

## POS LJEDICE ZRAČENJA UZROKOVANOG ČERNOBILSKOM NUKLEARNOM NESREĆOM

P. Kraljević

*Zavod za fiziologiju i radiobiologiju, Veterinarski fakultet, Zagreb*

*(Primljeno 18. II. 1987)*

U nedostatku podataka o dozi koju je jugoslavensko stanovništvo primilo od zračenja uzrokovanog nuklearnom nesrećom u Černobilu, pokušalo se, na temelju doze koju je primilo stanovništvo sjeverne Velike Britanije, gdje je akumulirano taloženje joda 131 i cezija 137 bilo više nego u Jugoslaviji, upozoriti na posljedice što ih je jugoslavensko stanovništvo pretrpjelo ili će pretrpjeti od tog zračenja. Iz načinjene analize može se zaključiti da jugoslavensko stanovništvo nije i neće pretrpjeti značajnijih posljedica za zdravlje.

Nesreća na nuklearnoj elektrani u Černobilu potkraj travnja 1986. godine uzrokovala je radioaktivnu kontaminaciju okoliša i u našim krajevima i zbog toga uznemirila stanovništvo. Od tada je prošlo relativno dugo vrijeme, i gotovo sve bitne činjenice u vezi s tom nesrećom dobro su poznate. Da bismo utvrdili koliko je strah koji je tada zavladao među stanovništvom bio opravdan, pokušat ćemo se u ovom članku osvrnuti na eventualne posljedice koje stanovništvo može pretrpjeti zbog zračenja kojemu je bilo ili će još biti izloženo.

Da bismo, pak, analizu mogli uspješno načiniti, moramo se naprije upoznati s nekim bitnim činjenicama. Čovjek je, naime, od rođenja pa do smrti stalno izložen radioaktivnosti koja je nazočna u okolišu, a koju s obzirom na izvore možemo podijeliti na prirodnu i proizvedenu (umjetnu, antropogenu) radioaktivnost. Prirodna radioaktivnost je stalno nazočna na Zemlji. Čine je tri komponente: kozmičke zrake, radionuklidi stvarani u atmosferi i oni nazočni u zemlji. Kozmičke su zrake čestice koje na Zemlju dopiru iz svemira. Dijele se na primarne i sekundarne. Primarne kozmičke zrake mogu se podijeliti na primarne galaktičke kozmičke zrake koje se sastoje uglavnom od protona velike energije (više od 90%), koji dolaze iz međuzvezdanog prostora i u Sunčev sustav ulaze zajedno s  $\alpha$ -česticama (oko 10% ili manje), te od elektrona, fotona i neutrina. Primarne Sunčeve kozmičke zrake nastaju prilikom Sunčevih eksplozija, a sastoje se također od nabijenih čestica, uglavnom od protona i  $\alpha$ -čestica. Sekundarne kozmičke zrake su čestice koje nastaju kada primarne kozmičke zrake visoke energije uđu u atmosferu i dođe do nuklearnih reakcija s jezgrama atoma nazočnih u zraku. Tom prilikom stvaraju se

neutroni, protoni i druge čestice. Protoni i neutroni značajno doprinose apsorbiranoj dozi u gornjim slojevima atmosfere, i taj doprinos postupno opada prema donjim slojevima atmosfere. Drugim riječima, doza od kozmičkog zračenja smanjuje se sa smanjenjem nadmorske visine i obratno (1).

Radionuklidi stvarani u atmosferi (kozmojeni radionuklidi). Prilikom sudara primarnih kozmičkih zraka s atomima plinova u atmosferi nastaju, osim protona i neutrona, radionuklidi  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{Ce}$ ,  $^{22}\text{Si}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{33}\text{P}$ ,  $^{33}\text{S}$ ,  $^{38}\text{Cl}$  i  $^{39}\text{Cl}$  (2). Među nabrojanim radionuklidima jedino  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$  i  $^{22}\text{Na}$  značajnije doprinose ukupnoj dozi koju čovjek primi od prirodnog zračenja (1).

Radionuklidi nazočni u zemlji (primordijalni radionuklidi) potječu još od nastanka Zemlje. To su radionuklidi koji se pojavljuju pojedinačno, ima ih osamnaestak, a među njima značajan izvor zračenja su  $^{40}\text{K}$  i  $^{87}\text{Rb}$  te radionuklidi koji su članovi triju radioaktivnih nizova. Uranov niz započinje sa  $^{238}\text{U}$ , ima preko 17 radionuklida te završava stabilnim  $^{206}\text{Pb}$  (2). Iz ovog niza spomenut ćemo  $^{222}\text{Rn}$  čije zračenje predstavlja najveći pojedinačni prinos radijacijskoj dozi koju prosječni stanovnik primi. Naime, primarni učinak ne dolazi izravno od  $^{222}\text{Rn}$  nego od njegovih kratkoživućih potomaka ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ) od kojih se većina veže za aerosole. Ovi aerosoli, kada se udahnu, ugrade se u pluća i ozračuju ih (3). Torijev niz započinje sa  $^{232}\text{Th}$  i preko 10 radionuklida završava stabilnim  $^{208}\text{Pb}$ . Aktinijev niz započinje sa  $^{235}\text{U}$  i preko 13 radionuklida završava stabilnim  $^{207}\text{Pb}$  (2).

Proizvedena radioaktivnost (umjetna, antropogena) jest radioaktivnost koju je proizveo ili proizvodi čovjek, te na različite načine i u različitim količinama ozračuje ljude. Glavni izvori ove radioaktivnosti su ionizacijsko zračenje i radionuklidi koji se primjenjuju u medicini, pokusne nuklearne eksplozije i nuklearne elektrane (1). Postoje još i neki drugi izvori zračenja, ali su manje značajni od nabrojanih s obzirom na njihovu količinu i intenzitet ozračivanja.

Od svih izvora proizvedene radioaktivnosti, našu pozornost u ovom trenutku najviše zaokupljaju nuklearne elektrane, unatoč tome što one u normalnim uvjetima najmanje pridonose ozračivanju stanovništva (4). Pretpostavljam da je to zbog ovih razloga: prvo, svi se još dobro sjećamo nuklearne katastrofe u Černobilu, pa se bojimo da se slično ne ponovi; drugo, u Jugoslaviji već postoji jedna nuklearna elektrana, a planira ih se još graditi; treće, mišljenja stručnjaka o opasnosti nuklearnih elektrana vrlo su različita, a najčešće sasvim oprečna, i četvrto, stanovništvo vrlo malo zna o radioaktivnosti i učincima zračenja na živa bića, te o nuklearnoj tehnologiji, i zato cijelom tom problemu pristupa veoma emotivno. Zbog toga treba jasno reći: nuklearne elektrane, dok su ispravne, mali su zagađivači okoliša i ne predstavljaju opasnost za zdravlje stanovništva. Tako npr., smatra se, ako bi u SAD-u došlo do veće izgradnje nuklearnih centrala, prosječna bi se doza koju bi stanovništvo primalo tijekom godine povećala za oko  $10 \mu\text{Sv}$  po osobi (1 mrem), odnosno za dozu koja je sto puta manja od one koju stanovništvo u toj zemlji primi od prirodnog zračenja (5). Istodobno termoelektrana na ugljen od 1.000 MW izbaci godišnje u okoliš toliko radionuklida (nalaze se u ugljenu i pripadaju trima radioaktivnim nizovima) da maksimalna pojedinačna godišnja doza na udaljenosti od 500 metara od termoelektrane iznosi 0,01—0,42 mSv (1—42 mrema), odnosno 0,04—3,8 mSv (4—380 mrema), ovisno

o unijetim pokazateljima i pretpostavkama (6). Dođe li, pak, do nesreće na nuklearnoj elektrani, ona može postati velik zagađivač okoliša radioaktivnim tvarima i predstavljati veliku opasnost za čovjeka. Opasnost najčešće prijeteći od ispuštanja radioaktivnih tvari, uglavnom hlapljivih fizijskih proizvoda, u atmosferu iz oštećenog nuklearnog reaktora, koje onda tvore radioaktivni oblak i kao radioaktivne padaline dopijevaju u okoliš. Među ispuštenim fizijskim proizvodima nalaze se ovi radionuklidi: plemeniti plinovi ( $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ), radioaktivni izotopi joda (od  $^{131}\text{I}$  do  $^{135}\text{I}$ ), radioaktivni izotopi cezija ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{136}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ), radioaktivni izotopi rubidija (od  $^{88}\text{Rb}$  do  $^{91}\text{Rb}$ ) i rodija (od  $^{107}\text{Rh}$  do  $^{109}\text{Rh}$ ), zatim  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , te radioizotopi nekih drugih elemenata (Nd, Pr, Y, Nb, Am, Pu, Np i Zr) (7, 8). Koncentracija radionuklida koja će se istaložiti na tlo na određenoj udaljenosti od oštećenog reaktora ovisit će o količini radionuklida koja je izbačena u atmosferu, visini mjesta odakle je izbačena, brzini i smjeru vjetra, atmosferskim prilikama, temperaturi u reaktoru, precipitaciji na tlu, fizičkim i kemijskim oblicima oslobođenih radionuklida, te o drugim čimbenicima (9). Neposredno nakon nuklearne nesreće u Černobilu, na području Švedske identificirano je u zraku šesnaest radionuklida:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{239}\text{Np}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{132}\text{I}$  i  $^{136}\text{Cs}$  (10), a u Velikoj Britaniji uglavnom devet:  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{140}\text{Ba}$  i  $^{140}\text{La}$  (11). Od svih nabrojanih radionuklida najvažniji su  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{134}\text{Cs}$ , koje obično nazivamo biološki značajnim radionuklidima. U ovu skupinu radionuklida spadaju još i  $^{89}\text{Sr}$  i  $^{90}\text{Sr}$ . Naročito je značajan ovaj potonji čiji poluraspad (vrijeme potrebno da radioaktivnost spadne na polovicu) iznosi čak 28 godina. Međutim, pri ispuštanju radioaktivnih tvari u atmosferu prilikom nuklearnih nesreća, on ne predstavlja veću opasnost jer je u toj mješavini radionuklida nazočan u koncentraciji koja predstavlja tek stoti dio (oko 1%) aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  (12).

Jod 131 je  $\beta$ - i  $\gamma$ -emiter s fizičkim poluraspadom od 8,05 dana (8) i biološkim (vrijeme koje je potrebno da organizam izluči polovicu unijete koncentracije nekog elementa) od 138 dana (13). Jod se iz probavnog sustava apsorbira gotovo 100%, a u organizam može dospjeti i udisanjem, ali u mnogo manjim količinama nego *per os* (13). Unijet u organizam  $^{131}\text{I}$  se nakuplja u štitnjači, i to u prosjeku 30% od unijete količine (14). Glavni izvor kontaminacije za čovjeka jest mlijeko (7).

Cezij 137 također je  $\beta$ - i  $\gamma$ -emiter s fizičkim poluraspadom od 30 godina (poluraspad za cezij 134 je 2,046 godine) (8). Prosječno biološko poluizlučivanje za odrasle osobe je 93 dana, krećući se od 68 dana ljeti do 130 dana zimi, dok je u djece kraće (15). Iz probavnog sustava  $^{137}\text{Cs}$  se apsorbira 80–90% (16). U organizmu se on raspoređuje poput kalija po mekim tkivima (17), smještajući se unutar stanice (18).  $^{137}\text{Cs}$  odlaže se i u kosti gdje je npr. u rebrima nazočan u jednakoj ili čak i većoj koncentraciji negoli u mišićima (19). Glavni izvor kontaminacije za čovjeka su mlijeko i meso (20).

Ako radioaktivne tvari dospiju u okoliš u većim količinama, kontaminirat će ga, a ljudi će biti ozračeni. Ozračivanje ljudi može biti vanjsko i unutrašnje (21). Kod vanjskog ozračivanja radioaktivni izvor je izvan organizma, npr. u radioaktivnom oblaku, na tlu, ili, pak, na koži. Kod unutrašnjeg ozračivanja izvor je zračenja u organizmu kamo može dospjeti probavom, disanjem ili,

rjeđe, kroz kožu, naročito ozlijeđenu. Bez obzira o kakvom se ozračivanju radilo, ono može izazvati određene promjene u čovjeka. Učinke ionizacijskog zračenja u čovjeka dijelimo na nestohastičke i stohastičke (22). Nestohastički učinci su oni za koje postoji prag-doza. To je doza ionizacijskog zračenja ispod koje se učinak ne pojavljuje, a iznad koje se on pojavljuje i postaje sve jači s porastom doze. U ovu skupinu učinaka spadaju svi somatski učinci, osim raka i leukemije koje ubrajamo u stohastičke učinke. Od svih somatskih učinaka najniža je prag-doza za leukopeniju i iznosi 0,5 Sv (50 rema). Doza od 1 Sv (100 rema) prosječni je prag doze za anoreksiju, mučninu, povraćanje i umor (23). Doza od 3,5 Gy (350 rada) (odgovara otprilike ekvivalentnoj dozi od 3,5 Sv (350 rema) jest srednja smrtonosna doza, tj. doza od koje će umrijeti oko 50% ozračenih osoba (24).

Stohastički učinci su oni za koje ne postoji prag-doza, pa je ozljeda, čak i ona najteža, posljedica slučajnog događaja; sa smanjenjem doze zračenja smanjuje se samo vjerojatnost nastajanja te promjene, pri čemu se ta vjerojatnost nikada ne svodi na nulu. U ovu skupinu učinaka spadaju svi genetski (nasljedni) učinci, te rak i leukemija (22).

Prema tome, doze niže od 0,5 Sv (50 rema) neće u čovjeka izazvati neke somatske učinke, tj. neće izazvati nikakve kliničke ni morfološke promjene na organima ozračenih jedinki. Međutim, one mogu izazvati promjene na genima tjelesnih ili spolnih stanica, što može imati za posljedicu pojavu raka, ili različitih oštećenja na potomstvu, i to predstavlja jedan od najvećih problema u zaštiti od zračenja. Zbog toga je ICRP 1977. godine (22), u namjeri da rizik od stohastičkih učinaka svede na najmanju moguću mjeru, donijela preporuke o najvišoj dopuštenoj izloženosti zračenju. Tako npr. osobe profesionalno izložene ionizacijskom zračenju smiju primiti najviše dozu od 5 mSv (5 rema) godišnje (ujednačeno ozračivanje cijelog tijela). Pojedinci ili grupe pojedinaca iz neke populacije, tj. osobe koje se ne bave profesionalno zračenjem, smiju primiti dozu od najviše 5 mSv (0,5 rema) godišnje. I konačno, prosječna doza iznad prirodnog zračenja koju smije primiti godišnje neka (određena) populacija treba biti što je moguće manja, ali nikako viša od 1,7 mSv (170 rema).

Nakon upoznavanja ovih činjenica bit će nam lakše raspravljati o eventualnim posljedicama koje je ionizacijsko zračenje ostavilo na stanovništvu nakon černobilske nuklearne nesreće. No, osim prikazanih činjenica moramo bezuvjetno znati još jedan podatak. Taj podatak jest doza, približna ili procijenjena, koju je primilo stanovništvo određenog područja. Nažalost, do sada (siječanj 1987) još nije objavljeno koliku je dozu zračenja primilo stanovništvo SFR Jugoslavije. Zbog toga, mi ćemo se ovom prilikom poslužiti podacima o dozi koju je primilo stanovništvo sjeverne Velike Britanije, a koje je objavio *Baverstock* (25). U vezi s tim nameće nam se pitanje: možemo li podatke o dozi koju je primilo stanovništvo sjeverne Velike Britanije primijeniti na jugoslavensko stanovništvo, i na temelju tih podataka prosuđivati o eventualnim posljedicama koje mogu nastati zbog tih primljenih doza? Stojim na stajalištu da možemo. Naime, prema podacima Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) (26), akumulirano taloženje  $^{131}\text{I}$  na tlo do 8. svibnja 1986. godine iznosilo je u sjevernoj Sloveniji, sjevernoj Hrvatskoj, sjevernoj Bosni te u Vojvodini i ostalim dijelovima Srbije oko 10 kBq/m<sup>2</sup> ili

manje, dok je u ostalim predjelima Jugoslavije bilo još manje. Akumulirano taloženje  $^{131}\text{J}$  na tlo sjeverne Velike Britanije u istom razdoblju iznosilo je oko 100 kBq/m<sup>2</sup> ili manje. Akumulirano taloženje  $^{137}\text{Cs}$  na tlo u istim dijelovima Jugoslavije i u istom razdoblju iznosilo je između 3 i 10 kBq/m<sup>2</sup>, dok je u ostalim dijelovima Jugoslavije iznosilo 0,3 kBq/m<sup>2</sup> ili manje. U sjevernoj Velikoj Britaniji kontaminacija cezijem 137 iznosila je između 10 i 30 kBq/m<sup>2</sup>. Iz navedenih podataka jasno se razabire da je kontaminacija tla jodom 131 i cezijem 137 bila niža na području Jugoslavije negoli na području sjeverne Velike Britanije, pa je stoga logično pretpostaviti, čak uz pretpostavku da izneseni podaci ne moraju biti apsolutno točni, da jugoslavensko stanovništvo, ukoliko nije primilo manju dozu od stanovništva sjeverne Velike Britanije, nikako nije primilo veću. Naravno uz uvjet da su poduzete mjere zaštite i stvarno ponašanje ljudi na uspoređenim područjima bili više manje podjednaki.

Pa što je to izračunao *Baverstock* (25)? On je izračunao prosječnu ekvivalentnu dozu za dvije starosne grupe, odraslo stanovništvo i djecu od šest mjeseci, u Velikoj Britaniji. Mi ćemo se za naše potrebe koristiti samo podacima koji se odnose na stanovništvo sjeverne Velike Britanije, jer je radioaktivna kontaminacija u južnoj Velikoj Britaniji bila još niža nego u Jugoslaviji, pa ta doza ne bi bila realna za naše prilike. Dakle, izračunao je dozu za cijelo tijelo, te posebno za štitnjaču, pluća i kožu, jer su ti organi najviše izloženi zračenju; štitnjača jer se u nju nakuplja jod 131, pluća jer radionuklidi mogu udisanjem izravno ući u njih, pa ako su još netopljivi tu se zadrže i ozračuju ih, a koža jer je prekrivač čitavog tijela i najviše je izložena vanjskom zračenju. Pri izračunavanju doze uzeti su u obzir svi mogući izvori zračenja: zračenje iz radioaktivnog oblaka, s tla, i s kože (vanjsko ozračivanje), te ozračivanje radionuklidima unijetim u organizam hranom ili udisanjem (unutrašnje ozračivanje). Doza koju će stanovništvo primiti s tla, izračunata je za razdoblje od pet godina, tj. do svibnja 1991. godine. Izračunatu dozu iz drugih izvora zračenja stanovništvo će primiti do kraja života, odnosno do potpunog radioaktivnog raspada radionuklida ili do njegove eliminacije iz organizma. To je tzv. vezana ekvivalentna doza (committed dose equivalent).

Težinu posljedica od primljenih doza ionizacijskog zračenja nakon černobilske nesreće moći ćemo lakše i realnije procijeniti ako ih usporedimo s dozom koju stanovništvo diljem svijeta primi od prirodnog zračenja. Doza od prirodnog zračenja koju stanovništvo SAD-a primi iznosi 0,8—1 mSv/osobu/godinu (80—105 mrema). Istodobno stanovnici Denvera, grada u SAD-u, prime dozu od 1,30 do 2,30 mSv/osobu/godinu (130—230 mrema) (7). Prema tome, prosječni Denverčanin primi godišnje dozu veću za 0,5—1,30 mSv (50—130 mrema) od prosječnog Amerikanina. Prosječna doza koju prime stanovnici Evrope iznosi 1 mSv/osobu/godinu (100 mrema). U pojedinim dijelovima Evrope ta doza je, međutim, i nekoliko puta viša (27).

Stanovništvo sjeverne Velike Britanije bit će, zbog černobilske nesreće, u razdoblju od svibnja 1986. do svibnja 1991. godine, najviše izloženo zračenju s tla. Hranom unijeti radionuklidi također su pridonijeli i pridonijet će ukupnoj dozi, ali manje od ekspozicije s tla. Doza za cijelo tijelo koju će primiti stanovnici Velike Britanije kroz to razdoblje, tj. tijekom pet godina, jest do

1 mSv/osobu (100 mrema). Prema tome, ta doza predstavlja godišnje povećanje od oko 20% u odnosu na dozu koju stanovništvo prosječno primi od prirodnog zračenja tijekom jedne godine. Znači li to i 20% veći rizik od raka? Ne, to ne znači povećan rizik od raka, jer su *Hanson i Komarov* pokazali 1983. godine (28) da povećana prirodna radioaktivnost u odnosu na prosječnu, ne utječe na smrtnost od raka.

Ekspozicija s tla također je tom prilikom bila glavni izvor ozračivanja pluća, dok su radionuklidi unijeti u pluća udisanjem mnogo manji izvor ozračivanja. Primljena doza iznosi do 1 mSv/pluća/5 godina (100 mrema). Da bismo lakše procijenili opasnost od ove doze, navest ćemo dva podatka: prosječna doza od prirodnih izvora radona i njegovih potomaka u Velikoj Britaniji iznosi 18 mSv/pluća/god. (1800 mrema). Doza koju prime na isti način stanovnici Cornwalla iznosi čak 400 mSv/pluća/god. (40.000 mrema) (29). Prema tome, iz ovih podataka lako se može zaključiti da je prosječna doza apsorbirana u plućima, koju su primili stanovnici sjeverne Velike Britanije, doista beznačajna.

Koža će u prosjeku primiti dozu do 1 mSv/5 godina (100 mrema). Glavni izvor ozračivanja su radionuklidi istaloženi na zemlju, te cezijevi izotopi odlagani u koži. Radioaktivna kontaminacija kože pridonijela je dozi samo 10%. Prije nego iznesemo stajalište o opasnosti od te doze, treba reći da: ukoliko se relativno teške, visokoaktivne čestice istalože na kožu i na njoj se neko vrijeme zadrže, mogu povećati lokalnu dozu na koži i prouzročiti rane učinke (crvenilo i upala) ili pak kasne učinke (karcinom kože, npr.). Ovakav slučaj primijećen je na Marshallovim otocima nakon američkih pokusnih termonuklearnih eksplozija (25). Nije izviješteno da su na području Velike Britanije zabilježene ovakve čestice. Znamo da ih je bilo u Švedskoj (10). Nitko do sada nije izvijestio da li ih je bilo u Jugoslaviji. Na temelju usporedbe taloženja joda 131 i cezija 137 na tlo Velike Britanije, Švedske i Jugoslavije (26), može se pretpostaviti da takvih visokoaktivnih čestica kod nas nije bilo. Prema tome, ako nije bila nazočna kontaminacija kože česticama koje su bile vrlo radioaktivne, doza koju je primila koža nakon černobilske nesreće nije opasna. Radi se, naime, samo o povećanju doze od 20% u odnosu na dozu koju koža primi godišnje od prirodnog zračenja. A kako već rekosmo, dokazano je da povećana prirodna radioaktivnost ne povećava rizik od raka (28).

*Baverstock* (25) nadalje procjenjuje da će štitnjača šestomjesečne djece primiti dozu od 10 do 20 mSv (1.000—2.000 mrema) tijekom pet godina. Glavni je izvor ozračivanja  $^{131}\text{I}$  (90%). Ostatak doze od 10% štitnjača je primila ili će primiti od vanjskog  $\gamma$ -zračenja, te od cezijevih radio-izotopa ugrađenih u štitnjaču. Primljena doza, prema mišljenju istog autora, predstavlja 10—20% veći rizik od pojave karcinoma štitnjače. Ta se procjena temelji na pretpostavci da će rizik od karcinoma štitnjače biti povećan ako ta žlijezda primi dozu koja je iznad 1 mSv (100 mrema) (to je doza koju štitnjača primi godišnje u ljudi koji žive u područjima s »normalnim« osnovnim prirodnim zračenjem). Osim toga rizik od karcinoma štitnjače tijekom trideset godina bit će trostruk kod primljenih doza od 90 mSv (9.000 mrema) (30), a rizik od doza zračenja manjih od 90 mSv smanjivat će se proporcionalno sa smanjivanjem doze. Što ustvari znači 10—20% povećan rizik od karcinoma štitnjače? To znači, ako je npr. u nekoj populaciji prije černobilske nesreće bilo sto

djece oboljele od karcinoma štitnjače, nakon černobilske nesreće može ih eventualno oboljeti 110—120. »Eventualno«. Znači da djeca mogu oboljeti, ali ne moraju, jer radi se samo o povećanoj vjerojatnosti. Prije negoli objasnimo pojam rizika, treba reći da u literaturi postoje podaci koji govore o karcinogenom djelovanju joda 131 na štitnjaču; oni se kreću od toga da liječenje hipertiroidizma u djece jodom 131 ne pokazuje karcinogeni učinak, koji je inače zapažen prilikom vanjskog ozračivanja štitnjače x-zrakama (31), pa do toga da nema dokaza da je jod 131 bitno manje karcinogen od x-zraka (32). Potonji autori ipak kažu da je rizik koji se izračunava iz rezultata dobivenih na djeci ozračenoj x-zrakama previsok a da bi se mogao generalno primijeniti na učinke malih doza ionizacijskog zračenja na stanovništvo širom svijeta. Pa što je to rizik od ionizacijskog zračenja? To je matematički izračunata vjerojatnost pojavljivanja nekog učinka, karcinoma naprimjer. Zasto matematički izračunata vjerojatnost? Zato što nema podataka o štetnim učincima malih doza ionizacijskog zračenja dobivenih na ljudima. Zbog toga, u tu se svrhu koriste podaci o preživjelim osobama nakon eksplozije atomske bombe u Hirošimi i Nagasakiju, zatim o osobama ozračenim u nuklearnim nesrećama, te o bolesnicima ozračenim velikim dozama u svrhu liječenja. Temeljna pretpostavka za procjenu rizika jest da rizik od stohastičkih učinaka, raka naprimjer, izazvanih zračenjem raste razmjerno s porastom doze i brzine doze (1). Prije nego parafraziramo ovu rečenicu, moramo reći što je to doza, a što brzina doze. Doza je ukupna količina apsorbirane energije zračenja koju primi određena jedinka po jedinici mase. Brzina, pak, doze, jest apsorbirana energija (tj. doza) u jedinici vremena. Naprimjer: brzina doze od 10 Gy/h znači da će određena jedinka, ako bude ozračivana jedan sat, primiti dozu od 10 greja. Naravno da će ukupno primljena doza pri toj brzini doze (10 Gy/h) ovisiti o tome koliko će dugo jedinka biti izložena zračenju. Sada možemo protumačiti temeljnu postavku o riziku. To jednostavno znači: veća doza veći rizik, i obratno; isto tako: veća brzina doze veći rizik, i obratno. To je točno za ozračivanje velikim dozama ionizacijskog zračenja. Da li je to tako i pri ozračivanju malim dozama ionizacijskog zračenja, vidjet ćemo iz slijedećih primjera. No, najprije moramo reći što razumijevamo pod »malim dozama« ionizacijskog zračenja. Male doze ionizacijskog zračenja su doze do 0,5 Gy (50 rada) primljene akutno pri relativno visokim brzinama doze. To mogu biti i doze primljene frakcionirano, s time da je svaka od njih manja od 0,1 Gy (10 rada) na godinu bez obzira na brzinu doze (33). Pogledajmo te primjere iz literature. *Ullrich i suradnici* istraživali su 1976. godine (34), pored ostalog, i pojavu raka u miševa ozračenih različitim dozama  $\gamma$ -zraka. Njihovi su rezultati pokazali obrnuti odnos između doze zračenja i pojave nekih tumora (sarkom retikularnih stanica i adenom pluća). Naime, veći postotak spomenutih tumora zabilježen je nakon ozračivanja dozom od 0,1 Gy (10 rada) negoli nakon ozračivanja dozom od 1 Gy (100 rada). Za neke druge tumore, kao npr. tumor hipofize, maternice i dojke, nije nađen obrnuti odnos između doze i pojave, ali nije nađena ni proporcionalnost, već su se rezultati kretali krivudavo. Iz ovih podataka može se jasno razabrati da pri niskim dozama ionizacijskog zračenja ne mora postojati linearan odnos između doze i učinka. A kakav je odnos između brzine doze i učinka pri malim dozama zračenja može se razabrati iz slijedećeg

primjera. *Crompton i suradnici* (35) istraživali su vezu između brzine doze i broja mutacija. U tu su svrhu ozračili kulturu stanica kineskog hrčka V79  $\gamma$ -zrakama ( $^{60}\text{Co}$ ) s različitim malim brzinama doze, a zatim ih testirali na otpornost prema mutacijama s pomoću 6-tiogvanina. Kao referentna vrijednost poslužio je broj mutacija dobiven nakon ozračivanja visokom brzinom doze od 84 Gy/h (8400 rada/h). Rezultati njihovih istraživanja pokazali su da je broj mutacija reduciran pri brzini doze od 50 mGy/h (5 rada/h), dok je pri nižim brzinama doze, npr. pri brzini doze od 8 mGy/h i 5 mGy/h (0,8 i 0,05 rad/h), broj mutacija bio povećan. Pri brzini doze od 8 mGy/h broj mutacija izazvanih 6-tiogvaninom bio je čak četverostruko veći od broja mutacija dobivenih pri ekvivalentnoj »akutnoj« brzini doze od 84 Gy/h. Pri brzini doze od 5 mGy/h broj mutacija je bio otprilike za pola niži od onoga dobivenog pri dozi od 8 mGy/h, što pokazuje da je brzina od 8 mGy/h bila »optimalna« mala brzina doze za izazivanje mutacija. Prema tome, iz ovog primjera jasno proizlazi da pri malim brzinama doze zračenja ne mora postojati linearan odnos između brzine doze i učinka.

Da bismo izbjegli moguće prigovore kako se prikazani primjeri odnose na životinje (miš), i na kulturu stanica, a ne na čovjeka, pa, prema tome, ti rezultati ne moraju ni vrijediti za nj, navest ćemo jedan primjer koji pokazuje da su opravdane naše sumnje u ispravnost postavke o linearnom odnosu između doze i brzine doze i pojave malignih bolesti u čovjeka pri malim dozama zračenja. Naime, *Ecknoff i suradnici* (36) istraživali su odnos između broja smrtnih slučajeva od leukemije i nadmorske visine življenja, odnosno doze prirodnog zračenja, konkretno, kozmičkog zračenja. Rekli smo, naime, već ranije da se doza od kozmičkog zračenja povećava s porastom nadmorske visine. Tako je npr. doza od kozmičkog zračenja na razini mora (dakle, nadmorska visina od nula metara) 0,31 mSv/god. (31 mreem/god.) (navest ćemo maksimalne vrijednosti), na visini od 1500 metara je 0,60 mSv/god. (60 mreema/god.), a na visini od 3.000 metara 1,20 mSv/god. (120 mreema/god.). Prije epidemioloških istraživanja, spomenuti autori su izračunali (očekivani) broj oboljelih od leukemije na 100 tisuća stanovnika i dobili ove vrijednosti: na razini mora očekivani broj smrtnih slučajeva od leukemije je 0,062, na 1.500 metara nadmorske visine iznosi 0,12, i na 3.000 metara 0,24 smrtnih slučaja. Epidemiološka istraživanja koja su zatim načinili pokazala su da je broj smrtnih slučajeva od leukemije na razini mora bio oko 6,5 na 100 tisuća stanovnika, umjesto 0,062 koliko su izračunali i da je smrtnost od leukemije doista rasla s porastom nadmorske visine, ali samo do 600 metara, a iznad te visine smrtnost od leukemije značajno je opadala s povećanjem nadmorske visine, odnosno s porastom doze kozmičkog zračenja.

Iz ovih primjera možemo, dakle, razabrati da glavna postavka na kojoj se temelji izračunavanje rizika ne počiva baš na čvrstim osnovama, i da proračun rizika u čovjeka ne mora biti jednak rezultatima dobivenim epidemiološkim istraživanjima. Prema tome, ni pretpostavka koju je iznio *Baverstock* (25), da doza koju su primila šestomjesečna djeca sjeverne Velike Britanije predstavlja 10—20% povećan rizik od karcinoma štitnjače, ne mora se ostvariti. No, ako bi se ta pretpostavka i ostvarila, postoji još jedna utješna činjenica. Naime, karcinom štitnjače uspješno se liječi, a smrtnost od njega ekstremno je mala (31). Stoga, na temelju prikazanih činjenica, stojim na



stajalištu da stanovništvo SFR Jugoslavije nije, i neće pretrpjeti značajnijih posljedica od zračenja uzrokovanim černobilskom nuklearnom nesrećom.

Htio bih još upozoriti na neinformiranost velikog dijela našeg stanovništva kada je u pitanju ionizacijsko zračenje. Koliko smo zapravo (ne)informirani i koliko je naša uznemirenost zbog zračenja uzrokovanog nuklearnom nesrećom u Černobilu bila pretjerana, lako ćemo razabrati kad prikazemo podatke o dozama zračenja kojima su izloženi pacijenti prilikom određenih medicinskih pretraga, na koje ih pojedini liječnici olako šalju, ili ih pojedini pacijenti, često, čak sami zahtijevaju.

Najprije ćemo prikazati podatke o dozama x-zračenja kojima su pacijenti u SAD-u bili izloženi prilikom nekih rendgenskih snimanja (radiografija) tijekom 1982. i 1983. godine (37). Prilikom jednokratne radiografije abdomena (trbuha) ekspozicija na koži pacijenta gdje zrake ulaze u organizam (»ulazna« koža) kretala se do čak  $5,16 \times 10^{-4}$  C kg<sup>-1</sup> (2.000 mR) (za orijentaciju, ova vrijednost odgovara otprilike ekvivalentnoj dozi od 20 mSv (2.000 mrema)). Prilikom najvećeg broja pregleda (u 16% radiografija abdomena) pacijenti su primili dozu između  $0,77 \times 10^{-4}$  i  $1,032 \times 10^{-4}$  C kg<sup>-1</sup> (300 i 400 mR) (odgovara otprilike ekvivalentnoj dozi od 3 do 4 mSv /300—400 mrema/). Prilikom snimanja zuba, doza na »ulaznoj« koži pacijenta kretala se od  $0,129 \times 10^{-4}$  do  $2,58 \times 10^{-4}$  C kg<sup>-1</sup> (50—1.000 mR) (0,5—10 mSv /50—1000 mrema/); primljena doza u 15% rendgenskih snimanja zuba kretala se od  $0,516 \times 10^{-4}$  do  $0,645 \times 10^{-4}$  C kg<sup>-1</sup> (200—250 mR) (2—2,5 mSv /200—250 mrema/). Pacijenti koji su bili podvrgnuti radiografiji lumbosakralne kralješnice bili su izloženi dozi na »ulaznoj« koži od  $4,9 \times 10^{-4}$  C kg<sup>-1</sup> (1.900 mR) (19 mSv /1.900 mrema/). Najviše pregledanih pacijenata, 13—14% bilo je izloženo dozi od  $1,032 \times 10^{-4}$  do  $1,29 \times 10^{-4}$  C kg<sup>-1</sup> (400—500 mR) (4—5 mSv /400—500 mrema/). Ekspozicija na »ulaznoj« koži prilikom radiografije pluća bila je najniža od svih navedenih primjera i kretala se do  $0,232 \times 10^{-4}$  C kg<sup>-1</sup> (90 mR) (0,9 mSv /90 mrema/). U 23% pregledanih pacijenata ekspozicija je iznosila  $0,0258 \times 10^{-4}$  —  $0,0387 \times 10^{-4}$  C kg<sup>-1</sup> (10—15 mR) (0,10—0,15 mSv /10—15 mrema/). Prilikom radiografije cijele kralješnice, štitnjača je primila dozu od 1,9 mGy (190 mrada) (1,9 mSv /190 mrema/).

To su dakle doze koje su pacijenti u SAD-u primili prilikom radiografije. O kakvim se, pak, dozama radi prilikom primjene radionuklida (radiofarmaceutika) u nuklearnoj medicini, vidjet ćemo iz primjera koje su iznijeli *Mettler i suradnici* 1986. godine (38), a odnose se, pored ostalog, na doze (efektivna ekvivalentna doza) koje su primili američki pacijenti u 1982. godini prilikom obavljanja pojedinih pretraga. Prilikom jedne pretrage mozga organizam je primio dozu od 4,8 do 8,1 mSv (480—810 mrema), ovisno o tome da li se za pretragu koristio <sup>99m</sup>Tc dietilentriaminpentaocetna kiselina (DTPA) ili <sup>99m</sup>Tc O<sub>4</sub>. Ako su se, pak, obavljale pretrage štitnjače, organizam je primio dozu od 0,15 do 59 mSv (15—5.900 mrema) po jednoj pretragi. Budući da se u 80% slučajeva za pretragu štitnjače upotrebljavao <sup>99m</sup>Tc O<sub>4</sub>, to je u najvećem broju pretraga štitnjače primljena doza iznosila 2 mSv (200 mrema). Nadalje, organizam je primio dozu od 4,4 do 10,4 mSv (440—1040 mrema) po jednoj pretrazi krvožilnog sustava, ovisno o tome da li se upotrijebio <sup>99m</sup>Tc fosfat ili <sup>201</sup>Tl klorid. Prilikom pretraga jetre organizam je primio dozu od 2,4 mSv (240 mrema), a prilikom pretrage kostiju 4,4 mSv (440 mrema). Ako je prili-

kom pretrage bubrega upotrijebljen  $^{131}\text{I}$  hipuran, pacijenti su primili dozu od 0,5 mSv (50 mrema), a ako je umjesto toga upotrijebljen  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  DTPA (primijenio se u 60% slučajeva), organizam je primio dozu od 4,8 mSv (480 mrema). Pretraga tumora s pomoću  $^{67}\text{Ga}$  citrata imala je za posljedicu primjenu doze od 12,2 mSv (1.220 mrema), dok je prilikom »ostalih« pretraga organizam primio dozu od 8,1 mSv (810 mrema).

Što ove doze znače za američko stanovništvo možemo razabrati iz ovog podatka: prosječna godišnja doza koju primi pojedinac u SAD-u od zračenja zbog medicinskog tretmana iznosi 0,70 mSv (70 mrema) (5,39). Prema UNSCEAR-u (1), godišnja doza koju stanovništvo u industrijaliziranim zemljama primi od x-zračenja i od zračenja zbog dijagnostike u nuklearnoj medicini (ekspozicija zračenju zbog liječenja nije uzeta u obzir) odgovara polovici godišnje doze od prirodnog zračenja. Unatoč tome, ljudi o ovome izvoru zračenja ne samo da ne govore već i ne razmišljaju. Na »udaru« su samo nuklearne elektrane. Točno je doduše da one, u slučaju većih nesreća, mogu postati vrlo opasne, ali o tome treba raspravljati bez emocija i argumentiranja, uspoređujući korist koju one donose i štetu koju mogu prouzročiti. Dakako, o svemu tome trebala bi biti informirana i šira javnost, jer samo dobro informirana javnost može pravilno odlučivati.

#### Literatura

1. *United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR):* 1982 Report: Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations, New York, 1982.
2. *Eisenbud, M.:* Environmental Radioactivity, Academic Press, New York; London, 1973, str. 159—168.
3. *Fleischer, R. L., Turner, L. G., George, A. C.:* Passive measurement of working levels and effective diffusion constants of radon daughters by nuclear track technique, *Health Phys.*, 47 (1984) 9.
4. *Draganić, I.:* Radioaktivni izotopi i zračenja, knjiga I, Naučna knjiga, Beograd, 1981, str. 244.
5. *Bodansky, D.:* Electricity generation choices for the near term, *Science*, 207 (1980) 721.
6. *Tadmor, I.:* Sensitivity analysis of the influence of sourceterm and environmental parameters on the radiological risk of coal-fired plants, *Health Phys.*, 51 (1986) 61.
7. *Bell, M. C., Bell, L. S.:* Possible effects of nuclear power reactor accidents on agriculture. University of Tennessee Agricultural Experiment Station, RR No. 81—11, (1981) 3.
8. *Radiological Health Handbook*, Bureau of Radiological Health. U. S. Department of Health, Education and Welfare, Rockville, 1970.
9. *International Atomic Energy Agency (IAEA):* Planning for off-site response to radiation accidents in nuclear facilities, Safety Series No 55, IAEA, Vienna, 1981.
10. *Devell, L., Tovedal, H., Bergström, U., Appelgren, A., Chyssler, J., Anderson, L.:* Initial observations of fallout from the reactor accident at Chernobyl, *Nature*, 321 (1986) 192.
11. *Fry, F. A., Clarke, R. H., O'Riordan, M. C.:* Early estimates of UK radiation doses from the Chernobyl reactor, *Nature*, 321 (1986) 193.
12. *Kaul, A.:* Chernobyl nuclear accident: Quantification and assesment of risk from radiation, Second World Congress Foodborne Infections and Intoxications, Berlin (West), 1986, Final Congress Document, str. 58.

13. Wasserman, R. H., Lengemann, F. W., Thompson, J. C. Jr., Comar, C. L.: The transfer of fall-out radionuclides from diet to man. U: Radioactive fall-out, soils, plants, foods, man. Ur. Fowler, E. B., Elsevier Publishing Co., Amsterdam, 1965, str. 204.
14. Comar, C. L.: Factors influencing the biological availability of fallout radionuclides for animals and man, Fed. Proc. 22 (1963), 1402.
15. Boni, A. L.: Correlation of  $^{137}\text{Cs}$  concentration in milk, urine and the whole body, Health Phys., 12 (1966) 501.
16. Moore, W. Jr., Comar, C. L.: Absorption of cesium 137 from the gastrointestinal tract of the rat, Int. J. Radiat. Biol., 5 (1962) 247.
17. Hood, S. L., Comar, C. L.: Metabolism of cesium 137 in rat and farm animals, Arch. Biochem. Biophys., 45 (1953) 423.
18. Wasserman, R. H., Comar, C. L., Towardock, A. R.: Metabolic behavior of  $^{137}\text{Cs}$  —  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  in the lactating goat, Int. J. Radiat. Biol., 4 (1962) 299.
19. Anderson, R. W., Gustafson, P. F.: Concentration of cesium-137 in human rib bone, Science, 137 (1962) 668.
20. Eisenbud, Merrill: Distribution of radioactivity in food, Fed. Proc., Part One, 22 (1963) 1410, Cit. prema: Bell, M. C., Bell, L. S. (7).
21. Jovanović, M. M.: Nuklearna dejstva i čovek (procena neposrednih i poznih posledica ozračenja), Beograd, Vojnoizdavački i novinski centar, 1986, str. 8.
22. International Commission on Radiological Protection (ICRP): ICRP Publication 26, Annals of ICRP 1, Oxford, Pergamon Press, 1977.
23. Voelz, G. L.: A collection of helpful items for medical evaluation of ionizing radiation exposure cases, U: Radiation emergency preparedness (Health Physics and medical aspects). Proceedings of a regional seminar for Asia and the Pacific region, Kalpakkam (Indija): Government of India, Atomic Energy Commission, 1982, str. 192.
24. International Atomic Energy Agency (IAEA): Manual on Early Medical Treatment of possible Radiation Injury, Safety Series No. 47, IAEA, Vienna, 1978.
25. Baverstock, K. F.: A preliminary assesment of the consequences for inhabitants of the UK of the Chernobyl accident. Int. J. Radiat. Biol. 50 (1986) III.
26. Anonimno: Radiation levels: WHO reports on Chernobyl. International Atomic Energy Agency Bulletin, 28 (3) (1986) 27.
27. United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR): 1977 Report: Sources and effects of ionising radiation, New York United Nations, 1977, Cit. prema: Baverstock, K. F.: (25).
28. Hanson, G. P., Komarov, E.: Health effects in residents of high background radiation regions. U: International Atomic Energy Agency: Biological effect of low-level radiation. Proceedings of a symposium. Venice, 1983. Vienna, 1983. str. 211.
29. Wrixon, A. D., O'Riordan, M. C.: The control of indoor radiation exposure, Sci. Total Environ., 45 (1985) 657.
30. Ron, E., Modan, B.: Thyroid and other neoplasms following childhood scalp irradiation. Radiation carcinogenesis: Epidemiology and Biological Significance. Boice, J. D. Jr., Fraumeni, J. F. Jr., New York, Raven Press, 1984. cit. prema: Baverstock, K. F.: (25).
31. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR): The effects on populations of exposure to low-levels ionizing radiation, Washington DC, National Academy of Sciences, 1980.
32. Johnson, J. R., Myers, D. K.: Is I-131 less efficient than external irradiation of producing thyroid cancers?: a review. U: International Atomic Energy Agency: Biological effects of low-level radiation. Proceedings of a symposium, Venice, 1983. Vienna, 1983, str. 289.
33. International Commission on Radiological Protection (ICRP): The evaluation of risks from radiation, Health Phys., 12 (1966) 239.
34. Ullrich, R. L., Jernigan, M. C., Cosgrove, G. E., Satterfield, L. C., Bowels, N. D., Storer, J. B.: The influence of dose and dose rate on the incidence of neoplastic disease in RFM mice after neutron irradiation, Radiat. Res., 68 (1976) 115.

35. *Crompton, N. E. A., Zölzer, F., Schneider, E., Kiefer, J.*: Increased mutant yield on low dose-rate  $\alpha$ -exposure of Chinese hamster cells (Abstract), *Int. J. Radiat. Biol.*, 49 (1986) 864.
36. *Ecknoff, N. D., Shultis, J. K., Clack, R. W., Ramer, E. R.*: Correlation of leukemia mortality rates with altitude in the United States, *Health Phys.*, 27 (1974) 377.
37. *Johnson, D. W., Goetz, W. A.*: Patient exposure trends in medical and dental radiography, *Health Phys.*, 50 (1986) 107.
38. *Mettler, F. A. Jr., Christie, J. H., Williams, A. G. Jr., Moseley, R. D. Jr., Kelsey, C. A.*: Population characteristics and absorbed dose to the population from nuclear medicine: United States — 1982, *Health Phys.*, 50 (1986) 619.
39. *Environmental Protection Agency (EPA)*: Radiation quality of environmental in U.S. Office of Rad. Prog. Washington D. C., 1977. Cit. prema: Bell, M. C., *Bell L. S.*: (7).

#### Summary

#### CONSEQUENCES OF THE CHERNOBYL NUCLEAR ACCIDENT

The paper is an attempt to assess the dose of radioactivity likely to be received by Yugoslav inhabitants from the Chernobyl nuclear accident using the dose likely to have been received by the people of north Great Britain where accumulated iodine-131 and caesium-137 deposition was greater than in Yugoslavia.

Based on the results of this analysis it may be concluded that the Yugoslav people neither have suffered nor will suffer in the future health damage from radiation released in the Chernobyl accident.

*Department for Physiology  
and Radiobiology, Veterinary College,  
Zagreb*

*Received for publication  
February 18, 1987*