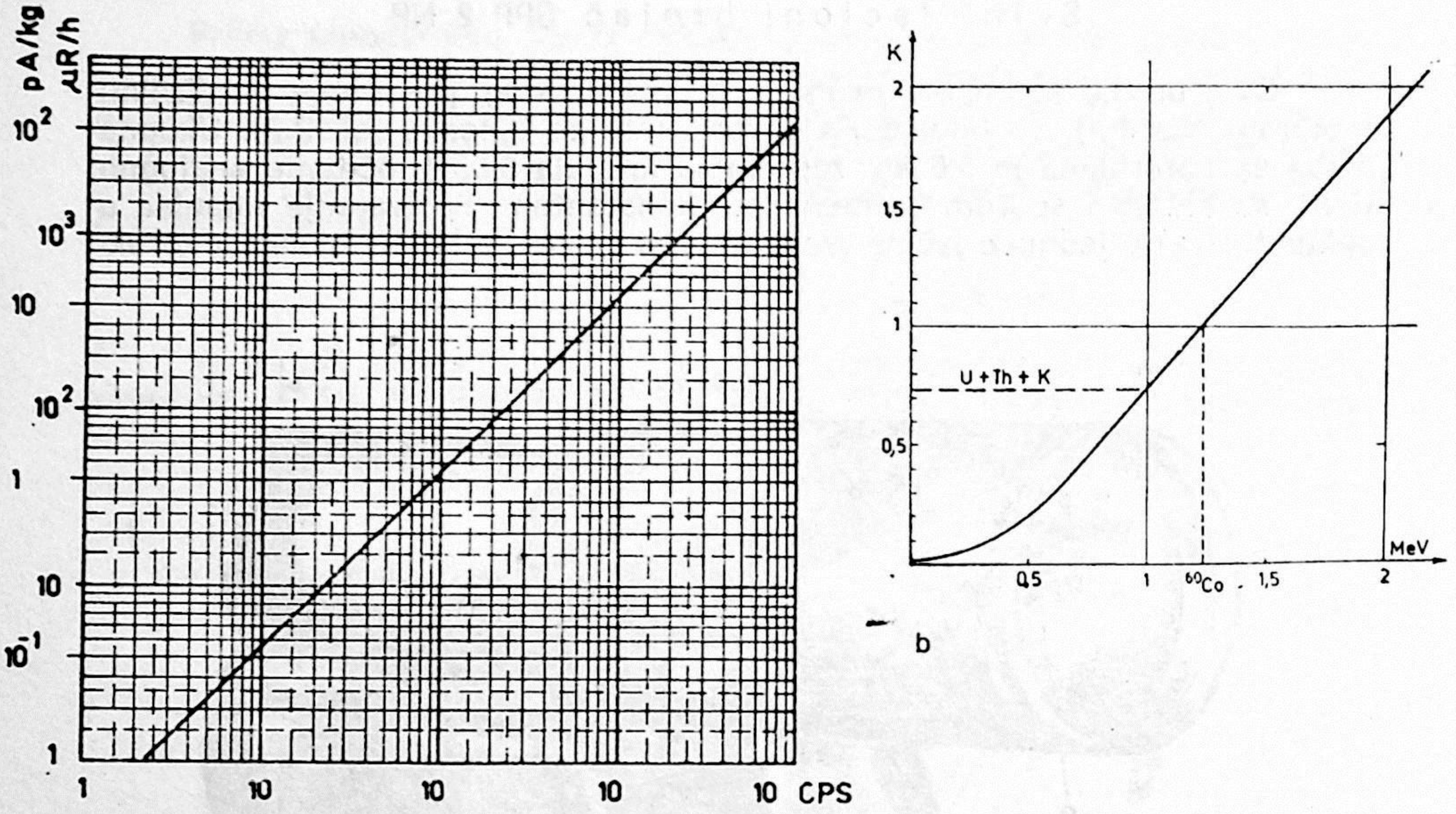
Scintilacioni brojač SPP 2 NP

Ovaj uređaj se znatno razlikuje od prethodnog, pre svega po dizajnu (»pištolj« sistem), sa odvojenim spremištem za baterije (sl. 2.2). Ukupna masa sa baterijama je 3,6 kg, zapremina kristala 0,03 l, očitanje analogno (i/s), sa brzom i sporom vremenskom konstantom. Pretvaranje impulsa u sekundi (i/s) u jedinice jačine zračenja vrši se preko kalibracionog i korek-



Sl. 2.2.
Scintilacioni brojač SPP 2 NF.
1. Čelo kristala, 2. indikatorska skala, 3. dijagram kalibracije za ^{60}Co (posebno na sl. 2.3.a), 4. dugme za zvučni signal, 5. priključak za slušalice, 6. spremište za baterije, 7. priključak za sondu, 8. dugme-potenciometar za promenu opsega, 9. plavo polje, indikator punih baterija.

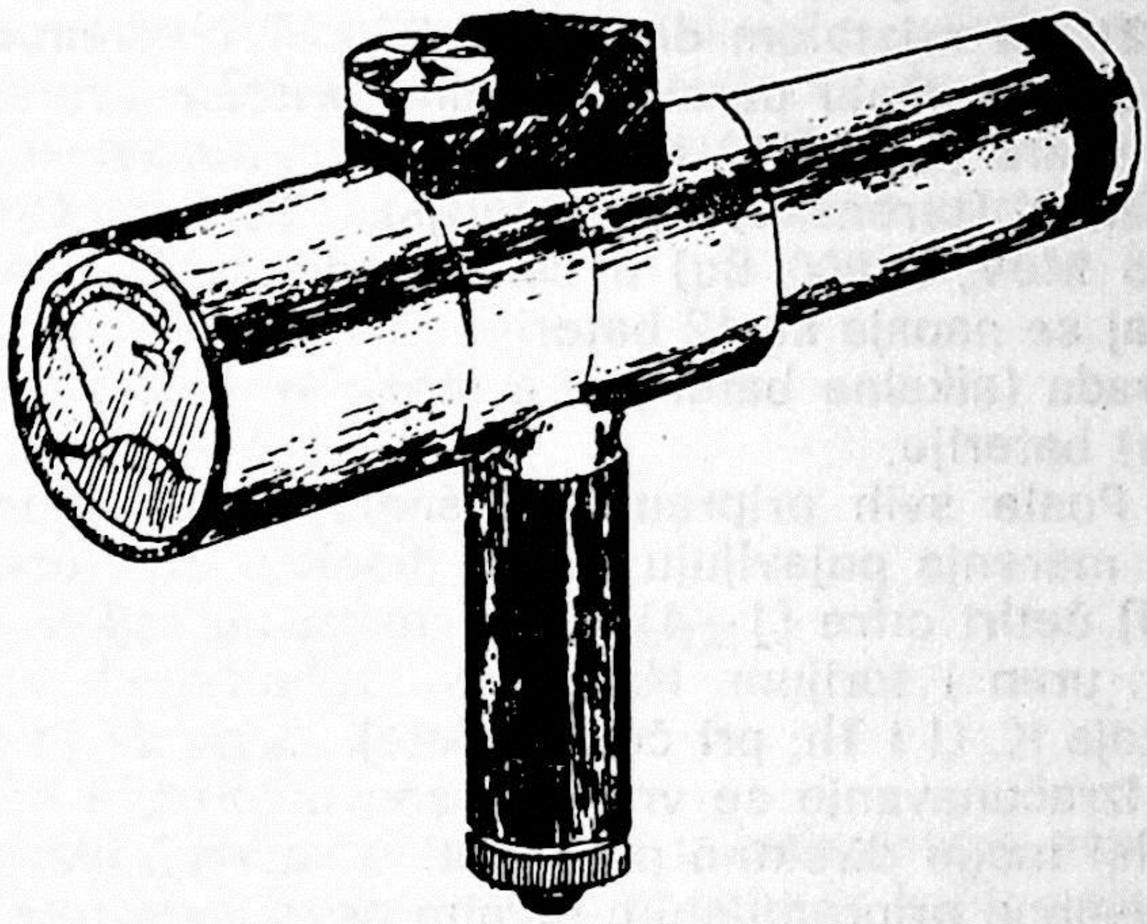
cionog dijagrama (sl. 2.3). Kod prospekcionih merenja treba imati u vidu (za korekciju) da je srednja energija gama zračenja uranovog niza oko 0,7 MeV, torijumovog niza oko 1,1 MeV i kalijuma 40 — 1,46 MeV. Srednja ponderisana vrednost prema procentualnoj zastupljenosti ovih elemenata je oko 1 MeV, tako da je faktor korelacije K = 0,75. Faktor će se menjati ukoliko se merenja vrše u pretežno uranonosnim, torijumonosnim ili kalijumom obogaćenim terenima. Ovaj robustni scintilometar je veoma stabilan, može se čak, po garanciji proizvođača, uranjati u vodu do 1 m dubine.



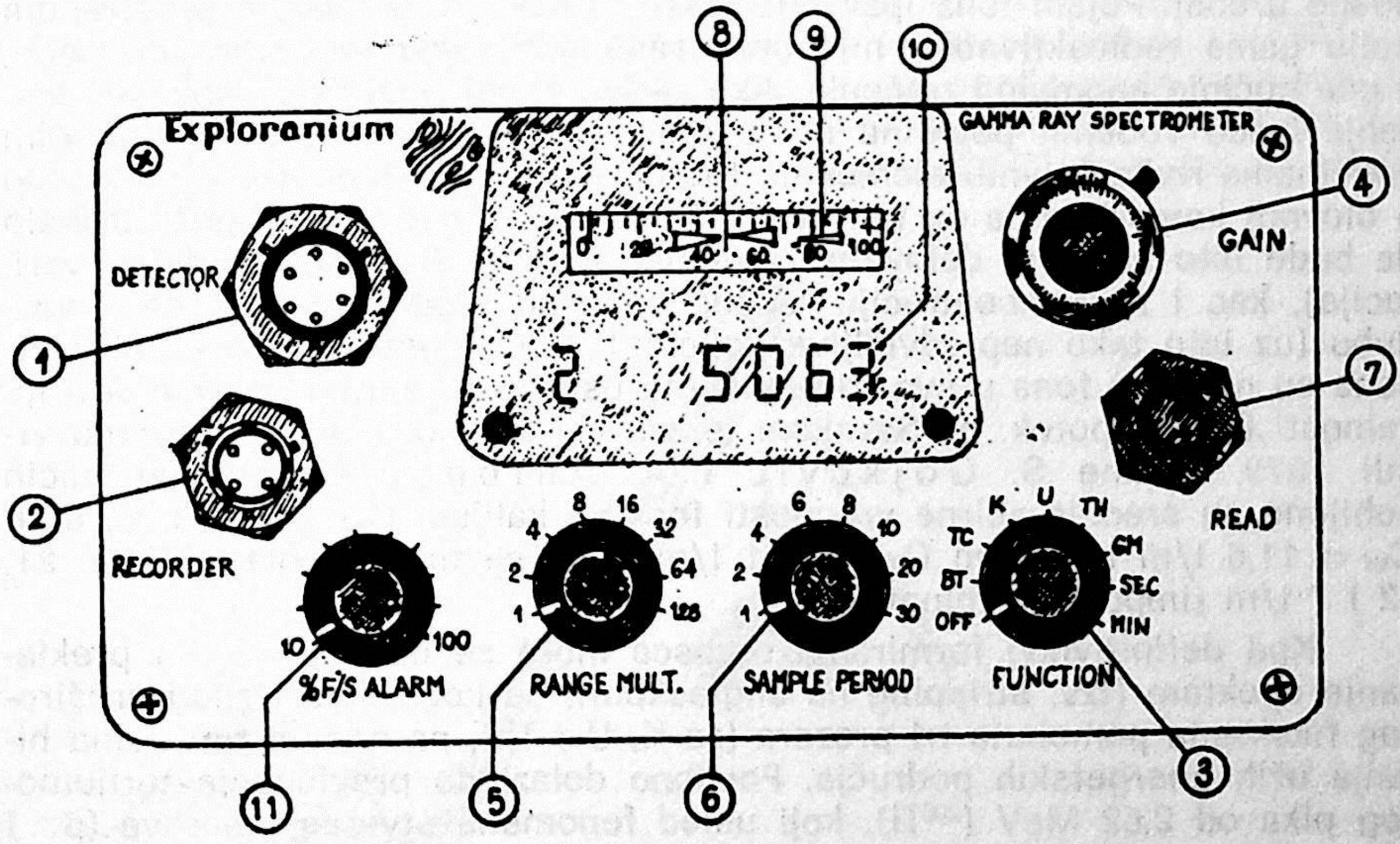
Sl. 2.3.
a) Kalibracioni dijagram za gama zračenje ^{60}Co.
b) Korekcioni dijagram za druge energije zračenja.

Naslednik ovog detektora je novi model SPP 20 (sl. 2.4), koji je skoro upola lakši (1,7 kg), bez dodatne kutije za baterije, koje se sada nalaze u ručki. Proizvođač je ista firma — Saphimo-Stel iz Francuske.

Pored ove i druge firme ne ostaju na starim modelima. Tako na pr. Scintrex preporučuje laki spektrometar GIS-5 sa nešto manjim kristalom od prethodnog modela GIS-3, zapremine 82 cm^3, sa digitalnim displejom, znatno lakši (2,8 kg) od prethodnika (4 kg). Ova firma nudi i scintilacione brojače za merenje celokupnog gama zračenja, modele BGS-3 (analogni) i BGS-4 (digitalni displej) sa istim kristalom 82 cm^3.



Sl. 2.4.
Scintilacioni brojač SPP 20.



Sl. 2.5.
Gama spektrometar GR-410.
1. Priključak za sondu, 2. priključak za zapisivač, 3. glavni prekidač, 4. regulator visokog napona, 5. opseg brojanja impulsa, 6. vreme merenja, 7. okidač za početak merenja, 8. merni indikator, 9. pokazivač stanja baterija, 10. ekran sa LED (svetlećim) diodama, 11. zvučni alarm.

Gama spektrometar GR-410

Ovaj veliki portabilni spektrometar, ukupne mase oko 9 kg, namenjen je za merenje sadržaja U, Th i K na mestu (sl. 2.5), preko uobičajenih prozora (kanala) u opsegu 0,4—3 MeV. Od tri modela sondi raznih dimenzija

kristala NaI(Tl) za prospekciona merenja na zemlji najpodesnija je sonda GPX-21, sa kristalom dimenzije 3"×3" (zapremine 0,35 l). Druga dva modela sonde imaju paralelopipedne kristale zapremine 1,8 litara (GPX-112) i 4,2 litara (GPX-256) i mogu da posluže za helikoptersku prospekciju ili preciznije (terenske) laboratorijske analize. Ugrađivanjem etalona ^{133}Ba (0,355 MeV, 37000 Bq) u čelo sonde, vrši se neprekidna autokalibracija. Uređaj se napaja sa 12 baterija od 1,5 V, dovoljnih za oko 40 sati neprekidnog rada (alkalne baterije), a mogu se koristiti i akumulatorske (kadmijumove) baterije.

Posle svih priprema izvršenih prema fabričkom uputstvu, aktiviranjem merenja pojavljuju se na displeju uzastopno (u razmaku od par sekundi) četiri cifre (1—4) koje označavaju redom ukupno zračenje (TC), kalijum, uran i torijum. Na osnovu zabeleženih vrednosti vrši se proračun sadržaja K, U i Th, pri čemu postoji uslov da je uran u radijumovoj ravnoteži. Izračunavanje se vrši na osnovu formule koje daje proizvođač, ali se impulsi mogu direktno pretvarati u sadržaj, ukoliko je kalibracija izvršena na posebno pripremljenim ravnim površinama-etalonima za svaki elemenat.

U formulama za proračunavanje sadržaja učestvuju i vrednosti fona, koje se dobijaju merenjem u odgovarajućim uslovima za svaku sondu odnosno uređaj. Pojam fona ipak nije jasan, jer na pr. u jednom prostranom polju gama radioaktivnosti nije definisano gde prestaje fonsko zračenje, a gde počinje anomalno zračenje. Ako se kao fonske uzimaju vrednosti merenja iznad vodenih površina ili na stenskim masama sa zanemarujućim količinama radioaktivnih elemenata (normalne ultrabazične stene) odnosno u olovnoj komori, onda se fon svodi na kosmičko zračenje, koje bi trebalo da bude isto na svim delovima zemljine površine (uz nepredvidljive varijacije), kao i na koncentraciju radona odnosno produkata raspada u vazduhu (uz isto tako nepredvidljive količine). U Geoinstitutu, Beograd, izvršena su merenja fona u sva tri pomenuta uslova, na serpentinitima kod lokalnosti Bubanj potok, na Savskom jezeru i u olovnoj komori (merenja vršili 1979. godine S. Gojković i A. Antonović). Na taj način dobijene su srednje zbirne vrednosti fona za kalijum $C_{Kf} = 21{,}1$ i/m, uran $C_{Uf} = 11{,}6$ i/m i torijum $C_{THf} = 7{,}1$ i/m, koje se mogu zaokrugliti na 21, 12 i 7 i/m (impulsa u minutu).

Kod definitivnog formiranja obrasca mora se uzeti u obzir i preklapanje spektara (tzv. stripping na engleskom), do koga dolazi zbog preširokog fiksiranja pomenuta tri prozora (za K, U i Th), pa samim tim nema biranja užih energetskih područja. Posebno dolazi do preklapanja torijumovog pika od 2,62 MeV (^{208}Tl), koji usled fenomena stvaranja parova (β^- i β^+, I.1.3.5. i III.2.1.2) gubi energiju od oko 1 MeV, tako da preostali zrak upada u uranov (^{214}Bi) kanal, dajući lažne vrednosti.

Treći vid konstanti odnosi se na tzv. osetljivost spektrometra, izraženu kao odnos broja impulsa i sadržaja (imp./ppm).

Tokom 1979. godine Gojković i Antonović su vršili probna merenja sa uređajem GR-410 (sa sondom GPX-21) na granitskim stenama Bukulje, uključivši i neka uranova orudnjenja sa manjom jačinom zračenja. Ukupno je izvršeno 24 merenja sa uzimanjem proba sa mesta merenja, koje su laboratorijski analizirane (radiometrijskim i hemijskim putem). Treba još napomenuti da su merenja vršena sa vertikalno postavljenim detektorom na samu površinu tla ili stene.

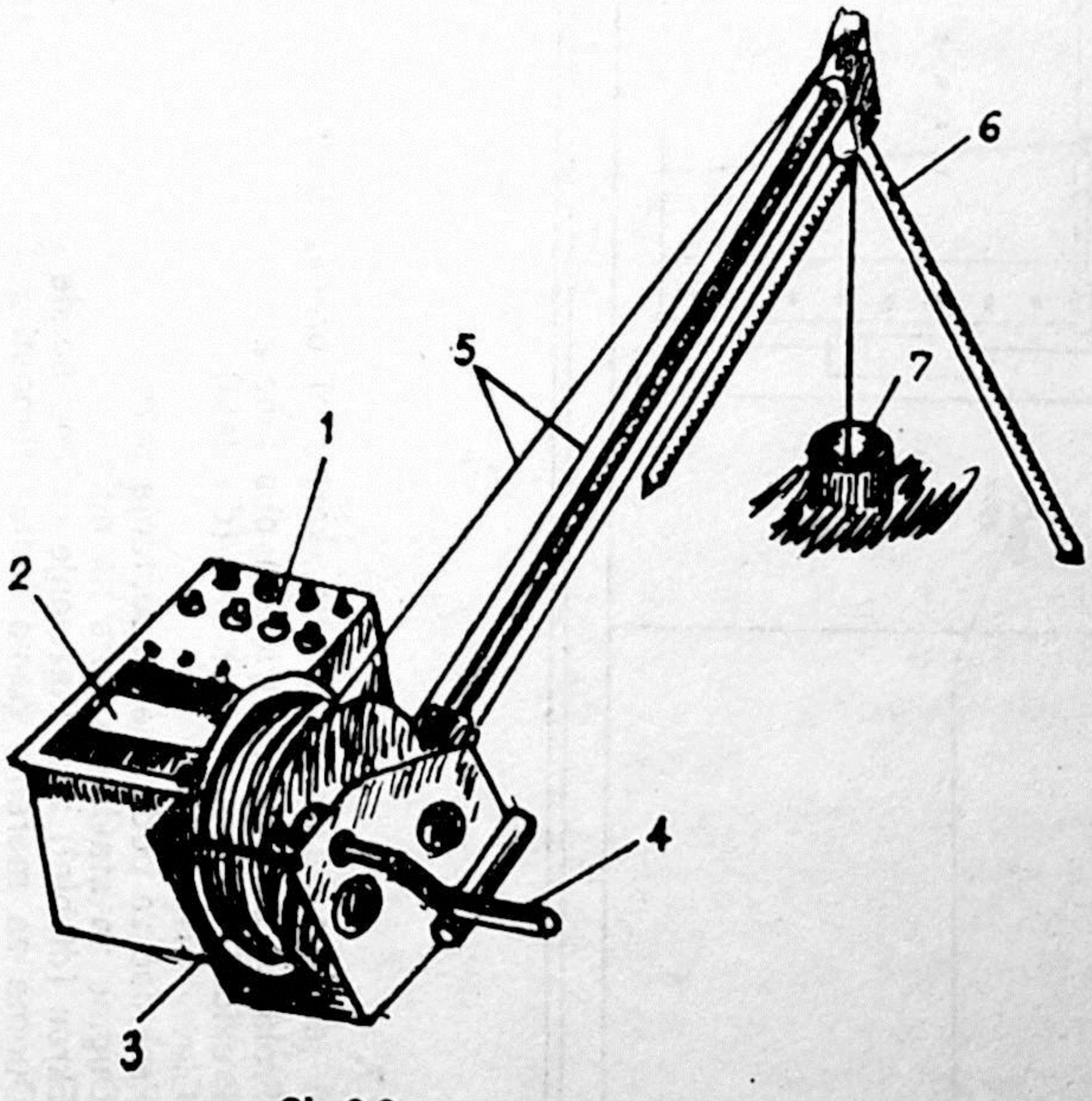
Rezultati analiza upoređivani su sa proračunatim sadržajima na osnovu dva obrasca, jedan u fabričkom uputstvu, a drugi u posebnim sveskama proizvođača [4]. Na taj način došlo se do zaključka da je ovaj drugi podesniji, svakako sa određenim dvoznačnim odstupanjima. Ovde su navedeni obrasci za sva tri elementa, gde su uzeta u obzir gore navedena umanjenja za fonske vrednosti:

$$K\% = 0{,}0063\ C_K - 0{,}0053\ C_U - 0{,}0036\ C_{Th} - 0{,}05$$
$$U\text{ppm} = 0{,}0591\ C_U - 0{,}0405\ C_{Th} - 0{,}4$$
$$Th\text{ppm} = 0{,}163\ C_{Th} - 0{,}0054\ C_U - 0{,}77$$

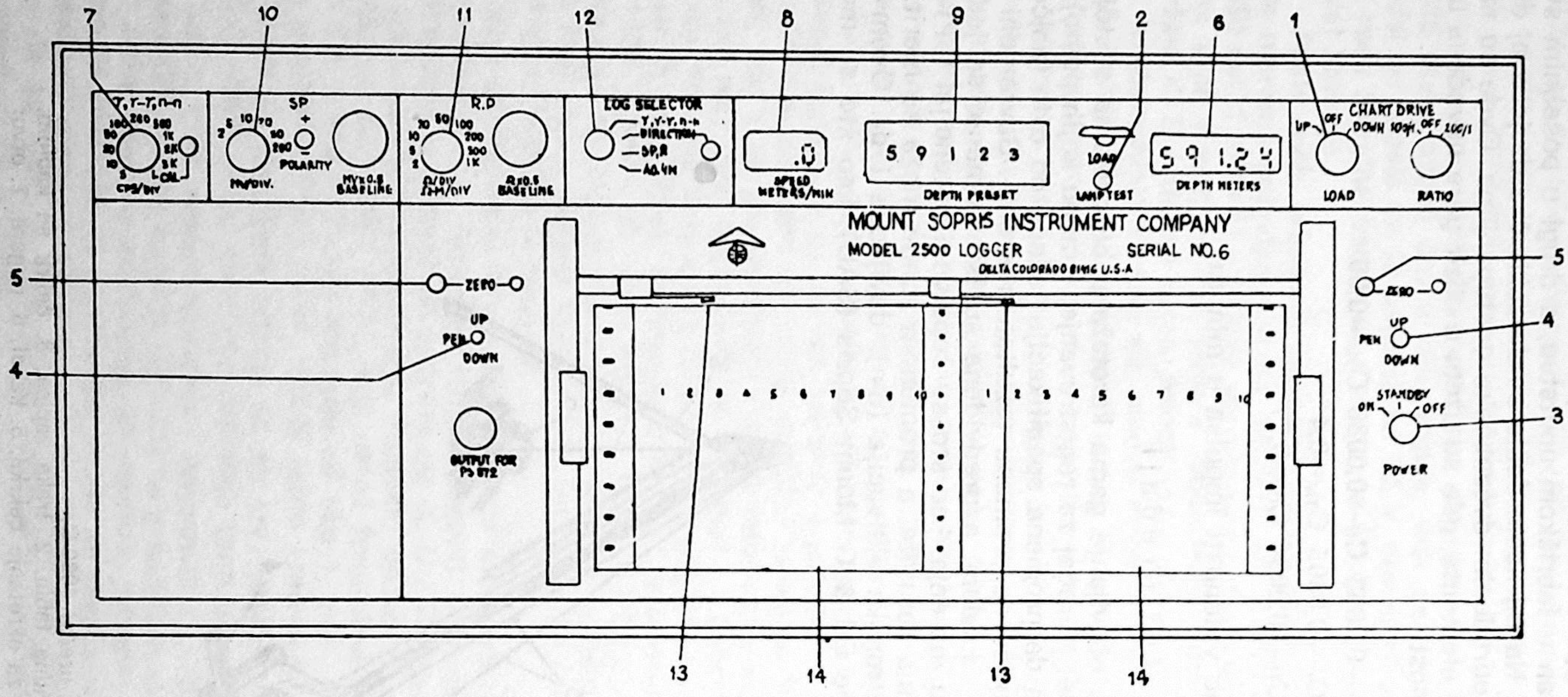
gde su $C_{K,\ U,\ Th}$ očitane vrednosti impulsa u minutu.

Gama karotažni uređaji

Merni uređaji za obavljanje gama karotaža u bušotinama sastoji se iz tri dela: sonda, kabel i uređaj za registrovanje, između kojih postoji određena zavisnost, tako da promena specifikacije jednog od ovih (najčešće se odnosi na kabel) utiče na promenu rezultata merenja. Savremeni uređaji su u potpunosti usklađeni, a predviđena su istovremeno, sa jednom istom sondom, i druga merenja, kao što su sopstveni potencijal (SP) i otpornost (R), pored gama karotaža, a promenom sonde može se meriti još gama-gama (γ-γ), neutronska aktivacija (n-n), devijacija i dr. Ovom tipu pripadaju uređaji firme EG & G Mount Sopris (SAD), kao što su modeli 1000-C, 2500 i 2500-II.



Sl. 2.6.
Karotažni uređaj 1000-C.
1. Komandna tabla, 2. traka zapisa, 3. čekrk sa kablom, 4. ručica za okretanje čekrka, 5. kabel, 6. nogare, 7. otvor bušotine.



Sl. 2.7.

Panel jedinice za registrovanje, karotažni uređaj 2500.

1. Prekidač za kretanje trake u oba smera
2. Prekidač za kontrolu ekrana (displeja)
3. Glavni prekidač
4. Prekidač za podizanje i spuštanje pera
5. Dugme za stavljanje pera na nulu
6. Ekran (displej) za pokazivanje dubine sonde
7. Dugme za merenje gama radioaktivnosti
8. Ekran (displej) za brzinu kretanja sonde
9. Korekcija dubine preko dužine od uređaja do otvora bušotine
10. Dugme za merenje SP
11. Dugme za merenje otpornosti (R)
12. Dugme za izbor karotažnog merenja
13. Pero zapisa
14. Levi i desni deo trake

Model 1000-C (sl. 2.6) ima kabel dužine 1000 stopa (300 m) na koturu (čekrku) pričvršćenom uz merni uređaj, koji se pokreće ručno. Ceo uređaj se može po potrebi transportovati na leđima. Ima jednotračni registrator sa dva pera, s tim što se pri spuštanju sonde vrši (i istovremeno zapisuje) karotaž SP i R, a pri podizanju sonde vrši se gama karotaž (novo zapisivanje). Unutar modula za registraciju nalazi se Ni-Cd akumulatorska baterija za pokretanje trake i rad modula uopšte.

Model 2500 ima poseban nosač sa koturom i kablom dužine 2500 stopa (750 m); kotur se pokreće elektromotorom, za koji je potrebno posebno napajanje, na pr. motorni agregat. Jedinica za registrovanje (sl. 2.7) vrši zapis na dva kanala (sa dva pera) slično kao kod modela 1000-C, s tim što se koristi traka za dva odvojena zapisa, tako da se zapisi sva tri karotaža mogu prikazati paralelno (dva na levom, a jedan na desnom polju). Pored toga, ovaj uređaj ima, pored registratora dubine (do 1 cm), i merač brzine kretanja sonde (preporučuje se optimalna brzina od 4 m/min.).

Za oba uređaja koriste se iste sonde, u ovom slučaju je to standardna kombinovana sonda (za gama, SP i R merenja) prečnika 2,9 cm, dužine 1,1 m, mase 2,95 kg. Kristal NaI ima dimenzije 0,5" × 1,5" (1,3 cm × 3,8 cm, zapremine 20 cm^3). Kod oba uređaja vrši se automatska korekcija za tzv. mrtvo vreme, prema obrascu $N = n/(1-nt)$, gde je N — stvarni broj otkucaja, n — mereni broj otkucaja, a t — mrtvo vreme između impulsa (iznosi obično 1—10 μs).

3. UREĐAJI I NAČIN MERENJA RADONA

Uređaje za merenje radona proizvode mnoge firme u svetu, kao što su EDA, Pylon Electronic Development Co., Bonder-Clegg and Co, TSA Systems, Inc., Strintex (SAD, Kanada), zatim S.R.A.T. iz Francuske, a postoje i noviji modeli iz SSSR, pored pomenutog starijeg modela iz serije SG.

3.1. Merenje radona u uzorku vazduha

Ovde je u prvom redu prikazan rad sa uređajem ETR-1 firme Scintrex, koji radi na principu elektrometra. To je relativno lak portabilni uređaj, koji se pričvršćuje na pumpu, koja ujedno služi kao stabilni nosač (sl. 3.2). Na detektoru (sl. 3.1) nalazi se jonizaciona komora, koja se može vaditi, obično radi povremenog čišćenja.

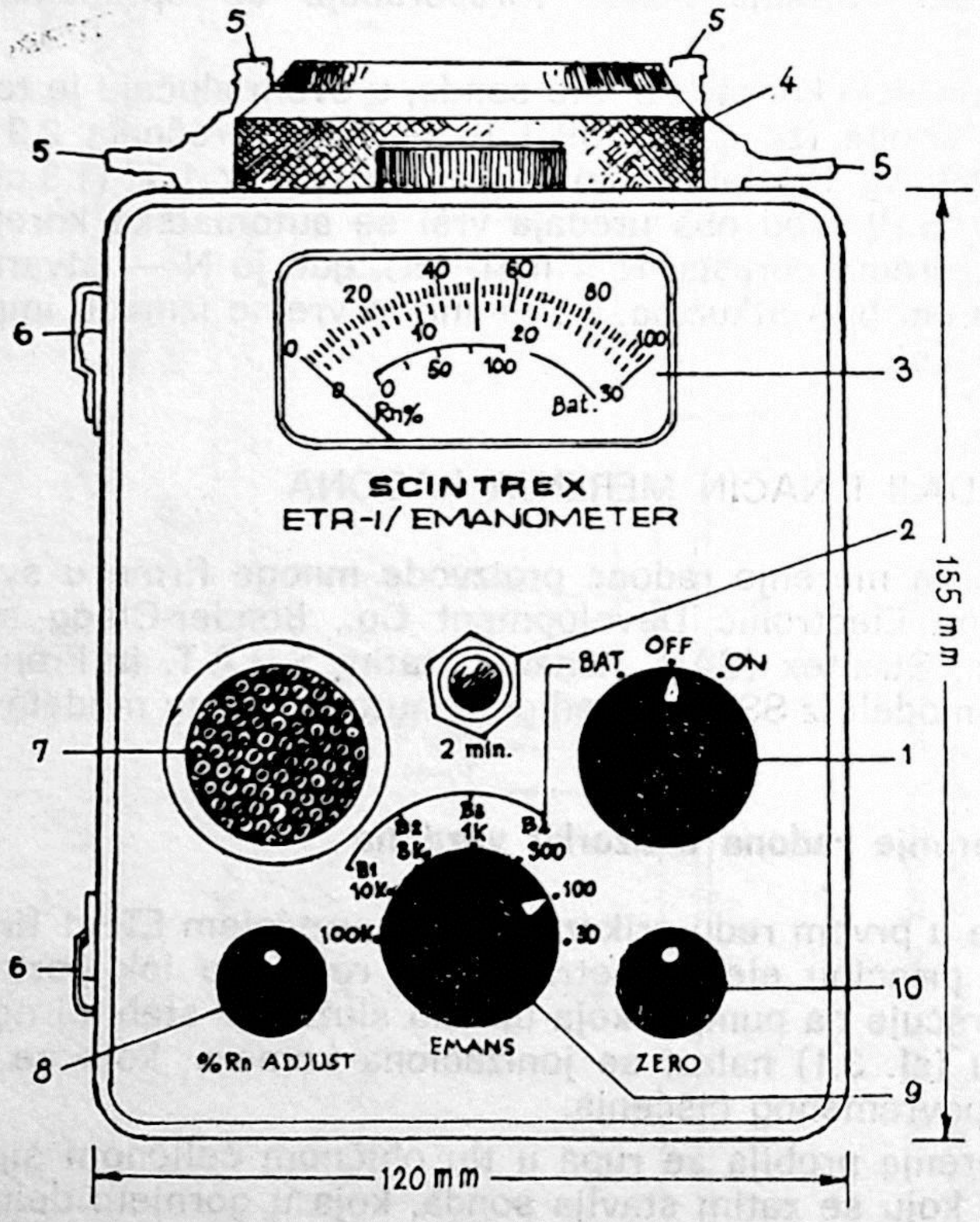
Pre merenja probija se rupa u tlu običnom čeličnom šipkom, dubine oko 0,5 m, u koju se zatim stavlja sonda, koja u gornjem delu ima konični čep, tako da dobro zaptiva rupu (sl. 3.2.). Cirkulacija vazduha ostvaruje se pumpanjem (5—7 pokreta klipa odnosno 30 sekundi), s tim što se pre svakog pumpanja igla podesi tačno na nulu (potenciometar 10 na sl. 3.1). Posle pumpanja zatvaraju se slavine i vrši se direktno očitanje igle. Opseg merenja bira se (dugme 9 na sl. 3.1) oobično na 100 emana, kako je naznačeno na skali (370 Bq/l). Da bi se dobio procenat radona, levim potenciometrom (8 na sl. 3.1) podešava se igla tačno na središnu (crvenu) crtu, zatim se pritiska gornje srednje dugme (2), čime započinje i dvominutno zujanje iz

zvučnika (7). Posle završetka signala, očitava se procenat radona na gornjoj skali. Veoma je važno da se posle svakog merenja igra vraća na nulu (levim potenciometrom).

Formalno uzev, osetljivost ovog emanometra je jedan, eventualno pola podeoka (1,8 Bq/l), što u ovom slučaju nema mnogo značaja, pošto je fon obično oko 20 Bq/l, a koji se inače proverava.

Kalibracija uređaja se vrši komorom-etalonom na čijem dnu se nalazi izvor ^{14}C, koji je beta emiter, a spolja je upisana vrednost u emanima (obično 180—250 emana; 1 eman = 3,7 Bq/l).

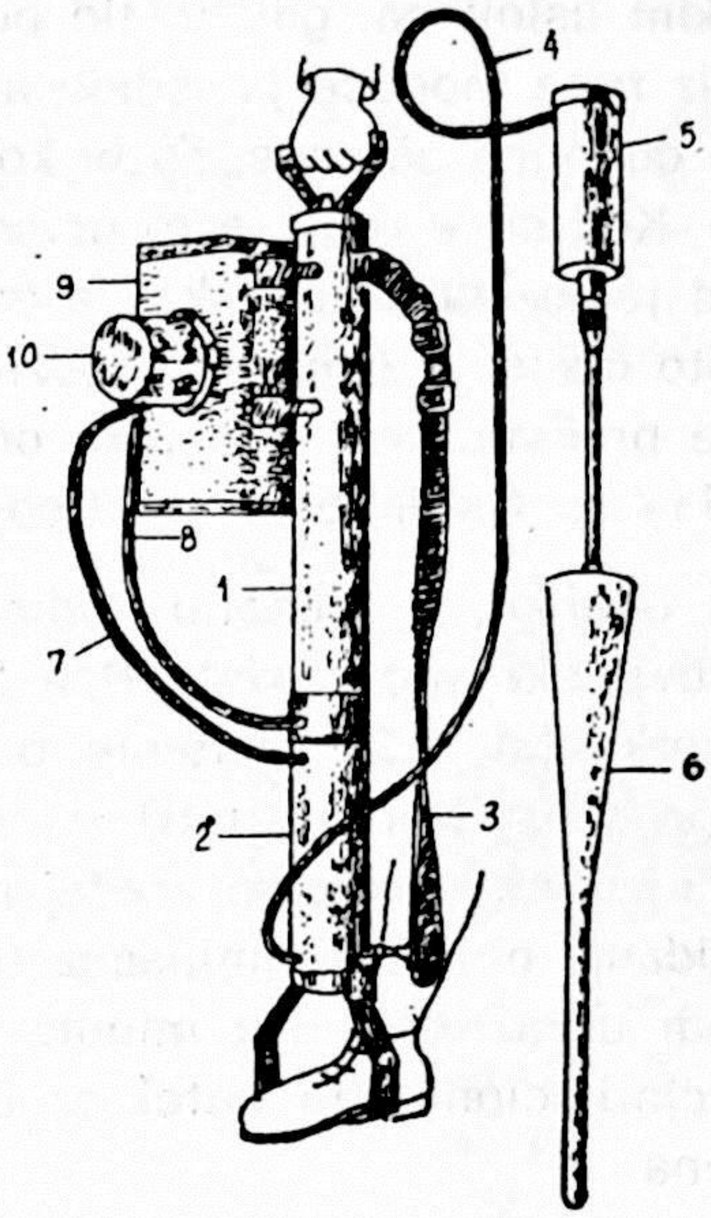
Ovaj emanometar se napaja sa 4 baterija po 9 V, koje traju najmanje mesec dana terenskog rada.



Sl. 3.1.

Komandna tabla emanometra ETR-1.

1. Glavno dugme-prekidač i kontrola baterija (preko dugmeta 9, na položajima B_{1-4} može se kontrolisati svaka od četiri baterije), 2. dugme-tajmer, uključuje zvuk trajanja dva minuta, 3. skala za gornja dva opsega (preko dugmeta 9) za ukupnu emanaciju, sa donjom levom skalom za procenat radona i desnim crvenim kružnim otsekom za kontrolu baterija, 5. ulazno-izlazni ventil, 6. kopče za vezivanje uz pumpu, 7. zvučnik (uključuje se pritiskom na dugme 2), 8. dugme za postavljanje igle na srednju crvenu crtu radi merenja % radona, 9. glavni potenciometar, 10. dugme za tačno fiksiranje igle na nuli.

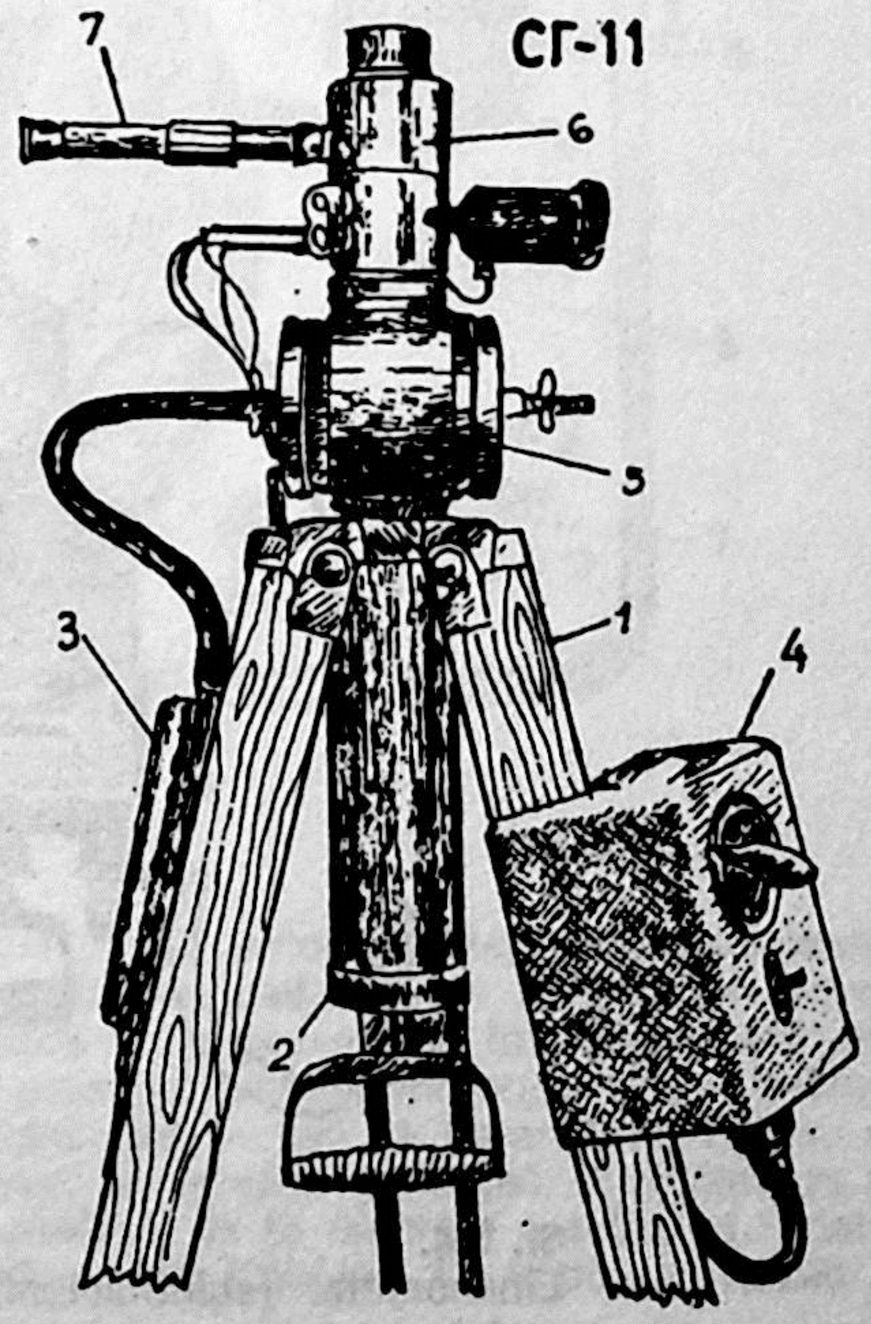


Sl. 3.2.
Opšti izgled emanometra ETR-1.

1. Pumpa
2. Filter za prašinu
3. Remen za nošenje
4. Vezivno crevo pumpe i sonde
5. Sakupljač vode (sprečava prodor vode u pumpu)
6. Sonda sa zaptivnim konusom
7. Vezno crevo filtera sa jednim parom ventila
8. Vezno crevo filtera i drugog para ventila
9. Emanometar (sl. 3.1.),
10. Jonizaciona komora

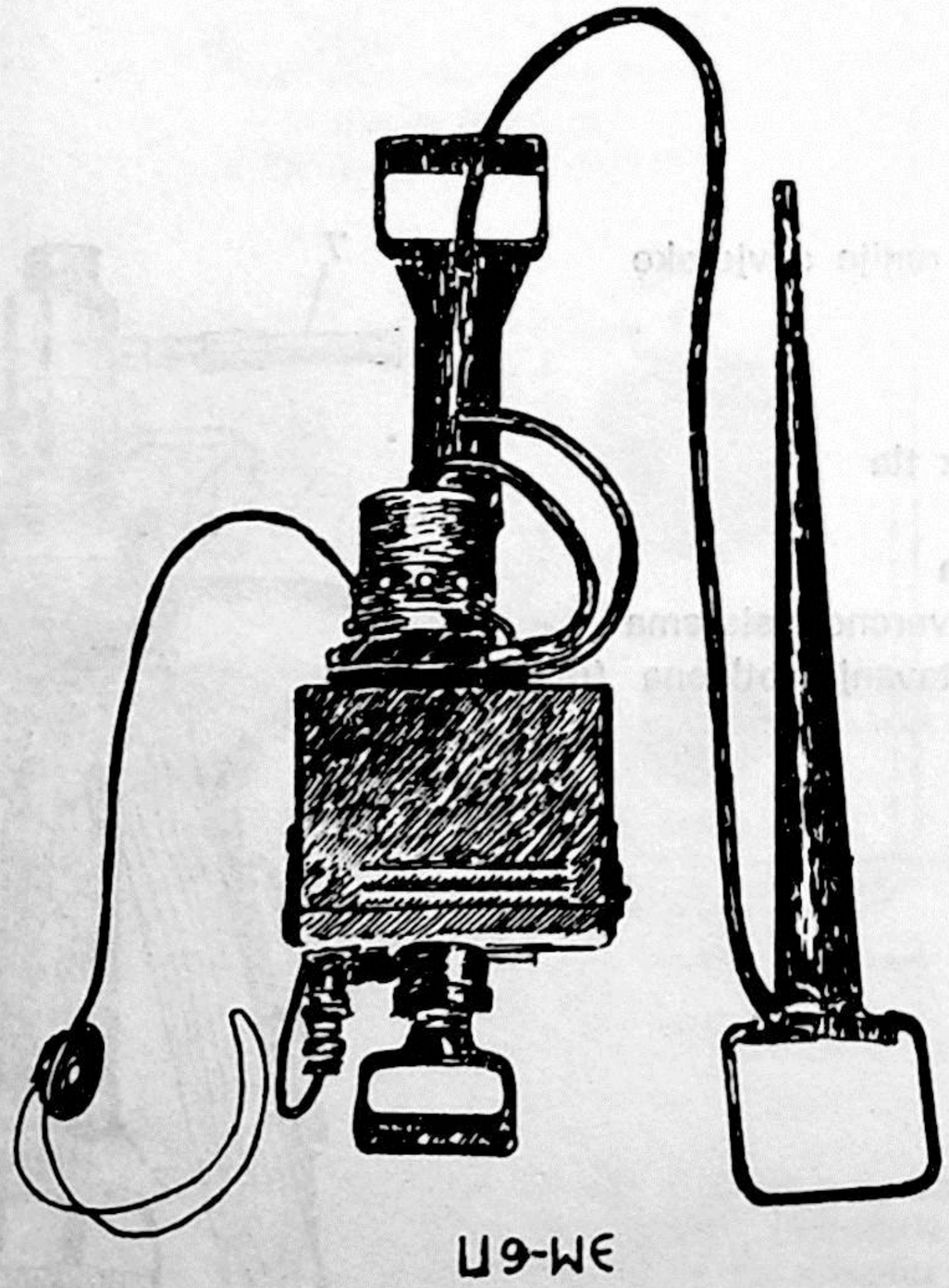
Sl. 3.3.
Emanometar SG-11 iz ranije sovjetske proizvodnje (1960).

1. Nogare
2. Pumpa
3. Isušivač vazduha iz tla
4. Kutija za baterije
5. Jonizaciona komora
6. Nosač torzionog kvarcnog sistema
7. Mikroskop za očitavanje otklona (uveličanje 70×).



Na osnovu iskustva rada u pustinjskim uslovima, gde je tlo po pravilu peskovito, ispravno vađenje vazduha iz rupe moguće je jedino ako se mesto rupe zalije vodom i tlo na taj način dovoljno očvrsne, da bi konusni čep dovoljno čvrsto nalegao na ivicu rupe. Kod suve rupe je to nemoguće pa se, ustvari, meri spoljašnji vazduh. Još jedna važna opaska na osnovu istog iskustva odnosi se na obavezno često čišćenje centralne (pozitivne) elektrode kod izlaza iz izolatora, zbog fine prašine, koja isto tako onemogućava merenje (ljubaznošću P. Nikolića, Geoinstitut — Beograd).

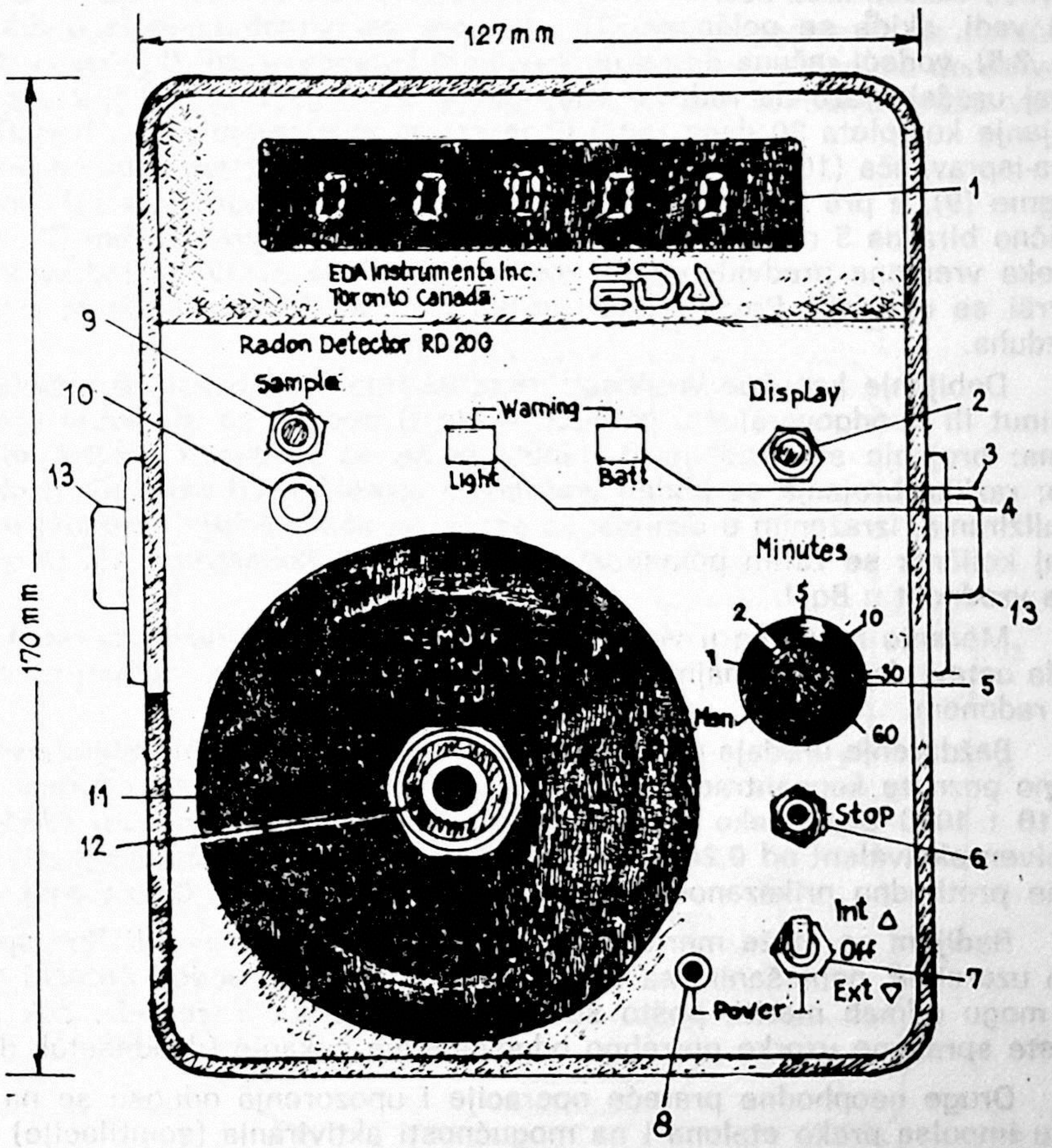
Kao što je navedeno u prethodnom odeljku, šezdesetih godina bio je u upotrebi emanometar-elektrometar sovjetske proizvodnje tipa SG-11 (SG-11M) i dr.), na bazi vakuumskog uzorka (sl. 3.3). Očitanje otklona kvarcnog štapića (ugrađenog u torzioni spreg na kvarcnoj niti) vršeno je vizuelno, mikroskopom. Ovaj inače veoma stabilan i pouzdan uređaj jedino je bio osetljiv na udar, zbog mogućnosti kidanja niti. Diskriminacija torona od radona vršena je dvostrukim merenjem u razmaku dva minuta. Novi sovjetski uređaj za merenje radona je scintilacioni alfa detektor EM-6P (sl. 3.4), korišćen u Jugoslaviji 70-tih godina.



Sl. 3.4.
Emanometar (scintilacioni) EM-6P novije sovjetske proizvodnje.

3.2. Merenje radona i radijuma u vodi

Merenje radona i radijuma u vodi vrši se na sličan način kao u prethodnom slučaju, jer se isto tako meri vazduh, koji je prethodno prošao kroz vodu i zahvatio radon. Ova merenja, koja zahtevaju veću tačnost, vrše se po pravilu preko scintilacionih komora sa oblogom cink sulfida aktiviranog srebrom, zapremine 160—170 ml. Ovde je prikazan rad sa radonovim



Sl. 3.5.
Detektor (scintilacioni emanometar) RD-200.
1. Digitalno očitanje (displej), 2. dugme za uključenje celog displeja kod definitivnog brojanja (baterijski pogon), 3. crveno svetlo označava pad napona baterija, 4. crveno svetlo označava samoisključenje fotomultiplikatora zbog prevelikog intenziteta svetlosti, 5. dugme za izbor perioda merenja (minuti), 6. prekidač perioda merenja ručnim načinom (dugme 5. postavljeno na Man), 7. glavni prekidač: Int — rad sa baterijama, Ext — rad preko mrežnog ispravljača-transformatora, 8. utikač za mrežni ispravljač, 9. dugme za početak merenja, 10. isprekidano crveno svetlo označava da je merenje u toku, 11. komora sa merenim gasom, 12. ulaz gasa u komoru (vakuumska komora), 13. kopče za nosač (na terenu).

detektorom UD-200 (sl. 3.5) preko uređaja za degazaciju RDU-200 (sl. 3.6), oba kanadske proizvodnje (firma EDA).

Uzorak vode (sa zabeleženim danom i satom uzimanja probe) sipa se u stakleni sud zapremine oko 200 ml (sl. 3. — 11), pri čemu je najmanja zapremina uzorka 130 ml. Ovaj sud ima na donjem kraju otvor sa finim staklenim filtrom (12) koji propušta vazduh u vidu finih mehurića. Pumpom se prvo stvara vakuum u komori (2) sa otvorenom slavinom (4), koja se zatim zatvara, a otvara druga slavina (9) čime se omogućava da vakuum povuče vazduh kroz uzorak vode. Time je prva faza završena, pa se komora (2) vadi, skida se poklopac (3) i komora se odmah ubacuje u detektor (sl. 3.5), vodeći računa da se unutrašnjost komore ne izloži jačoj svetlosti. Ovaj uređaj može da radi sa unutrašnjim baterijama (8 × 1,5 V, tip »D«, trajanje kompleta 30 dana rada) ili mrežnim napajanjem preko transformatora-ispravljača (10—24 V, jednosmerno). Merenje počinje kada se pritisne dugme (9), a pre toga je izabrano vreme merenja dugmetom (5), koje se obično bira na 5 minuta, pa se zatim uređaj uključi prekidačem (7). Posle isteka vremena predviđenog za merenje, gasi se svetlosni indikator (10) i vrši se očitanje. Pre merenja uzorka meri se fonska vrednost okolnog vazduha.

Dobijanje konačne vrednosti merenja (može se izraziti u impulsima/ /minut ili u odgovarajućoj jedinici — Bq/l) postiže se sledećim operacijama: brojanje se svodi na 1 minut, pa se od vrednosti uzorka oduzme fon; razlika brojanja se podeli vremenom proteklim od uzimanja proba do analiziranja, izraženim u danima, pa se na taj način dobije vrednost u i/m; ovaj količnik se zatim pomnoži odgovarajućom konstantom da bi se dobila vrednost u Bq/l.

Merenje radijuma u vodi vrši se na potpuno isti način, s tim što se voda ostavi da odstoji najmanje 21 dan, da bi radijum bio u punoj ravnoteži sa radonom.

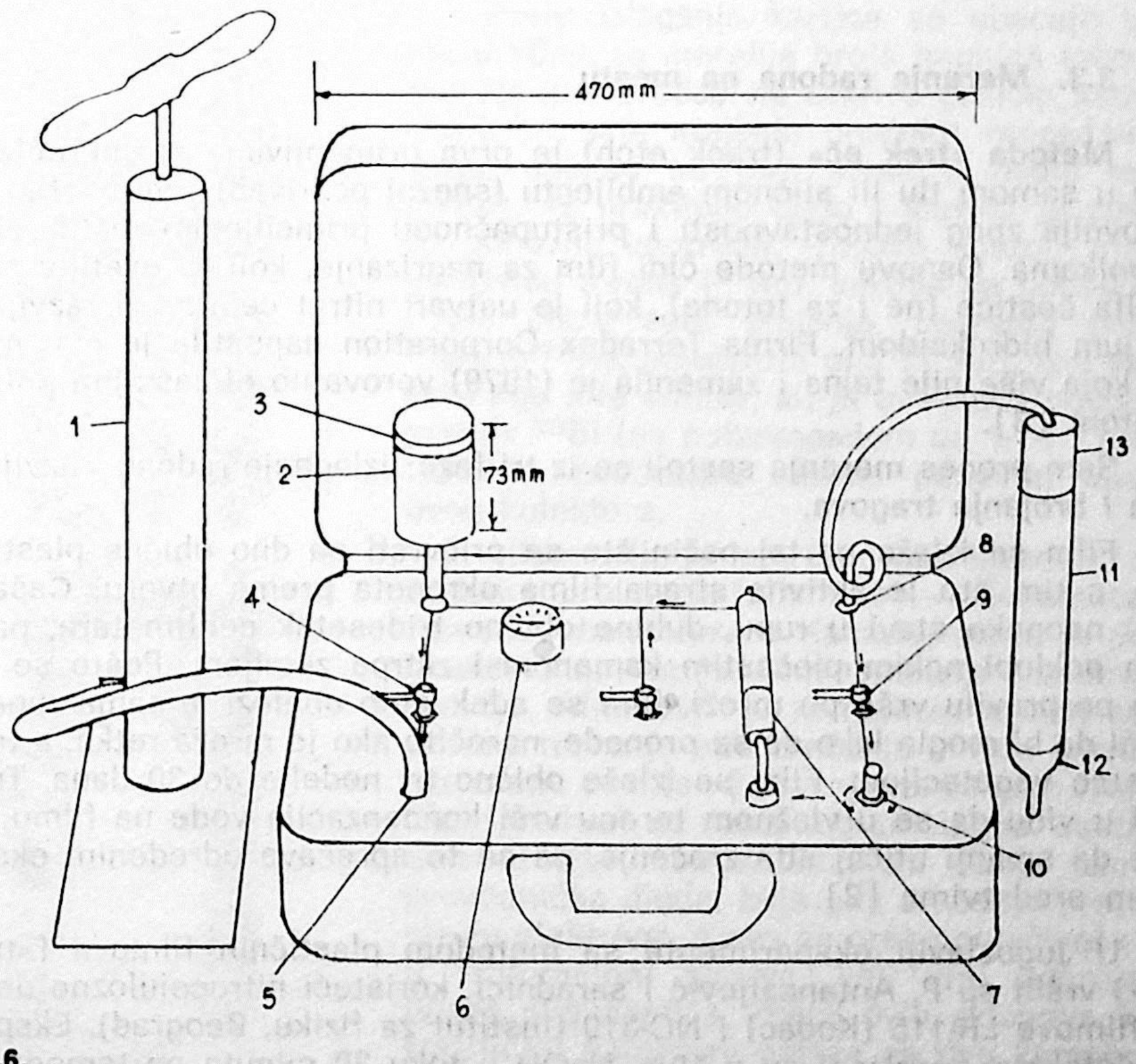
Baždarenje uređaja na jedinicu Bq/l vrši se rastvorom radijumove soli tačno poznate koncentracije, pri čemu se obično prirede tri etalona — sa 1, 10 i 1000 Bq/l. Tako je za detektor RD-200 u Geoinstitutu (Beograd) dobiven ekvivalent od 0,2489 Bq/l za 1 i/m, čime se množe vrednosti dobivene prethodno prikazanom operacijom (ljubaznošću Z. Červenjaka).

Radijum se može meriti ovom metodom i u čvrstim, ali fino sprašenim uzorcima, pomešanim sa vodom (40 g na 200 ml vode). Potočni talozi se mogu odmah meriti, pošto su radon i radijum u ravnoteži, dok je za čvrste sprašene uzorke potrebno odgovarajuće čekanje (dvadesetak dana).

Druge neophodne prateće operacije i upozorenja odnose se na kontrolu impulsa preko etalona i na mogućnosti aktiviranja (scintilacije) cink-sulfida pod dejstvom jače svetlosti. Na etalonu stoji oznaka broja impulsa koji ovaj daje (obično preko 1000 i/m), a oblik etalona (sa radijumskim izvorom, kao alfa emiterom) je podešen tako da se lako unosi u komoru. Eventualna odstupanja se mogu korigovati podešavanjem potenciometra za visoki napon fotomultiplikatora (označen isto tako na etalonu), koji se nalazi u kutiji uređaja UD-200. Pri svakom rukovanju komorom pred merenje treba u svakom slučaju izbeći izlaganje njene unutrašnjosti jačoj svetlosti, pogotovo ne direktnoj sunčevoj svetlosti. Ukoliko se to desi, treba sačekati nekoliko minuta da se ova fosforescencija ugasi.

Detektor RD-200 može se koristiti i za terensku prospekciju radona (emanometriju), korišćenjem komora sa dva otvora, za protočno merenje vazduha, uključenjem pumpe direktno na komoru (sa odgovarajućim slavinama). Za diskriminaciju radona (^{222}Rn) od torona (^{220}Rn) meri se prvo radon po formuli $0{,}87\ C_2 + 0{,}32\ C_3 - 0{,}34\ C_1$, gde su $C_1 — C_3$ impulsi prvog, drugog i trećeg minuta merenja (pri čemu se fonski impulsi oduzimaju). Toron se dobija kada se od celokupnih trominutnih impulsa (takođe bez fonskih) oduzme rezultat dobiven po gornjoj formuli (radon). Prevođenje u Bq/l vrši se na isti način kao i kod analiza voda.

U praksi se rezultati prikazuju na formularima podesnim za obračun, a pripremaju se i priručne tablice sa tačno obračunatim danima do četvrte decimale, na osnovu terenskog zapisa dana i časa uzimanja probe vode.



Sl. 3.6.

Uređaj za punjenje komore vazduhom (sa radonom) RDU-200 za merni uređaj (RD 200 (sl. 3.5.).
1. Pumpa, 2. komora za vazduh (sa radonom), 3. poklopac se stavlja tokom vakuumiranja komore, 4. slavina odvoda vazduha (vakuuma), 5. vezno crevo komore i pumpe, 6. manometar (pokazivač vakuuma), 7. filter, 8. dovodno crevo za vazduh (radon) iz uzorka vode, 9. slavina za uvođenje vazduha iz vode u vakuumsku komoru, 10. regulator toka vazduha, 11. sud sa uzorkom vode (barboter), 12. porozni stakleni filter za uvođenje vazduha, 13. filter za sušenje vazduha.

Na taj način, na formular se nanose očitanja uzorka i fona za 5 minuta, kao i svedena na 1 minut, vreme stajanja probe i konačni rezultat u Bq/l (ljubaznošću M. Jauković a, Geoinstitut — Beograd).

Prevelika osetljivost detektora UD 200 postaje međutim faktor usporenja terenskog rada kod visokih koncentracija radona u tlu, jer dolazi do zagađenja komore produktima raspadanja radona, koji se ne mogu odstraniti produvavanjem komore, pa se komore moraju češće menjati, da bi bilo vremena za puni raspad produkata (oko 1 dan). Zato bi ove detektore trebalo koristiti za tačnija merenja finijih varijacija sadržaja radona u vazduhu.

I ovde važe isti trendovi kod ponude novih uređaja, gde se principi ne menjaju, ali se povećavaju tačnost i brzina merenja, analogni sistemi se zamenjuju digitalnim, od displeja sa LED-diodama prelazi se na tečne kristale, ugrađuju se složeniji procesorski sistemi koji daju već obrađene rezultate, smanjuju se dimenzije, poboljšavaju se dizajn i praktičnost rukovanja i sl.

3.3. Merenje radona na mestu

Metoda »trek eč« (track etch) je prva primenjivana za merenje radona u samom tlu ili sličnom ambijentu (snežni pokrivač) i verovatno najmasovnija zbog jednostavnosti i pristupačnosti primenjenim materijalima i tehnikama. Osnovu metode čini film za nagrizanje, koji je osetljiv samo na alfa čestice (ne i za fotone), koji je ustvari nitrat celuloze i razvija se natrijum hidroksidom. Firma Terradex Corporation napustila je ovu materiju, koja više nije tajna i zamenila je (1979) verovatno efikasnijim polikarbonatom [3].

Sam proces merenja sastoji se iz tri faze: izlaganje radonu, razvijanje filma i brojanje tragova.

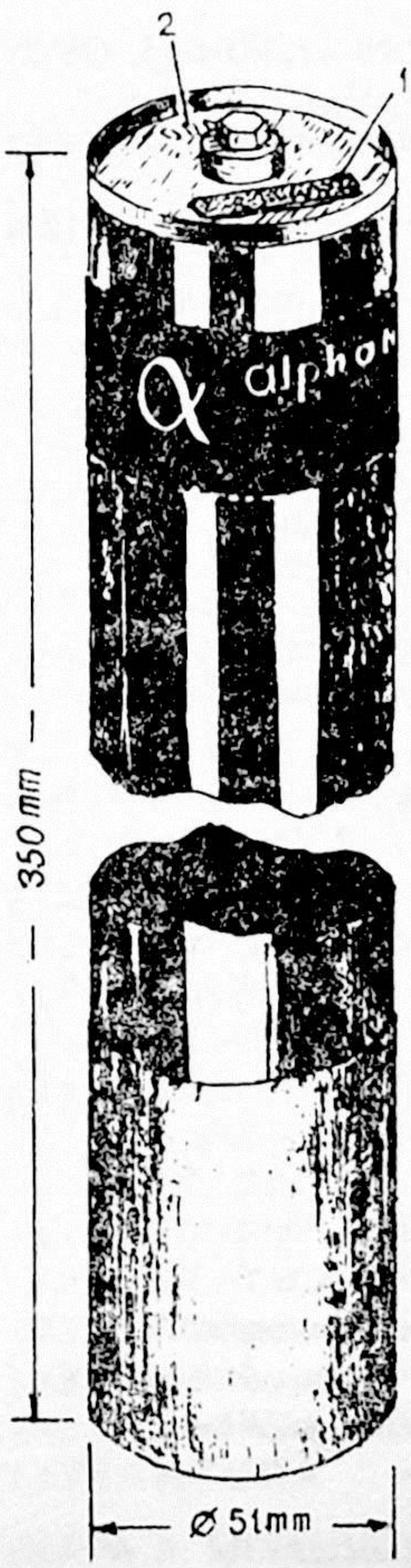
Film se izlaže na taj način što se pričvrsti na dno obične plastične čaše, s tim što je aktivna strana filma okrenuta prema otvoru. Čaša se zatim naopako stavi u rupu, dubine obično tridesetak centimetara, pa se zatim poklopi nekim pločastim kamenom i zatrpa zemljom. Pošto se merenja po pravilu vrše po mreži, film se adekvatno obeleži, a sama rupa se označi da bi mogla lako da se pronađe, naročito ako je mreža retka, a teren obrastao vegetacijom. Film se izlaže obično tri nedelje do 30 dana. Treba imati u vidu da se u vlažnom terenu vrši kondenzacija vode na filmu, što može da smanji uticaj alfa zračenja, pa se to sprečava određenim eksikacionim sredstvima [2].

U Jugoslaviji eksperimente sa metodom plastičnih filmova (»track etch«) vršili su P. Antanasijević i saradnici, koristeći nitrocelulozne detektore-filmove LR-115 (Kodac) i NC-310 (Institut za fiziku, Beograd). Eksponirani detektori nagrizani su u 10% NaOH u toku 30 minuta na temperaturi od 60°C. Drugi autori navode nagrizanje sa 6N NaOH u vremenu od 1—3 sata, na temperaturi od 40°C.

Očitavanje se vrši običnim mikroskopom na taj način što se na određenoj površini (na pr. 1 mm^2) vrši brojanje tragova. Ovo je ustvari glavna smetnja za veću efikasnost ove metode, jer izvežban operator utroši na čitanje jednog filma obično pola sata. Postoji međutim automatsko bro-

janje, zapravo merenje intenziteta zasenčenja elektronskim uređajima sa fotoćelijama, koje se za jedan film obavi za nekoliko sekundi.

Metoda »alfa kartica« (alphacards — zaštićen naziv od strane proizvođača »Alphanuclear« iz Kanade [5]) bazira na principu fiksiranja čvrstih produkata raspadanja radona na površini određenih metala. To je prvenstveno RaA ili ^{218}Po (poluživot 3 m) čija energija alfa zračenja iznosi oko 6 MeV (za razliku od samog ^{222}Rn — 5,5 MeV), koji se zatim mere na posebnom uređaju. Alfa kartica je ustvari kružna pločica prečnika 1—2 cm od posebne plastike, metalizirane na obe strane. Postupak izlaganja pločice (ili kolektora, kako se još naziva) je vrlo slično kao kod prethodne metode, samo što se ovde kartica ne pričvršćuje na dno čaše, već se okači na žicu razapetu između zidova čaše, tako da slobodno visi u izvrnutom sudu. Proizvođač preporučuje da se čaša ne zatrpa već da se rupa pokrije, a preko pokrivača naspe zemlja, tako da je oko kolektora znatno veći slobodni prostor, pa se tako izlaže 12 sati.



Sl. 3.7.
Alfametar (detektor radona — Alphanuclear).
1. magnet za uključivanje i isključivanje, 2. displej.

Posle izlaganja kartica se ubacuje u prorez uređaja za merenje broja impulsa tokom pet minuta (proizvođač ne otkriva princip merenja). Posle tri sata stajanja produkti raspadanja radona, ukoliko se radi samo o ovom nuklidu (^{222}Rn), se praktično gube i kartica je spremna za ponovnu upotrebu. Ukoliko postoji značajno prisustvo torona (^{220}Rn), kartica se ponovo meri posle četiri sata stajanja. Posredni potomak ^{220}Rn je ^{212}Pb, poluživota oko 11 sati, koji sam po sebi nije alfa emiter, ali je to njegov neposredni predak ^{212}Bi (sa poluraspadom od 1 h). Ovim se, naravno, produžava raspon ponovne upotrebe ovog kolektora.

Alfametrija je isto tako ime izvedeno od zaštićenog proizvoda (alfametar — alphameter iste firme, Alphanuclear u Kanadi), mada je pomalo neadekvatno, jer je i emanometrija u osnovi alfametrija. Alfametar je kompletan uređaj za izlaganje i merenje alfa zračenja u vidu hermetički zatvorene cevi (sl. 3.7), koja na donjem kraju ima film (premaz) od metalnog silicijuma, osetljiv na dejstvo alfa čestica. Silicijum deluje kao poluprovodnička dioda, koja alfa zračenje pretvara u struju elektrona, a ova se preko pojačivača uvodi u integracioni sistem, koji vrši odbrojavanje upada alfa čestica. Pored ovih sklopova, u unutrašnjosti detektora nalaze se dva kompleta baterija i to 2 × 5,6 V (11,2 V) i 4 × 22,5 V (90 V), s tim što prvi ima radni život oko 3 meseca, a drugi jednu godinu. Ekran (displej) ima 5 brojčanih mesta, gde se vrše dva vida očitanja: jedno je broj udara alfa čestica do maksimalno 99999, a drugo je vreme maksimalno 999,99 časova.

Uključivanje i isključivanje uređaja vrši se preko posebnog modula, pri čemu se na displeju naizmenično pokazuju odbrojane čestice i vreme merenja, koje treba zabeležiti. Sonda se inače ukopava u tlo, pri čemu se slobodan prostor oko sonde zapunjava zemljom, a na površini ostaje samo vrh sa ekranom (koji se pokriva navlakom za vreme stajanja u tlu). Maksimalno vreme merenja je 40 dana.

LITERATURA

[1] **Frank A. L., Benton E. V.,** 1977: Radon dosimetry using plastic nuclear track detector. Nuclear track detector, vol. 1, No. 3/4, Pergamon Press, p. 149—179.

[2] **Likes R. S., Mogra-Campero A., Fleischer L.,** 1979: Moisture-intensive monitoring of radon. Nuclear instrumental and methods 159, North-Holland Publishing Co, p. 395—400.

[3] **Pacer J. C.,** 1982: Radon measurement techniques for uranium exploration. OECD--NEA/IAEA Sympos., Paris, p. 9.

[4] Survey guidelines for using a portable gamma ray spectrometer in uranium explorations. No. 13, Nov. 1977, Geometrics technical report.

[5] The Alphacard system of radon measurements. Product description report, 1980, Alphanuclear Co., Missassaga, Ont., Canada.

S A D R Ž A J

Str.

PREDGOVOR — — — — — — — — — — — — — — — — 7

UVOD — — — — — — — — — — — — — — — — — — 9

ISTORIJSKI PREGLED RAZVOJA ATOMISTIKE — — — — — — — — 11

GLAVA I. **RADIOAKTIVNOST I NUKLEARNI RASPAD** — — — — — — — 13

I.1. PRIRODA JONIZUJUĆEG ZRAČENJA — — — — — — — — — — 13

I.1.1. *NUKLIDI* — — — — — — — — — — — — — — — — 13

I.1.2. *OPŠTE OSOBINE JONIZUJUĆEG ZRAČENJA* — — — — — — — 14

I.1.3. *POSEBNA OBELEŽJA JONIZUJUCEG ZRAČENJA* — — — — — — — 14

I.1.3.1. Alfa raspad i zračenje — — — — — — — — — — — 15

I.1.3.2. Beta raspad i zračenje — — — — — — — — — — — 16

I.1.3.3. Gama zračenje — — — — — — — — — — — — — 16

I.1.3.4. Izomerski prelaz — — — — — — — — — — — — — 17

I.1.3.5. Prolaz jonizujućeg zračenja — — — — — — — — — — 17

Alfa zračenje — — — — — — — — — — — — — — 17

Beta zračenje — — — — — — — — — — — — — — 18

Gama zračenje — — — — — — — — — — — — — — 19

I.1.4. *NEUTRONSKO ZRAČENJE* — — — — — — — — — — — 20

I.2. RADIOAKTIVNI RASPAD — — — — — — — — — — — — 21

I.2.1. *KARAKTER RADIOAKTIVNOG RASPADA* — — — — — — — — 21

I.2.2. *NIZOVI RADIOAKTIVNOG RASPADA* — — — — — — — — — 24

I.2.3. *DRUGI IZVORI ZRAČENJA* — — — — — — — — — — — 26

I.2.3.1. Drugi radionuklidi u prirodi — — — — — — — — — — 26

I.2.3.2. Kosmičko zračenje — — — — — — — — — — — — 27

I.2.3.3. Značajniji manufakturni izvori jonizujućeg zračenja — — — — — — 27

I.2.4. *RADIOAKTIVNA RAVNOTEŽA* — — — — — — — — — — 29

I.2.4.1. Odnosi predaka i potomaka — — — — — — — — — — 29

I.2.4.2. Značaj radioaktivne ravnoteže u istraživanju urana — — — — — — 30

I.3. MERNE JEDINICE — — — — — — — — — — — — — 32

I.3.1. *AKTIVNOST IZVORA ZRAČENJA* — — — — — — — — — — 32

I.3.2. *DOZE JONIZUJUĆEG ZRAČENJA* — — — — — — — — — — 33

I.3.2.1. Ekspoziciona doza zračenja — — — — — — — — — — 33

I.3.2.2. Apsorbovana i ekvivalentna doza zračenja — — — — — — — — 33

I.3.2.3. Specifična aktivnost i maseni koeficijent slabljenja — — — — — — 34

LITERATURA — — — — — — — — — — — — — — — — 35

GLAVA II. **METALOGENIJA I PRIVREDNI ZNAČAJ URANA I TORIJUMA** — — — 37

II.1. GEOHEMIJA URANA I TORIJUMA — — — — — — — — — — — 37

II.1.1. *GEOHEMIJA URANA* — — — — — — — — — — — — — 37

II.1.1.1. Uran magmatskog porekla — — — — — — — — — — — 37

Str.

II.1.1.2. Uran hidrotermalnog postanka — — — — — — — — — — 37
II.1.1.3. Uran u egzogenom ciklusu — — — — — — — — — — 38
II.1.1.4. Sadržaji urana u stenama i pripovršinskim vodama — — — — — — 39
II.1.1.5. Geohemija radijuma i radona — — — — — — — — — — 41
II.1.1.6. Geohemijski ciklus urana u zemljinoj kori — — — — — — — — 41
II.1.2. *GEOHEMIJA TORIJUMA* — — — — — — — — — — 41
II.2. MINERALOGIJA URANA I TORIJUMA — — — — — — — — 42
II.2.1. *MINERALI URANA* — — — — — — — — — — — — 42
II.2.2. *MINERALI TORIJUMA* — — — — — — — — — — — — 44
II.3. MINERALNA LEŽIŠTA URANA I TORIJUMA — — — — — — — — 45
II.3.1. *SEVERNA AMERIKA* — — — — — — — — — — — — 46
II.3.2. *LATINSKA AMERIKA* — — — — — — — — — — — — 48
II.3.3. *AFRIKA* — — — — — — — — — — — — — — 49
II.3.4. *AZIJA* — — — — — — — — — — — — — — 49
II.3.5. *AUSTRALIJA* — — — — — — — — — — — — — — 50
II.3.6. *EVROPA* — — — — — — — — — — — — — — 51
II.3.6.1. Jugoslavija — — — — — — — — — — — — — — 52
II.3.7. *RUDNA LEŽIŠTA TORIJUMA* — — — — — — — — — — 52
II.3.8. *REZERVE I PROIZVODNJA URANA U SVETU* — — — — — — — 52
II.3.9. *TRŽIŠTE I CENE URANA* — — — — — — — — — — 55
II.4. EKSPLOATACIJA I IZDVAJANJE URANA — — — — — — — — 56
II.4.1. *LUŽENJE USITNJENE RUDE* — — — — — — — — — — 57
II.4.2. *LUŽENJE NA GOMILI I NA MESTU* — — — — — — — — — 58
LITERATURA — — — — — — — — — — — — — — 60

GLAVA III. **METODE ISTRAŽIVANJA URANA** — — — — — — — — — 63
III.1. KRATAK ISTORIJAT ISTRAŽIVANJA NUKLEARNIH SIROVINA — — — — 63
III.2. RADIOMETRIJSKE METODE — — — — — — — — — — — 65
III.2.1. *GAMA RADIOMETRIJSKE METODE* — — — — — — — — — 66
III.2.1.1. Detektori gama zračenja — — — — — — — — — — — 66
Gasni ili jonizacioni brojači — — — — — — — — — — — 67
Scintilacioni brojači — — — — — — — — — — — — 68
III.2.1.2. Gama spektrometrija — — — — — — — — — — — 70
Terenska merenja — — — — — — — — — — — — 72
Radiometrijske analize — — — — — — — — — — — — 72
III.2.1.3. Terenske metode istraživanja — — — — — — — — — — 75
Distribucija gama radioaktivnih emitera — — — — — — — — 76
Uticaj reljefa na nazemna merenja — — — — — — — — — 78
Regionalna gama radiometrijska prospekcija — — — — — — — — 78
Prospekcija iz vazduha — — — — — — — — — — 79
Ocena i provera anomalija gama radioaktivnosti — — — — — 81
Regionalna pešačka i auto gama prospekcija — — — — — — 86
Primeri provera i otkrića nekih ležišta i pojava urana — — — 87
Poludetaljna i detaljna gama radiometrijska prospekcija — — — — 93
Poludetaljna prospekcija — — — — — — — — — — 93
Detaljna gama radiometrija — — — — — — — — — — 96
Gama sondiranje — — — — — — — — — — — — 99
III.2.1.4. Gama radioaktivni karotaž bušotina — — — — — — — — — 99
III.2.2. *ALFA RADIOMETRIJSKE METODE* — — — — — — — — — — 103

Str.

III.2.2.1. Detekcija alfa zračenja — — — — — — — — — — — — 104
III.2.2.2. Pogodnosti i nedostaci primenjenih metoda — — — — — — — 105
III.3. MINERALOŠKE I HEMIJSKE METODE — — — — — — — — — 109
III.3.1. *MINERALOŠKE METODE* — — — — — — — — — — — — 109
III.3.2. *HEMIJSKE METODE* — — — — — — — — — — — — 111
III.3.3. *DRUGE METODE ODREĐIVANJA SADRŽAJA URANA* — — — — — 112
III.4. GEOHEMIJSKA PROSPEKCIJA URANA — — — — — — — — — 113
III.4.1. *HIDROGEOHEMIJSKA PROSPEKCIJA URANA* — — — — — — — 114
III.4.2. *MEHANIČKI OREOLI RASEJAVANJA URANA* — — — — — — — 116
III.5. OSTALE METODE ISTRAŽIVANJA URANA — — — — — — — — 116
III.5.1. *HELIJUMOVA METODA* — — — — — — — — — — — 117
III.5.2. *DALJINSKA DETEKCIJA* — — — — — — — — — — — 117
III.5.3. *DRUGE GEOFIZIČKE METODE* — — — — — — — — — — 118
III.5.4. *OSTALE NEIMENOVANE ILI NEDOVOLJNO RAZVIJENE METODE* — — — 118
III.6. *GAMA RADIOMETRIJA U SLUŽBI DRUGIH GEOLOŠKIH CILJEVA* — — — 119
LITERATURA — — — — — — — — — — — — — — — 120

GLAVA IV. **PRIMENA NUKLIDA I JONIZUJUĆIH ZRAČENJA U GEOLOGIJI** — — 123
IV.1. NUKLIDI IZ PRIRODE I PROIZVODNJE U GEOLOGIJI I DRUGIM DOMENIMA 123
IV.1.1. *NUKLIDI U GEOLOGIJI* — — — — — — — — — — — — 124
IV.1.1.1. Izdvajanje nuklida — — — — — — — — — — — — 125
IV.1.1.2. Masena analiza nuklida — — — — — — — — — — — — 126
IV.1.1.3. Način prikazivanja analitičkih podataka — — — — — — — — 126
IV.1.1.4. Pregled izotopskih odnosa i sadržaja po elementima — — — — — 127
IV.1.1.5. Izotopska geohronologija — — — — — — — — — — — 132
Metoda uran-torijum-olovo — — — — — — — — — — — 133
Kalijum-argonova metoda — — — — — — — — — — — 134
Rubidijum-stroncijumova metoda — — — — — — — — — — 137
Ostale metode — — — — — — — — — — — — — 138
IV.1.1.6. Radioaktivnost i toplota zemlje — — — — — — — — — — 139
IV.1.2. Proizvodnja i primena radionuklida — — — — — — — — — — 140
IV.2. KRATAK PREGLED TEHNIKE NUKLEARNIH ENERGETSKIH REAKTORA — — 142
IV.3. ZAŠTITA OD JONIZUJUĆEG ZRAČENJA — — — — — — — — — 146
IV.4. FENOMEN OKLO — — — — — — — — — — — — — — 151
IV.4.1. *GEOLOŠKA GRAĐA PODRUČJA I URANOVO ORUDNJENJE* — — — — 152
IV.4.2. *MINERALOŠKI I HEMIJSKI KARAKTER RUDE URANA* — — — — — 152
IV.4.3. *GEOHEMIJSKE KARAKTERISTIKE* — — — — — — — — — 153
IV.4.4. *FIZIČKI ASPEKTI PRIRODNOG REAKTORA* — — — — — — — — 155
IV.5. TABELARNI PREGLED STABILNIH I RADIOAKTIVNIH IZOTOPA — — — — 157
LITERATURA — — — — — — — — — — — — — — — 168

DODATAK — **UREĐAJI ZA MERENJE RADIOAKTIVNOSTI I UPUTSTVA ZA RAD** — 171
1. NEKI TIPOVI GM BROJAČA — — — — — — — — — — — — 171
2. NEKI TIPOVI SCINTILACIONIH DETEKTORA GAMA ZRAČENJA — — — — 172
3. UREĐAJI I NAČIN MERENJA RADONA — — — — — — — — — 179
3.1. Merenje radona u uzorku vazduha — — — — — — — — 179
3.2. Merenje radona i radijuma u vodi — — — — — — — — 183
3.3. Merenje radona na mestu — — — — — — — — — 186
LITERATURA — — — — — — — — — — — — — — — 188

Antonije Antonović
Radioaktivnost u prirodi —
značaj za istraživanja u geologiji

Posebna izdanja Geoinstituta, knjiga 12

Izdavač: GEOINSTITUT
RO za geološka, geofizička i rudarska istraživanja
nuklearnih i drugih mineralnih sirovina,
istražno bušenje, inženjersku i hidrogeologiju
Beograd, Rovinjska 12

Tehnički urednik: Gradimir Milikić
Štampa: Srboštampa, Beograd, Dobračina 6—8
Tiraž: 500 primeraka
Format B-5 (176×250 mm)
Štampano: februara 1990. godine