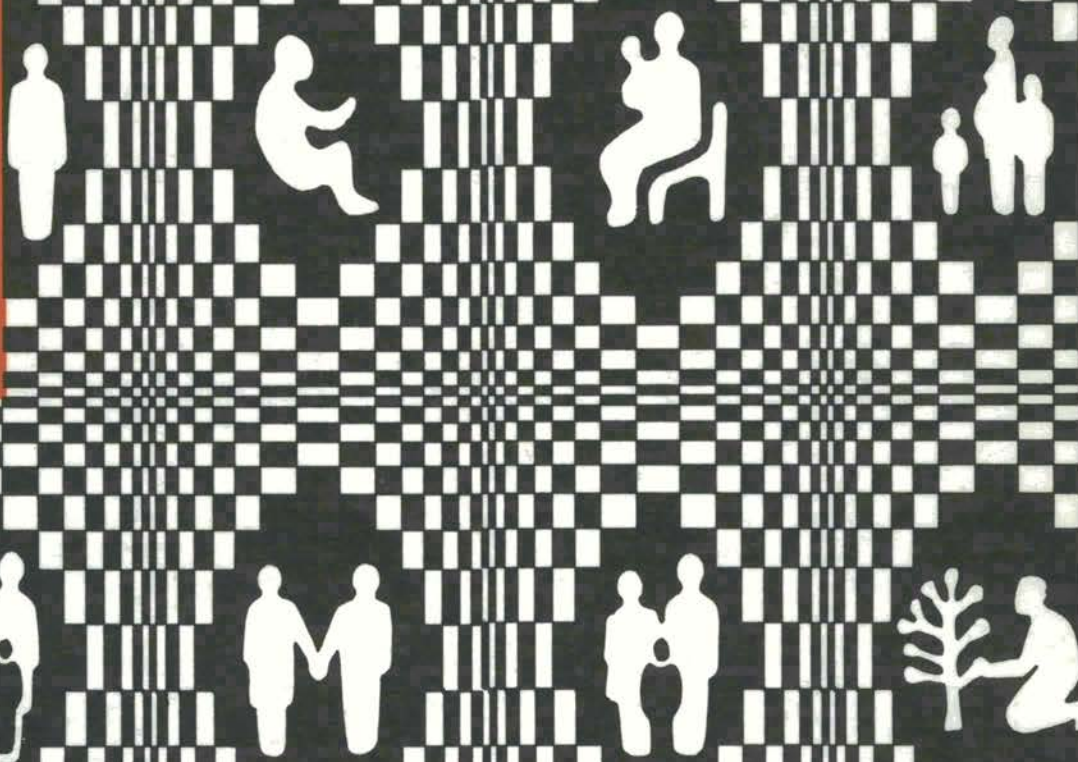




RADIJACIJA

Doze, posledice, rizici



NOLIT

*Ova knjižica je pretežno zasnovana na nalazima
Naučnog komiteta Ujedinjenih nacija za efekte atomske
radijacije (UNSCEAR), organa Generalne skupštine
Ujedinjenih nacija. Ova publikacija ne mora u svemu da
odražava gledišta Komiteta, niti Programa Ujedinjenih
nacija za prirodnu sredinu, niti urednika publikacije.*

RADIJACIJA

Doze, posledice, rizici

NOLIT • BEOGRAD

BIBLIOTEKA SVE O SVEMU

UREDNICI

DUŠAN PAJIN
VLADIMIR POLAK
SIMON SIMONVIĆ
MIRJANA STEFANOVIĆ

Pol
Pol
Nud/12r
1st ed.

Prevela Ema Časar

Dodatak: POGLED NA RADIJACIJU POSLE
ČERNOBILA

Napisao dr Vladimir Ajdačić

Naslov originala

RADIATION — Doses, Effects, Risks
United Nations Environment Programme
Copyright UNEP 1985
Program Ujedinjenih nacija za prirodnu sredinu
P.O.B. 30552, Najrobi, Kenija

Dizajn i likovni prilozi: Diagram Visual
Information Limited, London

Sadržaj

	Predgovor	4
1	Uvod	5
2	Radijacija i život	6
3	Prirodni izvori	12
4	Veštački izvori	26
5	Uticaj radijacije na čoveka	48
6	Prihvatljivost rizika	60

Predgovor

Ranih pedesetih godina u svim zemljama vladala je velika zabrinutost zbog posledica jonizujuće radijacije. Nisu samo užasi bombardovanja Hirošime i Nagasakija bili još sveži u sećanju svih ljudi. Isprobavanjem novog nuklearnog oružja u atmosferi, tri zemlje su počele da šire radioaktivne materije širom sveta. Posledice takvih radioaktivnih padavina bile su dobrim delom nepoznate, što je rađalo spekulacije o zdravstvenim posledicama tako rasprostranjene izloženosti stanovništva zračenju.

Reagujući na ovu zabrinutost, Generalna skupština Ujedinjenih nacija je formirala, kao jedan od svojih organa, Naučni komitet za efekte atomskih zračenja. Odluka o osnivanju ovog komiteta bila je formulisana na način koji pokazuje smelost i onim što je rečeno i onim što u tom tekstu nije rečeno. Ne organizavajući zadatak Komiteta na proučavanju radioaktivnih padavina, tj. na pitanje koje je tada svakome bilo na umu, zahtevano je od Komiteta da revidira nivoe, posledice i rizike od svih izvora zračenja, kako prirodnih, tako i veštačkih, uključujući i radioaktivne padavine. Njime se ne zahteva od Komiteta da predloži određena rešenja niti da preporuči kakvu bi akciju trebalo preduzeti – već samo da proceni aktuelnu situaciju, neometan odgovornostima koje su povezane sa donošenjem odluka.

Posle trideset godina, tokom kojih je objavljeno osam obimnih izveštaja, Komitet još uvek predstavlja jedan od malobrojnih primera koji pokazuju kako jedno telo izgrađeno na zdravim osnovama može neprekidno odlično da obavlja svoj posao, koji je od velike vrednosti, kako za naučnu zajednicu, koja stalno ukazuje na te izveštaje kao na autentični i najautoritativniji izvor podataka o zračenju i njegovoj proceni, tako i za političku zajednicu, koja je u tim izveštajima našla solidnu činjeničnu osnovu, na kojoj su zasnovani takvi instrumenti kao što je Ugovor o delimičnoj zabrani nuklearnih eksplozija.

Knjižica koju imam zadovoljstvo da predstavim objavljuje se na 30. godišnjicu Komiteta i ima za cilj da nalaze UNSCEAR-a učini dostupnim široj čitalačkoj publici od one

koja je dosad imala pristupa tim podacima. U jednoj oblasti koja je toliko složena i sporna kao što je zračenje, neizbežno je i korišćenje tehničkog žargona. Zahvalan sam uredniku i nizu naučnika koji su mu pomagali, što su tehnički rečnik održali na nivou dostupnom čitaocu sa opštim obrazovanjem. Naravno, to možda nije laka lektira, ali za napor koji čitalac mora da uloži da bi savladao sve ono što taj tekst čini komplikovanim, on će biti nagrađen time što će mu ova knjižica omogućiti da shvati i da sa razumevanjem učestvuje u jednoj od velikih polemika našeg vremena.



Mostafa Kamal Tolba,
izvršni direktor
Programa Ujedinjenih nacija za prirodnu sredinu

Najrobi, decembra 1985.

Uvod

Malo je naučnih postignuća uzdiglo toliko mnogo javnih neslaganja kao što su to učinci radijacije.* Teško da prođe ijedana nedelja a da u razvijenijim zemljama ne dođe do izražavanja narodnog nezadovoljstva, a zemlje u razvoju koje unapređuju i svoje nuklearne programe uskoro mogu imati sasvim slična iskustva. Nema nikakvih znakova da će neslaganja oko radijacije prestati u bliskoj budućnosti.

Na nesreću, obezbeđivanje nepristrasnih činjeničnih obaveštenja za javnost, često je u pozadini mišljenja koja propagiraju potrebnost nuklearne energije. Prečesto se antinuklearni aktivisti oslanjaju na emocije: prečesto se zastupnici nuklearne energije oslanjaju na slepa umirivanja javnosti.

Naučni komitet Ujedinjenih nacija za praćenje efekata atomskih radijacija (UNSCEAR) skuplja potrebne podatke o izvorima i učincima radijacije i sređuje ih. On razmatra širok opseg prirodnih i veštačkih izvora radijacije i njegovi rezultati mogu da iznenade čak i one koji redovno prate javne rasprave o radijaciji.

Radijacija ubija. Ona prouzrokuje velika oštećenja pri visokim dozama. Manje doze mogu da prouzrokuju rak ili genetske defekte koje mogu da steknu deca, unuci ili čak dalji potomci ozračenih.

Ali najvažniji izvori radijacije ne privlače najveću pažnju javnog mnjenja. Prirodni izvori su ujedno i najvažniji izvori radijacije.

Nuklearna energetika doprinosi samo mali deo radijaciji koja biva emitovana usled ljudskih aktivnosti, neke daleko manje osporavane aktivnosti, kao što je korišćenje rendgenskih zraka u medicini, daju mnogo veće doze. I druge svakodnevne aktivnosti, kao što je sagorevanje uglja, letovi avionom i – naročito – život u kućama sa dobrom izolacijom može bitno da doprinese izloženosti prirodnoj radijaciji. Najveći uzroci za zabrinutost i najveće mogućnosti za smanjivanje izloženosti ljudi radijaciji nalaze se

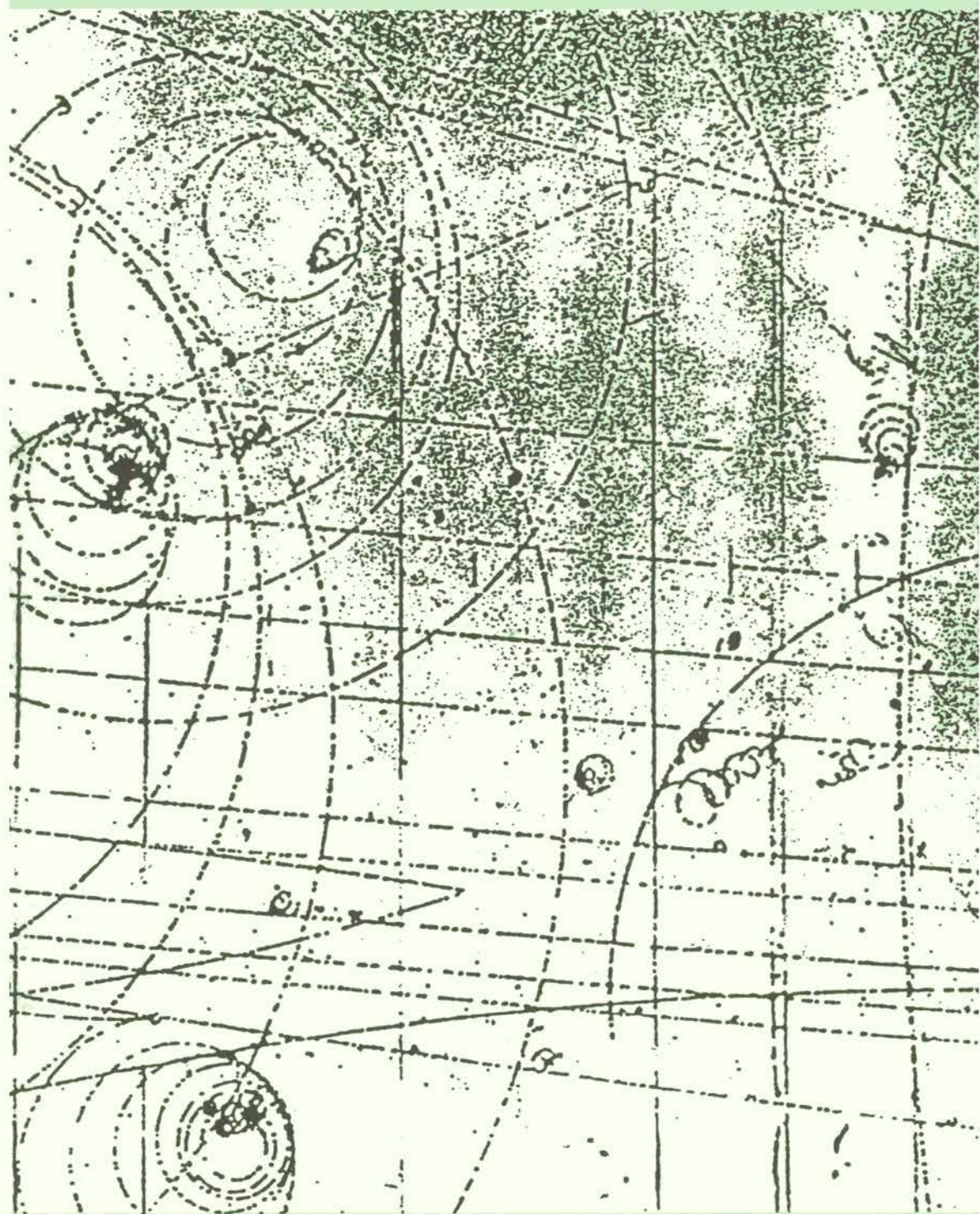
upravo u nekim od ovih nekontroverznih aktivnosti, koje se gotovo uopšte ne pominju u diskusijama.

Sastavljači ove knjižice ne pretenduju da imaju odgovore na sva pitanja. Naše znanje je još neadekvatno, mada se više zna o izvorima, efektima i rizicima radijacije nego o efektima i rizicima gotovo bilo kog drugog toksičnog agensa. Ali, sastavljači ove knjižice su ipak pokušali da saberu sve informacije koje su zasnovane na čvrstim osnovama, kako bi usmerili debatu na teren čvrstih činjenica.

UNSCEAR je organ koji je Generalna skupština Ujedinjenih nacija osnovala 1955. godine, sa zadatkom da procenjuje doze, efekte i rizike od radijacije u globalnim razmerama. Komitet okuplja vodeće naučnike iz 20 zemalja i predstavlja jedno od najautoritativnijih tela ove vrste u svetu. UNSCEAR ne postavlja niti čak preporučuje standarde bezbednosti; on samo pruža informacije o radijaciji, koje omogućavaju takvim telima kao što su Međunarodna komisija za radiološku zaštitu i nacionalne vlasti da to čine. Svakih nekoliko godina UNSCEAR priprema sveobuhvatne izveštaje u kojima se procenjuju, prilično detaljno, doze, efekti i rizici od svih izvora radijacije kojima je čovek izložen. Ova knjižica predstavlja pokušaj da se sumiraju najaktuelniji nalazi sadržani u ovim izveštajima i tako stave na raspolaganje javnosti. Takav sumaran pregled ne predstavlja zamenu za same izveštaje.

Četiri poglavlja koja slede zasnovana su na najnovijim izveštajima koje je UNSCEAR podneo Generalnoj skupštini Ujedinjenih nacija, s tim što njihov tekst nije podnet Komitetu na uvid i odobrenje. Poslednje poglavlje je pokušaj razmatranja nekih opštih pitanja u vezi sa prihvatljivošću rizika od radijacije, pitanja koja nisu sastavni deo dokumenata Komiteta, niti su ikad bila obuhvaćena njegovim izveštajima.

* U ovoj knjizi pod radijacijom se podrazumeva samo jonizujuće zračenje koje je opasno po živi svet (prim. recenzenta).



Radijacija i život



Radioaktivnost nije ništa novo – izuzev što su ljudi naučili da je koriste za nove namene. I radioaktivnost i radijacija postojale su na Zemlji još davno pre nego što se na njoj pojavio život. One su bile prisutne u kosmosu još pre nego što je nastala sama Zemlja.

Radijacije je bilo u „velikom prasku“, iz koga se, kao što nam je poznato, pre oko 20 milijardi godina, rodila vasiona. Od tog vremena, radijacija je prožela kosmos. Radioaktivni materijali postali su sastavni deo Zemlje prilikom njenog formiranja. Čak i sam čovek je neznatno radioaktivan, jer svako živo tkivo sadrži u sebi tragove radioaktivnih materija. Međutim, tek pre manje od jednog veka čovečanstvo je prvi put otkrilo ovaj elementarni, univerzalni fenomen.

Godine 1896. francuski naučnik Anri Bekerel (Henri Becquerel) spremio je neke fotografske ploče u jednu fioku i pritisnuo ih komadima jednog minerala koji sadrži uranijum. Kada je razvio te ploče, utvrdio je na njima, na svoje čuđenje, dejstvo radijacije, što je doveo u vezu sa uranijumom. Uskoro posle toga je Marija Kiri (Maria Curie), mlada hemičarka poljskog porekla, nastavila ovo istraživanje i smislila reč „radioaktivnost“. Godine 1898. ona i njen muž, Pjer (Pierre), otkrili su da se uranijum, zračeći, na misteriozan način pretvara u druge elemente. Jedan od tih elemenata nazvali su polonijum, po domovini Marije Kiri, a drugi radijum, element koji „svetluca“. Radovima Bekerela i Kirijevih znatno je doprinelo jedno ranije značajno naučno otkriće: to je bilo otkriće iks-zraka (rendgenskih zraka), koje je 1895 – takođe slučajno – otkrio nemački fizičar Vilhelm Rentgen (Wilhelm Roentgen).

Uskoro potom Bekerel je iskusio najtežu posledicu radijacije, delovanje koje ona može da ima na živa tkiva. On je, naime, stavio u džep bočicu punu radijuma, i ovaj mu je ošteti kožu. Marija Kiri je umrla od maligne bolesti krvi, koja je – što se tada smatralo verovatnim, a danas već pouzdano zna – bila posledica njenog izlaganja radijaciji. Najmanje 336 osoba koje su u to vreme radile sa radijacijom umrlo je od primljenih doza.

Ali, mala grupa pretežno mladih naučnika, sjajnih umova koji se time nisu dali zastrašiti, krenula je u jedno od najzbuđljivijih istraživanja svih vremena, tragajući za najdubljim tajnama same materije. Njihov rad će kasnije, 1945. godine, dovesti do eksplozije atomskih bombi krajem drugog svetskog rata, sa katastrofalnim posledicama po ljudske živote. Ali, taj je rad takođe doveo 1956. godine do prve u svetu nuklearne elektrane veće snage,

Kolder Hol (Calder Hall) u Velikoj Britaniji. U međuvremenu, počev od prvih Rentgenovih otkrića, stalno se širi korišćenje radijacije u medicini.

U fokusu istraživanja naučnika nalazio se atom, tačnije njegova struktura. Mi danas znamo da se atomi ponašaju kao minijturni sunčevi sistemi; majušna jezgra su okružena „planetama“ – elektronima, koji oko njih kruže. Jezgro nije veće od stohiljaditog dela atoma, ali je tako velike gustine, da sačinjava gotovo čitavu masu atoma. Ono se obično sastoji od grozda čestica, koje su čvrsto „prionule“ jedna za drugu (vidi dijagram 2.1).

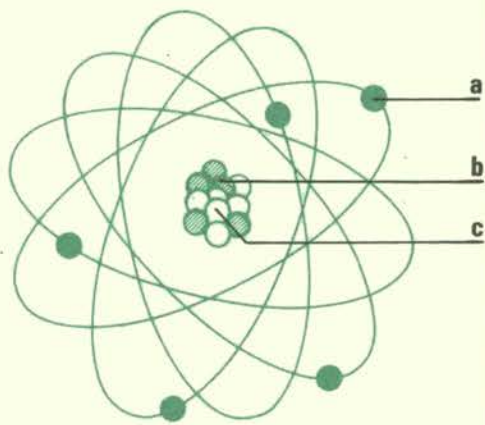
Neke od ovih čestica imaju pozitivni električni naboj i nazivaju se protonima. Od broja protona zavisi kojem elementu neki atom pripada; atom vodonika ima jedan jedini proton, atom kiseonika ima ih osam, atom uranijuma 92. Svaki atom ima isti broj protona i elektrona koji kruže oko jezgra; elektroni su negativno naelektrisani, pa su stoga oni i pozitivno naelektrisani protoni u ravnoteži. Zbog toga sam atom nije ni pozitivno ni negativno naelektrisan, već neutralan.

Ostale čestice u „nuklearnom grozdu“ nazivaju se neutronima, zbog toga što nisu naelektrisani. Atomi istog elementa uvek imaju u svojim jezgrima isti broj protona, ali mogu da imaju različite brojeve neutrona. Oni koji imaju različite brojeve neutrona, ali isti broj protona, pripadaju različitim oblicima istog elementa i nazivaju se njegovim izotopima. Njih obeležavamo sabiranjem ukupnog broja čestica u njihovim jezgrima. Tako, uranijum-238 ima 92 protona i 146 neutrona; uranijum-235 ima takođe 92 protona ali 143 neutrona. Tako označeni atomi nazivaju se nuklidima.

Neki nuklidi su stabilni i njihov život protiče bez ikakvih događaja i promena. Ali, ovi čine manjinu. Većina nuklida je nestabilna, i oni svoju nestabilnost izražavaju na taj način što neumorno teže da postanu nešto drugo. Da uzmemo samo jedan primer: čestice u jezgru atoma uranijuma-238 jedva da su sposobne da se drže u vidu grozda. Jednom će, međutim, „grumen“ od dva protona i dva neutrona uspeti da se odvoji. I tada se uranijum-238 pretvara u torijum-234 (sa 90 protona i 144 neutrona). Ali, torijum-234 je i sam nestabilan; i on teži da postane nešto drugo. On se preobražava kroz jedan drukčiji proces; jedan od njegovih neutrona pretvara se u proton i postaje protaktinijum-234 sa 91 protonom i 143 neutrona. Kada proton doživi metamorfozu, jedan od elektrona koji kruže gubi svog partnera i odvađa se. Protaktinijum je krajnje nestabilan;

2.1 ATOM

a elektron
b proton
c neutron

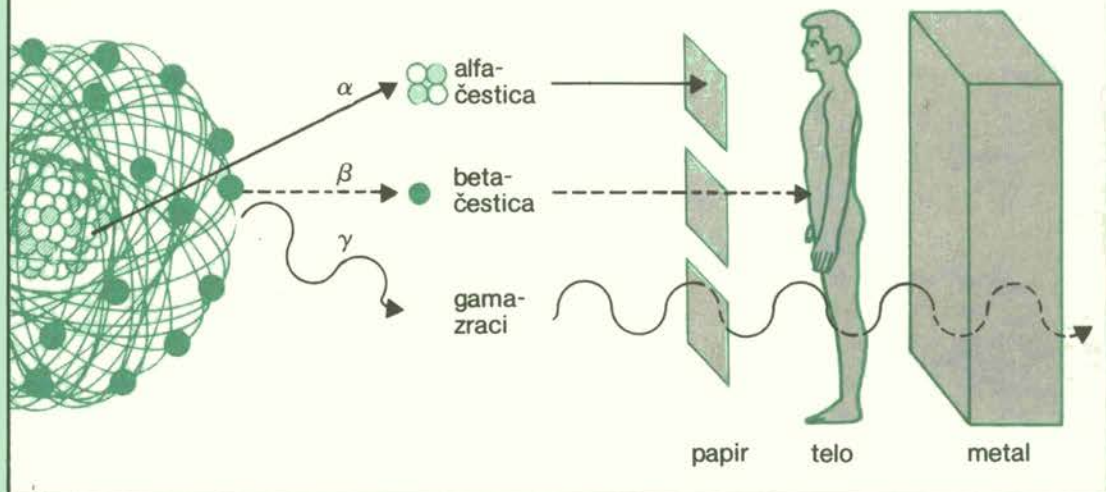


on, „ne gubeći vreme“, i sam menja oblik, i tako, uzastopno, atom nastavlja da se preobražava i da odbacuje čestice, sve dok konačno ne završi kao stabilno olovo (dijagram 2.3). Naravno, postoje mnoge takve sekvence preobražaja ili „raspadanja“, kako se taj proces naziva, sa velikom raznovrsnošću obrazaca i kombinacija.

Prilikom svake promene, oslobađa se energija i manifestuje kao radijacija. Uproščeno rečeno, ispuštanje grumena od dva protona i dva neutrona, recimo iz uranijuma-238, jeste alfa-zračenje; emisija elektrona, recimo torijuma-234, jeste beta-zračenje. Često nestabilni nuklid biva toliko pobuđen, da emisija čestica nije dovoljna da bi se umirio; tada on izbacuje snažan mlaz „čiste energije“, nazvane gama-zračenjem. Kao i rendgenski zruci (kojima je po mnogo čemu slično), gama-zračenje ne predstavlja emitovanje čestica.

Čitav ovaj proces transformacije naziva se

2.2 RADIJACIJA



Tri tipa radijacije i njihova prodorna moć

„radioaktivnošću“, a nestabilni nuklidi – radionuklidima. Ali, dok su svi radionuklidi nestabilni, neki su nestabilniji od drugih. Protaktinijum-234 se, na primer, veoma „žurno“ preobražava, dok je kod uranijuma-238 ovaj proces veoma spor. Polovina količine protaktinijuma-234 doživljava metamorfozu za nešto više od jednog minuta, dok je polovini količine ili mase uranijuma-238 potrebno četiri i po milijarde godina da bi se pretvorio u torijum-234. Period koji je potreban da se polovina bilo koje količine nekog elementa raspadne, naziva se vremenom poluraspada. Ovaj se proces nastavlja bez zastoja. Po završetku jednog vremena poluraspada, 50 do 100 atoma ostaje neizmenjeno; tokom sledećeg vremena poluraspada raspašće se 25 od preostalih 50, i tako dalje eksponencijalno. Broj preobražaja koji se događaju svake sekunde u jednoj količini radioaktivnog materijala naziva se njegovom aktivnošću. Aktivnost se meri

jedinicama koje se nazivaju bekerelima, po imenu čoveka koji je otkrio fenomen radioaktivnosti; jedan bekerel jednak je jednom preobražaju u jednoj sekundi.

Različiti oblici radijacije razlikuju se po energiji i prodornoj moći, pa stoga imaju i različito delovanje na živa bića (dijagram 2.2). Alfa-radijacija, koja se sastoji od „grumena“ neutrona i protona, može da bude zaustavljena listom papira, i ona jedva da prodire kroz spoljne slojeve epitela na koži. Ova radijacija stoga i nije opasna, ukoliko supstance koje je emituju ne prodru u telo kroz neku otvorenu ranu, ili ako ih ne pojedemo ili udahnemo – u tom slučaju ono nanosi velika oštećenja. Beta-radijacija je prodornija. Ona prolazi kroz jedan do dva centimetra živog tkiva. Gama-radijacija, koja se prostire brzinom svetlosti, krajnje je prodorna i prolazi kroz sva tela, izuzev kroz debele ploče od olova ili betona.

2.3 RADIOAKTIVNO RASPADANJE

tip radi- jacije	nuklid	vreme poluraspada
α	uranijum-238	4,47 milijardi godina
β	torijum-234	24,1 dan
β	protaktinijum-234	1,17 minuta
α	uranijum-234	245000 godina
α	torijum-230	8000 godina
α	radijum-226	1600 godina
α	radion-222	3,823 dana
α	polonijum-218	3,05 minuta
β	olovo-214	26,8 minuta
β	bizmut-214	19,7 minuta
α	polonijum-214	0,000164 sekunde
β	olovo-210	22,3 godine
β	bizmut-210	5,01 dana
α	polonijum-210	138,4 dana
	olovo-206	stabilno

Raspadanje uranijuma-238

Energija radijacije je ta koja izaziva oštećenja, a količina energije deponovane u živom tkivu naziva se dozom. To je termin koji unekoliko može da stvori zabunu, jer je prvobitno upotrebljen da podseti ljude na doze lekova koje se uzimaju. Doza može da potiče od bilo kojeg radionuklida ili više radionuklida, bez obzira da li oni ostaju izvan tela ili ga ozračuju iznutra, pošto su udahnuti sa vazduhom ili progutani sa hranom ili vodom. Doze se različito izražavaju, zavisno od toga koliko je ozračeno neko telo i koji su njegovi delovi ozračeni, da li je jedan čovek ili su mnogi ljudi izloženi radijaciji i koliki je period izloženosti.

Količina energije zračenja koja se apsorbuje po gramu tkiva naziva se apsorbovanom dozom (dijagram 2.4), a meri se jedinicom koja se zove grej (Gy). Ali, time nije sve rečeno, zbog toga što određena doza alfa-zračenja nanosi mnogo više oštećenja nego ista doza beta ili gama-zračenja. Stoga je potrebno da se odredi moć neke doze da izazove oštećenja. Tako npr. alfa-zračenje ima dvadeset puta veću ovu moć nego beta i gama-zračenje. Doza uvećana odgovarajućim težinskim faktorima poznata je pod nazivom ekvivalentna doza, a meri se jedinicom koja se zove sivert (Sv) (dijagram 2.5).

Potrebno je ovde ukazati na još jednu okolnost. Neki delovi tela su osetljiviji od drugih; određena ekvivalentna doza će sa većom verovatnoćom izazvati smrtonosni rak u plućima nego u štitnoj žlezdi, na primer, a reproduktivni organi su naročito ugroženi zbog opasnosti od genetskog oštećenja. Različiti delovi tela su zato rangirani po osetljivosti (dijagram 2.6). Kada se uzme u obzir i ovo rangiranje, ekvivalentna doza postaje efektivna ekvivalentna doza koja se takođe izražava u sivertima.

Ovim nazivima označene su samo individualne doze. Saberemo li sve individualne efektivne ekvivalentne doze koje je primila grupa ljudi, dobija se „kolektivna efektivna ekvivalentna doza“ i izražava u čovek-sivertima (čovek Sv). Ali, ovde moramo da uvedemo još jednu definiciju jer se mnogi radionuklidi tako sporo raspadaju, da će biti radioaktivni i u dalekoj budućnosti. To je kolektivna efektivna ekvivalentna doza koju će tokom vremena primiti generacije ljudi, a koja se zove „angažovana kolektivna efektivna ekvivalentna doza“.

Ova hijerarhija pojmova može izgledati složenom, ali njom se ti pojmovi povezuju u koherentnu strukturu; time se takođe omogućava da se doze definišu na način koji je dosledan, što omogućuje upoređivanja. Da bismo stvari izneli na što jednostavniji način,

2.4 DOZE

α β γ



Apsorbovana doza: energija uneta radijacijom po gramu tkiva

Ekvivalentna doza: apsorbovana doza merena po moći različitih zračenja da izazovu oštećenja



Efektivna ekvivalentna doza: ekvivalentna doza merena osetljivošću različitih tkiva na oštećenja



Kolektivna efektivna ekvivalentna doza: efektivna ekvivalentna doza za grupu ljudi za određeni izvor zračenja



Angažovana kolektivna efektivna ekvivalentna doza: kolektivna efektivna ekvivalentna doza koju će tokom vremena primiti generacije ljudi

izbegavaćemo u narednim poglavljima ove termine gde god je to moguće. Ali, često za njih nema alternative, ako želimo da obezbedimo tačnost i izbegnemo svaku dvosmislenost.

Faktori rizika, prema preporuci Međunarodne komisije za radiološku zaštitu za izračunavanje efektivne ekvivalentne doze

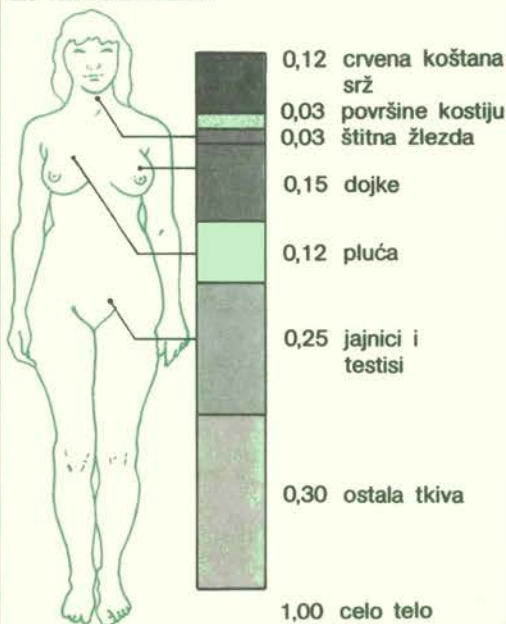
2.5 JEDINICE

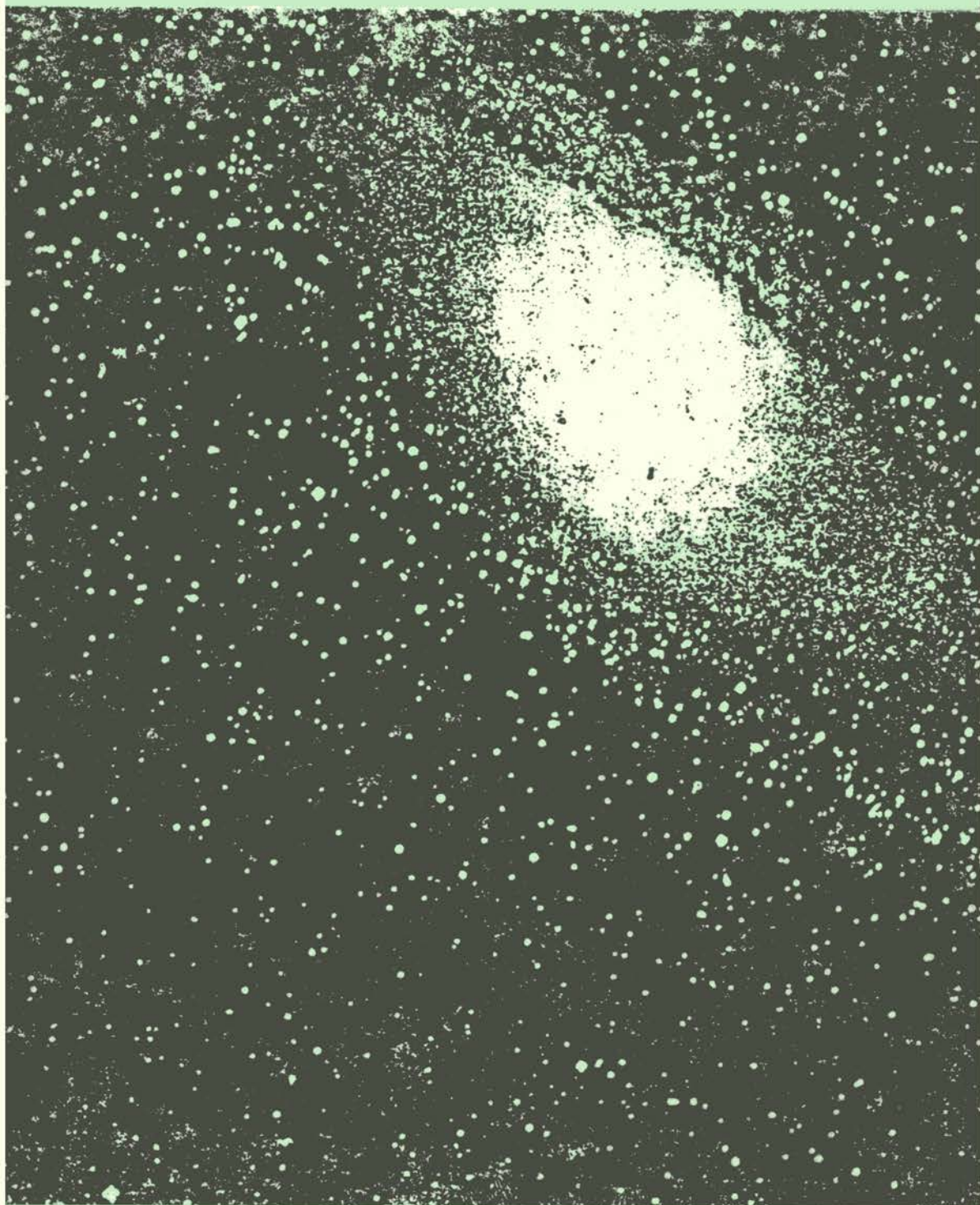
Bekerelel (Bq): posebni naziv za jedinicu aktivnosti. Jedan bekerelel odgovara jednom raspadu bilo kog radionuklida u jednoj sekundi.

Grej (Gy): posebni naziv za jedinicu apsorbovane doze. To je količina energije unete putem jonizujućeg zračenja u jedinicu mase neke materije, kao što je npr. tkivo. Jedan grej odgovara jednom džulu po kilogramu.

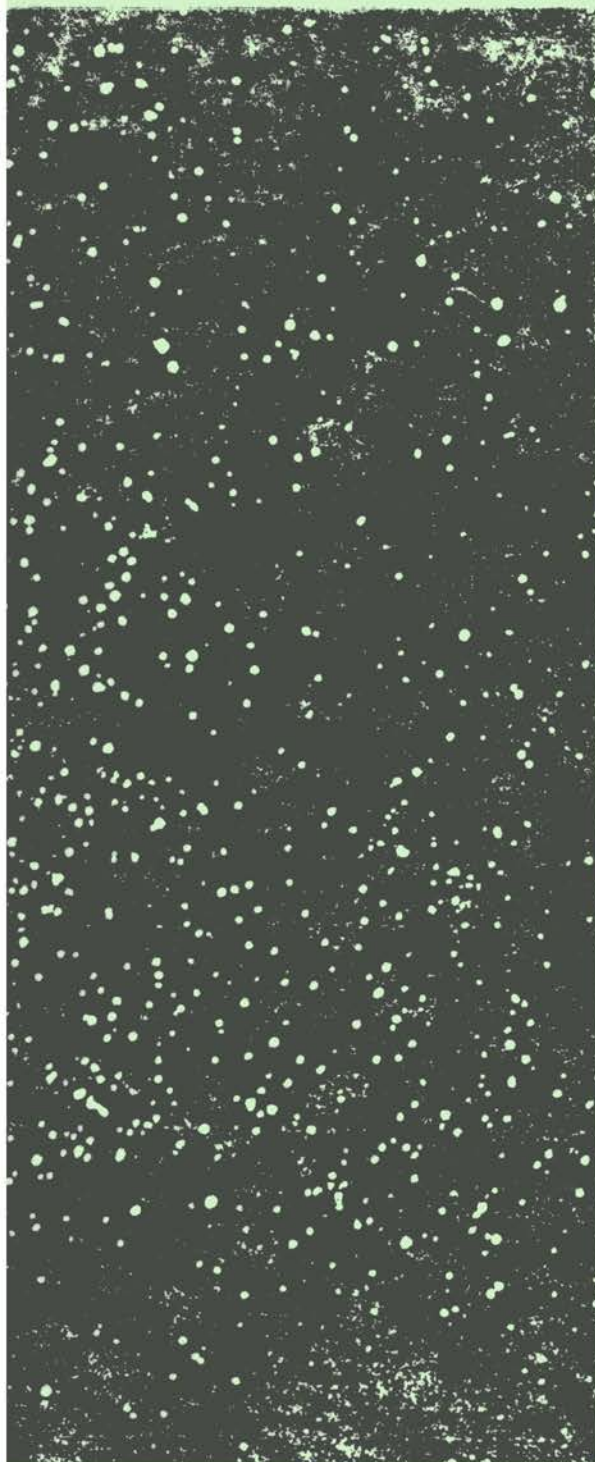
Sivert (Sv): posebni naziv za jedinicu ekvivalentne doze. To je apsorbovana doza uvećana za faktor koji odgovara moći radijacije da izazove oštećenja. Jedan sivert takođe odgovara jednom džulu po kilogramu.

2.6 FAKTORI RIZIKA





Prirodni izvori



Daleko najveći deo radijacije koju svetsko stanovništvo prima potiče od prirodnih izvora (dijagram 3.1). Izlaganje najvećem delu ove radijacije je neizbežno. Tokom čitave istorije naše planete radijacija dopire do njene površine iz kosmosa i iz radioaktivnih materijala koji se nalaze u Zemljinoj kori. Ljudi bivaju ozračeni na dva načina. Radioaktivne supstance mogu da ostanu izvan tela i da ga ozračuju spolja, „eksterno“, ili pak mogu da se udišu sa vazduhom i gutaju sa hranom i vodom i da tako ozračuju ljude iznutra, „interno“.

Ali, mada svi stanovnici Zemlje primaju prirodnu radijaciju, neki apsorbuju mnogo veće količine nego drugi. To može da zavisi od toga gde ko živi. Doze su na nekim mestima sa naročito radioaktivnim stenama ili tлом, znatno više od proseka; na drugim mestima su pak znatno niže. Kolike će doze neko primiti, može da zavisi od njegovog životnog stila. Korišćenje naročitog građevinskog materijala za kuće, kuvanje na plinu, otvoreno ognjište na kome sagoreva ugalj, izolacija kuće, pa čak i avionski letovi – sve to povećava prirodno ozračavanje.

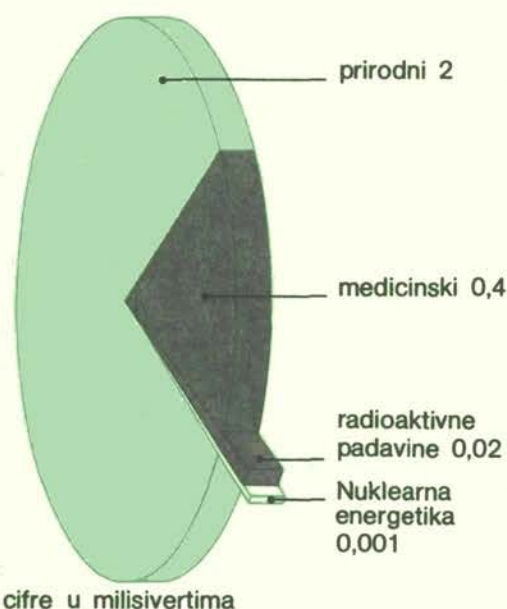
U celini uzev, zemaljski izvori su odgovorni za najveći deo čovekove izloženosti prirodnoj radijaciji. U normalnim prilikama, na njih otpada više od pet šestina godišnje efektivne ekvivalentne doze koju apsorbuju pojedinci – i to pretežno internom radijacijom. Na kosmičke zrake otpada preostali deo, pretežno eksterne radijacije (dijagram 3.2).

U ovom poglavlju razmotrićemo najpre eksternu radijaciju iz kosmičkih i zemaljskih izvora. Zatim ćemo se pozabaviti internom radijacijom, posvećujući posebnu pažnju radonu, radioaktivnom gasu koji je najveći pojedinačni izvor prosečnih doza koje potiču od prirodne radijacije. Najzad ćemo se osvrnuti i na neke aktivnosti, počev od sagorevanja uglja pa do korišćenja đubriva, pri kojima se ispuštaju radioaktivne materije iz tla i tako povećava čovekova izloženost zemaljskim izvorima.

Kosmički zraci

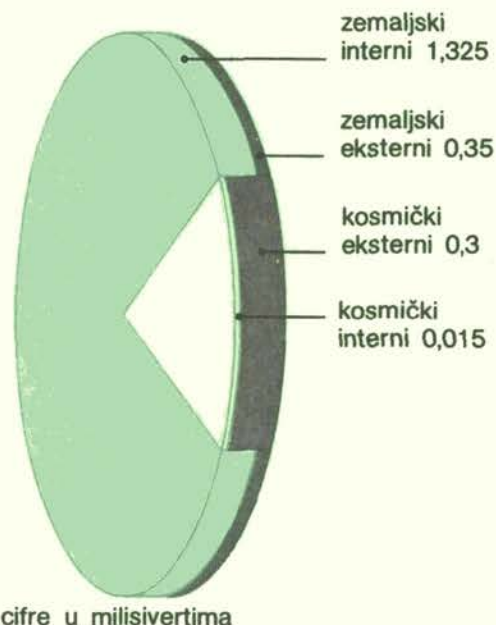
Nešto manje od polovine čovekove izloženosti spoljnoj prirodnoj radijaciji potiče od kosmičkih zraka (dijagram 3.2). Većina tih zraka dopire do nas iz dubine međuzvezdanog prostora; neke emituje Sunce prilikom svojih eksplozija. Kosmički zraci direktno ozračuju Zemlju, stupajući u interakciju s atmosferom, pri čemu se stvaraju nove vrste radijacije i razni radioaktivni materijali.

3.1 IZVORI RADIJACIJE



Prosečne godišnje efektivne ekvivalentne doze iz prirodnih i veštačkih izvora radijacije

3.2 PRIRODNI IZVORI

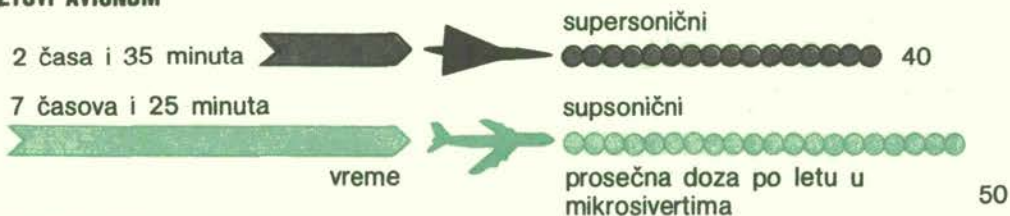


Prosečne godišnje efektivne ekvivalentne doze iz prirodnih izvora radijacije

Nijedno mesto na Zemlji ne može da izbegne ovaj univerzalni, nevidljivi pljusak. Ali, on neke delove zemaljske kugle jače pogada nego druge. Polovi primaju više radijacije nego ekvatorijalni regioni, zbog toga što magnetsko polje Zemlje

skreće naelektrisane čestice sadržane u zračenju. I, što je još značajnije, nivo radijacije se povećava sa nadmorskom visinom, pošto na velikim visinama ima manje vazduha koji deluje i kao štiti.

3.3 LETOVI AVIONOM



Izračunate doze od kosmičkih zraka, koje prima osoba koja leti preko Atlantika supersoničnim i supersoničnim

avionom (pod uslovima prosečnog zračenja Sunca).

Neko ko živi na nivou mora, prima godišnje efektivnu ekvivalentnu dozu od oko 300 mikrosiverta (milijunih delova siverta), dok onaj ko živi na visini iznad 2.000 metara prima nekoliko puta veću dozu. Leteći avionima, putnici i osoblje izloženi su i većim dozama, mada za kraće vreme. Na visinama između 4.000 metara – a to je visina najviših stalno naseljenih šerpaskih sela na obroncima Mont Everesta – i 12.000 metara – koliko iznosi najveća visina interkontinentalnih letova – izloženost kosmičkoj radijaciji povećava se za oko 25 puta. Ona se dalje povećava na visinama između 12.000 i 20.000 metara, kolika je maksimalna visina leta supersoničnih aviona (dijagram 3.4).

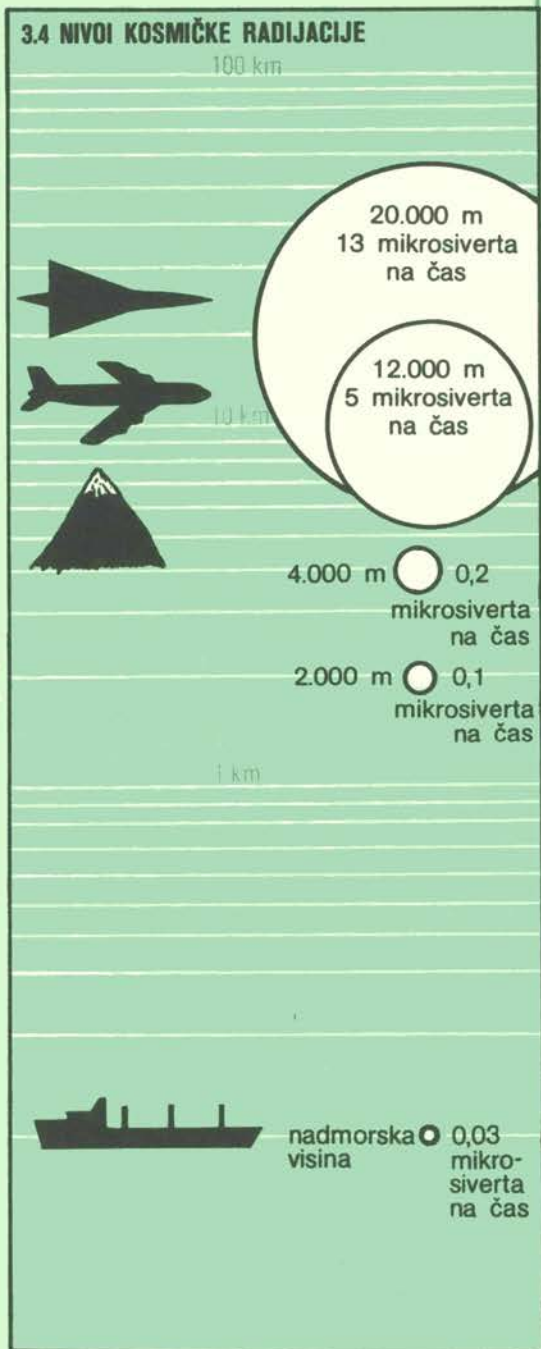
Na letu iz Njujorka u Pariz putnik je izložen radijaciji od oko 50 mikrosiverta u normalnom mlaznom avionu, a za 20 odsto manjoj u supersoničnom avionu; iako je supersonični avion izložen intenzivnijem zračenju, on mnogo brže obavlja putovanje (dijagram 3.3). Sve u svemu, let avionom ima za posledicu kolektivnu efektivnu ekvivalentnu dozu ozračivanja stanovništva sveta u iznosu od oko 2.000 čovek-siverta godišnje.

Zemaljska radijacija

Glavni radioaktivni materijal u stenama jesu kalijum-40, rubidijum-87 i dve porodice radioaktivnih elemenata koje nastaju raspadanjem uranijuma-238 i torijuma-232, dva dugovečna radionuklida koji su se zadržali na Zemlji od njenog postanka.

Naravno, nivoi zemaljske radijacije razlikuju se od mesta do mesta širom sveta, kao što se menja i koncentracija ovih materijala u Zemljinoj kori. Za većinu ljudi ove razlike nisu naročito dramatične. Ispitivanja u Francuskoj, SR Nemačkoj, Italiji, Japanu i SAD, na primer, ukazuju da oko 95 odsto ljudi živi u oblastima gde prosečna doza varira od 0,3 do 0,6 milisiverta (hiljaditih delova siverta) godišnje. Ali, neki ljudi primaju znatno veće doze; oko 3 odsto ljudi je izloženo dozi od jednog milisiverta godišnje, a polovina njih prima više od 1,4 milisiverta godišnje. Ima mesta na Zemlji gde je zračenje iz zemljišta još i mnogo veće (dijagram 3.5).

Blizu grada Pososa de Kaldas, na 200 km severno od Sao Paola, u Brazilu, nalazi se brežuljak na kome su istraživači izmerili doze radijacije do oko 800 puta veće od prosečnih – 250 milisiverta godišnje. Sva je sreća da je ovaj brežuljak nenastanjen. Ali, samo nešto manji nivoi radijacije otkriveni su i u letovalištu na



Rast ekvivalentne doze iz kosmičke radijacije uporedo sa povećanjem visine. (Na dijagramu je korišćena logaritamska skala.)

obali mora, udaljenom oko 600 km odatle, u pravcu istoka.

Guarapari je gradić sa 12.000 stanovnika, koji svakog leta posećuje oko 30.000 turista. Na pojedinim tačkama njegove plaže registrovana je radijacija od 175 milisiverta godišnje. Pokazalo se da su nivoi radijacije na ulicama tog gradića znatno niži; tu se kreću od 8 do 15 milisiverta godišnje, što je još uvek mnogo puta veća doza od normalne. Ista je situacija i u ribarskom selu Meaipe, koje se nalazi 50 km južno. I jedno i drugo naselje podignuto je na pesku koji je bogat torijumom.

Na drugoj strani sveta, na jugozapadnoj obali Indije, 70.000 ljudi živi u 55 km dugom obalskom pojasu, koji je takođe prekriven peskom bogatim torijumom. Merenja doza radijacije kod 8.513 osoba u tom kraju pokazala su da su one u proseku primile 3,8 milisiverta godišnje. Više od 500 njih primilo je više od 8,7 milisiverta godišnje. Oko 60 je apsorbovalo više od 17 milisiverta, oko 50 puta veću količinu od prosečne doze eksterne zemaljske radijacije.

Ove oblasti u Brazilu i Indiji su najbolje proučene „vruće tačke“ na Zemlji. Ali, doze do 400 milisiverta godišnje utvrđene su i u Ramsaru (Iran), gde ima izvora bogatih radijumom. Regioni sa visokom prirodnom radijacijom zemljišta poznati su i u Francuskoj, na Madagaskaru i u Nigeriji.

U proseku, prema proračunima UNSCEAR-a, svetsko stanovništvo prima efektivnu ekvivalentnu dozu od oko 350 mikrosiverta godišnje, koja potiče od eksterne prirodne zemaljske radijacije; to je znatno više nego što prosečna osoba koja živi na nivou mora prima od kosmičkih zraka.

Interno ozračivanje

U proseku, dve trećine efektivne ekvivalentne doze koju ljudi primaju iz prirodnih izvora potiče od radioaktivnih materija u vazduhu koji udišu, hrani koju jedu i vodi koju piju.

Veoma malo, zaista, od ove interne doze potiče od radioaktivnih materija – kao što su ugljenik-14 i tricijum koje se stvaraju usled kosmičkog zračenja. Gotovo čitava interna doza potiče od zemaljskih izvora. U proseku, ljudi primaju oko 180 mikrosiverta godišnje iz kalijuma-40, koji telo apsorbuje uporedo sa neradioaktivnim kalijumom, elementom od bitnog značaja. Ali, neuporedivo najveća količina potiče iz elemenata koji nastaju raspadanjem uranijuma-238, a u manjoj meri iz raspadanja torijuma-232.

Neki od ovih, kao olovo-210 i polonijum-210, uglavnom ulaze u telo zajedno sa hranom. Jedan i drugi koncentrisani su u ribi i rakovima; ljudi koji jedu velike količine hrane iz mora nužno će primiti odgovarajuće visoke doze radijacije.

Na desetine hiljade stanovnika krajnjeg severa hrani se uglavnom mesom irvasa (ili karibua). U telu ovih životinja nalaze se velike koncentracije ova dva radioaktivna materijala, naročito polonijuma-210, zbog toga što one zimi pasu lišajevu u kojima se te radioaktivne materije nagomilavaju. Tako se događa da u organizam stanovnika ovih krajeva dospevaju količine polonijuma-210 koje su do 35 puta veće od normalnih. U međuvremenu, na drugom kraju sveta, ljudi koji žive u oblasti Zapadne Australije bogatijom uranijumom primaju, jedući meso i iznutricu ovaca i kengura, doze radijacije koje su do 75 puta veće od normalne.

Radioaktivne materije kao što su ove često prolaze zaobilaznim putevima kroz prirodnu sredinu pre nego što dospeju do čoveka. Takvi putevi ili „staze“ često se uzimaju u obzir prilikom izračunavanja doza primljenih od pojedinih izvora. Uprošćen primer spleta ovih staza dat je na dijagramu 3.6.

Radon

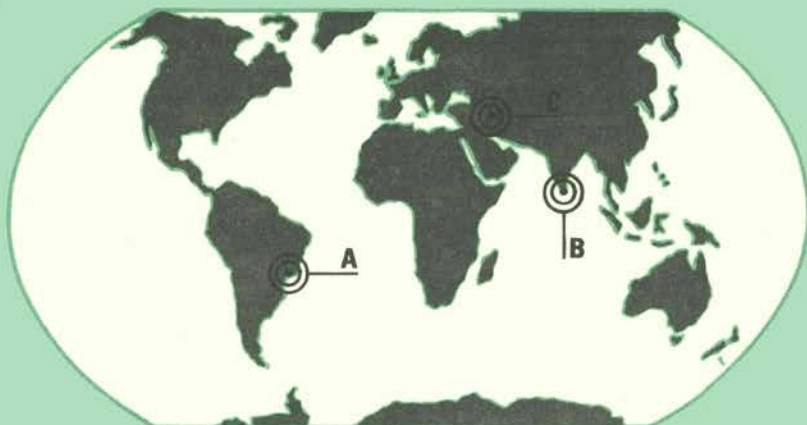
Naučnici su tek nedavno počeli da shvataju da je najvažniji od svih izvora prirodne radijacije nevidljivi gas bez ukusa i mirisa, sedam i po puta teži od vazduha, zvani radon. UNSCEAR sada procenjuje da, zajedno sa svojim „kćerima“ – radionuklidima koji se formiraju prilikom njegovog radioaktivnog raspadanja – radon normalno doprinosi oko tri četvrtine godišnje efektivne ekvivalentne doze koju pojedinci primaju iz zemaljskih izvora – i oko polovine onih doza koje oni primaju iz svih prirodnih izvora zajedno. Većinu ovih doza oni primaju udisanjem radionuklida, naročito u zatvorenom prostoru.

Radon, u stvari, ima dva glavna oblika: radon-222, jedan od radionuklida u porodici koja nastaje prilikom raspadanja uranijuma-238, i radon-220, iz porodice koja nastaje raspadanjem torijuma-232. Izgleda da radon-222 ima dvadeset puta jače delovanje od radona-220, ali, iz praktičnih razloga, ovde ćemo obe vrste ovog radioaktivnog gasa zvati „radonom“. U stvari, najveći deo doza radijacije potiče od radionuklida koji nastaju raspadanjem radona, a ne od samog gasa radona.

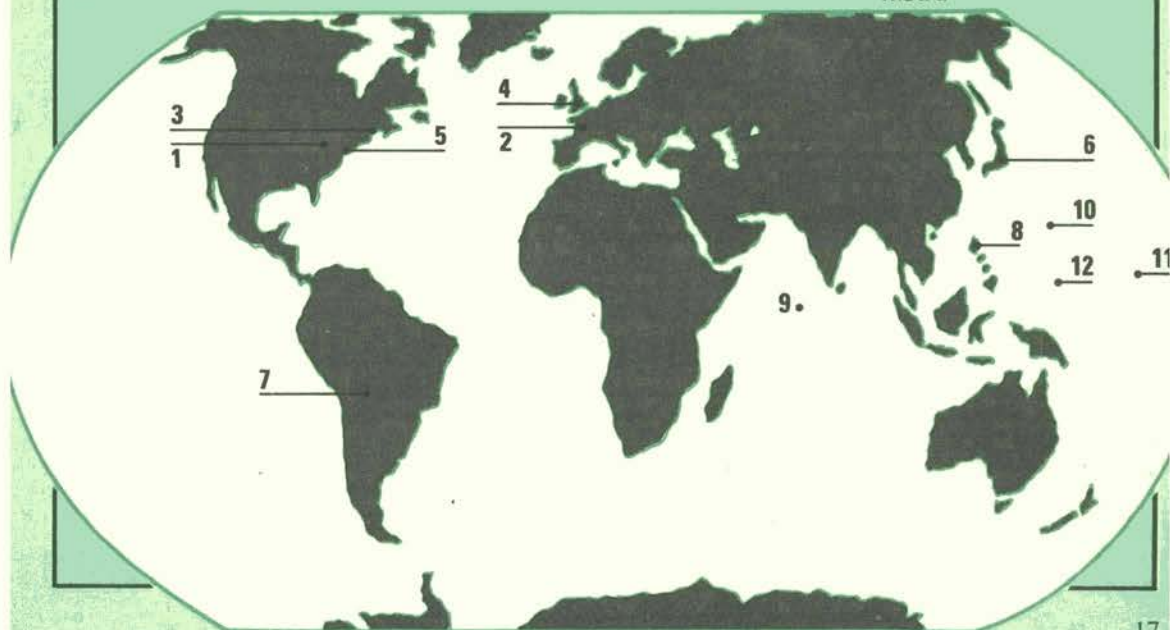
Širom sveta, radon izbija iz zemlje, ali nivo zračenja u vazduhu na otvorenom prostoru

3.5 ZEMALJSKI IZVORI I RADON

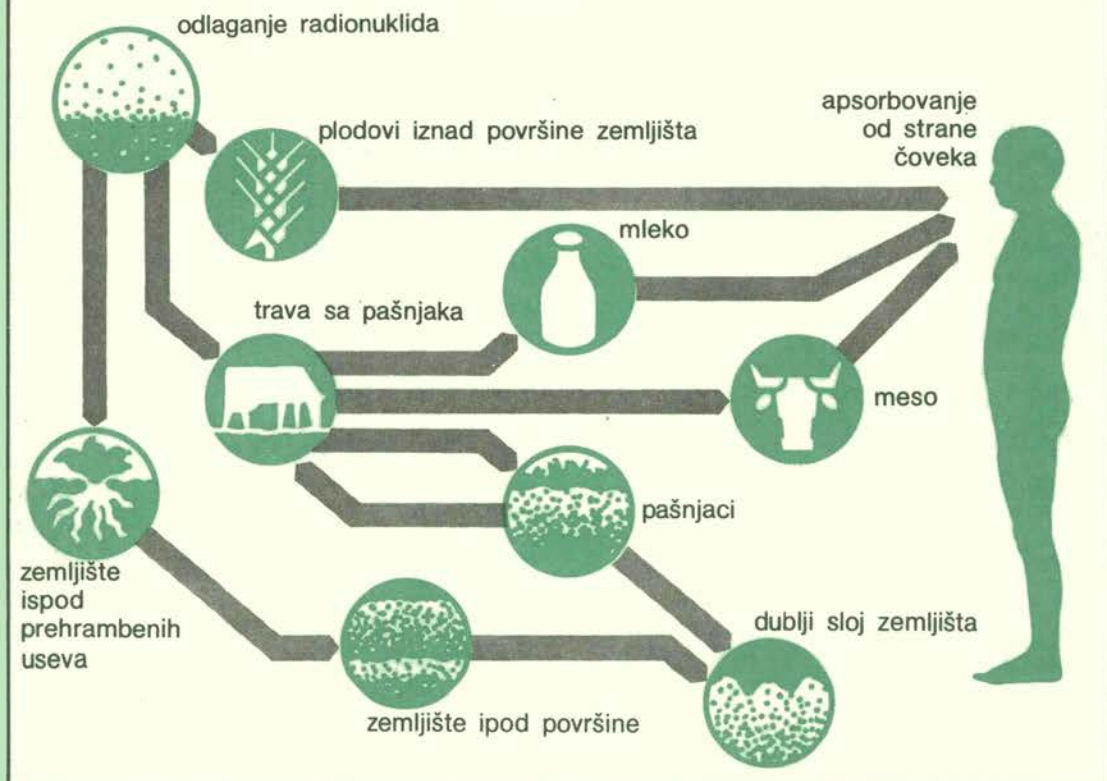
- A Posas de Kaldas i Guarapari
- B Kerala i Tamil Nadu
- C Ramsar



Neka merjenja koncentracije aktivnosti radona-222 u vazduhu na otvorenom prostoru u raznim delovima sveta



3.6 KRETANJE RADIONUKLIDA U PRIRODNOJ SREDINI



Niz staza po kojima se kreću radionuklidi u prirodnoj sredini. Ovaj dijagram, zasnovan na kompjuterskom modelu, raden da bi se izračunale doze nastale taloženjem radionuklida iz proizvodnje nuklearne energije, pokazuje kako ti radionuklidi mogu da dospeju do čoveka kroz

lanac ishrane i kako mogu da stignu u dublje slojeve zemljišta. Sve je, naravno, prikazano uprošćeno: gotovo u svakom od ovih stupnjeva odvija se, u stvari, veoma složen proces.

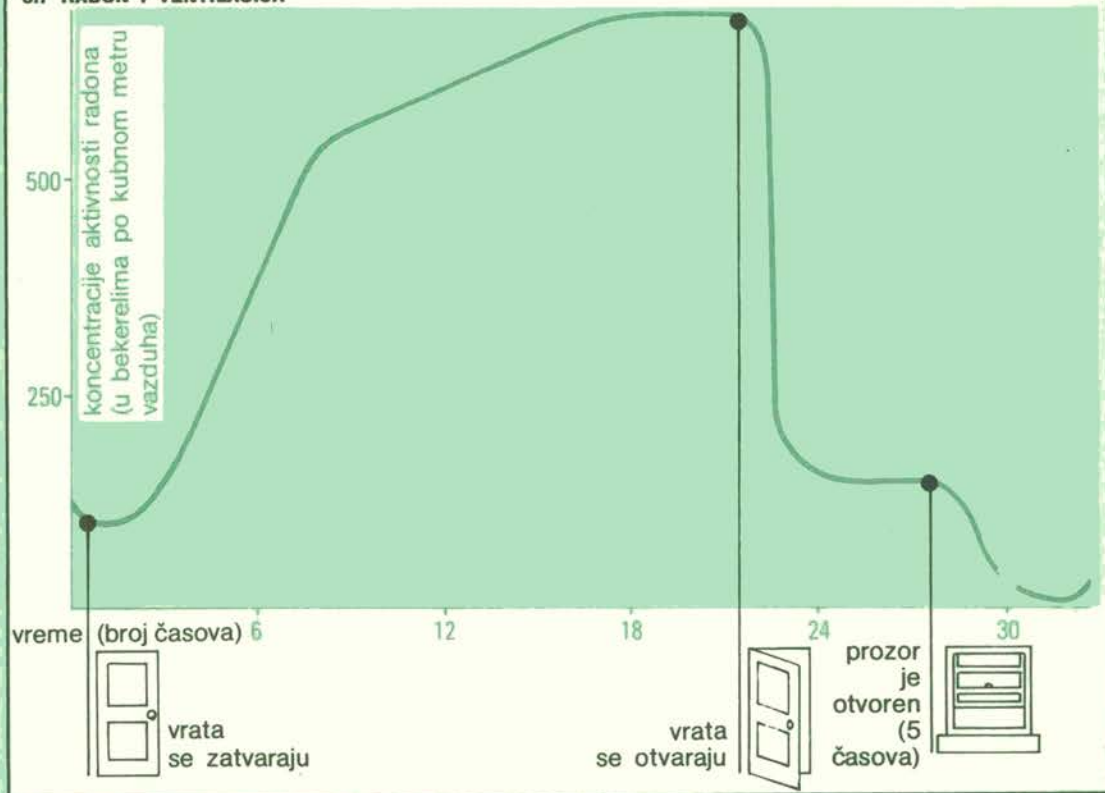
znatno varira od mesta do mesta (dijagram 3.5). Pa ipak, ma koliko to izgledalo paradoksalno, ljudi su najviše izloženi radonu u zatvorenim prostorijama. U delovima sveta s umerenom klimom, koncentracije radona su u zatvorenim prostorijama prosečno oko osam puta veće nego napolju. U tropskim zemljama nisu izvršena merenja, ali pošto je tamo klima topla, to su zgrade mnogo više otvorene, pa verovatno ne postoji velika razlika između koncentracija radona unutra i napolju.

Radon se koncentriše u sobnom vazduhu u zgradama koje se pretežno sastoje od zatvorenih prostorija (dijagram 3.7). Kada taj gas jednom uđe, probijajući se kroz drvene podove iz tla ili,

u manjoj meri, iz samog građevinskog materijala, on će teško izaći. Ishod toga može da bude vrlo visok nivo radijacije, naročito ako je zgrada podignuta na izrazito radioaktivnom tlu ili ako je sagrađena od naročito radioaktivnog materijala. Velike količine izolacionog materijala još više pogoršavaju situaciju, otežavajući radonu da se probije napolje.

Sve češće i češće nailazimo na vrlo visoke nivoe radijacije. Krajem sedamdesetih godina, koncentracije koje 5.000 puta premašuju tipične nivoe radijacije u vazduhu na otvorenom prostoru, registrovane su u stanovima u Švedskoj i Finskoj. U vreme kada je sastavljen najnoviji izveštaj UNSCEAR-a, 1982., u Britaniji

3.7 RADON I VENTILACIJA



Promene koncentracije radona u jednoj porodičnoj kući

i SAD nađene su u nekim stanovima koncentracije za 500 puta veće od tipičnog nivoa na otvorenom prostoru, a od tog vremena su u ovim dvema zemljama u nekim stanovima registrovani nivoi radona ravni onim najvišim koji su zabeleženi u Skandinaviji. Uporedo sa povećavanjem broja stanova u kojima su izvršena takva merenja, povećao se i broj onih za koje je utvrđeno da sadrže ekstremne koncentracije radona.

Najobičniji građevinski materijali – drvo, cigle i beton – ispuštaju relativno malo radona (dijagram 3.8). Granit je u mnogo većoj meri radioaktivan, a isto važi i za plovućac, koji se često koristi u Sovjetskom Savezu i Zapadnoj

Nemačkoj. Neki građevinski materijali su neprijatno iznenadili građevinare, naučnike i stanare, pokazavši se veoma radioaktivnim.

Tokom nekoliko decenija npr., korišćen je u Švedskoj stipsni škriľjac za proizvodnju betona. Taj je beton uzidan u 350.000 do 700.000 švedskih kuća. Tada se pokazalo da je ovaj škriľjac visoko radioaktivan. Njegova upotreba se sredinom sedamdesetih godina smanjila, a zatim je potpuno obustavljena. Šljaka od kalcijum-silikata – visoko radioaktivni nusprodukt proizvodnje fosfatne rude – koristi se za izradu betona i drugog građevinskog materijala u Severnoj Americi. Upotrebljen je u zgradama u Ajdahou, Floridi i Kanadi.

Gips sa sadržajem fosfora, drugi nusprodukt, koji se javlja prilikom jednog drugog postupka prerade fosfatne rude, mnogo je korišćen za izradu građevinskih elemenata, suvog maltera, pregradnih zidova i cementa. On manje košta od prirodnog gipsa, a pobornici zdrave prirodne sredine su ga pozdravili, zbog toga što je on, u stvari, otpadni proizvod, tako da se njegovim korišćenjem štede prirodni izvori i smanjuje zagađenost. Samo u Japanu, građevinska industrija je tokom 1974. godine upotrebila 3 miliona tona ovog materijala. Ali, on je takođe mnogo puta radioaktivniji nego prirodni gips, koji on zamenjuje, pa ljudi u zgradama za čiju je gradnju ovaj materijal upotrebljen mogu očekivati da će biti izloženi za 30 odsto većem zračenju. Sve u svemu, procenjuje se da gips sa sadržajem fosfora stvara kolektivnu efektivnu ekvivalentnu dozu izloženosti u toku više generacija od oko 300.000 čovek-siverta.

Među druge visoko radioaktivne otpadne proizvode koji se koriste u građevinarstvu spadaju crvene cigle od blata koje je nusprodukt u proizvodnji aluminijuma, šljaka iz visokih peći u čeličanicama i lebdeći pepeo od sagorevanja uglja.

Čak i otpaci iz rudnika uranijuma upotrebljeni su u građevinarstvu. Oni su u periodu od 1952. do 1966. godine upotrebljavani kao građevinski materijal i stavljani ispod kuća, naročito u Grend Džankšonu, Kolorado. U Port Houpu, Ontario, materijal iz jednog postrojenja za preradu uranijuma upotrebljen je u građevinskoj industriji. U oba ova slučaja vlade tih zemalja su

morale da intervenišu i da preduzmu zdravstveno zbrinjavanje stanovništva zbog radijacije koju je primilo.

Mada ljude brine građevinski materijal, tle ispod kuća je gotovo uvek veći izvor radona. U nekim slučajevima, kuće su građene na starim radioaktivnim otpacima, kao što su otpaci iz rudnika uranijuma u Koloradu, otpaci stipsnog škrljca u Švedskoj, otpaci iz proizvodnje radijuma u Australiji i na zemljištu gde su se nekad nalazili rudnici fosfata u Floridi. Ali, i u normalnijim okolnostima, najviše radijacije probija se kroz podove.

Najviši nivoi radona u Helsinkiju, u Finskoj, više od 5.000 puta veći od tipičnih nivoa u spoljnom vazduhu, nađeni su u kućama u kojima je jedini veći izvor radijacije moglo da bude tle na kojem su te kuće podignute. Čak i u Švedskoj, gde teškoće potiču od korišćenja stipsnog škrljca, nova istraživanja ukazuju na to da najveći problem predstavlja radon koji izbija iz tla.

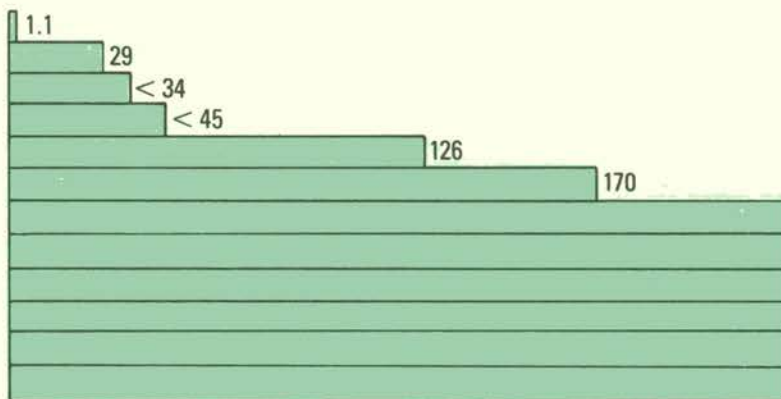
Koncentracije radona na višim spratovima zgrada su obično niže nego u prizemlju. Jedan pregled raden u Norveškoj čak je pokazao da drvene kuće imaju veće koncentracije radona nego one od cigle, uprkos činjenici da drvo ne emituje taj gas. To je bilo zbog toga što drvene kuće obično imaju manje spratova, pa su i stanovi u njima bliže tlu, koje ispušta radon.

Debljina i kompaktnost podova u zgradama određuje koliko će radon, izbijajući iz tla, moći u njih da prođe. Ovo je utvrđeno pregledom kuća podignutih na meliorisanom fosfatnom zemljištu

Srednje koncentracije aktivnih materija izmerene u različitim zemljama

3.8 GRAĐEVINSKI MATERIJALI

drvo (Finska)	1.1
prirodni gips (Britanija)	29
pesak i šljunak (SRN)	< 34
portland cement (SRN)	< 45
cigla (SRN)	126
granit (Britanija)	170
lebdeći pepeo (SRN)	
stipsni škrljca (Švedska) 1974-1979	
stipsni škrljca (Švedska) 1929-1975	
fosforni gips (SRN)	
šljaka od kalcijum-silikata (SAD)	
otpaci iz uranijumskih rudnika (SAD)	



u Floridi, dok je u Čikagu nađeno da kuće podignute na goloj zemlji sa nepopločanim podrumima imaju koncentracije radona koje su za 100 puta veće od tipičnih koncentracija na otvorenom prostoru, iako su koncentracije u tlu bile normalne.

Nivo radona u kućama može da se smanji prekrivanjem podova i zidova nepropustljivim materijalom. Eksperimenti su još u toku, ali su već postignuti rezultati koji dosta obećavaju. Korišćenje ventilatora u podrumima je naročito efikasan način da se smanji količina radona koji u kuće ulazi kroz podove. U međuvremenu, oblaganje zidova plastičnim materijalima kao što su poliamid, polivinilhlorid, polietilen i epoksnе boje – ili njihovo premazivanje sa tri sloja masne boje – desetostruko smanjuje emisiju radona iz ovog izvora.

Voda i prirodni gas su sledeći, mada manje značajni izvori radona u kućama (dijagram 3.9). Obično su količine radona u vodi veoma male, ali se ovaj ponegde, naročito u dubokim bunarima, javlja u veoma velikim koncentracijama (dijagram 3.10). Tako visoki nivoi nađeni su npr. u bunarima u Finskoj; među ovima su reni-bunari iz kojih se vodom snabdeva Helsinki. Slična je situacija i u nekim reni-bunarima u SAD, na primer u jednom od onih kojima se snabdeva Hot Springs, u Arkanzasu. Najradioaktivnije vode imaju aktivnosti radona od sto miliona bekerela po kubnom metru – najmanje nemaju praktično nikakvu aktivnost. Sve u svemu, UNSCEAR procenjuje da manje od jednog procenta

svetskog stanovništva pije vodu koja sadrži više od milion bekerela radonske aktivnosti po kubnom metru, a da manje od 10 odsto pije vodu sa više od 100.000 bekerela po kubnom metru.

Možda je ipak neobično što pijenje vode koja sadrži radon nije glavni problem, čak ni tamo gde su njegovi nivoi visoki. Opšte uzev, ljudi unose najviše vode sa hranom i sa toplim napicima kao što su čaj i kafa. Kada se voda kuva, ona gubi najveći deo radona, pa se stoga najviše radona pijenjem unosi sa svakom čašom hladne vode, ali se ovaj vrlo brzo eliminiše iz tela.

Za ljude postoji veći rizik od udisanja radioaktivnosti koju emituje voda bogata radonom – naročito u kupatilu. Pregledom finških kuća je utvrđeno da su, u proseku, koncentracije radona u kupatilima oko tri puta veće nego u kuhinjama, gde se koristi manja količina vode, a oko 40 puta veće nego u sobama za dnevni boravak (dijagram 3.12). Međutim, jedno ispitivanje obavljeno u Kanadi je pokazalo da se količina radona i radionuklida nastalih njegovim raspadom u vazduhu kupatila povećava za vreme toplog tuširanja koje traje sedam minuta, i da je tek jedan i po sat posle zatvaranja tuša, nivo radona u kupatilu otprilike isti kao pre njegove upotrebe (dijagram 3.11).

Radon takođe dospeva u „prirodni gas“ u zemljištu. Preradom i uskladištenjem uklanja se veliki deo tog radona pre nego što gas dospe do potrošača, ali koncentracije radona u stanovima

bekereli radijuma
i torijuma po kilogramu

341

496

1367

< 574

2140

4625

3.9 RADON U ZGRADAMA

prirodni gas



voda



vazduh
na otvorenom
prostoru



građevinski
materijali
i tle ispod zgrade



kBq dnevno

3

4

10

60

Relativni doprinos različitih izvora radona u referentnoj kući

moгу i dalje da se znatno povećavaju ako se taj gas koristi u gasnim pećnicama, grejalicama i drugim uređajima bez spoljne ventilacije. Ako ti uređaji imaju spoljnu ventilaciju, onda je povećanje koncentracije radona zanemarljivo.

Dobar deo radona koji se uklanja iz prirodnog gasa za vreme prerade dospeva u tečni gas (LPG), koji se proizvodi kao nusprodukt.

Koncentracija prosečne aktivnosti radona (kBq po kubnom metru) u izvorima vode

3.10 RADON U VODI

Mesto

SAD

Henkok, Mejn



1400

Severna Karolina



100

Finska

Helsinki i Vantaa



1,200

Austrija

Salzburg

1,5

● = 50 kBq po kubnom metru

Ali, prirodni gas unosi deset do sto puta više aktivnosti u stanove, računajući celu zemlju (ispitivanje je obavljeno u Kanadi) nego radioaktivniji LPG, zbog toga što se on mnogo više koristi.

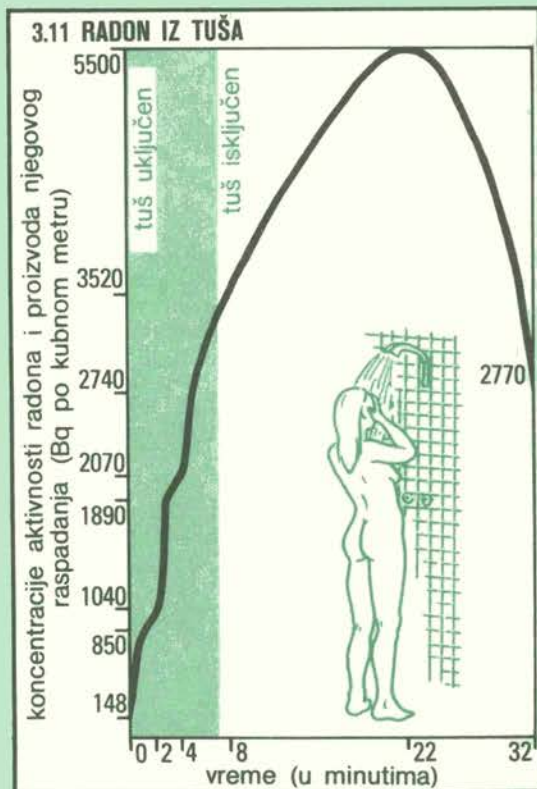
Mere uštede energije mogu znatno povećati koncentracije radona. Izolacijom kuća i sprečavanjem promaje smanjuje se ventilacija. Tako se čuva toplota, ali takođe omogućava nagomilavanje radona.

Ovo naročito pogađa Švedsku, gde u kućama postoji veoma solidna izolacija. Mnogo godina se smatralo da radon u kućama ne predstavlja problem u toj zemlji, i pored toga što se koristi stipsni škrljac; jedan pregled 1956. godine je ukazao na to da, s obzirom na ventilaciju, nema razloga za ozbiljnu zabrinutost. Međutim, počev od ranih pedesetih godina ventilacija u švedskim kućama se stalno smanjuje da bi se uštedela energija.

Između 1950. i sredine sedamdesetih godina ventilaciju su smanjili za više od polovine, i koncentracije radona su se tada više nego utrostručile (dijagram 3.13). Proračuni su pokazali da će za svaku gigavat-godinu električne energije koju budu uštedeli smanjenjem ventilacije, Švedani biti izloženi dopunskom zračenju do 5.600 čovek-siverta.

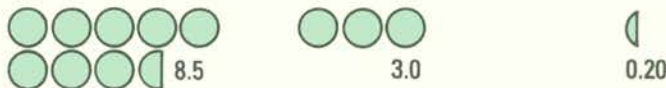
Stroge mere uštede energije, velike emisije radona iz tla koje pogađaju niske građevine i korišćenje stipsnog škrljca, predstavljaju

Prosečna koncentracija aktivnosti radona u vazduhu koja potiče od radona iz vode (iz proučavanja 20 finskih kuća)

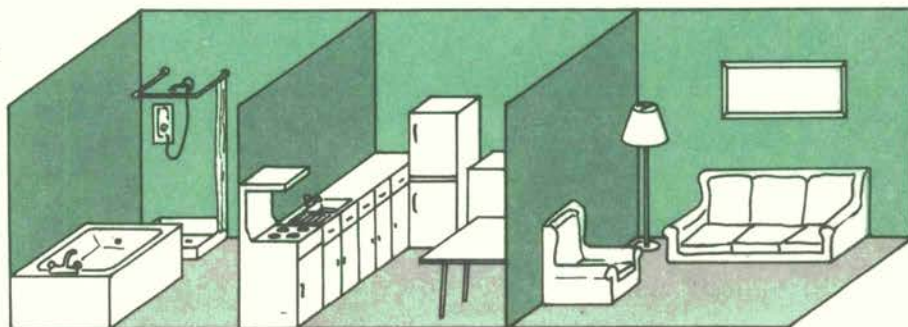


Koncentracija aktivnosti radona i proizvoda njegovog raspada u vazduhu zatvorenog kupatila za vreme i posle sedmominutnog toplog tuširanja u jednoj kanadskoj kući. (Koncentracija radona u vodi bila je 4.400 bekerela po kubnom metru.)

3.12 RADON U RAZLIČITIM PROSTORIJAMA



prosečne koncentracije radona u hiljadama Bq po kubnom metru



kupatilo

kuhinja

soba za dnevni boravak

objašnjenje za situaciju u Švedskoj. Godine 1982. UNSCEAR je objavio i informacije iz drugih zemalja koje ukazuju na to da u 90 odsto zgrada postoji aktivnost radionuklida radona u koncentracijama do 50 bekerela po kubnom metru, što je 25 puta više od tipičnog nivoa na otvorenom, a da je u nekoliko procenata zgrada ovaj nivo i viši od 100 bekerela po kubnom metru. U Švedskoj, međutim, kako je zabeleženo u istom izveštaju, više od 30 odsto zgrada ima aktivnost radionuklida iznad ovog višeg nivoa, a prosečne koncentracije su četiri puta veće nego u drugim zemljama u pojasu umerene klime.

Međutim, u poslednje vreme postoje indikacije da Švedska možda i nije takav izuzetak kao što se to nekad smatralo. I druge zemlje počinju da uviđaju da su njihovi problemi veći nego što se pretpostavljalo. Verovatno se ranije smatralo da je u Švedskoj ovaj problem veći nego u drugim zemljama zbog toga što su Šveđani ranije nego drugi počeli da mere aktivnost radionuklida radona u svojim kućama.

Danas se zna da u raznim zemljama procenat zgrada sa koncentracijama radionuklida radona od čitavih 1.000 do 10.000 bekerela po kubnom metru dostiže 0,01% do 0,1%. To znači da prilično veliki broj ljudi može da bude izložen visokim koncentracijama radona u svojim stanovima. Ali, u zemljama u kojima je taj problem manje akutan nego u Švedskoj, tri četvrtine kolektivne efektivne ekvivalentne doze izloženosti potiče od života u zgradama sa koncentracijama ispod 100 bekerela po kubnom metru. Ukupna efektivna ekvivalentna doza usled izloženosti radonu i njegovim radionuklidima iznosi normalno oko 1 milisivert godišnje – ili oko polovine ukupne procenjene doze iz svih prirodnih izvora zračenja.

Drugi izvori

Ugalj, kao i većina prirodnih materijala, sadrži tragove drevnih radionuklida. Sagorevajući, on te radionuklide, ranije zatrpane duboko u zemlji, ispušta u prirodnu sredinu gde ovi mogu štetno da utiču na ljude.

Iako njihove koncentracije mogu toliko da variraju, da u jednoj rudnoj žili budu i sto puta veće nego u drugoj, većina naslaga uglja sadrži količine radioaktivnog materijala koje su manje od prosečnih količina u Zemljinoj kori. Ali, kada ugalj sagoreva, najveći deo njegovih mineralnih materija stapa se u pepeo u kojem je koncentrisan i najveći deo radioaktivnih supstanci. Taj je pepeo pretežnim delom težak i pada na dno kotla u elektrani. Međutim, lakši,

„lebdeći pepeo“ odlazi u dimnjak. Koliki će njegov deo iz dimnjaka izići u atmosferu, zavisi od toga šta se čini da bi se tehničkim sredstvima sprečilo zagađenje vazduha.

Oblak iz dimnjaka ozračava ljude, a zagađenje se nagomilava i pri tlu i kontaminira prehrambene kulture. Događa se čak i to da se jedan deo zagađivača u vidu prašine vraća u vazduh. Procenjuje se da proizvodnja svake gigavat-godine električne energije povlači za sobom angažovanu kolektivnu efektivnu ekvivalentnu dozu izloženosti u toku više generacija od 2 čovek-siverta, što znači da su tokom 1979. termoelektrane na ugalj u čitavom svetu proizvele neizbežnu kolektivnu efektivnu ekvivalentnu dozu od oko 2.000 čovek-siverta.

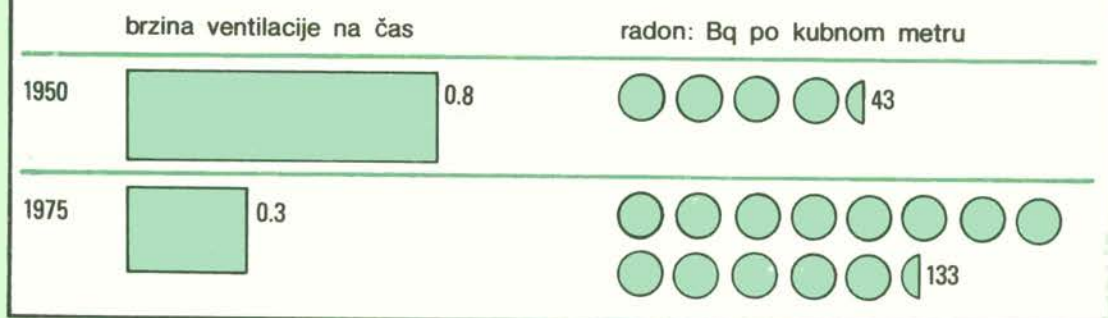
Manje uglja koristi se za kuvanje i grejanje u stambenim zgradama, ali tu kroz dimnjake izlazi više pepela. Zbog toga je lako moguće da peći i štednjaci širom sveta ispuštaju u atmosferu isto toliko pepela koliko i elektrane. Osim toga, za razliku od većine elektrana, stambene zgrade imaju niske dimnjake i nalaze se, normalno, u centru gradova; zbog toga veće količine čestica zagađivača padaju na ljude. Ovom pitanju se dosad posvećivalo vrlo malo pažnje, ali, prema gruboj proceni, kuvanjem u privatnim stanovima i njihovim zagrevanjem tokom 1979. godine proizvedena je možda angažovana kolektivna efektivna ekvivalentna doza u svetu od oko 100.000 čovek-siverta.

Malo se zna i o efektu lebdećeg pepela koji se zadržava u filterima za sprečavanje zagađenosti vazduha. U nekim zemljama više od jedne trećine ovog pepela biva ponovo upotrebljeno, uglavnom za proizvodnju cementa i betona. Neke vrste betona su takve, da se četiri petine sastoje od lebdećeg pepela. Taj se pepeo takođe koristi za gradnju puteva i za poboljšanje poljoprivrednog zemljišta. Sve ove primene mogle bi dovesti do povećane izloženosti radijaciji, ali o toj oblasti je dosad vrlo malo objavljeno.

Geotermička energija je još jedan izvor povećane radijacije. U nekoliko zemalja koriste se rezervoari pare i geotermička vrela za proizvodnju električne energije i za zagrevanje zgrada; jedan takav izvor daje energiju turbinama u Larderelu, u Italiji, još od početka ovog veka. Analiza iz ove i još dve manje elektrane ove vrste u Italiji, ukazuje na to da one proizvode angažovanu kolektivnu efektivnu ekvivalentnu dozu od 6 čovek-siverta po gigavat-godini proizvedene električne energije, a to je tri puta veća doza od one koju proizvode termičke elektrane na ugalj.

Geotermička energija, budući da na nju

3.13 KONZERVACIJA ENERGIJE I RADON

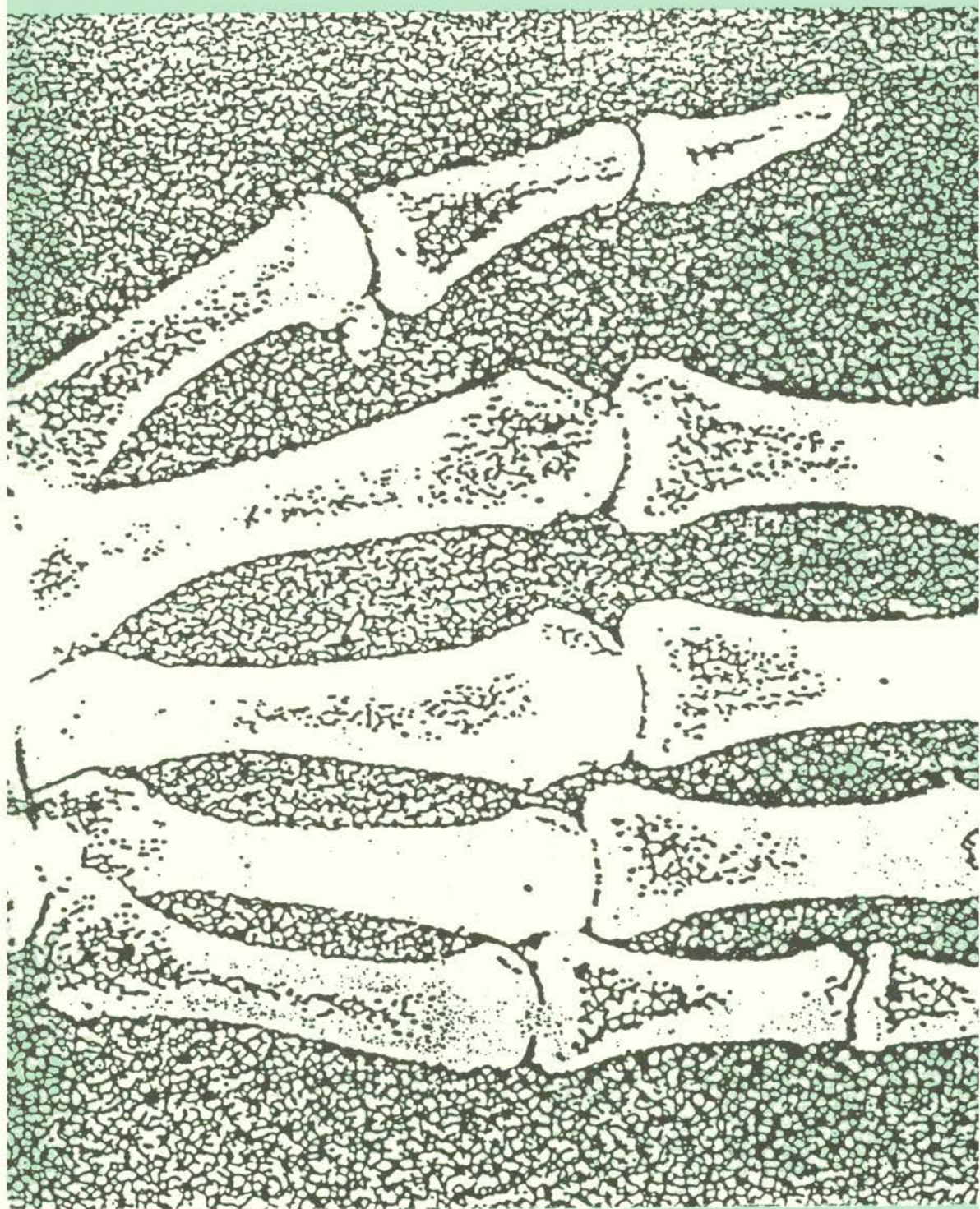


Smanjenje ventilacije i porast srednje koncentracije aktivnosti u švedskim stambenim zgradama

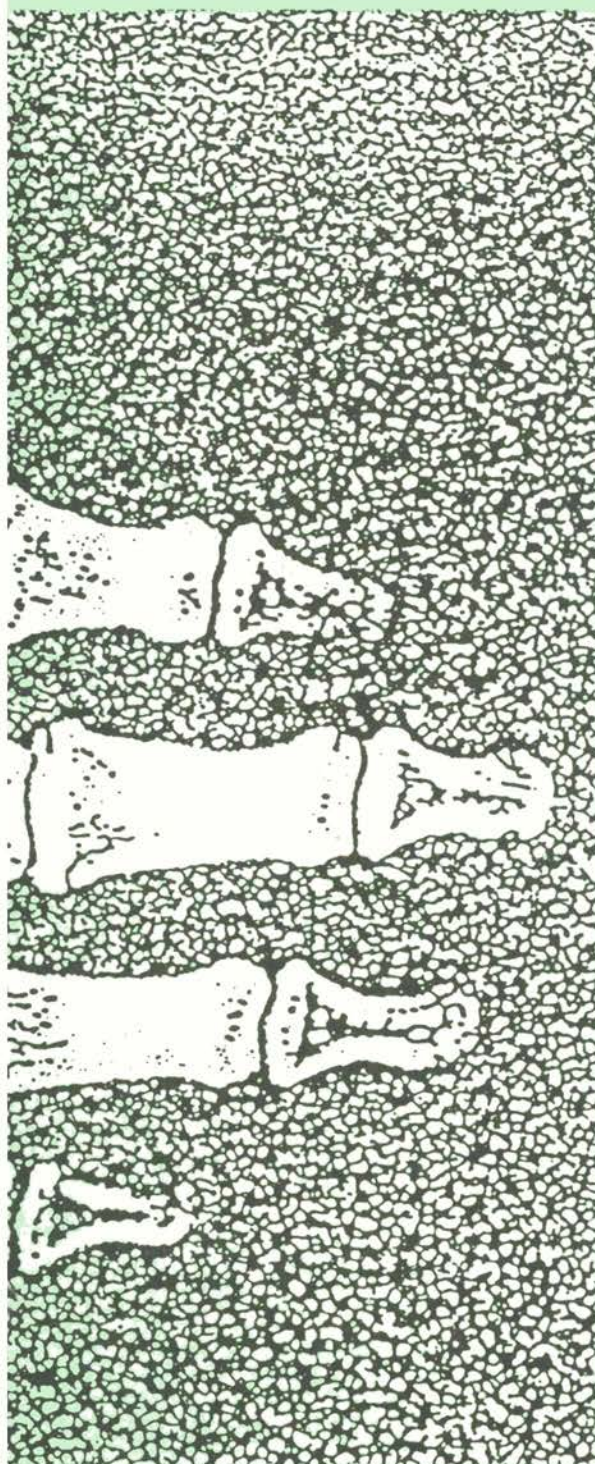
otpada samo 0,1% sadašnje proizvodnje energije u svetskim razmerama, samo minimalno povećava globalnu izloženost radijaciji.

Međutim, njena uloga može u budućnosti da postane mnogo veća, s obzirom na to da mnoga ispitivanja govore da je njen potencijal veoma veliki.

Fosfatna ruda se uveliko vadi širom sveta, naročito radi toga da bi se upotrebila za proizvodnju veštačkog đubriva. Samo 1977. godine proizvedeno je 30 miliona tona fosfatnog đubriva. Najveći deo fosfatne rude koja se eksploatiše sadrži visoke koncentracije uranijuma. Za vreme kopanja i prerade tih ruda oslobađa se radon, a i samo đubrivo je radioaktivno i zagađuje hranu. To zagađenje je pod normalnim okolnostima samo neznatno, ali može da bude i veće, ako je veštačko đubrivo u tečnom obliku ili ako se fosfatni proizvodi daju kao hrana životinjama. A takvi se proizvodi široko upotrebljavaju u dodacima stočnoj hrani; ako se daju kravama, mogu uticati na znatno povećanje nivoa radijuma u mleku. Svi ovi aspekti industrije fosfata vode ka stvaranju neizbežne kolektivne efektivne ekvivalentne doze od oko 6.000 čovek-siverta, u poređenju sa 300.000 čovek-siverta, koliko je proisteklo od fosfornog gipsa iz proizvodnje fosfata 1977. godine.



Veštački izvori



Za poslednjih nekoliko decenija čovek je veštački proizveo nekoliko stotina radionuklida. Naučio je i da koristi snagu atoma za niz raznih svrha, od medicine do oružja, od proizvodnje energije do otkrivanja požara, od svetlećih brojanika satova do nalaženja minerala. Sve upotrebe radioaktivnosti povećavaju doze koje čovek kao pojedinac prima, a i čovečanstvo kao celina.

Individualne doze iz veštačkih izvora radijacije znatno variraju. Većina ljudi prima relativno male doze zračenja od veštačkih putem stvorenih izvora, ali pojedini primaju nekoliko hiljada puta veću količinu iz veštačkih nego iz prirodnih izvora.

Ova raznolikost u primljenim dozama obično je veća za veštačke nego za prirodne izvore. Osim toga, većina veštačkih izvora može lakše da se kontroliše nego najveći broj prirodnih izvora; mada je izloženost eksternom zračenju od radioaktivnih padavina koje potiču, recimo, od izvršenih nuklearnih eksplozija gotovo isto tako neizbežno i izvan svake kontrole kao što je izloženost radijaciji koja potiče od kosmičkih zraka ili od samog zemljišta.

Medicinski izvori

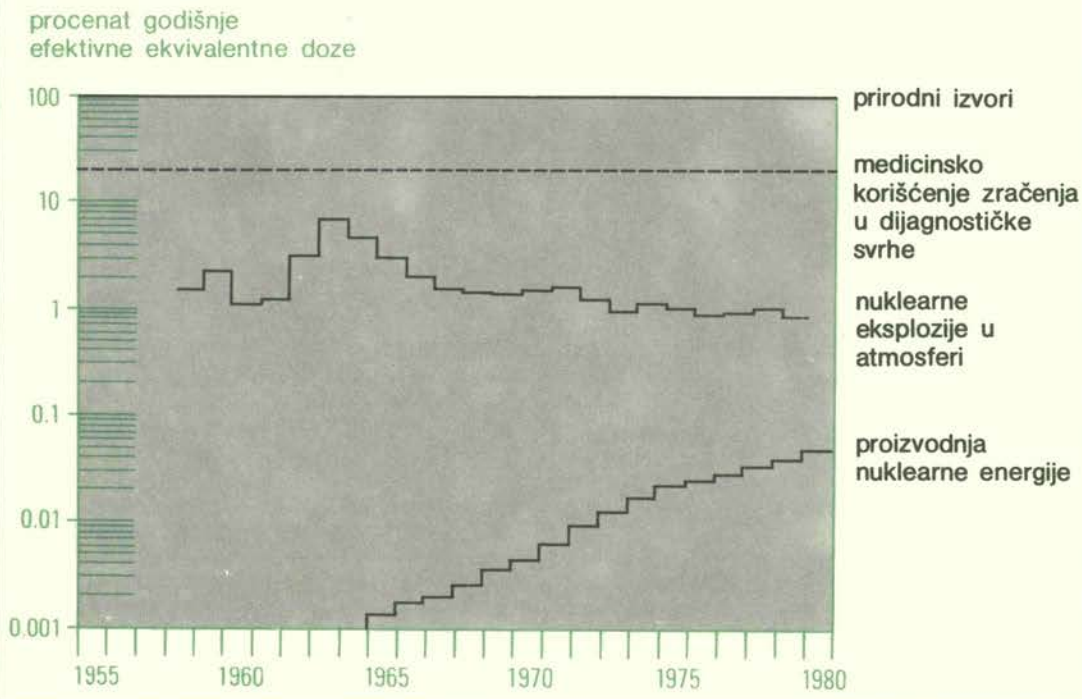
Danas je medicina najveći izvor izloženosti ljudi veštačkoj radijaciji (dijagrami 3.1, 4.1). U stvari, u mnogim zemljama je ova vrsta zračenja odgovorna za gotovo celokupnu dozu primljenu iz veštačkih izvora.

Radijacija se koristi u dijagnostici i lečenju bolesti. Svakome poznati rendgen je jedan od najkorisnijih uređaja u službi lekara – a nove, rafinovane, dijagnostičke tehnike sa korišćenjem radioizotopa sve se više primenjuju. Lečenje radijacijom je, osim toga, ma koliko to izgledalo, paradoksalno, jedan od glavnih načina borbe protiv raka.

Individualne doze, očigledno, ogromno variraju – od nule (kod onih koji nikad nisu imali rendgenski pregled) do doza koje su mnogo hiljada puta veće od prosečne godišnje doze iz prirodnih izvora (koliko primaju neki pacijenti koji se leče od raka). Međutim, još su malobrojne i nepouzdanе zvanične informacije koje bi bile potrebne UNSCEAR-u za izračunavanje doza koje prima svetsko stanovništvo. Nije dovoljno poznato ni to koliko ljudi biva ozračeno svake godine, ni kolike su primljene doze, niti u kojim delovima tela su apsorbovane.

Medicinsko zračenje je u načelu korisno. Ali, izgleda da ljudi zaista često primaju doze koje su

4.1 TENDENCIJA RAZVOJA IZVORA RADIJACIJE



Tendencija razvoja raznih izvora radijacije. Godišnje efektivne ekvivalentne doze primljene iz raznih izvora izražene su kao procenat doza od prirodnog zračenja. Doze od prirodnih izvora ostaju, naravno, konstantne i izražene su sa 100 odsto. Doze od medicinskog korišćenja radijacije u dijagnostičke svrhe bile su, kako se pretpostavlja, takođe konstantne od 1945. do 1980. godine i iznosile su 20 odsto od prirodne radijacije. Doze od nuklearnih eksplozija u atmosferi, pošto su, sa oko 7

odsto, dostigle vrhunac početkom šezdesetih godina, smanjile su se posle zaključenja Ugovora o delimičnoj zabrani eksperimentalnih nuklearnih eksplozija, na oko 0,8 odsto od prirodne radijacije 1980. godine. Međutim, doze od proizvodnje nuklearne energije povećavaju se uporedo sa ekspanzijom ove industrije — one su se od 1965. godine, kada su iznosile 0,001 odsto od prirodne radijacije, povećale do 1980. godine na oko 0,035 odsto. Obratite pažnju na logaritamsku razmeru.

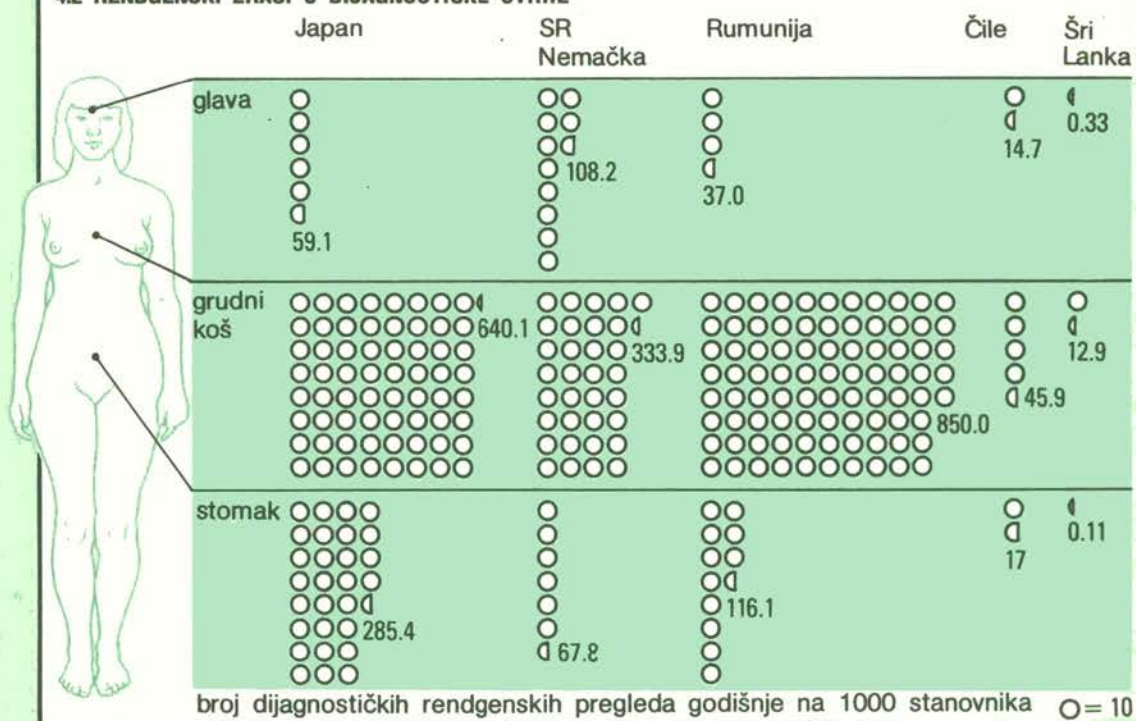
nepotrebno visoke, a koje bi, bez ikakvog gubitka efikasnosti, mogle znatno da se smanje. Budući da na medicinsko zračenje otpada tako visoka stopa izloženosti veštačkim izvorima, korist od njihovog smanjenja bila bi velika.

Dijagnostički rendgenski zraci su najrasprostranjeniji oblik medicinskog zračenja. Podaci iz industrijalizovanih zemalja govore da se godišnje stope kreću od 300 do 900 pregleda na svakih 1.000 stanovnika — pri čemu nisu uračunati rendgenski snimci zuba i masovna radiografija pluća. Oskudniji podaci iz zemalja u razvoju pokazuju da u tim zemljama stopa rendgenskih pregleda ne premašuje 100 do 200

na svakih 1.000 stanovnika. U stvari, oko dve trećine svetskog stanovništva živi u zemljama u kojima je prosečna učestalost radioloških pregleda otprilike deset puta manja nego u razvijenim zemljama.

U većini zemalja oko polovine svih rendgenskih pregleda čine pregledi pluća. Ali, masovna radiografija pluća postaje sve manje korisna kako se rasprostranjenost tuberkuloze smanjuje. Osim toga, postoje valjani dokazi o tome da se ranim otkrivanjem raka pluća ovom metodom ne povećavaju značajnije stope preživljavanja obolelih. Zbog toga je učestalost takvih pregleda znatno smanjena u mnogim

4.2 RENDGENSKI ZRACI U DIJAGNOSTIČKE SVRHE



Godišnja učestalost dijagnostičkih rendgenskih pregleda raznih organa u različitim zemljama (rendgenski pregled

„stomaka“ uključuje preglede gornjeg dela gastro-intestinalnog trakta)

industrijalizovanim zemljama, među kojima se nalaze Švedska, Britanija i SAD. Međutim, u nekim drugim zemljama, otprilike jedna trećina stanovništva i dalje se svake godine podvrgava ovim pregledima.

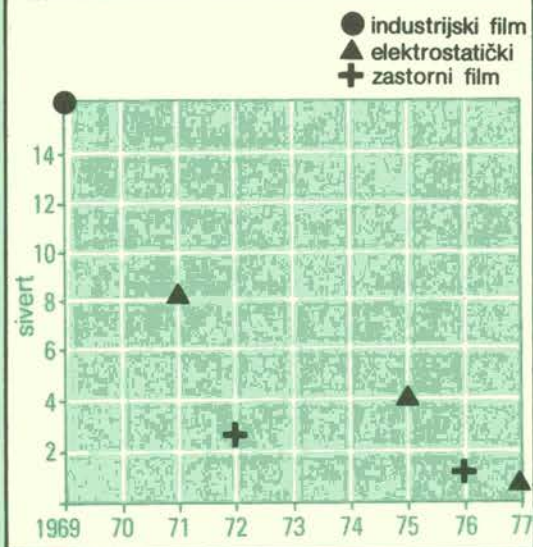
Poslednjih godina postignuta su tehnička poboljšanja, koja bi, pravilno primenjena, trebalo da smanje nepotrebno izlaganje pacijenata rendgenskim zracima. Međutim, studije obavljene u Švedskoj i SAD su, na opšte razočaranje, pokazale da su primljene doze smanjene malo ili čak nimalo.

Ove doze su od bolnice do bolnice, čak i u istoj zemlji, veoma različite. Nekoliko studija

obavljenih u SR Nemačkoj, Velikoj Britaniji i SAD pokazuje da se doze rendgenskih zraka kojima je izloženo telo ljudi mogu da razlikuju čak i za faktor sto. Druga jedna studija je pokazala da je i ozračenost oblasti tela katkad dvaput veća nego što bi trebalo da bude. Ima podataka i o tome da mnogi uređaji daju loše rendgenske slike i da, zbog toga što loše funkcionišu, nepotrebno izlažu pacijente radijaciji.

Pa ipak, u nekim slučajevima je izloženost radijaciji zaista smanjena zahvaljujući boljoj opremi i usavršavanju prakse. U drugim slučajevima se, opet, znatno povećala

4.3 RENDGENSKE DOZE PRI PREGLEDU DOJKI



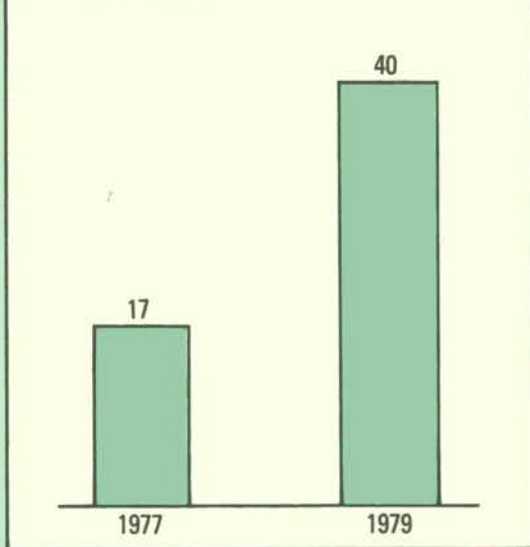
Smanjenje srednjih doza zahvaljujući usavršavanju mamografskih tehnika

dijagnostička efikasnost zahvaljujući umerenom povećanju doza. U svakom slučaju, mora biti cilj da se izloženost održi na najnižem nivou koji je neophodan; UNSCEAR veruje da postoje velike mogućnosti za značajno smanjenje doza.

Doze koje pacijenti primaju prilikom snimanja zuba smanjile su se, izgleda, zahvaljujući tehničkom usavršavanju postupka. Ovo je važno, pored ostalog, i zbog toga što su to u mnogim industrijalizovanim zemljama najčešći rendgenski pregledi. Strožim ograničavanjem dometa rendgenskih zraka, njihovim boljim filtriranjem da bi se eliminisalo nepotrebno ozračavanje i korišćenjem osetljivijih filmova kao i adekvatnom zaštitom od radijacije znatno se smanjuje stopa izloženosti.

Sada su smanjene i doze koje se primaju prilikom rendgenskog pregleda dojke. Tehnike mamografije koje su uvedene u drugoj polovini sedamdesetih godina, opšte uzev, daju znatno niže doze nego one koje su pacijentkinje primale kada se to snimanje vršilo starijim uređajima (dijagram 4.3) i moguće je da će one biti još više

4.4 MAMOGRAFIJA



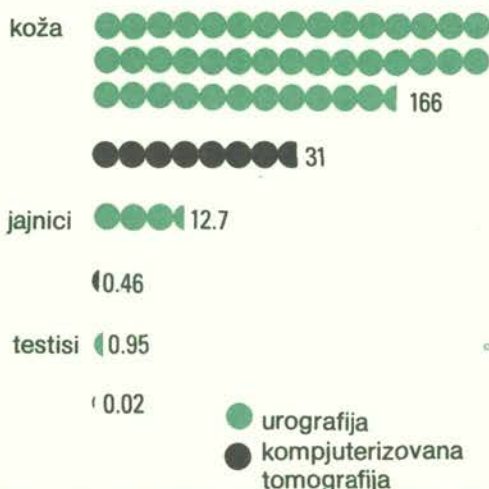
Povećanje broja rendgenskih pregleda dojke na svakih hiljadu žena u Švedskoj 1977—1979.

smanjene, a da to ne utiče na kvalitet rendgenskih snimaka. Ovo smanjenje doza prati sve rasprostranjenija praksa mamografije, snimanja čiji se broj u periodu između 1977. i 1979. udvostručio, kako u Švedskoj tako i u SAD (dijagram 4.4).

Još jedan nova tehnika, kompjuterizovana tomografija, smatra se najvećim poboljšanjem u dijagnostičkom korišćenju od vremena Rentgenovog otkrića x-zraka. I njena upotreba se brzo povećava — ona se u Švedskoj u periodu između 1973. i 1979. godine povećala za stotinu puta (dijagram 4.6). Studija o snimanju bubrega je pokazala da se novom tehnikom doze koje prima koža smanjuju za pet puta, jajnici — za 25 puta, a testisi — za 50 puta u poređenju sa dozama koje ovi organi primaju kada se primenjuju konvencionalne tehnike (dijagram 4.5).

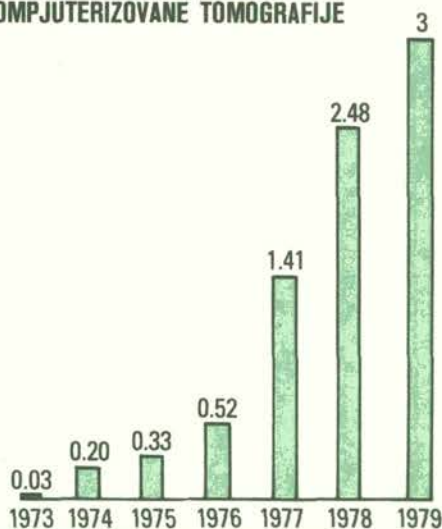
Veoma je teško izračunati prosečne doze koje je primio veliki broj ljudi, delimično zbog toga što su podaci o učestalosti rendgenskih pregleda manjkavi, naročito oni iz zemalja u razvoju.

4.5 DOZE RADIJACIJE PRI KOMPJUTERIZOVANOJ TOMOGRAFIJI



Doze apsorbovane prilikom snimanja bubrega kompjuterizovanom tomografijom bubrega (srednja vrednost za 10 pacijenata) u poređenju sa dozama pri konvencionalnoj urografiji.

4.6 PREGLEDI POMOĆU KOMPJUTERIZOVANE TOMOGRAFIJE



Povećanje broja pregleda pomoću kompjuterizovane tomografije na svakih 1.000 osoba u Švedskoj, 1973—1979.

Velike razlike u dozama primljenim prilikom pregleda istih organa od bolnice do bolnice još više komplikuju stvari, s obzirom na to da se zbog tih razlika podaci dobijeni od jedne od tih bolnica ne mogu smatrati reprezentativnim.

Sve doskora, naponi da se utvrdi prosečna doza primljenih rendgenskih zraka za neku populaciju bili su ograničeni na pokušaj da se odredi ona doza koja će moći da ima genetske posledice. Ona se naziva *genetički značajnom, ekvivalentnom dozom i obeležava sa GSD*. Njena veličina u velikoj meri zavisi od dva faktora. Prvi je, da li je verovatno da će pacijenti kasnije imati decu, što u velikoj meri zavisi od njihovog životnog doba. Drugi je doza rendgenskih zraka koju primaju reproduktivne ćelije. Ovo je u vezi sa tipom pregleda koji se vrše: u Velikoj Britaniji, najveći doprinos ukupnom GSD dali su 1977. pregledi karlice i lumbalno-sakralnog dela kičme, gornjeg dela butnih kosti i kukova, mokraćne bešike i urinarnog trakta kao i barijumske klizme.

U Britaniji je te godine GSD procenjen na

oko 120 mikrosiverta. GSD je iznosio oko 150 mikrosiverta u Australiji 1970. godine, isto toliko u Japanu 1974. i 1979. i oko 230 mikrosiverta u Sovjetskom Savezu krajem sedamdesetih godina.

U najnovijem izveštaju od 1982. godine UNSCEAR je pokušao da ide i dalje i da izračuna efektivnu ekvivalentnu dozu za pacijente, da bi se procenilo potencijalno oštećenje i drugih tkiva osim reproduktivnih organa. Ovo je u načelu teško uraditi zbog toga što uobičajeni metodi izračunavanja ove doze nisu prikladni za izračunavanje izloženosti radijaciji u medicinske svrhe. Postoje i tehničke teškoće. Za procenu efektivne ekvivalentne doze potrebni su tačni podaci o tome koliko je zračenja apsorbavalo desetak različitih organa ili tkiva prilikom svakog pregleda. Ove doze mogu da se razlikuju i za hiljadu i više puta za isti tip rendgenskog pregleda — uprkos tehničkom napretku od kojeg se očekivalo da će te razlike smanjiti.

U stvari, samo dve zemlje, Japan i Poljska, bile su u stanju da Komitetu podnesu koliko-

-toliko potpune informacije za izračunavanje tih doza — one su u Poljskoj 1976. godine iznosile oko 680 čovek-siverta na milion ljudi, a u Japanu su 1974. iznosile 1.800 čovek-siverta na milion ljudi. U odsustvu bilo kakvih drugih podataka, UNSCEAR je uslovno prihvatio da bi godišnja kolektivna efektivna ekvivalentna doza primljena rendgenskim pregledima u industrijalizovanim zemljama mogla da bude oko 1.000 čovek-siverta na milion ljudi. Pretpostavlja se da je u zemljama u razvoju ova vrednost niža, mada individualne doze mogu da budu i više.

Radionuklidi se koriste za ispitivanje mnogih procesa u čovekovom organizmu i za lociranje tumora. Njihovo korišćenje se za poslednjih 30 godina znatno povećalo, ali ono i danas nije ni izdaleka tako često kao što su rendgenski pregledi. Informacije o korišćenju radionuklida u ove svrhe su manjkave, a one koje su raspoložive govore da u industrijalizovanim zemljama dolazi samo oko 10 do 40 takvih ispitivanja na hiljadu stanovnika.

Slično tome, teško je doći i do procene doza; jednim ispitivanjem u Japanu izračunato je da je efektivna ekvivalentna doza reda veličine od 20 čovek-siverta po osobi. Takođe je utvrđeno da se kolektivna efektivna ekvivalentna doza kreće od 20 mikrosiverta na milion ljudi u Australiji, do oko 150 mikrosiverta u SAD.

U svetu postoji i oko 4.000 uređaja za radioterapiju. Njima se rak tretira snažnim ozračivanjem malignih tkiva u nastojanju da se unište ćelije tumora. Pa i za ovu primenu radijacija postoje samo vrlo ograničene informacije o tome koliko se one koriste i kolika je izloženost populacija. Doze koje prima svaki pacijent su visoke, ali one se obično daju osobama za koje se ne očekuje da će dugo živeti i kod kojih je mala verovatnoća da će još imati decu. Te se doze daju srazmerno malom broju ljudi, tako da one veoma malo povećavaju opštu dozu.

Međutim, na stotine miliona malih doza koje se godišnje daju prilikom rendgenskih pregleda daleko premašuju relativno visoke doze koje se daju obolelima od raka. Prosečna efektivna ekvivalentna doza od svih izlaganja radijaciji u medicinske svrhe može po jednom stanovniku industrijalizovanih zemalja da iznosi oko jednog milisiverta godišnje — što otprilike odgovara polovini prosečne doze primljene iz prirodnih izvora. Ova procena „proseka“ krije, doduše, velike razlike; efektivna ekvivalentna doza po stanovniku u nekim je industrijalizovanim zemljama čak i triput veća nego u nekim drugim. Pošto zemlje u razvoju daleko manje koriste

radijaciju u medicinske svrhe, svetski prosek mogao bi da bude oko 400 mikrosiverta po osobi godišnje; to bi značilo da ukupna kolektivna efektivna ekvivalentna doza iznosi oko 1,600.000 čovek-siverta godišnje.

Nuklearne eksplozije

Nema čoveka koji za poslednjih 40 godina nije bio izložen radioaktivnim padavinama od nuklearnog oružja. Praktično ništa od toga ne potiče od bombi koje su 1945. bačene na Hirošimu i Nagasaki; gotovo sve su te padavine posledice nuklearnih eksplozija u atmosferi koje su izvršene da bi se isprobalo nuklearno oružje.

Učestalost ovih eksplozija dva puta je bila na vrhuncu: prvi put između 1954. i 1958. godine, kada su i SAD, i Sovjetski Savez i Velika Britanija isprobavale svoje nuklearno oružje; drugi i viši maksimum dostignut je 1961. i 1962. godine, kada su najviše eksplozija vršili SAD i Sovjetski Savez. U prvom od ova dva perioda dominirale su nuklearne probe SAD, u drugom, opet, probe Sovjetskog Saveza. (dijagram 4.7).

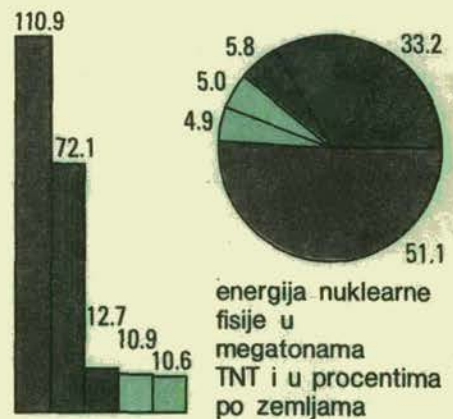
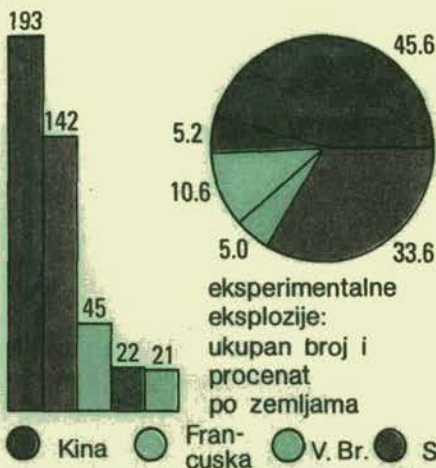
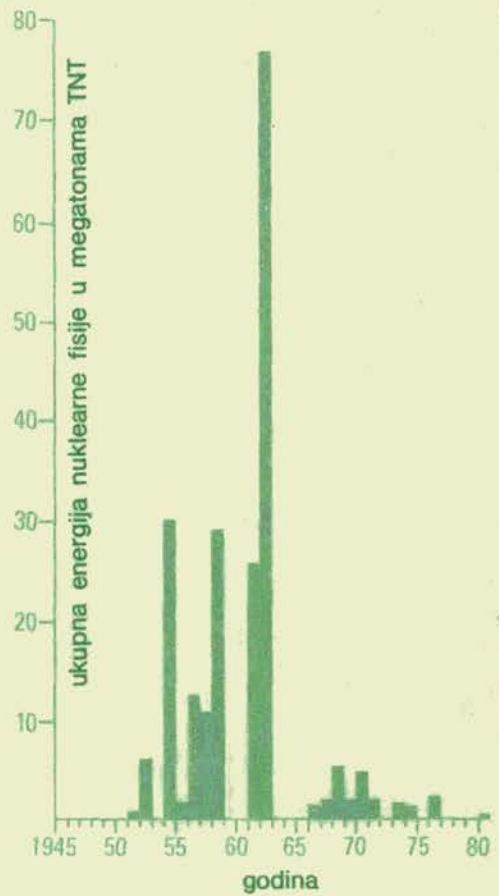
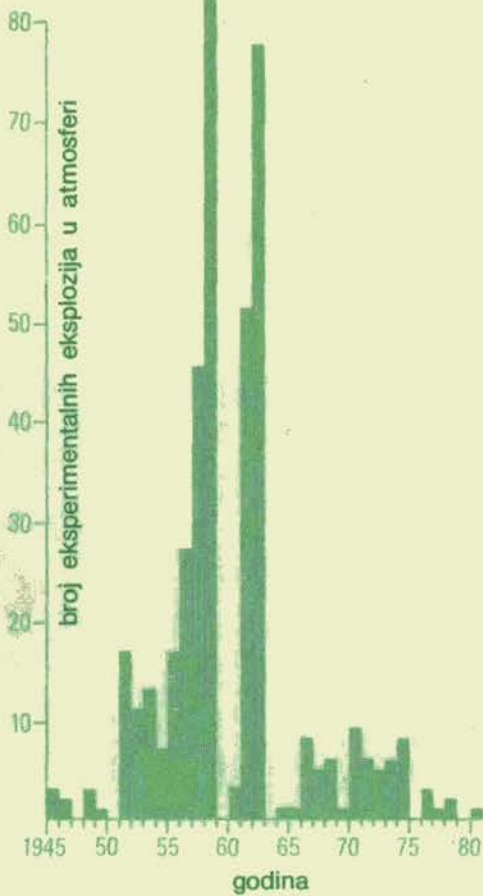
Godine 1963. SAD, Velika Britanija i Sovjetski Savez potpisali su ugovor o delimičnoj zabrani probnih nuklearnih eksplozija, kojim su se obavezali da ne isprobavaju nuklearno oružje u atmosferi, u okeanima i u vasionom prostoru. Otada su Francuska i Kina obavile niz proba daleko manjih razmera u atmosferi, čija je učestalost bivala sve manja — poslednja je izvršena 1980. Još i danas se vrše podzemne probne eksplozije, ali one, opšte uzev, ne dovode do radioaktivnih padavina.

Jedan deo radioaktivnih otpadaka od proba u atmosferi ne pada daleko od mesta eksplozije. Drugi deo se zadržava u troposferi, najnižem sloju atmosfere, a vetrovi ga raznose širom sveta, uglavnom u pojasu iste geografske širine; nošen vetrom, on postepeno pada na zemlju, zadržavajući se, u proseku, oko mesec dana u vazduhu (dijagram 4.8). Ali, najveći deo odlazi u stratosferu, viši sloj atmosfere (od 10 do 50 km naviše), gde se zadržava tokom mnogih meseci, a odakle se postepeno spušta u sve delove naše planete.

Ovi različiti tipovi padavina sadrže nekoliko stotina vrsta različitih radionuklida, od kojih samo neki utiču na stepen izloženosti ljudi

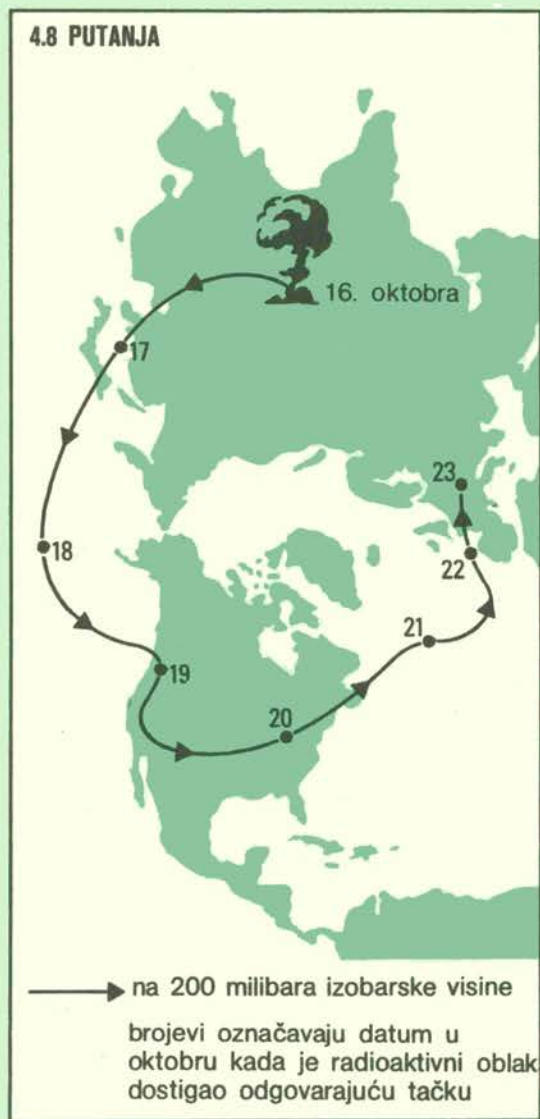
Ekperimentalne nuklearne eksplozije u atmosferi i ozračenost

4.7 EKSPERIMENTALNE NUKLEARNE EKSPLOZIJE U ATMOSFERI



● Kina ● Francuska ● V. Br. ● SAD ● SSSR

zračenju, budući da se većina njih stvara u veoma malim količinama ili brzo raspada. Samo četiri vrste povećavaju za više od 1 odsto neizbežnu kolektivnu efektivnu ekvivalentnu dozu kao posledicu nuklearnih eksplozija. Ti su radionuklidi, po opadajućem značaju: ugljenik-14, cezijum-137, cirkonijum-95 i stroncijum-90.



Troposferske padavine posle eksperimentalne nuklearne eksplozije u atmosferi od 16. oktobra 1980. Prikazana je samo jedna od nekoliko putanja koje su utvrđene na različitim izobarskim visinama

Doze ovih i drugih radionuklida dospevaju u organizme u različitim periodima, zbog toga što je brzina njihovog raspadanja različita. Tako, cirkonijum-95, koji ima vreme poluraspada od 64 dana, već je praktično „predao“ čitavu svoju dozu. Cezijum-137 i stroncijum-90 imaju, jedan i drugi, vreme poluraspada od oko 30 godina, tako da će najveći deo svojih doza „predati“ do kraja ovog veka. Samo ugljenik-14, čije je vreme poluraspada 5.730 godina, ostaće aktivan i u dalekoj budućnosti, mada će predavati niske doze; do 2000. godine on će predati samo 7 odsto svoje ukupne doze.

Godišnje doze su neposredno pratile eksperimentalne eksplozije koje su vrhunile 1958–1960. i, naročito, 1963–1964. (dijagrami 4.9, 4.10 i 4.11). Godine 1963. prosečne godišnje kolektivne doze dostizale su oko 7 odsto ekvivalentne izloženosti prirodnom zračenju; već 1966. one su pale na 2 odsto, a do početka osamdesetih godina na 1 odsto izloženosti prirodnoj radijaciji. Ako ne bude daljih eksperimentalnih eksplozija u atmosferi, buduće godišnje doze bivaće sve manje i manje.

Ove prosečne vrednosti skrivaju znatne varijacije. Severna hemisfera, gde je izvršen najveći deo eksperimentalnih eksplozija, primila je i najveći deo radioaktivnih padavina. Čobani krajnjeg severa, koji čuvaju irvase, primaju doze cezijuma-137 sto do hiljadu puta iznad normalnih, kao što primaju i više prirodnog zračenja; cezijum se koncentriše u lancu ishrane koji povezuje lišajevе i irvase. Na nesreću, neki ljudi koji žive u blizini eksperimentalnih poligona, kao što su neki stanovnici Maršalskih ostrva, a i japanski ribari na jednom brodu koji je tuda slučajno prošao, primili su visoke doze.

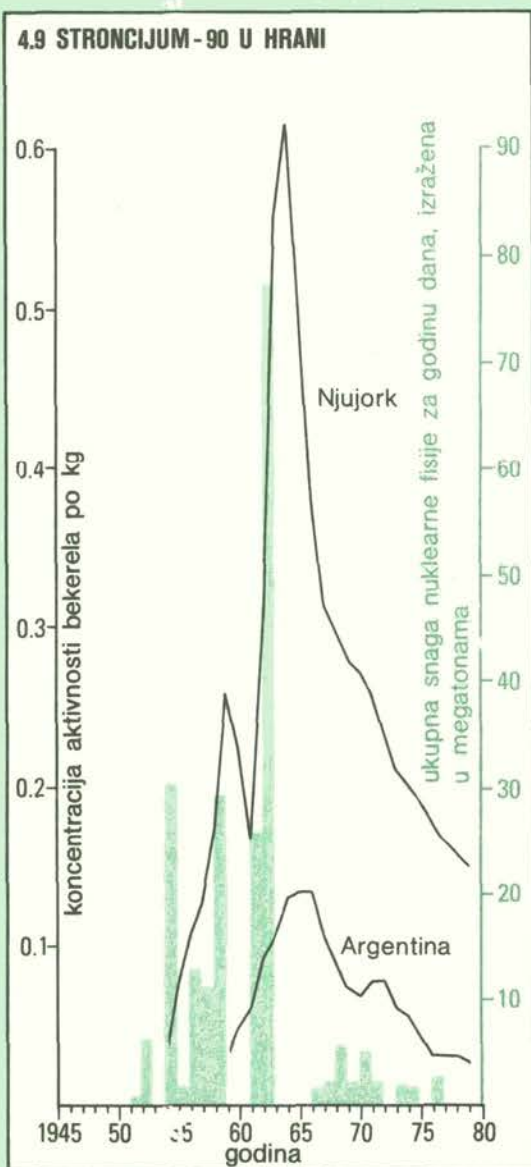
Ukupna angožava kolektivna efektivna doza usled zračenja od dosadašnjih nuklearnih eksplozija u atmosferi dostiže 30,000,000 čovek-siverta. Samo 12 odsto ove vrednosti predato je do 1980. godine, a ostatak će čovek primati tokom miliona godina.

Nuklearna energetika

Proizvodnja električne energije iz nuklearnih elektrana je najkontroverzniji od svih veštačkih izvora radijacije – ali izvor koji zasad vrlo malo doprinosi izloženosti stanovništva radijaciji.* Pri

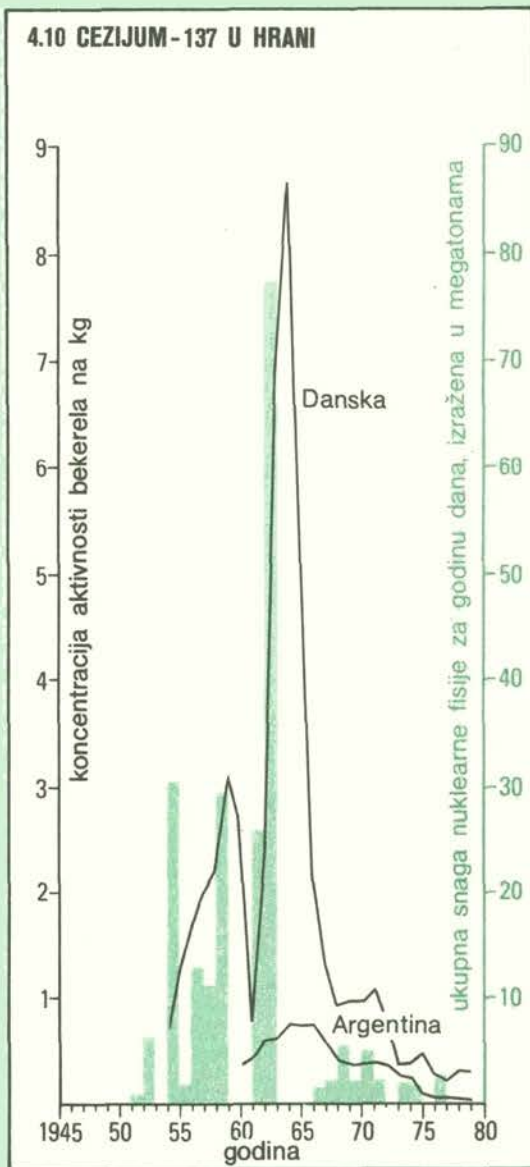
* Černobiška katastrofa zahteva ozbiljno preispitivanje procena opasnosti od nuklearno-energetskih postrojenja (prim. recenzenta).

4.9 STRONCIJUM -90 U HRANI



Nivoi stroncijuma-90 i cezijuma-137 u celokupnoj hrani, u odnosu na energiju iz eksperimentalnih eksplozija u atmosferi. Obratite pažnju na mnogo veću izloženost

4.10 CEZIJUM -137 U HRANI

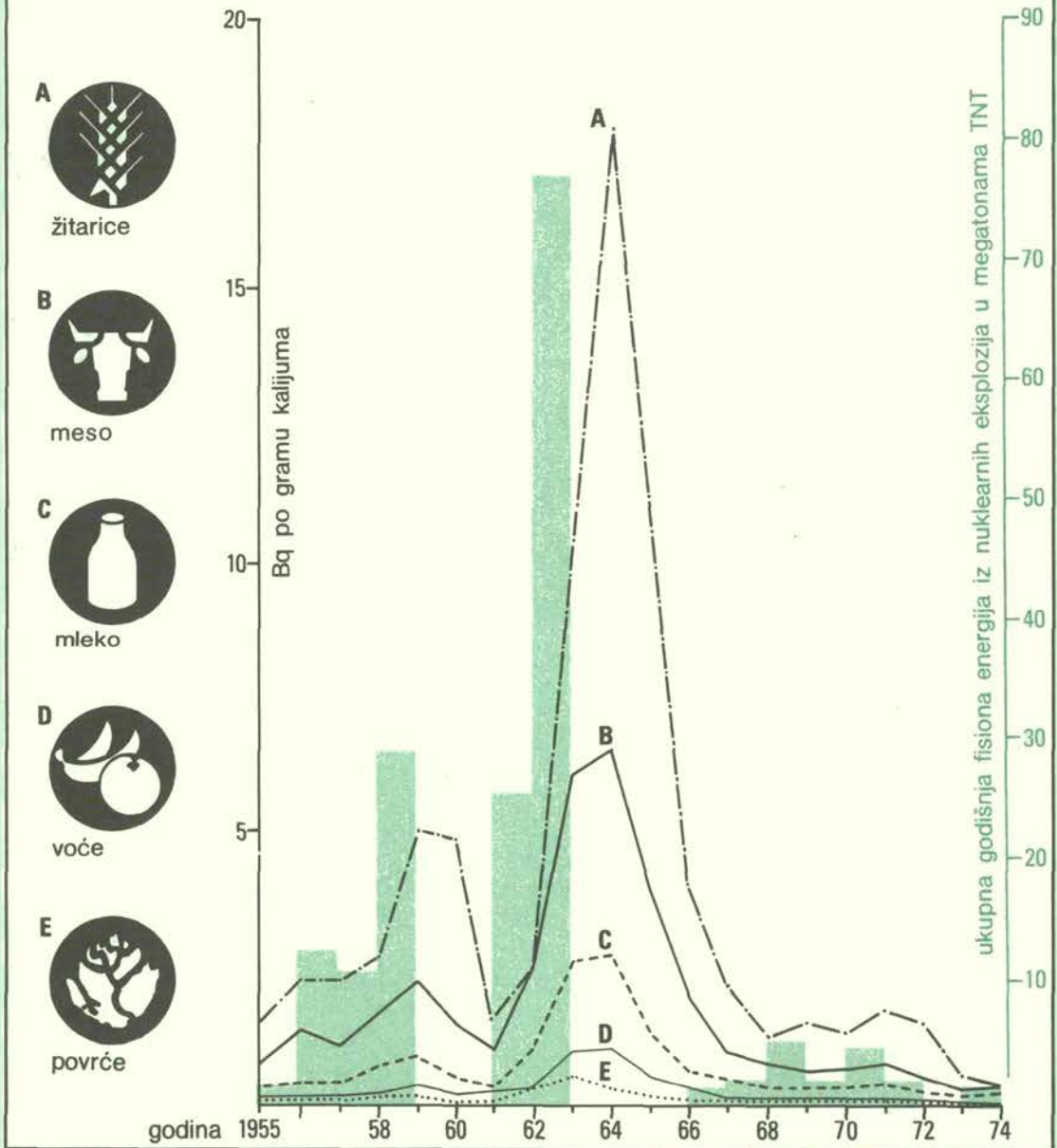


radijaciji severne (Njujork i Danska) nego južne hemisfere (Argentina)

normalnom radu, sa supstancama koje ispuštaju nuklearna postrojenja odlazi u okolinu vrlo malo radioaktivnih materija.

Do kraja 1984. godine bilo je u 26 zemalja širom sveta u pogonu 345 reaktora za proizvodnju energije. Oni su proizvodili 13 odsto

4.11 CEZIJUM-137 U NAMIRNICAMA



Sadržaj cezijuma-137 u raznim danskim namirnicama. Poređenja radi, prikazana je godišnja fisiona energija iz eksperimentalnih nuklearnih eksplozija u atmosferi

od ukupne količine proizvedene električne energije u svetu, sa ukupnim kapacitetom od 220 gigavata (dijagram 4.12). Taj se kapacitet udvostručio za samo nešto više od pet godina – ali buduće stope rasta su neizvesne. Naime, predviđanja nuklearnih kapaciteta pri kraju ovog

veka su tokom poslednjih godina u stalnom opadanju, pošto se stvarno povećavanje korišćenja nuklearne energije u odnosu na predviđeno usporava pod uticajem ekonomske recesije, mera za štednju energije i protivljenja javnosti. Prema najnovijem predviđanju Međunarodne agencije za atomsku energiju od 1983. godine, svetski kapacitet bi u 2000. godini iznosio 720 do 950 gigavata električne energije.

Nuklearne elektrane su samo sastavni deo kružnog ciklusa nuklearnog goriva, koji počinje sa kopanjem i drobljenjem uranijumove rude, a nastavlja se proizvodnjom nuklearnog goriva. Posle korišćenja u nuklearnim elektranama ozračeno gorivo se katkad prerađuje da bi se iz njega izdvojio uranijum i plutonijum. Na kraju se ciklus završava odlaganjem nuklearnog otpada (dijagram 4.14).

U svakoj fazi ovog ciklusa ispuštaju se radioaktivne supstance. UNSCEAR radi na proceni doza koje stanovništvo prima pri svakoj fazi ciklusa, kratkoročno i tokom mnogo stotina godina. Ali, proceniti te doze predstavlja složen i težak poduhvat. Pre svega, emisije radioaktivnih supstanci mogu da se razlikuju u širokom rasponu, čak i ako potiču iz sličnih instalacija; na primer, nivoi radioaktivnih gasova koji dolaze iz reaktora sa ključajućom vodom (BWR) mogu da se razlikuju od postrojenja do postrojenja i od jedne godine do druge, čak i za milion puta.

Doze radijacije su takođe različite na raznim mestima i u razna vremena. Opšte uzev, što ljudi žive dalje od određenog nuklearnog postrojenja, to je manja količina zračenja koje će iz njega primiti: i dok se neke instalacije nalaze u pustim predelima, druge su smeštene blizu centara najgušće naseljenosti. Te instalacije emituju mnoštvo različitih radionuklida, koji se raspadaju različitom brzinom. Većina njih deluje samo u lokalnim razmerama, zbog toga što se brzo raspadaju; drugi su međutim toliko dugovečni, da mogu da se prošire po čitavom svetu; neki pak ostaju praktično zauvek u prirodnoj sredini. Različiti radionuklidi se takođe različito ponašaju u prirodnoj sredini; pojedini se brzo šire, dok su drugi gotovo nepokretni.

Da bi ovladao ovom zbunjujućom situacijom, UNSCEAR je razvio hipotetičnu referentnu instalaciju za svaku fazu gorivnog ciklusa, projektovanu kao tipično postrojenje u tipičnom geografskom regionu, a okruženu stanovništvom sa tipičnom gustinom naseljenosti. UNSCEAR je takođe proučio informacije o kontrolisanom ispuštanju otpada iz nuklearnih postrojenja u svetu i tako dobio prosek ispuštanja

radioaktivnih supstanci za svaku gigavat-godinu proizvedene električne energije. Ove generalizacije pružaju određenu predstavu o opštem uticaju nuklearnog energetskog programa, ali se takve generalizacije očigledno ne mogu primenjivati bezrezervno na svako pojedinačno postrojenje. Takve generalizacije mogu se koristiti samo krajnje obazrivo, a ne smeju se direktno prihvatati, jer one zavise od velikog broja pretpostavki, koje su navedene u izveštaju UNSCEAR.

Oko polovine svetskih rezervi uranijumove rude dolazi iz površinskih kopova, a druga polovina iz podzemnih kopova. Ruda se kopa, pa onda, radi prerade, prevozi u fabrike, koje se obično nalaze u blizini. I rudnici i fabrike ispuštaju radioaktivne materije u prirodnu sredinu. Rudnici su, posmatrani kratkoročno, ti koji stvaraju gotovo čitavu kombinovanu dozu koja potiče od ovih dveju operacija. Ali, fabrike su odgovorne za jedan mnogo veći dugoročni problem: one proizvode velike količine otpadaka — 120 miliona tona nalazi se već uskladišteno na lokacijama aktivnih fabrika, uglavnom u Severnoj Americi. Ako se sadašnji trend nastavi, gomile ovih otpadaka će do kraja ovog veka narasti na 500 miliona tona.

Reč je o otpadu koji ostaje radioaktivan milionima godina po prestanku rada tih fabrika, koje, na taj način, svojim udelom najviše doprinose dugoročnoj izloženosti ljudi zračenju usled nuklearno-energetskih aktivnosti. Taj bi se udeo mogao, bar kratkoročno, znatno smanjiti, kad bi se ovaj otpad prekrivao asfaltom ili polivinil-hloridom. Takvi bi omotači morali, naravno, redovno da se zamenjuju novima.

Po izlasku iz fabrika, uranijum se, daljom preradom i prečišćavanjem, a obično i prolaženjem kroz postrojenje za obogaćivanje, pretvara u gorivo. Prilikom ovih procesa dolazi do ispuštanja radioaktivnih materija, kako gasovitih koje odlaze u vazduh tako i tečnih. Doze usled ovih ispuštanja su daleko manje od onih iz drugih delova gorivnog ciklusa.

Gorivo je sada spremno za korišćenje u reaktorima koji proizvode energiju. Od reaktora koji se danas nalaze u pogonu sledećih pet vrsta smatraju se najvažnijim: reaktori sa vodom pod pritiskom i reaktori sa ključajućom vodom, koji su prvobitno razvijeni u SAD, a sada su najrasprostranjeniji tipovi proizvodnih reaktora u svetu; reaktori hlađeni gasom, koji su razvijeni i danas se pretežno koriste u Velikoj Britaniji i Francuskoj; reaktori sa teškom vodom, pretežno ograničeni na Kanadu; i reaktori hlađeni običnom vodom sa grafitom kao moderatorom, koji su u upotrebi samo u Sovjetskom Savezu.

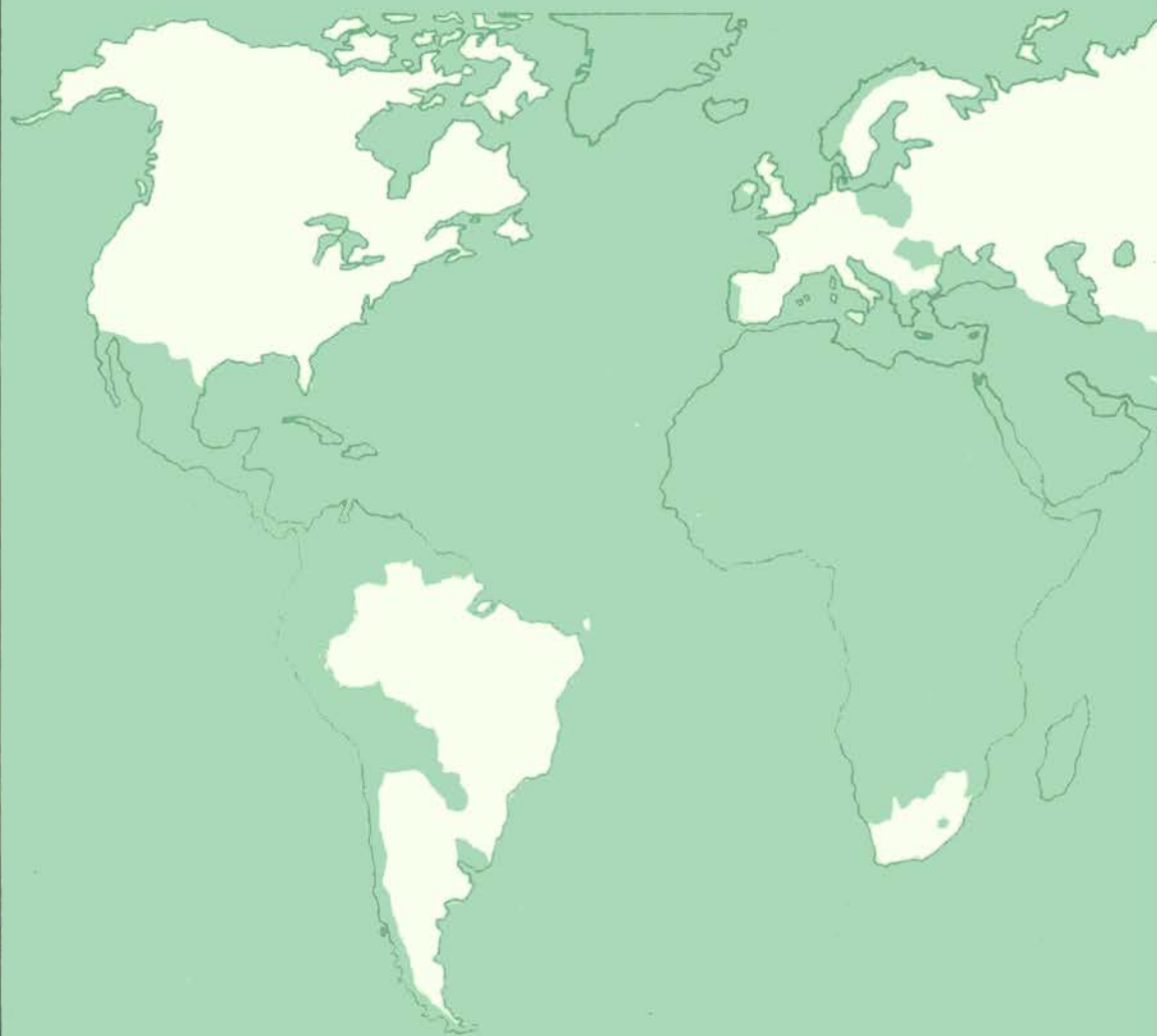
Osim ovih, postoje i četiri reaktora tipa brzog bridera, koji su predviđeni kao sledeća generacija nuklearnih elektrana u Evropi i u Sovjetskom Savezu.

Količine raznih vrsta radioaktivnih materija koje ovi reaktori ispuštaju razlikuju se u širokom rasponu, ne samo zavisno od tipa reaktora, već i od raznih rešenja istog tipa reaktora, pa čak se

4.12 SVET NUKLEARNE ENERGIJE

Zemlje sa nuklearnim energetske reaktorima u pogonu krajem 1984.

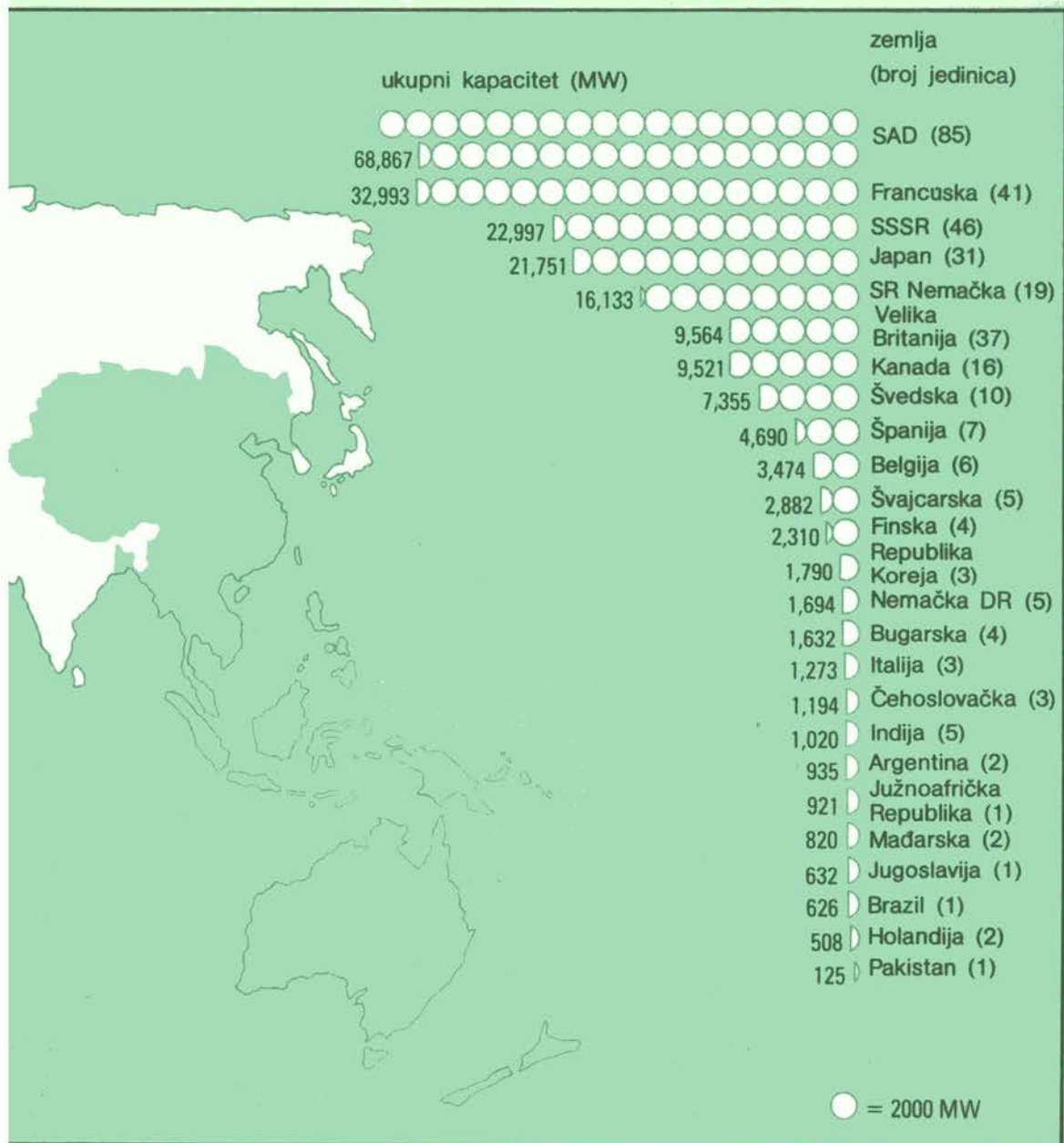
Izvor: godišnji izveštaj Međunarodne agencije za atomsku energiju za 1984. godinu



razlikuju i među pojedinim reaktorima istog rešenja. Štaviše, i isti reaktor u različitim godinama ispušta različite količine radioaktivnih materija, delimično zbog toga što je rad na

održavanju reaktora (koji dovodi do najvećeg rutinskog ispuštanja radioaktivnih materija) različitog obima u pojedinim godinama.

U poslednje vreme postoji tendencija ka

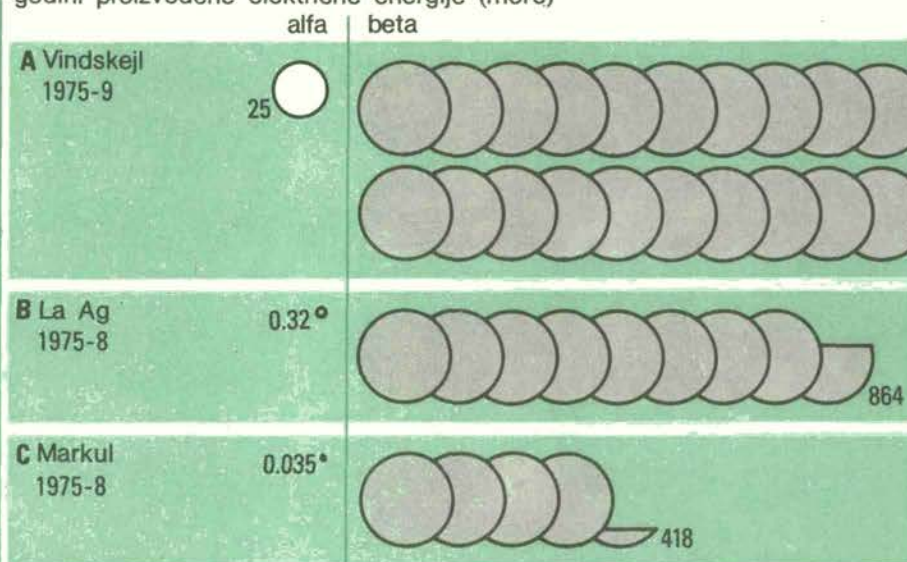


4.13 POSTROJENJA ZA PRERADU ISKORIŠĆENOG NUKLEARNOG GORIVA

lokacije



prosečno godišnje ispuštanje radioaktivnih supstanci u TBq po gigavat-godini proizvedene električne energije (more)



manjem ispuštanju radioaktivnih materija iz reaktora, iako se proizvodnja električne energije u postrojenjima povećava. Ovo je delimično rezultat tehnološkog poboljšanja, a delimično posledica strožih mera za zaštitu od radijacije.

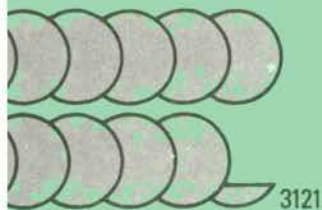
Posle korišćenja u elektranama, manje od jedne desetine svetskih količina ozračenog goriva biva prerađeno kako bi se iz njega izdvojili uranijum i plutonijum radi ponovne upotrebe. Danas se, koliko je poznato, nalaze u radu samo tri komercijalna postrojenja za prerađivanje nuklearnog goriva; dva se nalaze u Markulu i u La Agu u Francuskoj, a treće u Vindskejlu (Selafild) u Velikoj Britaniji. Markul, koji je pod naročito strogom kontrolom zbog toga što otpadne proizvode svog rada izbacuje u reku Ronu, daleko je najčistije postrojenje ove vrste. Od druga dva, koja otpadne proizvode izbacuju u more, Vindskejl mnogo više zagađuje prirodnu sredinu, iako veliki deo radioaktivnih materija koje ispušta ne potiče od same prerade nuklearnog goriva, već od korozije kontejnera u koje se ono smešta dok ne bude prerađeno.

U periodu od 1975. do 1979. godine ispuštanje radioaktivnih materija u Vindskejlu dovelo je do

više od tri i po puta veće beta-aktivnosti – a 75 puta veće alfa-aktivnosti – za svaku gigavat-godinu električne energije, nego u La Agu tokom istog perioda (dijagram 4.13).

U Vindskejlu je u međuvremenu znatno poboljšana situacija u pogledu ispuštanja radioaktivnih materija, ali tu je i danas veća zagađenost po jedinici prerađenog goriva nego u La Agu. Valja se nadati da će ispuštanje radioaktivnih materija iz budućih postrojenja za prerađivanje nuklearnog goriva biti znatno manje nego u ova dva postrojenja. Postoje idejni projekti koji predviđaju vrlo malo ispuštanje radioaktivnih materija u vodu, a UNSCEAR je zasnovao svoje referentno postrojenje na pretpostavljenom ispuštanju iz novog postrojenja planiranog za Vindskejl.

Dosad još nije izvršeno trajno odlaganje visoko-radioaktivnog otpada iz nuklearnih elektrana – što bi trebalo da predstavlja poslednju fazu gorivnog ciklusa. Zemlje koje ih proizvode zasad samo skladište radioaktivni otpad; u nekim zemljama odvija se istraživanje u cilju razvoja metoda za pretvaranje tog otpada u čvrsto stanje i njegovo odlaganje u stabilne



3121

prosečna kolektivna doza koju primaju radnici po čovek-greju na gigavat – godinu proizvedene električne energije

A Vindskejl: prosek 1971–1978

B La Ag: prosek 1972–1976



18



6

prosek angažovane kolektivne efektivne ekvivalentne doze iz mora, u čovek-sivertima po gigavat – godini proizvedene električne energije, 1975–1979.

A Vindskejl

B La Ag



124



53

geološke formacije na kopnu, odnosno na morskome dnu ili ispod morskog dna. Pretpostavlja se da jednom, kada visoko-radioaktivni otpad bude trajno odložen, praktično radioaktivne materije iz njega ne bi mogle dopreti do čoveka u doglednoj budućnosti. UNSCEAR nije procenjivao neizbežnu dozu za buduće generacije iz ovog otpada. Međutim, međunarodni tim za procenu gorivnog ciklusa je 1979. godine pokušao da predvidi sudbinu otpadnog materijala koji je bio odložen u podzemne slojeve. Procenjeno je da će proteći sto hiljada do milion godina pre nego što iole značajnije količine radioaktivnog materijala dospeju u biosferu.

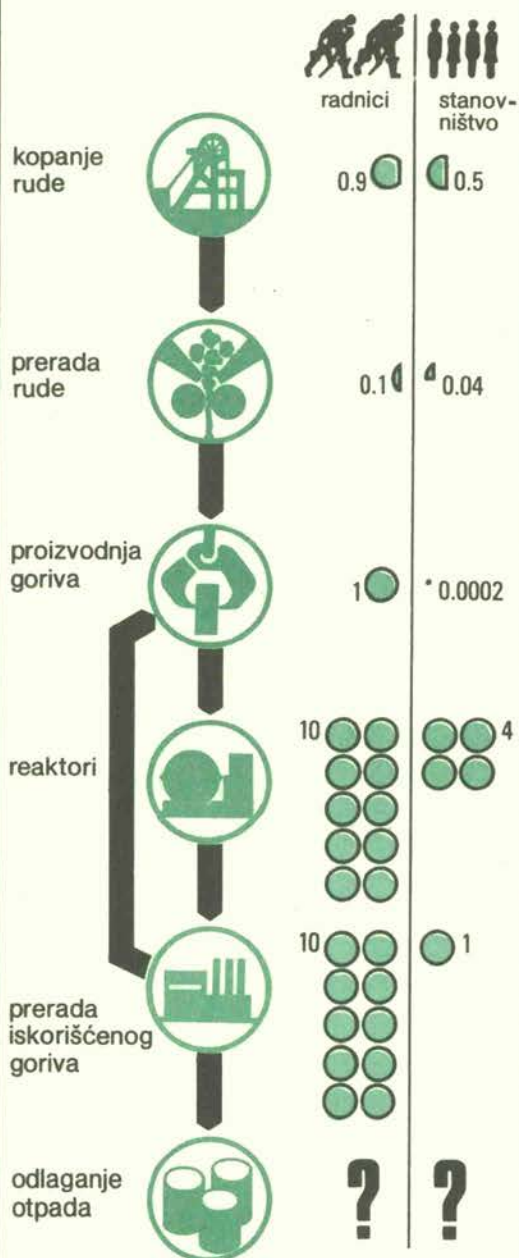
Sve u svemu, UNSCEAR procenjuje da pogoni gorivnog ciklusa doprinose kratkoročnoj angažovanoj kolektivnoj ekvivalentnoj dozi sa oko 5,5 čovek-siverta na svaku gigavat-godinu električne energije proizvedene u nuklearnim reaktorima (dijagram 4.14). Kopanje rude povećava izloženost za 0,5 čovek-siverta, a njena prerada za 0,04 čovek-siverta; proizvodnja goriva samo za 0,002 čovek-siverta. Nuklearni reaktori su odgovorni za najveći deo doze, pošto

je njihov udeo oko 4 čovek-siverta, dok je udeo prerade goriva jedan čovek-sivert. Brojka koja se odnosi na udeo ponovne prerade goriva dobijena je sabiranjem pretpostavljenih isticanja iz budućih postrojenja. Današnja postrojenja stvaraju doze koje su deset do dvadeset puta veće – ali, s obzirom na to da se u njima preraduje manje od 10 odsto svetskog goriva, njihov ukupni udeo je otprilike isti.

Devedeset odsto ove kratkoročne doze prenosi se u prirodnu sredinu u roku od godinu dana po ispuštanju radioaktivnih materija – 98 odsto u roku od pet godina. Gotovo čitavu ovu količinu prima lokalno stanovništvo i stanovništvo regiona u radijusu od nekoliko hiljada kilometara od ovih instalacija.

Pogoni gorivnog ciklusa ispuštaju i mnogo dugoživećih radionuklida koji se rasprostiru širom planete. Prema procenama UNSCEAR-a, angažovana kolektivna efektivna ekvivalentna doza iz ovog izvora iznosila bi 670 čovek-siverta za svaku gigavat-godinu proizvedene električne energije, od čega bi manje od 3 odsto bilo predato okolini tokom prvih 500 godina. Ovi dugoživeći radionuklidi predaju stanovništvu

4.14 GORIVNI CIKLUS



normalizovana angažovana kolektivna efektivna ekvivalentna doza u čovek-sivertima po gigavat-godini proizvedene električne energije

sveta otprilike istu godišnju prosečnu dozu kolika je ona koju kratkoživeći nuklidi predaju regionalnom i lokalnom stanovništvu, ali tokom mnogo dužeg perioda: 90 odsto ove doze biće predata u periodu između hiljadu i sto miliona godina posle ispuštanja. To znači da će ljudi koji žive u blizini nekog postrojenja pod normalnim okolnostima primati čitavu kratkoročnu dozu i mali deo dugoročne.

U ove brojke nisu uračunate doze koje potiču od otpadaka u fabrikama za preradu uranijumove rude i one od radioaktivnog otpada. Veruje se da je efekat odlaganja nuklearnog otpada zanemarljiv u periodu od sledećih nekoliko hiljada godina i da će njegov udeo ukupnoj angažovanoj dozi od nuklearne energetike iznositi samo 0,1 do 1 odsto. Ali, otpaci od prerade uranijumove rude će, bez sumnje, predstavljati krupan problem ako ne budu propisno pokriveni. Uzimajući u obzir ova dva izvora, ukupna angažovana efektivna ekvivalentna doza koja potiče od dugoživećih nuklida dostiže oko 4.000 čovek-siverta za svaku gigavat-godinu proizvedene električne energije. Ali, ove procene su veoma nesigurne. Drukčije i ne može da bude, jer je takva procena skopčana sa velikim teškoćama: naime, da bi se do tih procena došlo, treba ujedno predvideti buduće tehnike i praksu odlaganja nuklearnog otpada, brojnost stanovništva i njegove životne navike, pošto će najveći deo doze biti predat prirodnoj sredini tek posle 10.000 godina. Zbog toga UNSCEAR upozorava da ove brojke ne treba koristiti prilikom donošenja odluka i sugeriše da im ne treba pridavati veliki značaj.

Godišnja kolektivna efektivna doza koja je potekla od nuklearnog gorivnog ciklusa 1980. godine iznosila je oko 500 čovek-siverta. Do 2000. godine ona će se povećati na 10.000 čovek-siverta, a do 2100. godine na 200.000 čovek-siverta. S tim moramo da računamo, podemo li od pesimističke pretpostavke da u međuvremenu neće biti tehničkih poboljšanja i da će se nastaviti sadašnji nivo ispuštanja radioaktivnih materija u prirodnu sredinu. Ali, i u tom slučaju će prosečne doze dostizati samo mali deo izloženosti prirodnoj radijaciji, koje će se 2100. godine povećati na 1 odsto.

Nuklearni gorivni ciklus i doze u prirodnoj sredini i na radnim mestima koje potiču od raznih faza ovog ciklusa. Doze su izražene kao normalizovane angažovane kolektivne efektivne ekvivalentne doze u čovek-sivertima po gigavat-godini proizvedene električne energije

Pomenuli smo prosečne doze, ali ljudi koji žive u blizini nuklearnih instalacija primaju, naravno, doze koje su daleko iznad prosečnih. Tipične doze u blizini nuklearnih reaktora kreću se danas između jednog dela procenta i nekoliko procenata onih doza koje primamo iz prirodnih izvora. Doza koju su primili ljudi izloženi najvećem riziku u blizini Vindskejlja od ispuštanja cezijuma-137 tokom 1979. godine bila je verovatno manja od jedne četvrtine one doze koju su iste godine primili od prirodne radijacije.

Međutim, sve gornje brojke zasnivaju se na pretpostavci da nuklearne elektrane rade normalno; jer, ako dođe do udesa, mogu da budu ispuštene neuporedivo veće količine nuklearnog materijala. U svom poslednjem izveštaju UNSCEAR je pokušao da proceni te doze, ispitavši udes na ostrvu Tri Milje 1979. i onaj u Vindskejlju 1957. godine. Ispuštanje radioaktivnih materija na ostrvu Tri Milje bilo je manjih razmera, ali udes u Vindskejlju, kako je procenjeno, proizveo je angažovanu kolektivnu efektivnu ekvivalentnu dozu od 1.300 čovek-siverta. Komitet je, međutim, došao do zaključka da je nemoguće da se na osnovu ova dva udesa proceni opšti doprinos nivou zračenja usled ispuštanja radioaktivnih materija nesrećnim slučajem, bez obzira da li je reč o prošlim ili budućim nesrećama.

Izloženost radijaciji na radnom mestu

Najveće doze zračenja iz nuklearne energetike primaju oni koji u toj industriji rade. Kao i u svakoj drugoj industriji, najveća izloženost riziku je na radnom mestu.

Pokušaji da se procene doze primljene na radnom mestu nailaze na ogromne teškoće; uslovi se naime razlikuju u širokom rasponu, a o njima i nema dovoljno informacija. Stope izloženosti u nuklearnim postrojenjima razlikuju se kao i stope ispuštanja zračenja; a razni instrumenti koji se koriste za praćenje nivoa radijacije su tako konstruisani da obezbeđuju da radnici ne budu izloženi neprimerenim nivoima zračenja, pa stoga retko kad pružaju one informacije koje bi bile potrebne za tačno određivanje doza.

Procene izloženosti radijaciji u rudnicima i fabrikama za preradu uranijuma ukazuju na to da radnici na tim mestima primaju u proseku jedan čovek-sivert zračenja za svaku gigavat-godinu električne energije koja će od tog uranijuma biti proizvedena. I opet, rudnici su

odgovorni za oko 90 odsto ove doze, pri čemu su rudari koji rade u podzemnim kopovima, naravno, izloženi većim dozama nego oni u površinskim kopovima. Postrojenja za proizvodnju goriva verovatno takođe proizvode kolektivnu ekvivalentnu dozu od jednog čovek-siverta po gigavat-godini (dijagram 4.14).

Ove prosečne brojke kriju široki dijapazon doze; te su razlike još izraženije kad je reč o izloženosti radnika na nuklearnim reaktorima. Merenja na reaktorima sa vodom pod pritiskom, na primer, pokazuju da su se 1979. godine kolektivne doze po gigavat-godini električne energije međusobno razlikovale i za stotinu puta. Novije elektrane snižavale su doze u odnosu na one starije. U proseku, izgleda da većina tipova reaktora predaje godišnje efektivne ekvivalentne doze od 10 čovek-siverta po gigavat-godini.

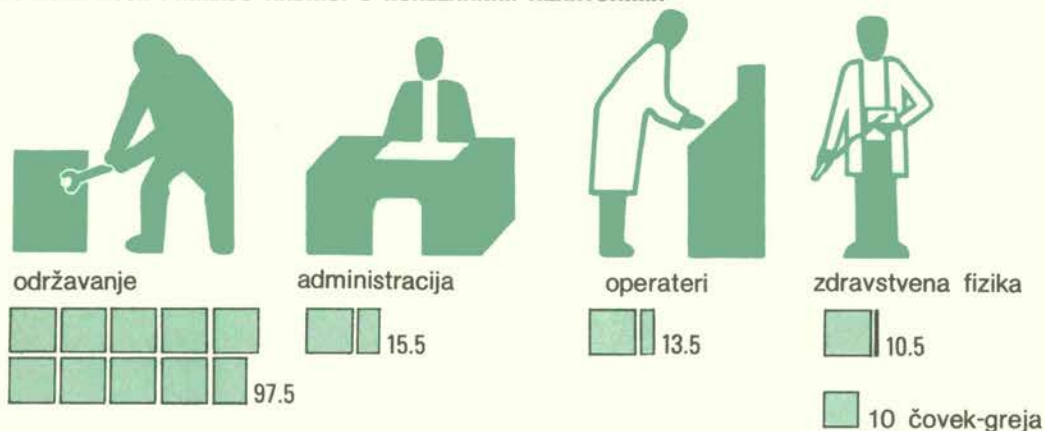
Radnici na različitim poslovima primaju različite doze (dijagram 4.15). Radnici na održavanju, bez obzira da li rade na rutinskom opsluživanju ili na nepredviđenim opravkama, primaju daleko najveći deo ove kolektivne doze — oko 70 odsto u reaktorima u SAD. Katkad bivaju angažovani radnici koji rade pod ugovorom kad treba obaviti naročito „prljave“ poslove. U SAD radnici pod ugovorom primaju polovinu ukupne kolektivne doze.

Veliki broj radnika prima značajne doze i na postrojenjima za preradu iskorišćenja nuklearnog goriva u Vindskejlju i u La Agu. I ovde postoji razlika između dvaju postrojenja; tokom sedamdesetih godina, Vindskejlj je stvarao prosečnu godišnju kolektivnu dozu od 19 čovek-siverta na gigavat-godinu, a to je tri puta više od nivoa u La Agu (dijagram 4.13). Ali, nova postrojenja za preradu iskorišćenog nuklearnog goriva će verovatno davati znatno niže doze. UNSCEAR procenjuje da bi 10 čovek-siverta po gigavat-godini moglo da predstavlja realnu globalnu vrednost u budućnosti.

Radnici angažovani na poslovima u nuklearnim istraživanjima i razvoju primaju doze koje se razlikuju u veoma širokom opsegu, zavisno od postrojenja i od zemlje. Kolektivne doze po jedinici proizvedene električne energije razlikuju se desetstruko od zemlje do zemlje; one su, na primer, niske u Japanu i Švajcarskoj, a visoke u Velikoj Britaniji. Realna globalna vrednost mogla bi da bude 5 čovek-siverta po gigavat-godini.

Ovim procenama povećava se godišnja ekvivalentna kolektivna doza za manje od 30 čovek-siverta za svaku gigavat-godinu proizvedene električne energije — što je 1979. godine iznosilo ukupno 2.000 čovek-siverta. To je

4.15 DOZE KOJE PRIMAJU RADNICI U NUKLEARNIM REAKTORIMA



Razne doze na različitim radnim mestima na nuklearnim reaktorima. Dijagram prikazuje godišnje prosečne kolektivne doze (u čovek-grejovima) koje su u periodu

između 1977. i 1979. primili radnici na reaktorima tipa PWR i BWR u SAD

oko 0,03 odsto od odgovarajuće doze iz prirodnih izvora.

Ali, ova brojka koja primljene doze na radnom mestu deli na čitavo stanovništvo, skriva činjenicu da radnici čiji je posao povezan sa radijacijom primaju na svom radnom mestu doze koje su veće od onih iz prirodnih izvora. Rudari u podzemnim kopovima rudnika uranijuma primaju najviše prosečne doze, koje su više od šest puta veće od proseka doza iz prirodnih izvora, a i radnici u Vindskeju sada se približavaju toj dozi. Rudari u površinskim kopovima i radnici u La Agu i u nuklearnim elektranama sa reaktorima tipa PWR, BWR i HWR primaju na radnom mestu prosečnu dozu koja je otprilike dvaput veća od one koju ljudi primaju iz prirodnih izvora. Samo radnici na reaktorima hlađenim gasom i u postrojenjima za proizvodnju nuklearnog goriva primaju prosečnu dodatnu dozu koja je otprilike iste veličine kao i prosek od prirodnog zračenja. Pa i te prosečne doze primljene na radnim mestu skrivaju velike individualne razlike.

Naravno, nisu samo radnici u nuklearnoj industriji ti koji na radnom mestu primaju doze proistekle od veštačke radijacije. Medicinsko osoblje i industrijski radnici su takođe izloženi zračenju. Izloženost medicinskog osoblja (dijagram 4.16) podrazumeva relativno niske prosečne doze, koje prima veliki broj radnika (takvih radnika ima u SAD najmanje 100.000, a

još više u Japanu i u SR Nemačkoj). Godišnje prosečne doze koje primaju zubari u raznim zemljama su čak i manje. Sve u svemu, procenjuje se da izloženost medicinskog osoblja koje radi u oblasti radiologije povećava za otprilike jedan čovek-sivert na milion ljudi kolektivnu ekvivalentnu dozu u zemljama sa visokim standardom zdravstvene zaštite.

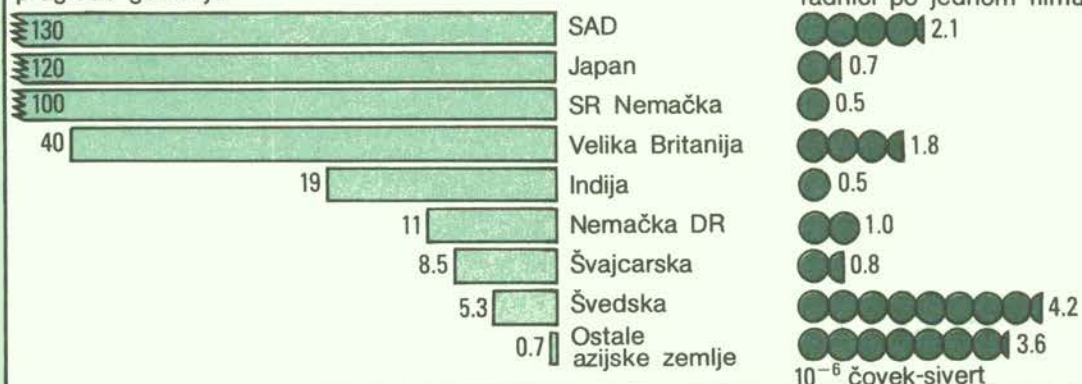
Korišćenje u industriji, opšte uzev, može da uzrokuje u industrijalizovanim zemljama povećanje radijacije godišnje kolektivne doze od još 0,5 čovek-siverta na milion stanovnika. Izgleda da su mnoge hiljade radnika izložene radijaciji, ali o tome se malo zna. Relativno mali broj radnika koji koriste radioaktivne materijale u izradi luminescentnih proizvoda prima visoke godišnje prosečne doze.

Radnici koji rade u industrijskoj radiografiji na gradilištima i sličnim radnim mestima koriste radijaciju pod prilično primitivnim uslovima. Preovladava uverenje da oni spadaju među radnike koji su najviše od svih izloženi zračenju, iako je teško pružiti za to čvrste dokaze. Svakako da za njih postoji najveća verovatnoća da u slučaju udesa budu izloženi suviše velikom zračenju.

Ima i radnika koji su na svom radnom mestu izloženi povećanim dozama prirodnog zračenja. Letačko osoblje čini najveću grupu takvih radnika: visina na kojoj rade povećava njihovu izloženost kosmičkim zracima. Oko 70.000

4.16 DOZE KOJE PRIMAJU MEDICINSKI RADNICI
milioni filmova korišćeni za rendgenske
preglede godišnje

godišnja efektivna
ekvivalentna doza koju
primaju medicinski
radnici po jednom filmu



Doze koje primaju medicinski radnici. Dijagram govori o efikasnosti mera predostrožnosti koje se preduzimaju u raznim zemljama, pokazujući kolika je prosečna

efektivna ekvivalentna doza koju medicinski radnici primaju po jednom razvijenom filmu.

članova posada aviona u SAD i 20.000 u Velikoj Britaniji prima u proseku dopunsku dozu prirodne radijacije od 1 do 2 milisiverta godišnje.

Daleko ispod njih, rudari u rudnicima uglja i metala takođe primaju povećane doze. Ove mogu da budu veoma različite — ali u nekim tipovima podzemnih kopova, i kada se ne radi o rudnicima uglja — takmiče se sa najvećim dozama koje primaju rudari u rudnicima uranijuma. U banjskim lečilištima sa mineralnim izvorima koji sadrže radon, kuda ljudi dolaze radi navodno blagotvornog delovanja ove vode, događa se da osoblje prima veoma visoke doze, koje ponekad premašuju 300 milisiverta godišnje, a to je šest puta više od međunarodno preporučene granice za radnike u nuklearnim postrojenjima.

Drugi izvori

Najzad, neki sasvim obični artikli koji se nalaze u širokoj upotrebi sadrže materije koje ljude izlažu radijaciji, a da oni toga često i nisu svesni.

Svetleći ručni satovi i budilnici stvaraju u svetskim razmerama najveću dozu takvog zračenja. Njihovo je delovanje tokom jedne godine četiri puta veće od ispuštanja radioaktivnih materija prilikom proizvodnje

nuklearne energije; kolektivna efektivna ekvivalentna doza koja od njih potiče jednaka je onoj od avionskog saobraćaja ili od izloženosti na radnom mestu ljudi koji su zaposleni u nuklearnoj industriji: 2.000 čovek-siverta (dijagram 4.18).

Da bi ručni satovi imali svetleće brojčanike, ranije se koristio radijum. Time je čitavo telo sopstvenika bilo izloženo prodornoj radijaciji — mada je doza 10.000 puta veća na 1 santimetar od brojčanika nego na udaljenosti od jednog metra. Sada se umesto radijuma u satovima najčešće upotrebljava tricijum ili prometijum-147, koji daju daleko manje doze. Međutim, krajem sedamdesetih godina u Velikoj Britaniji još je bilo u upotrebi 800.000 ručnih satova koji sadrže radijum. Godine 1967. objavljeni su međunarodni standardi za korišćenje radijuma u proizvodnji satova, ali se još nalaze u upotrebi mnogi satovi koji su možda proizvedeni ranije. Radionuklidi se takođe upotrebljavaju za obeležavanje ulaza i izlaza u prostorijama, za kompase, nišanske sprave, telefonske brojčanike i mnoge druge naprave.

U SAD se prodaju antistatički brisači sa alfa-česticama za uklanjanje prašine sa gramofonskih ploča i fotografskog materijala. Britanski Nacionalni odbor za radiološku zaštitu je 1975. godine utvrdio da sve ovo pod određenim uslovima može da bude opasno.

U mnogim detektorima dima takođe se koristi alfa-zračenje. Više od 26 miliona njih koji sadrže

i americijum-241, postavljeni su u SAD do kraja osamdesetih godina, ali oni prilikom normalne upotrebe uzrokuju samo minimalne doze. Radionuklidi se takode koriste u starterima za fluorescentne cevi i u nekim električnim uređajima. Samo u Zapadnoj Nemačkoj bilo je sredinom sedamdesetih godina u upotrebi oko sto miliona takvih proizvoda. Međutim, oni, ako nisu slomljeni, ne uzrokuju značajnije doze.

U nekim naročito tankim optičkim sočivima koristi se torijum, koji može da uzrokuje znatne doze u očnoj sočivu. Uobičajeno je korišćenje radijuma u zubnim protezama da bi veštački zubi bili sjajni: oni tako mogu da ozračuju tkiva u usnoj šupljini. Britanski Nacionalni odbor za radiološku zaštitu preporučio je da se ova primena uranijuma obustavi, a SAD i SR Nemačka, koje proizvode najveći deo porculana za zubne proteze, ograničavaju njegovu koncentraciju. Pošto primena radionuklida u

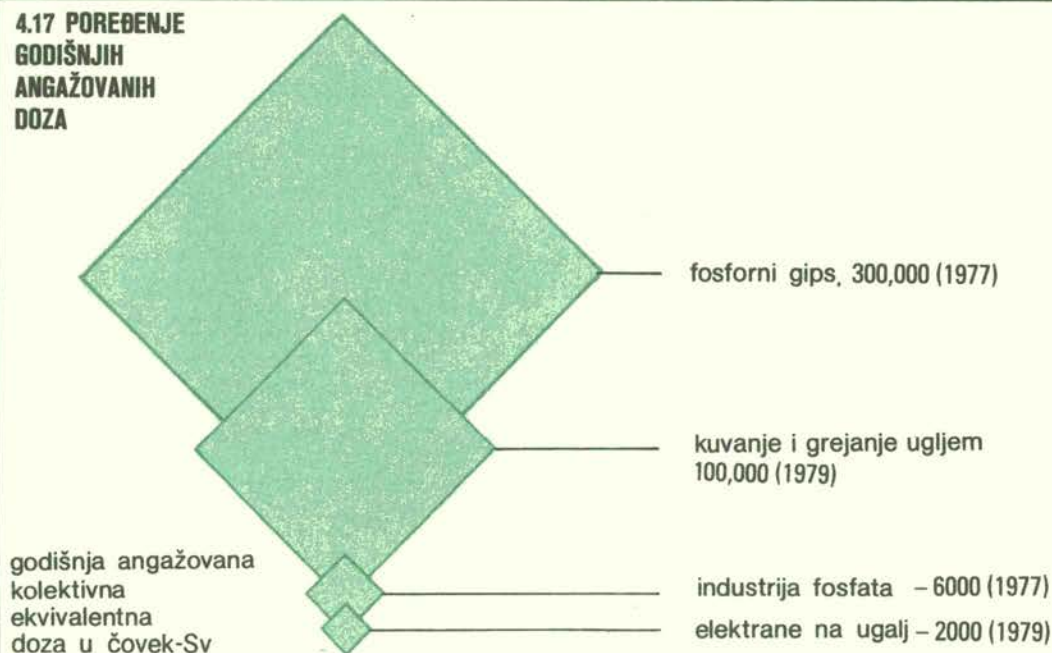
optičkim sočivima i zubnim protezama ima isključivo estetske razloge, potpuno je neopravdano izlaganje radijaciji koja od njih potiče.

U kolor-televizorima stvaraju se rendgenski zraci, ali moderni televizori, pod uslovom da se normalno koriste i održavaju, emituju samo zanemarljive količine opasnog zračenja. I rendgenski detektori na aerodromima uzrokuju kod putnika prilikom svakog putovanja samo minimalne doze ozračenosti. Mnogo više zabrinjava to što je pokazao pregled srednjih škola u SAD i Kanadi početkom sedamdesetih godina: u mnogim od tih škola korišćene su rendgenske cevi koje mogu da uzrokuju visoke doze zračenja, a većina nastavnika koji demonstriraju njihov rad znala je vrlo malo, ili ništa, o zaštiti od radijacije.

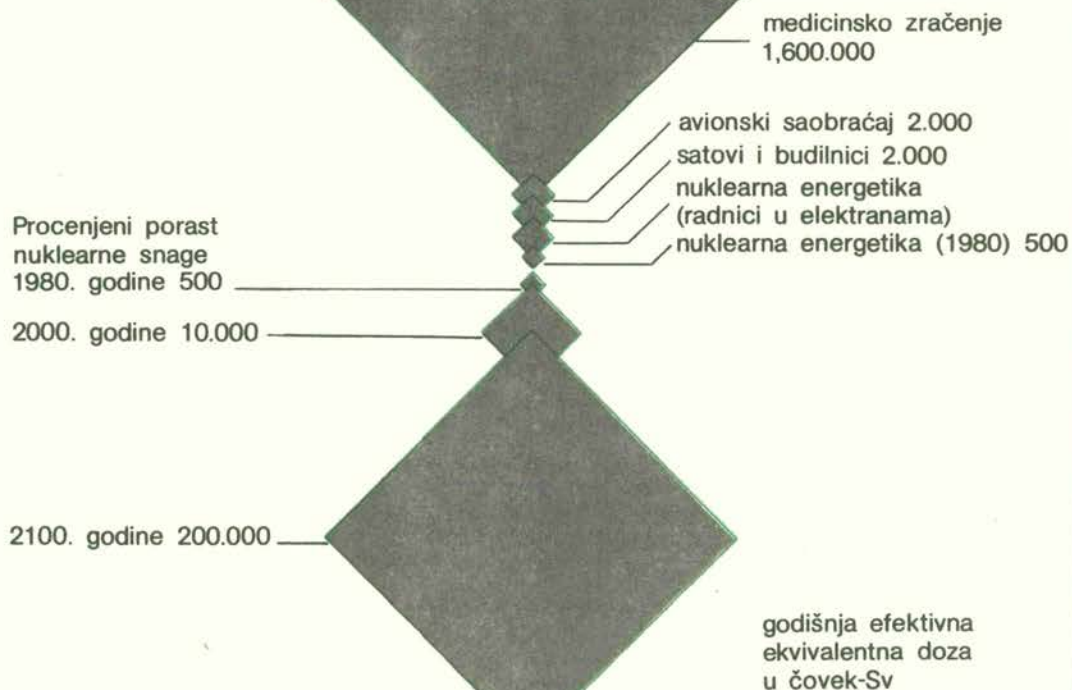
Poređenje doza iz različitih veštačkih izvora zračenja. Na ova dva dijagrama prikazane su, radi lakšeg poređenja, neke od doza navedenih u poslednja dva poglavlja. Na dijagramu 4.17 prikazane su angažovane kolektivne efektivne doze za određene godine, a dijagram 4.18 daje slično poređenje kolektivnih efektivnih

ekvivalentnih doza iz niza drugih izvora. Prikazano je i koliko se povećanje doza koje potiču od proizvodnje nuklearne energije očekuje kao posledica predviđene ekspanzije nuklearne industrije tokom sledećih 200 godina.

4.17 POREĐENJE GODIŠNJIH ANGAŽOVANIH DOZA

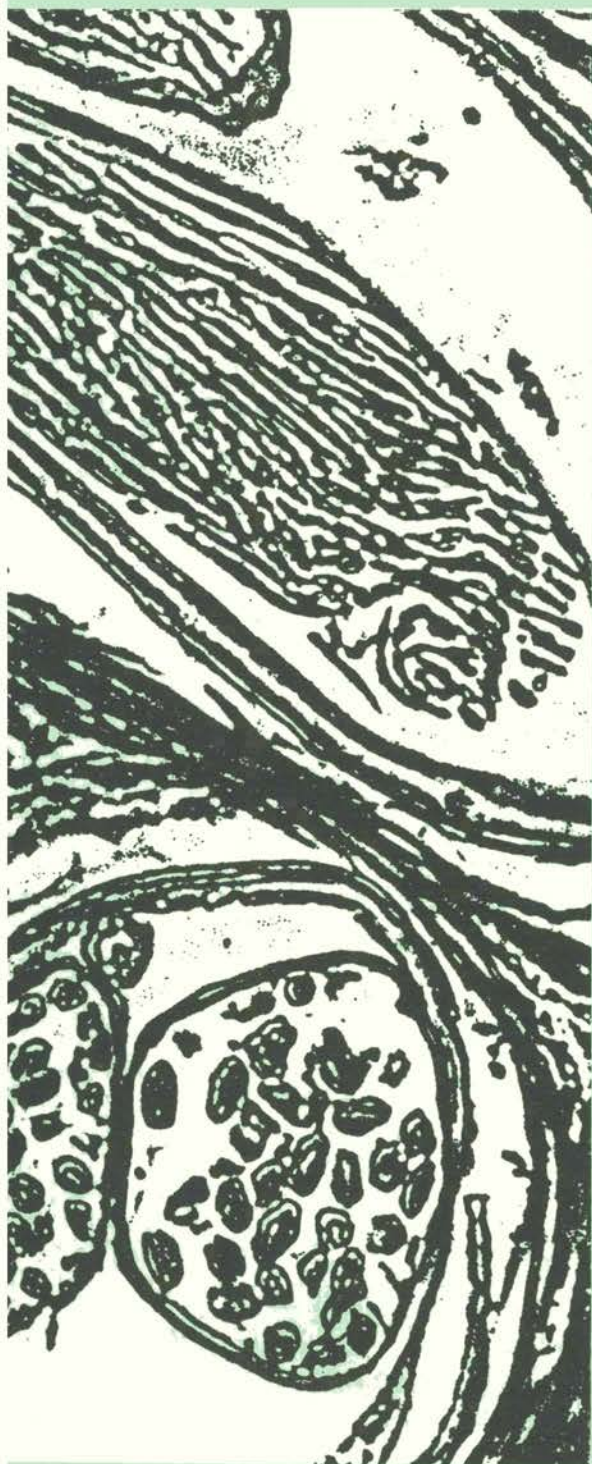


4.18 POREĐENJE GODIŠNJIH DOZA





Uticaj radijacije na čoveka



Radijacija je po samoj svojoj prirodi štetna po život. Već pri niskim dozama, ona može da pokrene samo delimično razjašnjen niz dejstava koja vode nastanku raka ili genetičkim oštećenjima (dijagram 5.1). Pri visokim dozama, pak, radijacija može da uništi ćelije, da ošteti organe i da izazove brzu smrt.

Oštećenja koja izazivaju visoke doze postaju u normalnim slučajevima očigledna već u roku od nekoliko časova ili dana. Ali, da bi se razvio rak, potrebno je mnogo godina, obično čak i više decenija. Nasledne deformacije i bolesti izazvane genetičkim oštećenjima – što im i samo ime kazuje – ispoljavaju se tek u narednim generacijama; žrtve su deca, unuci, pa čak i prauunci osoba koje su bile ozračene.

I dok je obično potpuno lako identifikovati neposredne akutne efekte visokih doza radijacije, uvek je krajnje teško raspoznati naknadne efekte niskih doza. To je tako, delimično zbog toga što je potrebno da prođe mnogo vremena da bi ti efekti postali приметni. Pa i onda, nije lako tačno odrediti krivca, zbog toga što i rak i genetička oštećenja nisu specifične posledice radijacije nego mogu da imaju i mnoge druge uzroke.

Potrebno je da doze radijacije dostignu određeni nivo da bi izazvale akutne povrede – ali ne i da bi uzrokovale rak ili genetička oštećenja. I najmanja doza, bar teorijski, može da bude dovoljna. *Znači da nema tog nivoa izloženosti radijaciji koji bi mogao da se označi kao bezbedan.* Ali, isto tako, ne postoji ni nivo koji bi bio u svakom slučaju jednako opasan. Čak i prilično visoke doze ne pogađaju svakoga; reparativni mehanizmi organizma obično „isceljuju“ ono što je bilo oštećeno. Isto tako, ako je neko bio izložen određenoj dozi radijacije, to još ne znači da mu je time neizbežno određeno da dobije rak ili da pretrpi genetska oštećenja; ali, takav rizik je kod njega veći nego što bi bio, da nije ozračen. I stopa rizika je utoliko veća, što je bila veća doza.

UNSCEAR nastoji da izračuna, što je moguće pouzdanije, sa kolikim su povećanim rizikom suočeni ljudi koji su primili različite doze radijacije. Verovatno ni o jednoj drugoj opasnosti po život i zdravlje nije bilo toliko istraživanja, kao o efektima radijacije. Ali, najmanje ima upotrebljivih informacija o dugoročnim efektima i o niskim dozama radijacije.

Akutni efekti

U svom nedavnom izveštaju, UNSCEAR je prvi put za oslednjih dvadeset godina dao iscrpan

pregled akutnih efekata visokih doza radijacije. Opšte uzev, opasnost se pojavljuje tek posle određenog minimuma doze ili „praga“ izloženosti radijaciji.

Velika količina informacija dobijena je zahvaljujući radioterapiji koja se primenjuje u lečenju raka. Tokom godina, medicina je mnogo naučila o tome kako ljudska tkiva reaguju na radijaciju. Među raznim delovima tela postoje ogromne razlike u reagovanju (dijagram 5.3). A veličina doze koja je potrebna da bi se izazvalo oštećenje zavisi od toga da li je doza primljena odjednom ili predstavlja zbir višekратно primljenih manjih doza. Većina organa je sposobna da do izvesne mere „popravi“ oštećenja od radijacije, pa stoga bolje toleriše niz manjih doza nego ukupnu toliku dozu primljenu odjednom.

Naravno, ako je doza vrlo visoka, ozračena

osoba će umreti. Opšte uzev, veoma visoke doze od recimo, 100 greja, toliko oštećuju centralni nervni sistem da smrt može da nastupi u roku od nekoliko časova ili dana (dijagram 5.2). Ako je čitavo telo primilo doze od 10 do 50 greja, žrtva ozračenosti može da izbegne takvu sudbinu, da bi zatim u roku od jedne do dve nedelje umrla od oštećenja želuca i creva. Ako su primljene doze bile niže, čovek može da izbegne oštećenje želuca i creva ili da se oporavi od njih — ali da ipak umre posle jednog do dva meseca, najčešće usled štete nanete koštanoj srži, krvotvornom tkivu; ako je čitavo telo primilo dozu od 3 do 5 greja, ishod će biti smrtonosan za polovinu ljudi koji su primili tolike doze. Znači, dakle, da se višim dozama samo ubrzava umiranje. Veoma često se, naravno, događa i to da se kombinacija ovih uslova pokaže fatalnom. Čitava oblast efekata radijacije predstavlja

5.1 KAKO RADIJACIJA POGAĐA TKIVA



Naelektrisane čestice. Kada alfa i beta-čestice prodiru u tkiva, one gube energiju usled električnih interakcija sa elektronima atomâ blizu kojih prolaze (gama-zraci i rendgenski zraci prenose energiju na razne načine, ali dovode i do električne interakcije).



Električne interakcije. Tokom desetobilionitog dela sekunde, pošto radijacija pogodi jedan atom u tkivu, od ovoga se odvaja jedan elektron. Elektron je negativno naelektrisan, i stoga ostatak ranije neutralnog atoma postaje pozitivno naelektrisan. Ovaj proces je poznat kao „jonizacija“. Taj elektron može zatim da nastavi da jonizuje druge atome.



Fizičko-hemijske promene. I elektron i jonizovani atom su obično vrlo nestabilni, pa tokom sledećeg desetomilijarditog dela sekunde prolaze kroz složeni lanac reakcija. Ovi stvaraju nove molekule, uključujući veoma reaktivne molekule poznate pod nazivom „slobodni radikali“.



Hemijske promene. Tokom sledećeg milionitog dela sekunde ovi slobodni radikali mogu da interaguju međusobno ili sa drugim molekulima i, usled procesa koji još nisu potpuno razjašnjeni, mogu dovesti do promena u molekulima koji su biološki važni za funkcionisanje ćelija.



Biološke posledice. Biološke promene, koje mogu da se pojave u bilo kom vremenskom intervalu, od nekoliko sekundi do više decenija posle ozračivanja, mogu odmah da unište ćelije ili da ih izmene na načine koji mogu da vode nastanku raka i da imaju genetske posledice.

značajan predmet proučavanja zbog toga što su informacije o tim efektima potrebne da bi se predvidele posledice nuklearnog rata, a i visokih doza radijacije kojima je stanovništvo izloženo prilikom udesa na nuklearnim postrojenjima.

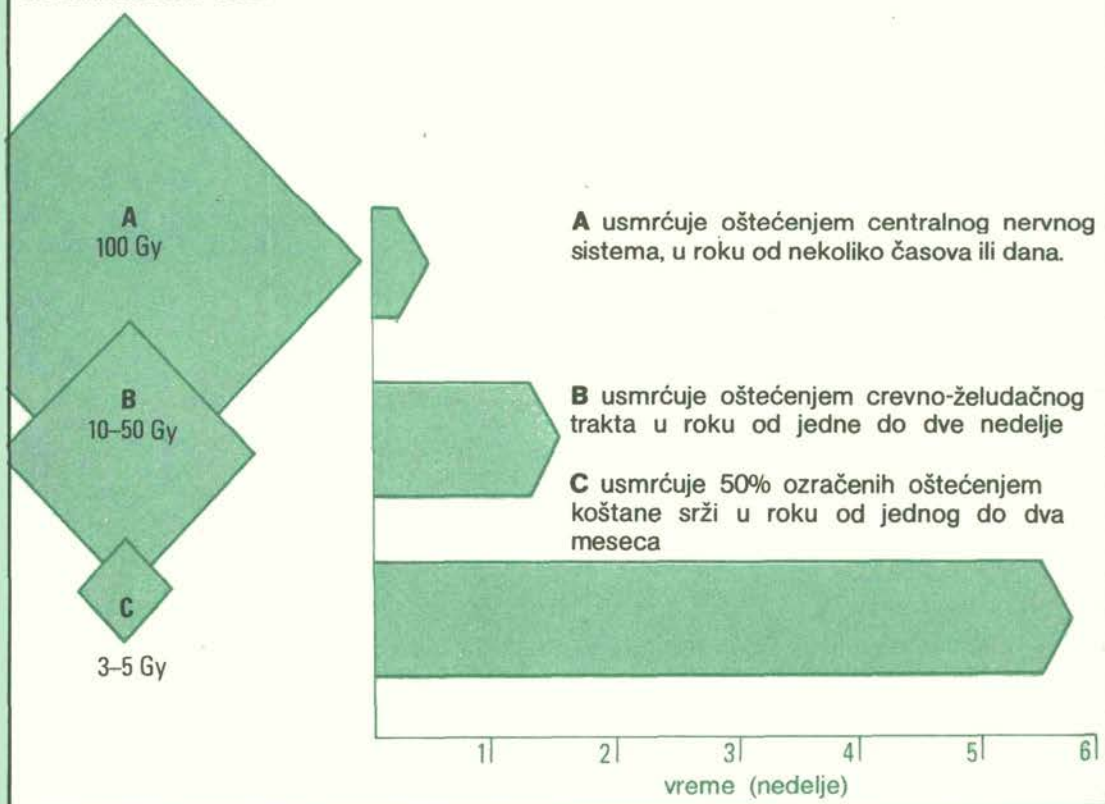
Koštana srž i ostali deo krvotvornog sistema spadaju među najosetljivije delove tela na koje utiču i tako male doze kao što su one od 0,5 do 1 greja. Sreća je, međutim, što ova tkiva imaju i izrazitu sposobnost regeneracije, pa kad doza nije tako velika da bi eliminisala njihovu normalnu funkciju, ona mogu potpuno da se oporave. Ako je samo deo tela bio ozračen, u normalnim slučajevima će ostati neoštećeno dovoljno koštane srži da bi zamenila onu koja je oštećena.

Reproduktivni organi i oči takode su izuzetno osetljivi. Događa se da muškarci ostanu privremeno sterilni i od tako malih doza kao što je 0,1 grej koje su primili njihovi testisi, dok

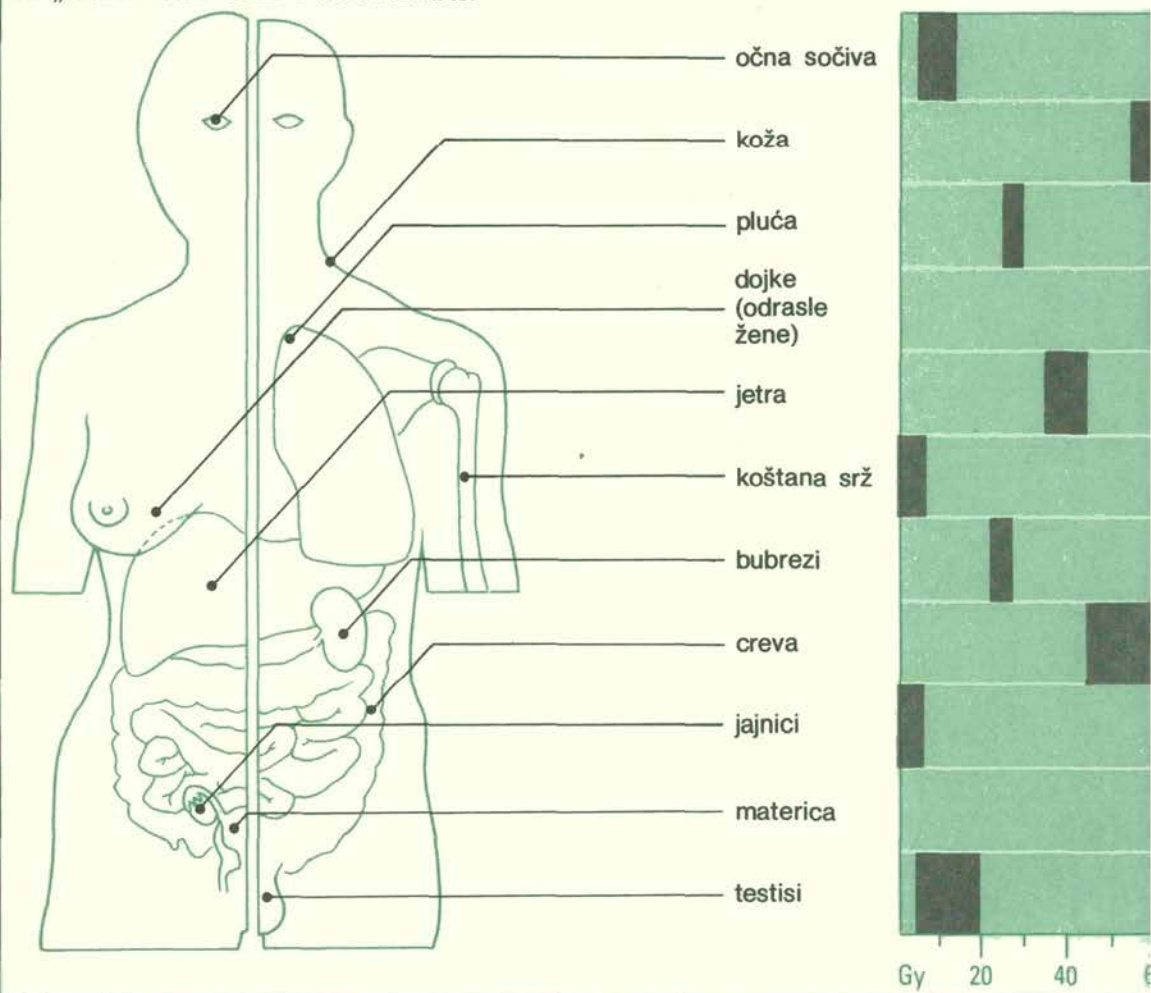
doze od preko 2 greja mogu da uzrokuju trajnu sterilnost. Testisi, inače, predstavljaju jedinstven primer organa koji trpi veća — a ne manja — oštećenja ako višekratno primi niz manjih doza nego čitavu dozu odjednom; događa se da tek mnogo godina posle primljenih doza koje su ih ozbiljno oštetile, testisi ponovo počnu normalno da proizvode spermatozoide. Jajnici su nešto manje osetljivi, bar kod odraslih žena. Kod njih pojedinačne doze od preko 3 greja izazivaju sterilnost, mada takva posledica neće nastupiti ako je u pitanju niz manjih doza, u kom slučaju njihov zbir može da bude čak i veći od 3 greja.

Očno sočivo je deo oka koji je najosetljiviji na radijaciju. Kako njegove ćelije izumiru, one postaju mutne, i kad se mutni delovi prošire, to može da dovede do katarakta i potpunog slepila. Što je veća doza, veći je i gubitak vida. Pojedine doze od 2 greja, pa i manje, mogu da stvore

5.2 SMRTONOSNE DOZE



5.3 „PRIHVATLJIVE” DOZE U RADIOTERAPIJI

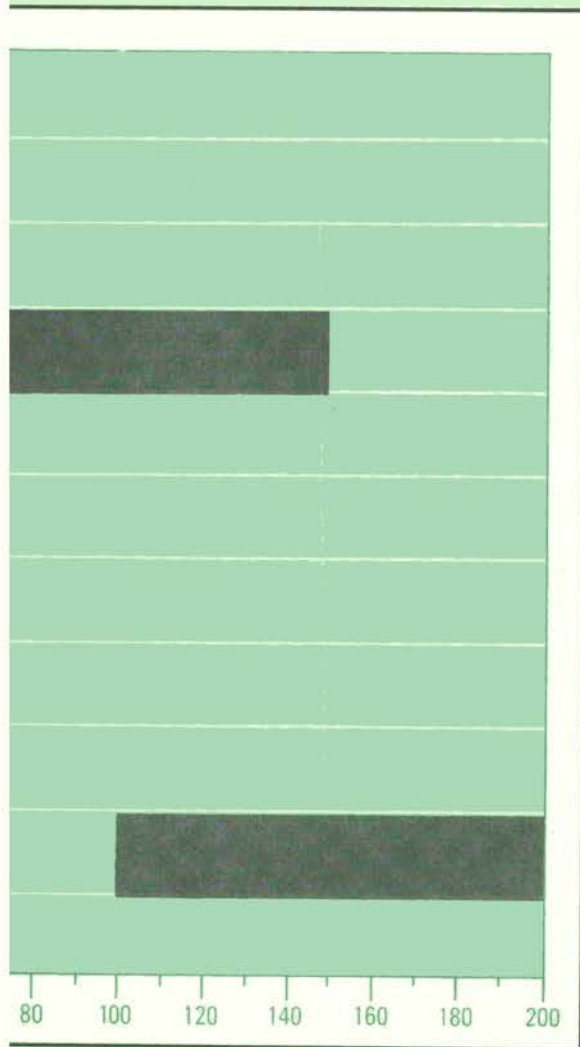


Doze naznačene u ovom dijagramu, modifikovane od strane P. Rubina i G. V. Kasareta (G. W. Casarett) u Patologiji kliničkog zračenja (Sonders, Filadelfija, 1968), mogu da se smatraju prihvatljivim ako se daju pacijentima pet rata tokom jedne nedelje. Definiciju

„prihvatljivosti“ dali su autori, a ne UNSCEAR, a potpunija tabela njihovih zaključaka data je u izveštaju UNSCEAR-a za 1982. godinu. Dijagram daje grubu ilustraciju različite osetljivosti pojedinih organa i tkiva.

zamućenja, a doze od 5 greja stvaraju ozbiljne katarakte, čiji razvoj napreduje. Pokazalo se da i izloženost radijaciji na radnom mestu može da ima posledice po vid; izloženost dozama od 0,5 do 2 greja tokom 10 do 20 godina povećava gustinu i zamućenost sočiva.

Deca su posebno osetljiva. Sasvim male doze, ako ih apsorbuje rskavičavi deo skeleta, može kod njih da uspori ili zaustavi rast skeleta i da dovede do deformiteta. Što je mlađe dete, to je ozbiljniji zastoj u razvoju: ukupne doze od 10 greja, akumulirane iz dana u dan tokom



demenciju, odnosno idiotizam. Međutim, kosti i mozak kod odraslih ljudi mogu da tolerišu mnogo više doze.

I kod nerođene dece veoma lako dolazi do oštećenja mozga, ako su njihove majke bile ozračene u periodu između osme i petnaeste nedelje trudnoće. To je period u kome se formira korteks mozga, pa stoga postoji veliki rizik da radijacija iz takvih izvora kao što su rendgenski aparati izazove tešku mentalnu retardaciju. Oko tridesetoro dece koja su bila ozračena u majčinoj utrobi kada su bačene atomske bombe na Hirošimu i Nagasaki, pretrpelo je takva oštećenja. Iako su individualni rizici veliki — a efekti takvih oštećenja naročito dramatični — broj žena koje se zateknu u tom stadijumu trudnoće u bilo koje vreme predstavlja samo mali deo stanovništva. Ovo je, međutim, najteži poznati efekat ozračivanja nerođene dece — mada su utvrđeni i mnogi drugi efekti, kao što su deformiteti, zastoj u rastu, pa i umiranje, kod životinjskih fetusa i embriona.

Većina tkiva kod odraslih ljudi je relativno otporna u svom reagovanju na radijaciju. Bubrež može da podnese oko 23 greja tokom pet nedelja bez većih znakova oštećenja; jetra može da toleriše oko 40 greja, primljenih tokom mesec dana; bešika oko 55 greja akumuliranih za isto vreme, a rskavičavi deo kostura kod odraslih ljudi čak i do 70 greja. Mnogo su osetljivija pluća, koja su naročito složen organ, a male ali potencijalno značajne promene mogu da se pojave na krvnim sudovima i kod sasvim niskih doza.

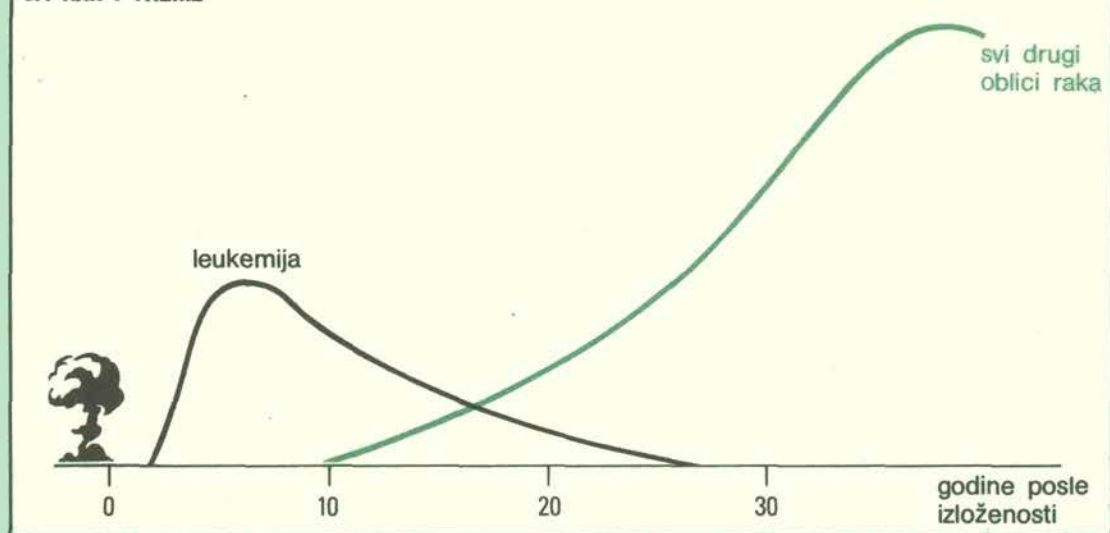
Naravno da terapijske doze — kao i svaka druga doza — mogu kasnije u životu da izazovu tumore ili da utiču na potomstvo. Međutim, terapijske doze se normalno daju radi lečenja raka osobama čija je očekivana stopa preživljavanja kratka i pacijentima koji su odveć stari da bi još mogli imati decu. U tom slučaju je rizik očigledno prihvatljiv. Međutim, rizik od takvih dugoročnih posledica kod izloženosti daleko nižim dozama u normalnim životnim situacijama, a posebno na radnom mestu, zadaje mnogo više teškoća naučnicima i stvara mnogo veće kontroverze u javnom mnenju.

Rak

Rak je daleko najteža posledica ozračenosti niskog nivoa — bar kad su u pitanju osobe direktno izložene takvoj radijaciji. U stvari, obimna ispitivanja na oko 100.000 ljudi koji su bili ozračeni, ali su preživeli eksploziju atomskih

nekoliko nedelja, dovoljne su da bi uzrokovale neki deformitet. U stvari, za ovaj efekat zračenja možda uopšte ne postoji prag doze. Slično tome, ozračivanje detetovog mozga tokom radioterapije izaziva promene u karakteru, gubitak pamćenja i, kod sasvim male dece, čak i

5.4 RAK I VREME



Nominalni rizik od raka koji bi se pojavio kao posledica jedne jedine doze od jednog rada (stoti deo greja), kojom bi bilo ravnomerno ozračeno čitavo telo. Dijagram, koji je zasnovan na istraživanjima o stanovništvu koje je preživelo eksploziju atomske bombe, pokazuje približno vreme pojavljivanja malignih promena posle ozračivanja čitavog tela. Najpre se pojavljuje leukemija, posle latentnog perioda od dve godine;

vrhunac je posle šest do sedam godina, a sve se manje javlja dok ne iščezne posle 25 godina. Čvrsti tumori počinju da se javljaju posle 10 godina, ali istraživači još ne raspolažu sa dovoljno informacija da bi se ova kriva dopunila. Dijagram potiče iz jednog naučnog saopštenja V. K. Sinklera (W. K. Sinclair) u dokumentima sa Dvadesete godišnje konferencije Nacionalnog saveta za zaštitu od radijacije i merenja, održane 4-5. aprila 1984.

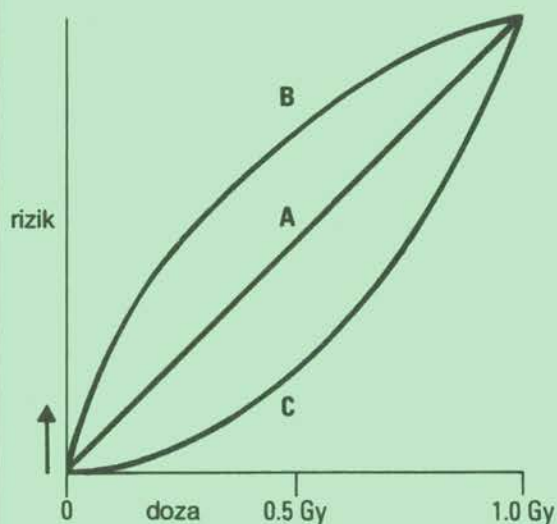
bombi bačenih 1945. na Hirošimu i Nagasaki, dosad su pokazala da je rak jedini uzrok njihovog povećanog mortaliteta.

U svojim naporima da proceni rizik od pojave raka, UNSCEAR se u velikoj meri oslanja na studije o stanovništvu koje je preživelo atomsko bombardovanje. Komitet se poslužio i rezultatima drugih istraživanja o stopi rasprostranjenosti raka među stanovnicima pacifičkih ostrva koji su bili kontaminirani radioaktivnim padavinama prilikom probne eksplozije atomske bombe 1954. godine, kao i podacima o rasprostranjenosti raka među rudarima u rudnicima uranijuma i među osobama koje su primale radioterapiju. Ali, jedino u studijama o Hirošimi i Nagasakiju je tokom više od 30 godina neprekidno praćen veliki broj osoba svih životnih doba koje su u gotovo jednakoj meri bile izložene ozračivanju čitavog tela.

Pa ipak, iako su sprovedena ova ispitivanja, još i danas raspolažemo samo ograničenim informacijama o raku kod ljudi koji se razvio

kao posledica radijacije. Mnoštvo podataka o eksperimentima na laboratorijskim životinjama kojima istraživači raspolažu, svakako je korisno, ali ne može da zameni informacije o tome šta se stvarno događa sa ljudima. Da bismo došli do valjanih procena rizika sa kojima su ljudi suočeni, potrebno je da podaci o ozračenim ljudima ispunjavaju čitav niz uslova. Moramo da znamo kolika je doza radijacije apsorbovana. To bi morala da bude doza koja je dovoljno ravnomerno raspodeljena po čitavom telu ili bar u onom delu tela koji proučavamo. Bilo bi potrebno da zdravstveno stanje ozračenih bude praćeno tokom decenija kako bi bilo dovoljno vremena da se rak iskaže. Dijagnoza mora da bude dovoljno pouzdana da bi otkrila sve slučajeve raka. Naročito je važno postojanje i „kontrolne“ grupe ljudi, koja se u svakom relevantnom pogledu može uporediti sa grupom koja se proučava, izuzev činjenice da ta grupa nije bila ozračena; tako bi se videlo koliko bi se slučajeva raka pojavilo i bez te radijacije. Potrebno je da obe grupe budu dovoljno brojne

5.5 DOZE I POSLEDICE



Zavisnost rizika od doze. Na osnovu proučavanja stanovništva koje je preživelo eksploziju atomske bombe i drugog ozračenog stanovništva, približno nam je poznat rizik za pojavu raka usled primljene ekvivalentne doze zračenja od jednog greja. Znamo, naravno, i to da bi rizik od izlaganja „nultom ozračavanju“, ako bi tako nešto bilo moguće, bio takođe nula. Ali mi malo znamo o efektima srednjih doza, pa stoga moramo pokušati da izvedemo procene rizika od niskih doza na osnovu onoga što znamo o rizicima od visokih.

Dijagram prikazuje razne načine na koje se to može da izvede. Uopšteno rečeno, tri vrste linija mogu da se povuku između tačaka za zračenje od nule i jednog greja (pretpostavljajući, kao što to čine UNSCEAR i druga tela, da ne postoji prag doze i da će stoga svako povećanje doze dovesti do povećanog rizika od raka, ma koliko to povećanje bilo malo). Jedna linija (A) je prava, i njom je grafički predstavljena pretpostavka da se rizik stalno povećava u direktnoj srazmeri sa dozom. Druga (B) je konveksna i ona sugerise da se rizik kod niskih doza naglo povećava, a kod visokih sporije. Treća (C) je konkavna, i ona govori obrnuto, da se rizik kod malih doza tek postepeno povećava, a kod visokih brže. UNSCEAR, kao i druga tela koja se bave ovim proučavanjima, pretpostavlja da se rizik povećava linearno, što je grafički predstavljeno linijom A.

da bi se dobili adekvatni statistički podaci. Nijedna od dosadašnjih studija ne ispunjava adekvatno sve ove uslove.

Što je još bitnije, gotovo svi podaci potiču od proučavanja stanovništva čija su tkiva primila prilično visoke doze radijacije, od jednog greja ili više. Malo ima podataka o posledicama doza radijacije primljenih na radnom mestu u nuklearnim postrojenjima, kao što nema direktnih podataka ni o svim vidovima izloženosti stanovništva radijaciji u normalnim životnim situacijama. Stoga nema alternative za pokušaj da na osnovu našeg oskudnog znanja o opasnosti visokih doza izvedemo procene rizika od niskih doza.

UNSCEAR — kao i druge istraživačke grupe koje proučavaju ovu oblast — polaze od dveju osnovnih pretpostavki, koje su solidno potkrepljene svim indikacijama kojima se zasad raspolaže. Prva je pretpostavka da ne postoji prag radijacije ispod kojeg nema rizika od raka. Svaka doza, ma koliko mala, povećava verovatnoću da će osoba koja je bude primila

oboleti od raka, a svaka dodatna doza čini tu verovatnoću još većom. Druga pretpostavka jeste da se rizik povećava u direktnoj proporciji sa primljenom dozom; da će se udvostručavanjem doze udvostručiti rizik, a njenim utrostručavanjem i rizik utrostručiti itd. (dijagram 5.5). UNSCEAR smatra da je to verovatno predostrožna procena; da se njom možda precenjuju, a gotovo sigurno ne potcenjuju niski nivoi ozračenosti. Na osnovu ove, po priznanju samih naučnika nesavršene ali prihvatljive polazne pretpostavke, mogli bismo doći do grubih procena rizika od različitih oblika raka.

Izgleda da se u nekoj ozračenoj grupi stanovnika od svih oblika raka najpre javlja leukemija (dijagram 5.4). Po svemu sudeći, leukemija u proseku usmrćuje otprilike deset godina posle oštećenja tkiva — znatno brže nego ostali oblici raka. Broj smrtnih slučajeva od leukemije među preživelim u Hirošimi i Nagasakiju naglo je pao posle 1970. i izgleda da je broj žrtava sada već konačan. Zbog toga rizik

umiranja od leukemije može pouzdanije da se proceni nego opasnosti od drugih oblika raka. UNSCEAR procenjuje da će kao posledica svakog primljenog greja dve od hiljadu osoba umreti od leukemije. Drugim rečima, ako nečija koštana srž apsorbira dozu od jednog greja, postoji verovatnoća 1:500 da će ta osoba umreti od leukemije.

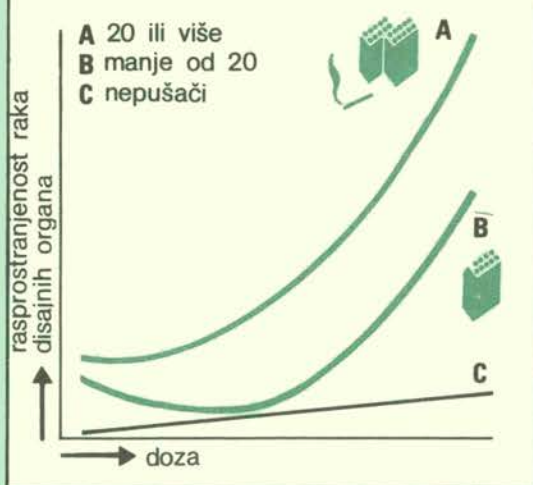
Izgleda da su rak dojke i štitne žlezde najčešći tumori izazvani radijacijom. UNSCEAR procenjuje da će oko deset osoba oboleti od raka štitne žlezde – a deset žena na svakih hiljadu od raka dojke – kao posledica svakog primljenog greja. Ali, obe ove vrste raka mogu, opšte uzev, da se leče, pri čemu je kod raka štitne žlezde izazvane radijacijom stopa smrtnosti naročito niska. To znači da će kao posledica svakog primljenog greja samo oko pet žena od hiljadu verovatno umreti od raka dojke, a samo jedna od hiljadu osoba od raka štitne žlezde.

Međutim, rak pluća sa sigurnošću ubija. I to je čest oblik raka koji pogada ozračene osobe. Sada raspoložemo i podacima o stopi raka pluća kod radnika u rudnicima uranijuma u Kanadi, Čehoslovačkoj i SAD, koji dopunjavaju one iz Hirošime i Nagasakija. Međutim, ti novi podaci, začudo, protivreče onim prvima; čak i ako uzmemo u obzir da se radi o različitim tipu radijacije, izgleda da kod rudara u rudnicima uranijuma postoji četiri do sedam puta veća verovatnoća nego kod osoba koje su preživle atomsko bombardovanje da od iste doze zračenja obole od raka. UNSCEAR je razmotrio nekoliko razloga za ovu razliku, pored ostalog i činjenicu da su rudari opšte uzev stariji nego što je bilo japansko stanovništvo u trenutku ozračivanja. Ovo ispitivanje navodi na zaključak da bi od svakog primljenog greja pet osoba od svakih hiljadu, starijih od 35 godina, prilikom ozračivanja, moglo da umre od raka pluća, ali da bi samo polovina ovog broja umrla u populaciji sastavljenoj od ljudi svih životnih doba. Viša brojka pada u donji deo opsega koji daje studija o rudarima.

Izgleda da radijacija ređe izaziva druge oblike raka. UNSCEAR računa da postoji verovatnoća da će od svakog greja samo jedna od hiljadu osoba umreti od raka želuca, jetre ili debelog creva, a da je još niži rizik da se pojave rak kostiju, jednjaka, tankog creva, mokraćne bešike, pankreasa, rektuma i limfnog tkiva – tu je verovatnoća možda 0,2 do 0,5 na hiljadu kao posledica svakog primljenog greja.

Deca su osetljivija nego odrasli, a posebno su osetljive još nerodene bebe. Neke studije ukazuju na to da kod dece postoji veća verovatnoća da će umreti od raka ako su im majke rendgenski

5.6 PUŠENJE I RADIJACIJA



Stopa smrtnosti od raka disajnih organa povezanog sa izloženošću radionuklidima radona kod rudara u rudnicima uranijuma, kod onih koji puše više od 20 cigareta dnevno, koji puše manje od 20 cigareta dnevno i kod nepušača.

zračene za vreme trudnoće; ali UNSCEAR još nije ubeđen da je uzročno-posledična veza ovde dokazana. Kod japanskih beba koje su u Hirošimi i Nagasakiju ozračene dok su bile u majčinoj utrobi nije dokazana veća verovatnoća obolevanja od raka.

Postoji, u stvari, još nekoliko neslaganja između podataka iz Japana i drugih navedenih podataka. Pored protivrečnih nalaza o raku pluća, postoje i bitna neslaganja podataka koji se odnose na rak dojke i štitne žlezde. U oba ova slučaja japanski podaci pokazuju i znatno nižu rasprostranjenost raka nego studije koje se odnose na druge zemlje; u oba slučaja UNSCEAR je za svoje procene upotrebio one više brojke. Takva neslaganja ilustruju koliko je teško proceniti rizik od niskih doza na osnovu oskudnih podataka o visokima. Još je teže doći do procene usled neizvesnosti o tome kolike su doze stvarno primili oni koji su preživeli atomsko bombardovanje. Novim nalazima dovedene su, naime, u pitanje stari proračuni doza ozračenosti, i čitava ova problematika se sada iznova razmatra.

S obzirom na to da je tako teško doći do odgovarajućih procena, nimalo ne iznenađuje što se toliko raspravlja o tome koliki je rizik od

niskog nivoa ozračenosti. Potrebna su dalja istraživanja o ovoj problematici. Bile bi naročito korisne studije koje bi se bavile izloženosti ljudi nivoima radijacije koji su uobičajeni na njihovim radnim mestima i u njihovoj životnoj sredini. Na žalost, što je manja izloženost radijaciji, to je teže obaviti relevantna istraživanja. Smatra se, na primer, da bi, ukoliko procene UNSCEAR-a nisu u osnovi pogrešne, studija o svim slučajevima raka među radnicima na nuklearnim postrojenjima koji su godišnje izloženi dozi od preko 0,01 greja morala da obuhvati nekoliko miliona ljudi-godina da bi uopšte mogla da dovede do nekog pouzdanog rezultata. Još je mnogo teže izraditi studije o efektima izloženosti ljudi radijaciji koja postoji u njihovoj životnoj sredini.

Ima, međutim, još složenijih pitanja koja bi morala da budu predmet naučnih istraživanja. Radijacija može, na primer, načelno da stupi u interakciju sa drugim hemijskim i biološkim agensima, čime se stopa rasprostranjenosti raka još povećava. Razume se da je ovo naročito važno pitanje zbog toga što je radijacija svuda prisutna i što u savremenom životu ima toliko mnogo faktora koji mogu da stupe s njom u interakciju. UNSCEAR je izvršio preliminarnu analizu informacija o velikom broju takvih faktora. Tako je izdvojeno nekoliko „osumnjičenih“, ali jakih indikacija ima samo za jednoga – to je duvanski dim. Izgleda da radnici u rudnicima uranijuma ranije obolevaju od raka ako su pušači (dijagram 5.6). Za sve ostale faktore podaci su oskudni i potrebna su dalja posmatranja.

Odavno ima nagoveštaja o tome da izloženost radijaciji može da ubrza proces starenja i da na taj način skрати život. UNSCEAR je nedavno ponovo razmotrio podatke koji se odnose na ovu hipotezu, ali nije našao dovoljno dokaza kojima bi je potkrepio, bilo da se radi o ljudima ili životinjama, bar kod umerene do niske dugoročne izloženosti. Ozračene populacije zaista imaju kraći prosečni vek, ali ovo, verovatno, treba u potpunosti pripisati povećanom broju pojedinaca koji obole od raka.

Genetski efekti

Izučiti genetske efekte radijacije još je teže nego ispitati vezu između radijacije i raka. Teže je, delom zbog toga što raspoložemo krajnje oskudnim podacima o genetskim oštećenjima koja ljudi trpe usled ozračivanja, delom stoga što će se čitav bilans naslednih bolesti i defekata tek pokazati tokom mnogih generacija, a delom i

usled toga, što, kao i u slučaju raka, defekti nastali usled radijacije neće moći da se razlikuju od onih koji su se pojavili kao posledica drugih uzroka.

Oko deset odsto sve živorođene dece ima neki urođeni defekt (dijagram 5.7). Raspon ovih defekata je veliki: od blagih anomalija kao što je daltonizam, do teških poremećaja koji ovu decu čine nesposobnom za normalan život, kao što su Daunov sindrom, Hantingtonova horeja ili teške malformacije. Mnogi od najteže pogođenih embriona i fetusa umiru; procenjeno je da je kod oko polovine svih spontanih prekida trudnoće plod imao abnormalnu genetsku konstituciju. Čak i ako novorođenčad sa naslednim defektima prežive, kod njih postoji pet puta veća verovatnoća da će umreti pre navršene prve godine nego kod normalne dece.

Genetske posledice radijacije dele se na dve glavne kategorije: aberacije hromozoma koje uključuju promenu broja ili strukture hromozoma, i mutaciju samih gena. Mutacije gena se dalje dele na dominantne (pojavljuju se kod dece onih roditelja koji su ih prvi pretrpeli) i recesivne mutacije (koje će se pojaviti samo ako se zajedno nađu žena i muškarac sa istim mutiranim genom i rođe dete, pa taj gen može da ostane latentan tokom mnogih generacija ili zauvek). Obe posledice radijacije mogu da izazovu nasledna oboljenja tokom narednih generacija, ali se to ne mora neizbežno dogoditi. Procene UNSCEAR-a su isključivo zasnovane na teškim naslednim defektima.

Samo dve verovatne mutacije nađene su među više od 27.000 dece roditelja koji su bili izloženi relativno visokim dozama zračenja od atomskih bombi bačenih na Hirošimu i Nagasaki – a nijedna mutacija nije se pojavila među otprilike jednakim brojem dece onih ljudi čija je izloženost radijaciji bila manja. Studije takođe ne pokazuju značajno povećanje slučajeva abnormalnosti hromozoma kod dece čiji su roditelji bili ozračeni pri eksploziji atomskih bombi. Iako neke studije ukazuju na to da za ozračene roditelje postoji veća verovatnoća da rođe decu sa Daunovim sindromom, druge studije to ne potvrđuju.

Postoje neki iznenađujući dokazi da se kod ljudi izloženih niskim dozama pojavljuju primetna oštećenja hromozoma u krvnim ćelijama. O tome svedoče slučajevi izloženosti ljudi koji žive u austrijskom banjskom mestu Badgaštajn ili tamo rade na radioaktivnim izvorima kojima se pripisuju lekovita svojstva. I radnici na nuklearnim postrojenjima u SR Nemačkoj, Velikoj Britaniji i SAD koji su izloženi dozama manjim od dozvoljenog

5.7 NASLEDNI DEFEKTI

broj slučajeva kod stanovništva
na milion živorođene dece

90,000

maksimalnog nivoa ozračenosti, koji je tako procenjen po međunarodnim standardima, takođe pokazuju oštećenja hromozoma. Ali, koliki je biološki značaj i kakve su zdravstvene posledice ovog oštećenja — nije još ustanovljeno.

U odsustvu daljih podataka, potrebno je proceniti rizike od naslednih defekata kod ljudi na osnovu obimnih ispitivanja na životinjama. UNSCEAR koristi dve metode, nastojeći da utvrdi veličinu rizika po ljude. Jedna je direktno usredsređena na to da se odredi kolika oštećenja izaziva određena doza radijacije. Druga pokušava da odredi kolike su doze potrebne da bi se udvostručio broj novorođenčadi koja bi i inače bila rođena sa različitim naslednim defektima.

Pomoću prve metode je procenjeno da bi jedan grej radijacije niskog nivoa koji bi primili samo muškarci prouzrokovao od 1.000 do 2.000 teških mutacija, a 30 do 1.000 ozbiljnih posledica usled aberacije hromozoma na svakih milion porođaja. Daleko su neizvesnije brojke koje se odnose na ozračivanje žena, ali te brojke su niže pošto su ženske polne ćelije manje osetljive na radijaciju; grubi proračuni nagoveštavaju da se kreću od nula do 900 na milion porođaja kad su u pitanju mutacije, a od nula do 300 kad je reč o aberacijama hromozoma.

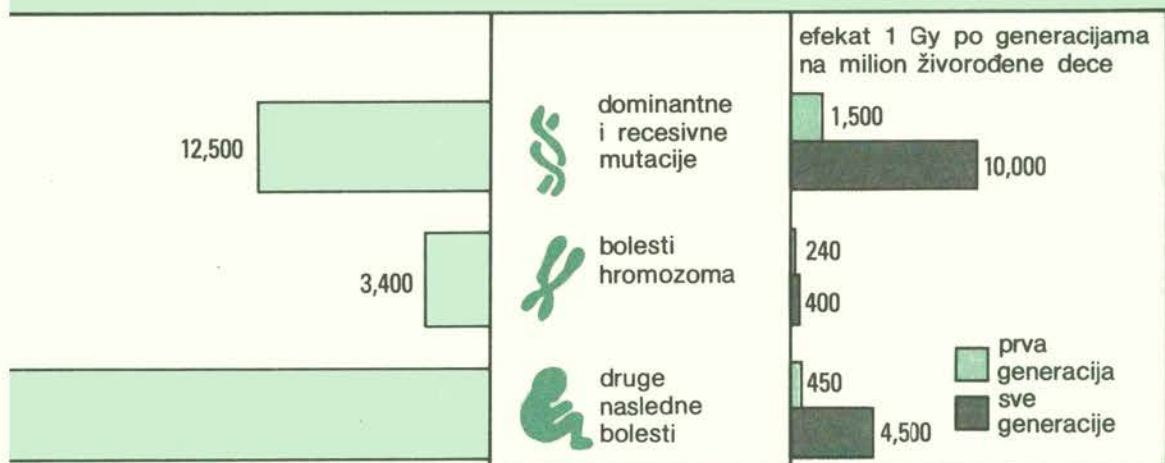
Druga metoda procenjuje da će stalno ozračivanje od jednog greja za svaku generaciju (oko 30 godina) uzrokovati oko 2.000 slučajeva teških genetskih oboljenja na milion porođaja kod dece čiji su roditelji bili izloženi radijaciji. Ova metoda takođe pokušava da dođe do ukupnog broja defekata koji će se pojaviti u svim generacijama ako se nastavi ista stopa

izloženosti radijaciji. Ona računa da će usled toga i dalje da se rađa oko 15.000 dece sa teškim oboljenjima na svakih milion porođaja (dijagram 5.7).

Ova metoda pokušava da uključi i posledice recesivnih mutacija. O ovima nije mnogo poznato, i oni su i dalje predmet rasprava; ali, smatra se da će njihov doprinos biti mali, pošto su male šanse da će baš osobe sa istom vrstom genetskih oštećenja imati zajedničku decu. Malo je poznato i o delovanju zračenja na takve karakteristike kao što su visina i plodnost, koje ne zavise od samo jednog gena, već od interakcije mnogih gena. Procene UNSCEAR-a su koncentrisane uglavnom na uticaj zračenja na pojedinačne gene, pošto je veoma teško proceniti doprinose takvih višegenskih faktora.

Veće ograničenje predstavlja činjenica da obe pomenute metode za procenu mogu samo da ukažu na ozbiljne nasledne efekte. Postojeći podaci odlučno govore da manji defekti brojno premašuju one ozbiljnije u tolikoj meri, da oni, sa gledišta populacije u celini, verovatno nanose više štete od onih težih.

U svom poslednjem izveštaju UNSCEAR je učinio prvi pokušaj da proceni i odraz ozbiljnih genetskih defekata na ljude. Pokušao je da proceni i razluči težinu oštećenja usled različitih vrsta defekata. Na primer, i Daunov sindrom i Hantingtonova horeja su ozbiljne genetske bolesti — ali imaju različit odraz. Hantingtonova horeja napada organizam negde između treće i pete decenije života i izaziva vrlo ozbiljnu ali postepenu degeneraciju centralnog nervnog sistema; Daunov sindrom, međutim, izaziva krajnje ozbiljne probleme već od samog rođenja



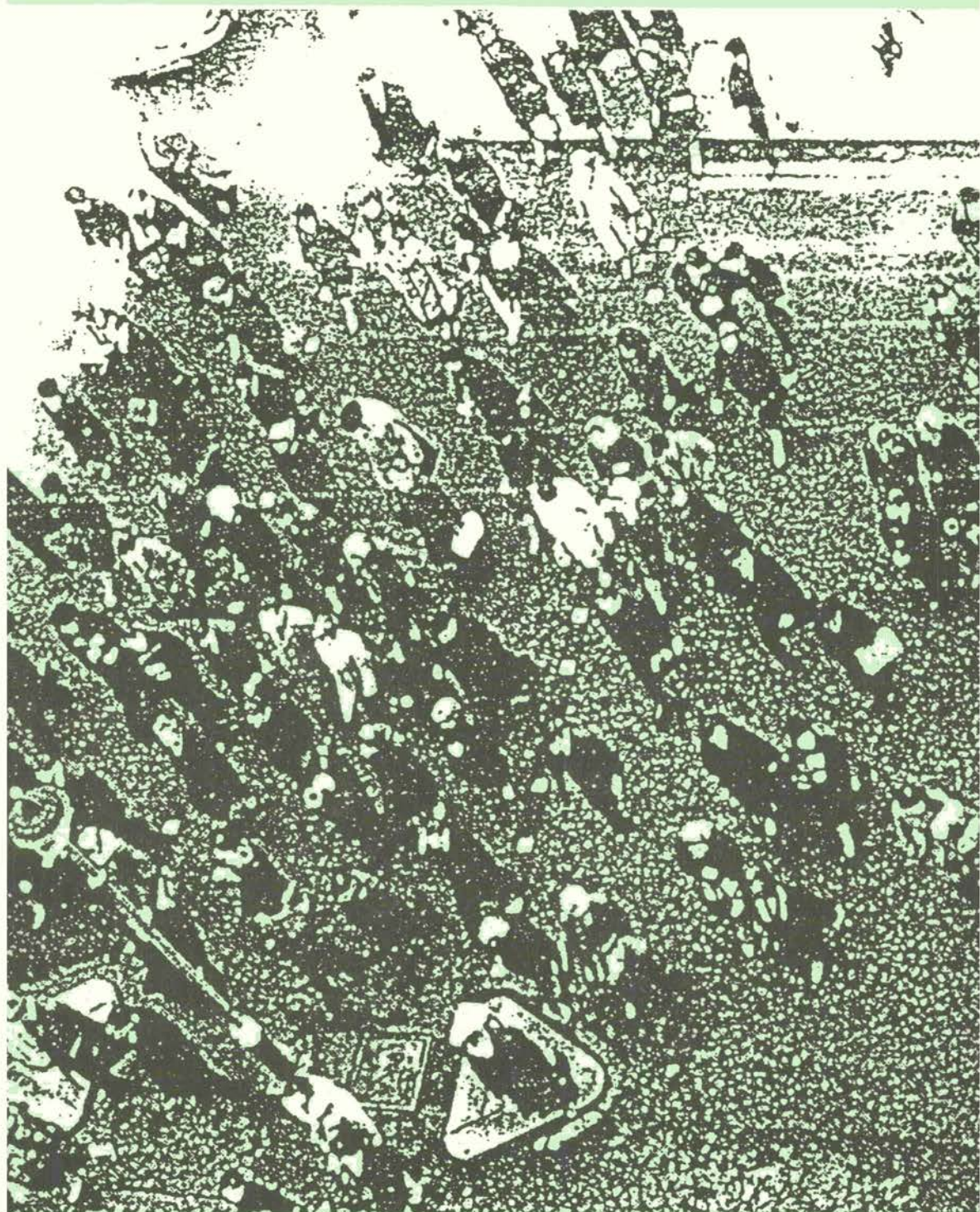
Nasledni defekti su prilično rasprostranjeni, ali dodatne doze radijacija mogu da povećaju njihovu rasprostranjenost. Dijagram pokazuje broj slučajeva ozbiljnih defekata kod stanovništva (uključujući i posledice prirodnog zračenja) usled jednog greja

radijacije po generaciji. Prikazane su posledice radijacije koje trpe deca onih koji su prvi bili izloženi i posledice tokom svih generacija, pod uslovom da se nastavi ista stopa izloženosti. Brojke predstavljaju broj dece rođene sa ozbiljnim defektima na svaki milion živorođene dece.

pa nadalje. Ukoliko treba načiniti razliku između ove dve bolesti, onda bi se Daunov sindrom mogao oceniti kao defekt većeg odraza.

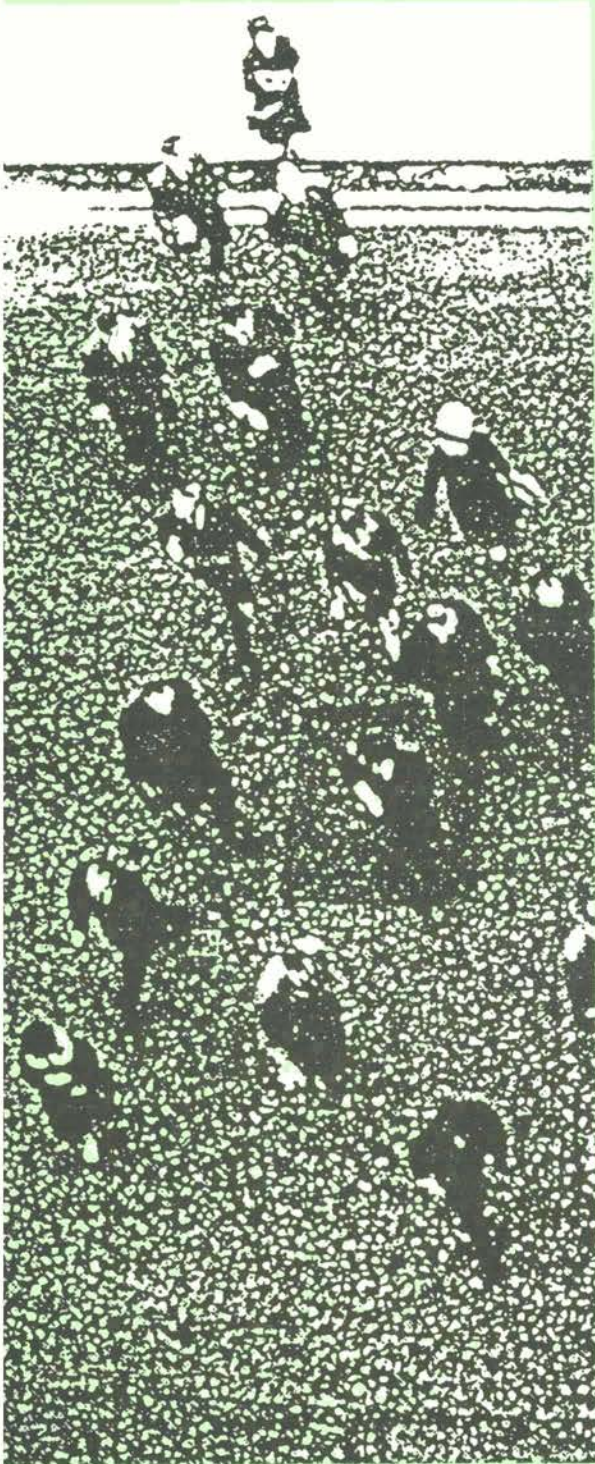
UNSCEAR je zbog toga pokušao da proceni posledice genetskih oboljenja izraženih u godinama teških ili i izgubljenih za bolesnika. Tu, naravno, nisu uračunate patnje žrtava ovih bolesti, niti je moguće odmeriti težinu svih takvih faktora kao što je duševni bol roditelja bolesnog deteta, ali takve faktore je i inače nemoguće izmeriti. Svestan toga da je učinio samo prvi, grubi pokušaj, UNSCEAR je u svom izveštaju procenio da jedan grej konstantnog ozračivanja za svaku generaciju uzrokuje 50.000 godina umanjene vrednosti života i daljih 50.000 godina umanjene vrednosti života na svakih milion živorođenih među decom prve generacije ozračenih – i najzad ukupno 340.000 godina umanjene vrednosti života i 286.000 godina izgubljenog života na svakih milion živorođenih.

Mada su ovo samo grube procene, one su važne zbog toga što predstavljaju pokušaj da se prilikom procenjivanja posledica radijacije uzmu u obzir i društvene vrednosti. Jer, te su vrednosti one koje, pored brojčanih procena, sve više utiču na stavove o prihvatljivosti rizika. I pravo je da tako bude.



Prihvatljivost rizika

Ovo poglavlje nije zasnovano, kao prethodna četiri, na izveštajima UNSCEAR-a, već tretira pitanje kojim se ti izveštaji nikad nisu bavili.



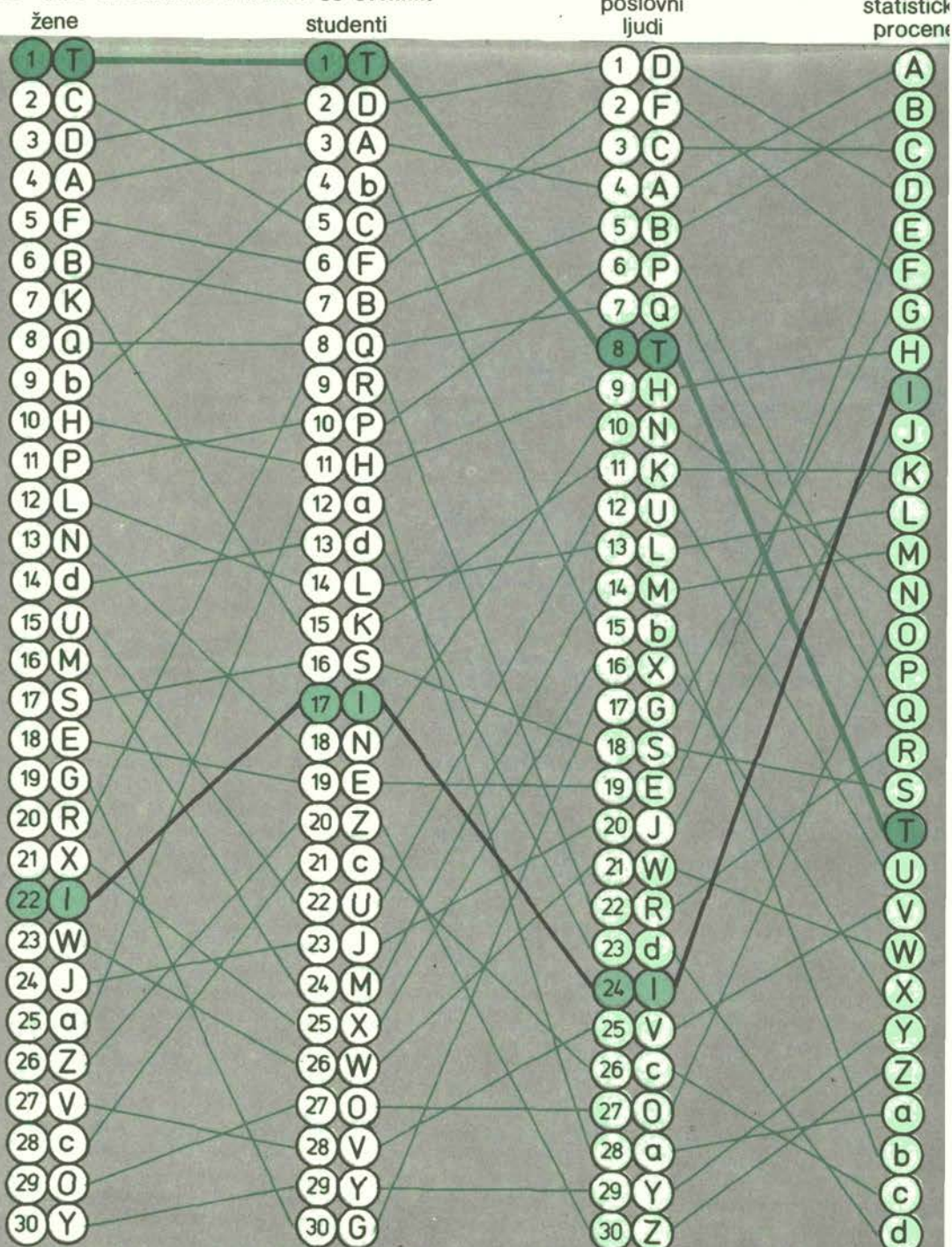
S obzirom na sve što je dosad izneto, ima opravdanog razloga za nedoumicu. Jer, ako su procene navedene u ovom tekstu koliko-toliko tačne, to znači da ozračavanje niskog nivoa predstavlja relativno malu opasnost po stanovništvo.

Mnogi ljudi spremno prihvataju mnogo veće opasnosti koje dolaze, recimo, od pušenja i vožnje automobila. Građanin neke razvijene zemlje koji prima prosečnu dozu iz prirodnih i veštačkih izvora radijacije izložen je pet puta većoj opasnosti da pogine na nekom drumu, a sto puta je više ugrožen da umre od posledica pušenja 20 cigareta dnevno, nego da oboli od neizlečivog raka izazvanog radijacijom. Izgleda da javnost nije mnogo zabrinuta zbog prirodne radijacije, koja sačinjava četiri petine prosečne efektivne ekvivalentne doze u svetskim razmerama. Mali je broj ljudi, na primer, koji se sa mesta na kojima postoji visoka prirodna radijacija preseljavaju na mesta gde su manje izloženi zračenju, da bi time umanjili rizik obolevanja od raka. Javnost praktično ne pokazuje nikakvu zabrinutost zbog dveju ljudskih aktivnosti od kojih potiče najveća nepotrebna izloženost — štednje energije i suviše velike izloženosti medicinskom rendgenskom zračenju. Gotovo sva pažnja i sav strah javnosti usredsređeni su na nuklearnu energetiku, čiji je doprinos opštoj dozi jedan od najmanjih.

Naučnici i zvaničnici u mnogim zemljama su često iznervirani onim što im se čini kao iracionalno ponašanje javnosti — i oni zato katkad čak sugerišu da je stav javnosti podstaknut delovanjem agitatora, koji žele da potkopaju društvenu strukturu. To je sa njihove strane nerazborito, kao što ističe i Britansko kraljevsko društvo. Stav javnosti nije toliko iracionalan kao što to može izgledati, i može biti dobro zasnovano. I, kao što i treba, većina vlada pre će slediti javno mnjenje nego preporuke „eksperata“.

Jedan od razloga za toliki jaz između viđenja većine stručnjaka, s jedne, a sve većeg dela javnosti, s druge strane, mogao bi da potiče od same nepreciznosti u proceni posledica nekih vidova izloženosti radijaciji. U ovoj knjižici su više puta naglašavani problemi koji se nameću u vezi sa prikupljanjem pouzdanih informacija o nekim vidovima izloženosti radijaciji i sa procenivanjem njihovih efekata. Još je mnogo teže odrediti prihvatljivost rizika. Malo je poznato o tome zbog čega ljudi reaguju na rizike

6.1 RIZICI – KAKO IH OSEĆAMO I KOLIKO SU STVARNI



broj smrtnih slučajeva godišnje u SAD



onako kao što to čine. Postojeće metode za određivanje cene koja se plaća za rizične poduhvate i koristi koje ti poduhvati donose još su veoma neprecizni.

Kao što je ilustrovano u prethodnom poglavlju, cena koja se plaća u vidu osakaćenosti i obolevanja ljudi samo je grubo procenjena. Jer, reč je o metodi koja samo pokušava da kvantitativno utvrdi posledice u vidu povećane smrtnosti, i to često samo finansijski izražene; u najboljem slučaju se pokušava da se pomoću njih da gruba procena umanjene vrednosti života usled teških povreda. Njima ne može efektivno da se proceni težina manjih oštećenja nanetih kvalitetu života, a pogotovo ne da se uzme u obzir i ljudska nesreća i izneverene nade. Međutim, javnost, makar i nagoni, uzima u obzir takve faktore.

Često je još teže proceniti blagodati nego odmeriti štetu. Osim toga, nije dovoljno pokazati da neki rizičan postupak donosi blagodati društvu kao celini; ljudi koji su izloženi najvećem riziku žele da budu sigurni da blagodati koje oni lično imaju od tog postupka pretežu nad opasnostima. Kod radioterapije raka, na primer, izgledi za izlečenje obično daleko pretežu nad rizicima koje predstavljaju velike doze, tako da su ljudi koji primaju te doze oni isti koji će od njih imati koristi. S druge strane, neopravdana izloženost medicinskim rendgenskim pregledima daje isto tako jasnu jednačinu: pacijent se izlaže dodatnom riziku, a da od toga nema nikakve koristi.

Međutim, izloženost prirodne sredine radijaciji koja proističe od nuklearne energetike predstavlja mnogo teži problem. Kao prvo, društvo u celini uzev uživa sve blagodati koje nuklearna energija pruža: ljudi koji žive u blizini nuklearnih uređaja snose gotovo sav rizik, a dobijaju samo mali deo opšte koristi. Kao drugo, suštinski je sporno da li nuklearna

Rizici koje javnost oseća kao najveće, nisu uvek oni koji stvarno uzrokuju smrt najvećeg broja ljudi. Tri grupe Amerikanaca, članice Lige žena koje glasaju na izborima, studenti i članovi kluba poslovnih ljudi i slobodnih profesija, predstavljali su ispitanike od kojih je zatraženo da naznače, po redosledu opasnosti, 30 vrsta rizika. Redosled koji su ti ispitanici naznačili – što je predstavljeno u prve tri kolone – upoređen je sa statističkim procenama godišnjeg udela ovih opasnosti u broju smrtnih slučajeva u SAD. Nuklearna energetika, koju su i žene i studenti stavili na prvo mesto, a poslovni ljudi na osmo, dolazi na dvadeseto mesto na listi statističkih rizika. Rendgenski zraci, koje su sve tri grupe nisko rangirale, dolaze na deveto mesto na statističkoj tabeli.

energija zaista pruža stvarne prednosti u odnosu na korišćenje drugih vrsta goriva — mada dve najvažnije alternative takođe predstavljaju izvesne rizike. Prilikom sagorevanja uglja stvaraju se radioaktivni lebedći pepeo i drugi ozbiljni zagađivači, a štednja energije uzrokuje posebne opasnosti od radijacije.

Zatim, postoji i bitna razlika između rizika kojima se ljudi dobrovoljno izlažu i onih koje ne bi sopstvenom voljom na sebe preuzeli. Neki ljudi drage volje uzimaju na sebe velike opasnosti, kojima prkose iz zadovoljstva; oni nalaze da opasnost povećava uživanje, na primer, u letenju „zmajem“ i u skijaškim skokovima. Drugi se, opet, iz altruističkih pobuda suočavaju sa velikim opasnostima; nije redak slučaj da rizikuju život spasavajući životinje koje, čak, i nisu njihove. I pušenje i upravljanje motornim vozilima podrazumevaju dobrovoljno prihvatanje rizika; zbog te dobrovoljnosti mnogi smatraju taj rizik prihvatljivim.

Sloboda rizikovanja sopstvenog života i zdravlja je neizostavni deo čovekove slobode, ali se tu ne podrazumeva i sloboda da se takav rizik nametne drugima, i javno mnjenje je toga i te kako svesno. Ono zbog toga sa sve žešćim protivljenjem gleda na nametnute rizike, odnosno na one rizike koje ljudi nisu voljni da preuzmu. A kada se ljudi osete nemoćnim pred nekim takvim rizikom nad kojim nemaju nikakvu kontrolu niti načina da se od njega zaštite, oni su prema tom riziku još manje tolerantni. Radijacija iz nuklearnog gorivog ciklusa je u očima javnosti otelovljenje svih ovih nepoželjnih karakteristika.

Nuklearna energetika nas stavlja i pred jednu moralnu dilemu. Ljudi se pitaju da li imaju pravo da budućim generacijama ostave u nasleđe radioaktivni otpad koji će biti opasan i u dalekoj budućnosti — naročito s obzirom na to što naši potomci neće imati nikakvu kontrolu nad problemom koji im budemo ostavili, dok će odluku o tome šta činiti sa otpadom morati da donese sadašnja generacija koja će i imati koristi od nuklearne energije. Nuklearna energija takođe ascira na nuklearni rat, kojeg se ljudi užasavaju.

Nadalje, ljudi se više plaše katastrofa, ma koliko one bile retke, nego manjih opasnosti, ma koliko one bile česte. A veliki deo straha od nuklearne energetike, sasvim razložno, u stvari je strah od posledica nekog udesa — bilo da je to udes u nuklearnoj elektrani, u fabrici za prerađivanje iskorišćenog goriva ili na deponiji nuklearnog otpada — a ne toliko od efekata rutinskog ispuštanja radijacije. UNSCEAR ne uzima u

obzir verovatnoću udesa, a one studije koje su i to uzele u obzir nisu ubedile široku javnost.

Na stavove prema rizicima utiče i to u kojoj su meri oni poznati. S jedne strane, neki su rizici jedva poznati javnosti i zbog toga se, na žalost, na njih vrlo malo obraća pažnja: ovim se verovatno može objasniti nebriga koju u većini zemalja pokazuju prema prodiranju radona u kuće i prema nepotrebnom izlaganju rendgenskim zracima. S druge strane, ako smo navikli na neke rizike, to, kako izgleda, vodi njihovom potcenjivanju. Jedna nedavno objavljena studija je pokazala da dobro poznati rizici, kao oni od vožnje motociklom, skijanja, planinarenja, pušenja, pa čak i od pljačkaša i od drogiranja heroinom — ne izazivaju neki veći strah. S druge strane, nuklearna energija predstavlja jedan od najmanje poznatih izvora rizika, pa stoga i jedan od onih koji pobuđuje najveće strahovanje; interesantno je da ga se ljudi više plaše nego azbesta, za koji smatraju da ga bolje poznaju.

Tajnost — a naročito ono što se napola drži u tajnosti — rađa strah, a toga je u prošlosti bilo suviše. Bilo je, takođe, suviše lepo formulisanih uveravanja i opominjanja da stručnjaci sve znaju najbolje. Ta su se uveravanja pokazala manjkavim, a stručnjaci — iako bez sumnje imaju mnogo znanja svaki u svojoj struci — često nemaju dovoljno široke vidike. Reči su u velikoj meri izgubile uverljivost.

Potrebno je da javnost u daleko većoj meri učestvuje u proceni rizika, za koje se od nje traži da ih prihvati — i da o tim rizicima donese svoj sud. Ako se to javnosti ne omogući, ona će sve manje biti spremna da takve rizike preuzme. Zbog toga je potrebno da se javnosti pruže potpune činjenične informacije koje nisu emocionalno obojene. Jer, kao što je Aleksander Poup (Alexander Pope) rekao u jednom stihu: „malo znanja — opasna je stvar“. Ova knjižica predstavlja pokušaj da se to znanje poveća.

Dodatak*

Dr Vladimir Ajdačić

Pogled na radijaciju posle Černobila

* Ovaj dodatak ne predstavlja sastavni deo engleskog izdanja knjige, nego je napisan za srpskohrvatsko izdanje, imajući u vidu potrebu revidiranja nekih gledišta posle havarije u Černobilu.

Knjiga *Radijacija* na informativan i korektan način upoznaje čitaoca sa opasnostima od jonizujućih atomskih radijacija prirodnog ili veštačkog porekla. Pisana jednostavnim, lako razumljivim jezikom, ona je pristupačna najširem krugu čitalaca. *Radijacija* sadrži veliki broj tabela, dijagrama i slika koje izvanredno uspešno ilustruju činjenično jezgro knjige. Ovu sjajnu knjigu možemo svakome preporučiti kao početno štivo – informator i priručnik – za oblast radijacija za koju uglavnom iz nevolje počinje da se javlja sve šire zanimanje i van stručnih krugova.

Iako *Radijacija* zaslužuje mnoge pohvale, ona ima jedan nedostatak – pisana je pre černobilske katastrofe, te sticajem prilika sadrži veoma optimističko viđenje opasnosti od nuklearnih elektrana i njihovih mogućih havarija.

Problem bezbednosti nuklearnih elektrana, kao i postrojenja koja su vezana za njihov rad (postrojenja za dobijanje reaktorskih gorivnih elemenata, postrojenja za preradu istrošenog goriva, spremišta radioaktivnog otpada i dr.), privlači pažnju naučne javnosti već skoro pola veka i izaziva vrlo oprečna reagovanja i u najstručnijim sredinama. Tako se među atomistima mogu naći ljudi protivnici nuklearne energetike, kao i njene velike pristalice. U ovoj dugoj i još uvek izvanredno aktuelnoj debati naučnici su se podelili na dva tabora – na „pesimiste“ i „optimiste“. Dok prvi sumnjaju u bezbednost nuklearnih elektrana, drugi smatraju da one predstavljaju najbezbednija složena postrojenja koja je čovek do danas izgradio.

Na žalost, vreme je pokazalo da su „pesimisti“ u pravu i da su njihovi proračuni verovatnoće odigravanja većih havarija na nuklearnim elektranama mnogo bliži stvarnosti od proračuna „optimista“.

Analiza sigurnosti rada nuklearnih elektrana, postrojenja u kojima se koncentriše ogromna radioaktivnost, pokazuje da je mogućnost dešavanja težih havarija, kao što je topljenje jezgra atomskog reaktora, daleko od zanemarljive. Dvadeset i dve analize topljenja jezgra u slučaju reaktora sa lakom vodom pod pritiskom (*IEEE Trans. on Reliability* R-33, No. 1, str. 41, april 1984) za verovatnoću odigravanja ovog događaja daju vrednost koja se nalazi u opsegu od 1:1.000.000 do 2:1.000 za rad nuklearnog reaktora tokom jedne godine dana.

Pretpostavimo da je ova verovatnoća 1:1.000. U tom slučaju, sa oko 250 lakovodnih reaktora pomenutog tipa mogli bismo u četiri godine da očekujemo jednu težu (ili najtežu) havariju.

Razume se, to je previše – naročito kada se ni

približno ne može predvideti mesto i vreme kada do havarija može doći.

Kao i u drugim slučajevima u kojima verovatnoća igra svoj „ludi ples“, tako i kod nuklearnih reaktora treba samo čekati dovoljno dugo vremena da bi se nesreća desila. Koliko to vreme može da iznosi? Godine, desetine, stotine godina ili čak milenijume (mišljenje „optimista“ – verovatnoća reda veličine 1:1.000.000)?

Havarije koje su se već odigrale, naročito ova poslednja, najkatastrofalnija – havarija u nuklearnoj elektrani „Lenjin“ u Černobilu – pokazale su da sa sadašnjom tehnologijom velike katastrofe možemo očekivati bar jednom u 10 godina. A to je prevelika cena za dobrobit od električne energije dobijene fisijom teških elemenata.

Do černobilske katastrofe najteža nuklearna havarija desila se na američkom nuklearnom reaktoru „Ostrvo tri milje“ 1979. godine. Tom prilikom došlo je do delimičnog topljenja jezgra reaktora uz oslobađanje radioaktivnih elemenata iz „vrućeg“ goriva. Ceni se da je u okolinu ispušteno radioaktivnih materija čija je aktivnost iznosila oko 180 milijardi bekerela. Samo zahvaljujući dobrom natkrivanju reaktora zaštitnim „zvonom“ stanovništvo nije bilo izloženo većem ozračavanju.

Međutim, druga havarija, havarija u Vindskejlu (Windscale, 1957) imala je teže posledice – procenjena je doza (kolektivna efektivna ekvivalentna doza) na 1.300 čovek-siverta.

Pomenute nuklearne nesreće na reaktorima daleko su prevaziđene havarijom černobilskog reaktora. Prilikom ove nesreće, koja se desila na grafitno-moderiranom reaktoru, u atmosferu je ispušteno oko četiri miliona puta više aktivnih materija (oko $7 \cdot 10^{17}$ bekerela) nego pri otkazivanju reaktora „Ostrvo tri milje“. Tom prilikom od zračenja je izgubilo život oko tridesetoro ljudi, visokim dozama ozračen je veliki broj ljudi, rasejana je visoka radioaktivnost po nepreglednim prostranstvima SSSR-a, susednih i udaljenih zemalja, uzrokujući ne samo neželjene posledice po zdravlje, već i kontaminaciju radioaktivnošću ogromnih prostranstava pod vegetacijom bitnom za život na planeti. Ukupna materijalna šteta prevazilazila desetine milijardi dolara...

U ovom trenutku teško je i proceniti iznos kolektivne ekvivalentne doze, ali je sasvim izvesno da je ona strahovito visoka. Neke od procena kažu da će u budućnosti oko 70.000 ljudi biti žrtve raka i leukemije izazvane prekomernim ozračivanjem aktivnim materijama oslobođenim iz raspomamljenog jezgra reaktora četvrtog bloka nuklearne elektrane u Černobilu. I

to će imati i posledice na buduće generacije, na potomstvo sada ozračenih ljudi, na naše sledbenike kojima ćemo u nasledstvo pored ostalih zala ostaviti i černobilsku radioaktivnost.

U spektru ovih radioaktivnih elemenata, pored onih kratkoživećih, kao što je npr. I^{131} (jod-131) sa vremenom poluraspada od oko 8 dana, postoje i dugoživeći izotopi: Cs^{137} (29 godina), Sr^{90} (28 godina), Zr^{93} (1,1 milion godina), Ru^{106} (1 godina), te aktivacioni izotop Co^{60} (5,6 godina) i drugi, koji će nas ozračivati desetlećima i stolećima.

Za radioaktivnost Černobila ispuštenu u atmosferu ceni se da je u trenutku oslobađanja iznosila samo 4–5% ukupne aktivnosti prisutne u jezgri reaktora. To znači, da je nesreća mogla da bude još teža da nije bilo krajnjeg ljudskog zalaganja oko „gašenja“ reaktora. Teško je i zamisliti kakav bi obim katastrofa poprimila da je vatra zadesila i obližnji blok-reaktor broj 3. Pored ovih reaktora 3 i 4, u neposrednoj blizini nalaze se i reaktori 1 i 2, svi iste konstrukcije – hiljade tona goriva uronjenog u ogromnu količinu grafita, svaki reaktor kao više pojedinačnih reaktora u „saću“ sa preko 3.400 rashladnih cevi sa vodenom parom pod ogromnim pritiskom u neposrednoj blizini pregrejanog grafita – slika stravične mete nekog mogućeg budućeg rata. I mnogo je sličnih, manje ili više opasnih reaktora širom sveta – koji mogu odvesti u nuklearnu kataklizmu neviđenih razmera.

Zato se, poučeni iskustvom černobilske katastrofe, možemo upitati u kakvom odnosu stoji radioaktivnost stvorena od strane čoveka, sada prisutna u našim reaktorima, sa prirodnom radioaktivnošću planete.

Odgovor na ovo pitanje nalazimo u knjizi Ivana Draganica, Zorice Draganic i Žan-Pjera Adlofa (Jean-Pierre Adloff) koja je u pripremi za štampu: *Radiation, Radioactivity, Nuclear Energy on the Earth and beyond*. Ovi autori daju poređenje za sredinu osamdesetih godina našeg veka. Tada je u nuklearnim elektranama bilo instalisano oko 200 gigavata električne snage. Ukupna radioaktivnost koju je čovek generišući električnu energiju putem fisije teških elemenata stvorio na Zemlji tada je iznosila oko 10^{23} bekerela. Globalna prirodna radioaktivnost atmosfere Zemlje (uglavnom tricijum) iznosi oko $3 \cdot 10^{18}$ bekerela. Hidrosfera (sve vode naše planete) sadrži oko $1,7 \cdot 10^{22}$ bekerela, a litosfera (sa 0,5 bekerela po gramu materije) oko $1,4 \cdot 10^{25}$ bekerela.

Na osnovu ovih podataka možemo da zaključimo da je čovek svojim aktivnostima u nuklearnoj energetici već „dodao“ Zemlji veću

aktivnost nego što je sadržela njena atmosfera i hidrosfera. Ako se ograničimo na razuman deo Zemljine litosfere, na dubinu tla merenu desetinama metara, a ne kilometrima, onda ćemo videti da je aktivnost sadržana u našim nuklearnim reaktorima poredljiva sa ukupnom aktivnošću tla s kojim dolazimo u dodir! Ovo je zaprepašujuć i upozoravajuć nalaz pomenutih naučnika.

Iz sveg dosadašnjeg iskustva možemo da izvučemo zaključak da je potrebno *krajnje kritičko preispitivanje* upotrebe nuklearne energetike na širokom planu.

Opasnost koju nekontrolisano ispuštanje aktivnosti iz nuklearnih elektrana može da ima po živi svet i čoveka na Zemlji, posmatrana u dugom intervalu vremena, ne može da se opravda našim sebičnim kratkoročnim ciljevima postizanja „blagostanja“ po cenu straha za život i pretvaranja planete u deponiju radioaktivnosti.

U tom pogledu iz černobilske katastrofe morali bismo da izvučemo ozbiljnu pouku.

КАТАЛОГИЗАЦИЈА У ПУБЛИКАЦИЈИ (CIP)

539.16

RADIJACIJA : doze, posledice, rizici / prevela Ema Časar.
Dodatak, Pogled na radijaciju posle Černobila / napisao Vladimir
Ajdačić. – Beograd : Nolit, 1986 (Subotica : Birografika). – 64,
III стр. : илустр. ; 25 см. – (Biblioteka Sve svemu)

Превод дела: Radiation. – Predgovor / Mustafa Kamal Tolba:
стр. 4

YU ISBN 86-19-01145-6

1. Часар, Ема, прев.

57:621.039.8

ПК: а. Јонизујуће зрачење

Обрађено у Народној библиотеци Србије, Београд

**BIBLIOTEKA
SVE O SVEMU**



Entoni Dž. Satilaro
VRAĆEN U ŽIVOT

Kerolajn Hajdenri
UVOD U MAKROBIOTIKU

RADIJACIJA
Doze, posledice, rizici

Ursula Goldman-Poš
DNEVNIK JEDNE DEPRESIJE

u pripremi

Mičio Kuši
PRIRODNO LEČENJE MAKROBIOTIKOM

Vladimir Adamović
STALJIN – PSIHOBIOGRAFIJA

Erik Bern
SEKS U LJUBAVI

Vendi Esko
MAKROBIOTIČKI KUVAR

Erl Mindel
VITAMINSKA BIBLIJA

RADIJACIJA

Nezaobilazna knjiga posle havarije u Černobilu. Gde sve postoje izvori radijacije: u medicinskim aparatima, kuhinji, kupatilu...? Koliko je

čovekovom zaslugom povećana radijacija u poslednjih sto godina? Kakav rizik donose nuklearne centrale? Odgovori na sva ta pitanja dati su u ovoj knjizi.

