

Arh. hig. rada, 29 (1978) 31.

IZLOZENOST ČOVJEKA IONIZIRAJUĆEM ZRAČENJU

VLASTA HABAZIN-NOVAK

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb

(Primitljeno 30. V 1977)

U uvodnom dijelu prikaza dat je kratak osvrt o prirodi i načinu djelovanja ionizirajućeg zračenja na biološki sistem.

Potanko je opisana izloženost humane populacije prirodnim i artificijalnim izvorima zračenja.

Raspravljene su osnovne značajke tjelesnih i mogućih genetskih oštećenja.

U dodatku su navedene preporuke Međunarodne komisije za radiološku zaštitu o maksimalno dopuštenim dozama zračenja i definicije osnovnih jedinica zračenja.

Ionizirajuće zračenje je sastavni dio prirodne okoline čovjeka i svih živih vrsta od njihova postanka pa sve do danas (1).

Posljednjih 75 godina izloženost ionizirajućem zračenju je porasla uslijed pojave novih izvora zračenja kao što su produkti eksplozija nuklearnog oružja, rendgenske i gama-zrake te umjetni radioaktivni izotopi. Novi izvori zračenja primijenjeni u raznim granama istraživanja donijeli su čovječanstvu osim opasnosti i neizmjerne koristi u obliku niza novih spoznaja kao i u radiološkoj terapiji malignih tumora (2).

Radioaktivnost je nuklearna pojava koja je praćena emisijom ili nabijenih čestica s niskom (pozitroni, alfa i beta-čestice) ili elektromagnetskog zračenja (rendgenske i gama-zrake) s visokom prodornom moći.

Biološki efekti ionizirajućeg zračenja u biti su slični bez obzira na izvor, tj. svi tipovi zračenja prenose energiju na sisteme kroz koje prolaze stvarajući ionizacije i ekscitacije, a ovisno o njihovoj raspodjeli i prodornosti varira stupanj razaranja biološke organizacije (9).

Uslijed apsorpcije samo jednog kvanta energije ionizirajućeg zračenja primarno nastaje cijeli niz ionizacija i ekscitacija koje se zbivaju u roku

od 10^{-17} do 10^{-15} sekunde, u toku čega dolazi do stvaranja tzv. slobodnih radikala odnosno ekscitiranih molekula. U vodenoj okolini, u kojoj se odvija ionizacija, biološki važne makromolekule gube bitne biološke i fizikalne osobine. Ovdje se radi o indirektnim učincima ionizirajućih zračenja, tj. o reakciji slobodnih radikala s biološki važnim molekulama. Slobodni radikali su intermedijeri u prijenosu energije zračenja na biološke molekule. Prihvatno mjesto takvog zračenja nije u samoj molekuli već u vodenoj okolini koja okružuje molekulu ili strukturu. To je teorija o indirektnom djelovanju ionizirajućeg zračenja (8). Protivna ovome je teorija o pogotku (8) koja govori o direktnom djelovanju zračenja na biološki važne makromolekule, tj. prihvatno mjesto ionizirajućeg zračenja je u samoj molekuli ili staničnoj strukturi. Svaki pogodak daje jedinicu učinka.

Smatra se da je glavna radiobiološka oštećenja posljedica indirektnog djelovanja zračenja, jer stanice i tkiva sadržavaju 70–80% vode.

Uslijed apsorpcije energije zračenja u biološkom sistemu dolazi do oštećenja molekula, organela, stanica, tkiva odnosno organa pa sve do promjena u genetskim karakteristikama uvjetovanih mutacijama. Slijed događaja teče uvijek od primarnih učinaka, koji su posve fizikalnog značenja, preko kemijskih promjena do bioloških pojava. Za stanicu i organizam nije svejedno kada doživi zračenje, jer su različito osjetljivi u različitim fazama funkcionalnog razvoja (9). Ni jedno tkivo nije potpuno otporno prema ionizirajućem zračenju pa ipak postoje razlike u osjetljivosti odnosno otpornosti različitih tkiva. Dok su visokodiferencirana tkiva (živčano, mišićno i koštano) najotpornija, krv, krvotvorno i limfatično tkivo, stanice spolnih žlijezda, kože i epitelne stanice probavnog trakta su najosjetljivija tkiva. Tkiva koja se neprestano nadoknađuju općenito su osjetljivija od permanentnih tkiva (10). Najosjetljivija su tkiva koja se sastoje od stanica u aktivnoj diobi. Pritom vrijedi *Bergonié-Tribondeauovo* pravilo: »Tkiva i organi su to osjetljiviji na ionizirajuće zračenje što su im stanice na nižem stupnju zametnog razvitka i što se brže razmnožavaju; tkiva i organi su otporniji na zračenje što im se stanice sporije razmnažaju i što su više diferencirane« (11).

Dosta se zna o biološkom djelovanju velikih doza zračenja, ali veoma malo o djelovanju malih. Smatra se da je dugotrajno izlaganje malim dozama također štetno po ljudsko zdravlje (37).

Djelovanje zračenja na čovjeka poznato je po posljedicama eksplozija atomskih bombi u Hirošimi i Nagasakiju 1945. g. (3), po opažanju nesretnih slučajeva kod istraživanja u nuklearnim institutima (4), kao i po zapazanjima posljedica terapijskih zahvata (5, 6).

Oko 59% izloženosti čovjeka zračenju odnosi se na prirodno zračenje (kozmičko zračenje i prirodni radioaktivni materijal), 40% na zračenje u medicinske svrhe (bilo dijagnostičke ili terapijske) a oko 1% na radioaktivne oborine koje su posljedica nuklearnih eksplozija (7).

Svako izlaganje ionizirajućem zračenju je nepoželjno i treba ga svesti na najmanju moguću mjeru i primjenjivati samo nužno u svrhu dijagnostike ili liječenja (12, 13).

PRIRODNO IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE

Pod ukupnim prirodnim ionizirajućim zračenjem razumijevamo zračenja kojima je čovjek izložen iz prirodnih vanjskih i prirodnih unutarnjih izvora zračenja (vidi tablicu 1.) (14).

Tablica 1.

Ukupno prirodno ionizirajuće zračenje što ga primaju gonade i koštana srž u toku godine

Izvori zračenja	Doza u mrem/godinu	
	Gonade	Koštana srž
<i>Vanjsko zračenje</i>		
Kozmičko zračenje (uključujući neutrone)	50	50
Zemaljsko zračenje (uključujući zrak)	50	50
<i>Unutarnje zračenje</i>		
^{40}K	20	15
^{226}Ra i razgradni produkti	0,5	0,6
^{228}Ra i razgradni produkti	0,8	1,0
^{210}Pb i razgradni produkti	0,3	0,4
^{14}C	0,7	1,6
^{222}Rn (apsorbiran u krvi)	3,0	3,0
Ukupno	125,3	121,6

Vanjski prirodni izvori zračenja

Vanjski izvori zračenja u okolini u kojoj čovjek živi sastoje se od tzv. kozmičkih zraka i zračenja zemlje kao i građevnog materijala.

Zemlja je stalno »bombardirana« kozmičkim zrakama koje dolaze iz izvanzemaljskih izvora, a primarno se sastoje od 91,5% protona, 7,8% alfa čestica i 0,7% teških jezgara. Na prolazu kozmičkih zraka kroz atmosferu nastaju neutroni, mezoni, gama zrake i energetski elektroni nastali kontaktom primarnih teških čestica s atmosferom Zemlje (15). Njihovom interakcijom s plinovima u atmosferi nastaju brojni radioaktivni izotopi od kojih su najvažniji: ^3H , ^{14}C i ^7Be . Od manje su važnosti ^{10}Be , ^{22}Na , ^{32}P , ^{33}P , ^{35}S , ^{32}Si , ^{39}Cl i ^{36}Cl (15). Početna energija kozmičkih zraka iznosi nekoliko tisuća MeVa, ali glavnina ove energije se gubi prilikom prolaza kroz atmosferu.

Doza kozmičkog zračenja varira ovisno o visini, geografskoj širini i duljini, o magnetskom polju Zemlje te o drugim činiocima kao što su to

Sunčevi i Mjesečevi ciklusi, promjene u temperaturi i barometarskom tlaku. Sva mjerenja upućuju da postoji porast doze s porastom visine i porastom geomagnetske širine (16).

Drugi vanjski prirodni izvor zračenja je radioaktivnost iz tla i građevnog materijala. Zračenje iz tla potječe od radioaktivnih elemenata u zemlji i stijencama. U čovjekovoj okolini postoji pet važnih prirodnih radioaktivnih izotopa koji emitiraju zračenje; to su: ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra i ^{228}Ra te njihovi raspadni produkti. Koncentracija ovih radioaktivnih izotopa varira s geološkim uvjetima i općenito je viša u granitnim ili vulkanskim stijenama (18). Neka područja Zemlje su veoma radioaktivna, na primjer Indija, Guarapari i Brazil gdje je utvrđena radioaktivnost četrdesetak puta jača negoli u ostalim dijelovima svijeta (19).

Oko 50 mrema na godinu iznosi prosječni nivo radioaktivnosti u zgradama koje su građene od opeke i oko 100 mrema na godinu u zgradama od granita (20).

Prosječna doza što je primaju gonade i koštana srž iz svih vanjskih prirodnih izvora iznosi 80—100 mrema na godinu, ali može iznositi i 190 mrema a u nekim područjima svijeta sve do 830 mrema na godinu (20).

Unutarnji prirodni izvori zračenja

Neki prirodni sastojci čovječjeg tijela su radioaktivni (vidi tablicu 1). Osim ovih dolaze još uran i torij ali nisu tako važni s fiziološkog stanovišta.

Prirodni kalij sadržava radioaktivni izotop ^{40}K u proporciji 12:100000. U čovječje tijelo ulazi uzimanjem čvrste hrane i tako postaje sastavnim dijelom tkiva tijela gdje ima određenu fiziološku ulogu. Poluživot radioaktivnog kalija iznosi $1,3 \times 10^9$ godina pa je tijelo konstantno ozračivano iz ovog izvora. Na 140 g kalija dolazi 17 mg ^{40}K što iznosi oko 0,1 μCi ili 4000 dezintegracija po sekundi (21). Izračunato je da meka tkiva tijela primaju godišnje oko 20 mrema ^{40}K a kosti i koštana srž 10—15 mrema na godinu (22).

Radioaktivni plinovi radon i toron udišu se i njihovi razgradni produkti se otapaju i odlažu u tkivima. To doprinosi izloženosti od još 2 mrema na godinu u meka tkiva (22).

Sumirajući doze iz ovih raznih prirodnih izvora vidljivo je da je prosječna osoba izložena totalnoj tjelesnoj dozi, iz prirodnih unutarnjih odnosno prirodnih vanjskih izvora 100—125 mrema na godinu.

ARTIFICIJALNO IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE

Osim što je čovjek stalno izložen zračenju iz prirodnih izvora, izložen je i zračenju provođenom u medicinske svrhe ali i zračenju iz radioaktivnih oborina koje su posljedica testiranja nuklearnog oružja.

Uskoro nakon pronalaska rendgenskih zraka, 1895, uslijedila je njihova primjena. Značajan dio populacije čovječanstva izložen je zračenju svake godine u dijagnostičke svrhe a mnogo manji dio populacije i u tera-

pijske svrhe (kod liječenja malignih bolesti) (tablica 2). U budućnosti će izloženost u medicinske svrhe rasti s razvitkom novih radioloških postupaka, čemu se mora posvetiti naročita pažnja. Pritom se mora posebno razmotriti doza koju prime gonade zbog njezina direktnog odnosa s genetskom opasnošću te doza koju primi koštana srž zbog njezina odnosa s pojavom jedne vrste somatskog oštećenja — leukemije.

Prosječna doza koju čovjek primi u toku jedne godine u dijagnostičke svrhe iznosi oko 80 mrema i tako čovjek u toku 30 godina primi u prosjeku otprilike 3 rema, što s genetskog stanovišta može predstavljati također značajnu dozu.

Druga vrsta zračenja, koja je posljedica aktivnosti čovjeka, vodi porijeklo od detonacija atomskih bombi. Pored osnovnog zračenja kod detonacije nastaju, pod utjecajem oslobođenih neutrona, razni radioaktivni izotopi kao što su: ^{24}Na , ^{35}S , ^{45}Ca , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{74}As , ^{100}Au . Uslijed raspada ^{235}U nastaju: ^{89}Sr , ^{91}Y , ^{95}Zr , ^{103}Ru , ^{115}Cd , ^{137}Cs , ^{147}Nd i ^{155}Eu . Radioaktivnost kojoj je čovjek izložen iz tih izvora godišnje u prosjeku iznosi 1,5 mrema (9, 23, 24) — (vidi tablicu 2).

Tablica 2.

Prosječna godišnja doza ionizirajućeg zračenja koja se primi u medicinske svrhe i iz radioaktivnih oborina (9)

Izvor zračenja	Doza u mrem/godinu
Medicinska primjena zračenja	
— u dijagnostičke svrhe	60—100
— u terapijske svrhe	3— 5
— zračenja iz radioizotopa	0,2
Radioaktivne oborine	1,5

Ovi radionuklidi su važni ne samo kao unutarnja opasnost od zračenja preko kontaminirane hrane, vode i zraka već također zbog djelovanja na fizikalne i biološke ekosisteme koji su u dinamičkoj ravnoteži.

BIOLOŠKO DJELOVANJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Neposredno nakon pronalaska X-zraka opisani su prvi opaženi slučajevi oštećenja kože uzrokovanih ovim zračenjem (25).

Najraniji poznati slučaj indukcije raka pod utjecajem zračenja opisan je 1902. godine (26).

Između 1922—1924. godine opisano je nekoliko slučajeva raka kosti u radnika industrije satova koji su radili s bojama koje su sadržavale radij. Duži rad s tim bojama doveo je do nagomilavanja radija u kostima čije je zračenje zatim dovelo do indukcije raka kosti (27).

Schwarz (28) objavio je revijski prikaz u kojem je diskutirao o opasnosti od zračenja trudnih žena. Doze koje uzrokuju teže oštećenje ploda obično izazivaju prekid trudnoće. Ako ne dođe do prekida trudnoće, rađaju se defektna djeca a oko 27% oštećene djece umire prije navršene treće godine života. Smatra se da je doza od 25 R najmanja koja utječe na prenatalni razvoj, međutim nije isključeno da su i manje doze štetne (29).

Najveći broj podataka o biološkom djelovanju ionizirajućeg zračenja dobiven je iz tri glavna izvora:

1. iz epidemioloških podataka nakon eksplozija atomskih bombi
2. proučavanjem ozračenih osoba nakon nesreće u nuklearnim laboratorijima
3. proučavanjem posljedica ozračivanja u terapijske i profesionalne svrhe.

Velika skupina ljudi izložena vrlo velikim dozama zračenja je populacija dvaju gradova — Hirošime i Nagasakija. U Hirošimi je oko 60000 osoba umrlo neposredno nakon eksplozije ili unutar nekoliko tjedana a 70000 osoba je preživjelo zračenje (30). Prema istom izvoru u Nagasakiju je bilo oko 33000 mrtvih i 25000 je preživjelo. Sistematska ispitivanja sperme muškaraca u Hirošimi i Nagasakiju su pokazala da je velik dio muškaraca izložen zračenju imao smanjenu sposobnost oplodnje (31).

Ichimaru (32) je epidemiološkim analizama ustanovio veliku učestalost pojave perniciozne anemije kao posljedice razaranja koštane srži i leukemije kao posljedice teškog oštećenja limfatičkog aparata, u ljudi koji su preživjeli atomsku eksploziju.

U žena koje su bile trudne za vrijeme atomske eksplozije u Nagasakiju nađeno je oko 24% mrtvorodne djece; 26% je umrlo nakon rođenja, dok je 25% bilo duševno zaostalo a ostatak normalno. Kod djece majki s većim oštećenjima tjelesna visina i opseg lubanje znatno su zaostali prema djeci iz kontrolne skupine (33).

Posebna saznanja o radijacijskoj bolesti dobivena su promatranjem akutno ozračenih osoba u institutima za nuklearna istraživanja prilikom nesreća u toku pokusa.

Prilikom terapijskog i dijagnostičkog izlaganja zračenju mogu se također javljati neželjeni štetni učinci po organizam, kao što je slučaj nakon

- razaranja timusa X-zrakama u oboljele male djece
- liječenja ankiloznog spondilitisa
- radioterapije malignih bolesti
- izlaganja solima radija sa svrhom liječenja artritisa
- pelvimetrije X-zrakama
- pretjeranog ozračivanja radiologa.

Prema tome, oštećenja ionizirajućim zračenjem mogu biti slučajna, profesionalna, terapijska i namjerna.

Kao što je već spomenuto zračenje može izazvati promjene u svakom dijelu složenog mehanizma stanice. Rezultat takvog djelovanja može biti inhibicija diobe pa sve do oštećenja funkcije ili smrti stanica što se onda odražuje i na čitav organizam.

Interpretacija bioloških učinaka zračenja je komplicirana međusobnim odnosom stanica u tkivima kao i mehanizmima oporavka. Razlikujemo oporavak oštećenih stanica i zamjenu oštećenih stanica novima. Jedna od značajki djelovanja zračenja jest i oštećenje samih reparacijskih mehanizama, bilo u stanicama ili u čitavom organizmu.

Obično se razlikuju oštećenja zračenjem dviju kategorija stanica, tj. onih koje su u vezi s održavanjem integriteta jedinke (takve su stanice npr. stanice koštane srži, krvi, jetre i druge) i one koje su u vezi s održavanjem i integritetom genetske informacije koja se prenosi s generacije na generaciju (to su reproduktivne stanice). Zato govorimo o tjelesnim i genetskim oštećenjima, tj. o oštećenjima koja su ograničena na sam ozračen organizam, odnosno na potomstvo. Tjelesna oštećenja mogu biti opća i lokalna a po svom trajanju akutna i kronična.

Na biološke efekte zračenja utječu fizikalni (tip zračenja, njegova energija, veličina doze, njegova distribucija kao i porijeklo zračenja, tj. je li izvan ili unutar tijela, daje li se kroz kraći ili duži vremenski period ili više puta redom), biološki (radiosenzitivnost tkiva i imunitet) kao i kemijski faktori (radiosenzitizeri — kisik i halogenirani pirimidini te radio-protectors — cistein, glutation i sulfhidrilni spojevi) (34).

Tjelesna oštećenja

Ovisno o spomenutim činiocima tjelesna oštećenja kod određene doze mogu se očitovati na razne načine. Ako se čitavo tijelo ozrači kratkotrajno velikom dozom, znakovi i simptomi združeni s takvim izlaganjem poznati su kao akutna radijacijska bolest (praćena oštećenjem koštane srži, gastrointestinalnog trakta i centralnog nervnog sistema) koja ima četiri faze (35). Inicijalna ili početna faza traje oko dva dana; faza latencije znači period od ozračivanja do pojave oštećenja a traje obično 2—3 tjedna (međutim ova faza može trajati i nekoliko minuta, sati, dana, mjeseci — kronična oštećenja, godina — leukoze i tumori i više od stoljeća — genetski učinak); faza oporavka može trajati 8—15 tjedana.

Ako se doza koja bi uzrokovala smrt nakon zračenja cijelog tijela podijeli u male frakcije koje se daju kroz nekoliko mjeseci ili godina s intervalima neizloženosti između doza, ne dolazi do neposredne smrti već do znakova kroničnog oštećenja. Ovo je uvjetovano činjenicom da je tijelo sposobno, u izvjesnoj mjeri, oporaviti se u vremenskim intervalima između izlaganja (36). Međutim kronično izlaganje, usprkos oporavku, može imati trajan patološki efekt i može se razviti bolest nakon dugog latentnog perioda (37, 38, 39). Kronično zračenje može uzrokovati jako oštećenje krvotvornih organa uzrokujući leukemiju ili hipoplastičnu anemiju. Ono može također uzrokovati fibrotičke i sklerotičke promjene u tkivima i smanjiti otpornost na infekciju, skratiti život, kao i izazvati

Tablica 3.

Ovisnost preživljenja o dozi i vremenu nakon rendgenskog zračenja

Vrijeme nakon zračenja tjedan	Preživljenje nemoguće 700 R i više	Preživljenje moguće 300 R—500 R	Preživljenje moguće 100 R—250 R
1			
2	smrtnost 100%		
3			
4		smrtnost 50% za 450 R	
12			oporavak

pojavu malignih tumora (40). Primjeri lokalnog djelovanja produženog vanjskog zračenja su kasne promjene na koži (uključujući dermatitis, atrofiju i rak kože). Ako se neki karakteristični učinci pojavljuju nakon latentnog perioda od nekoliko mjeseci i godina, nazivaju se odgođenim učincima kao što je slučaj pojave leukemije u preživjelih od eksplozije atomske bombe u Hirošimi i Nagasakiju.

Genetska oštećenja

Poznato je da je zračenje jedan od mutagenih činilaca. Izlaganje zračenju dovodi do porasta broja rijetkih nasljednih promjena iznad onih koje se zbivaju prirodno u stanicama. Ove promjene na genima odnosno kromosomima poznate su kao mutacije odnosno aberacije (48). Mutacije u somatskim stanicama nisu toliko važne kao one u zametnim koje bi se mogle izraziti kao nepovoljne promjene u budućim generacijama (41). Mutacije gena somatskih stanica dovode do razvoja defekata i bolesti u čovjeka. Najčešće dolazi do smrti ili gubitka sposobnosti produkcije potomstva, skraćanja trajanja života ili pojave malignih bolesti.

Recesivne mutacije gena zametnih stanica izazvane ionizirajućim zračenjem doći će do izražaja u potomstvu ako su oba roditelja posjedovala mutacije gena (41, 42). Ako se rađa dijete od jednog roditelja koji posjeduje recesivni mutirani gen, dok drugi roditelj ima normalne gene, normalni će geni biti dominantni tako da dolazi do pojave normalnih karakteristika. Međutim, štetan recesivni mutirani gen nije obično potpuno maskiran; čak kada se spaja s normalnim i dominantnim genom, on ima neki štetan efekt. Može se javiti značajno skraćanje života ili redukcija fertiliteta heterozigotnoga mutanta (43).

Dominantno letalne mutacije gena ili kromosoma dolaze do izražaja u neposrednom potomstvu i najčešće uzrokuju smrt embrija (48).

Smatra se da svaka pa i najmanja doza zračenja može inducirati mutacije (43). Mutacije su linearna funkcija doze zračenja, tj. veća doza zračenja izaziva veći broj mutacija. Genetsko oštećenje uzrokovano zra-

čenjem je kumulativno (44). Zato se smatra da svaki porast količine zračenja kojem smo izloženi može proizvesti nove mutacije čije bi se onda štetno djelovanje moglo odraziti na buduće generacije.

Kao što je sprijeda spomenuto gotovo glavni dio radioaktivnosti kojoj je izložen čovjek potječe od primjene X-zraka u medicinske svrhe. *Morgan* (13) upozorava na potrebu što većeg smanjenja ove izloženosti, jer niz teorijskih i eksperimentalnih radova upućuje na to da ne postoji tako mala doza kod koje ne bi bila opasnost od oštećenja (genetskog).

Da bi se smanjila opasnost koja proizlazi od zračenja kako kod profesionalne izloženosti tako i ostalog stanovništva zakonom su propisane maksimalno dopuštene doze koje se smiju apsorbirati tjedno odnosno u toku jedne godine. Međutim Međunarodna komisija za radiološku zaštitu ICRP (45) smatra da samo epidemiološka istraživanja na velikim skupinama ljudi koji su bili izloženi »dopustivim« dozama zračenja mogu dati pravi odgovor jesu li te doze zaista dopustive, tj. da ne dovode do stvaranja bilo somatskog ili genetskog oštećenja populacije.

Kako bi se smanjila mogućnost genetskog oštećenja koje bi moglo doći do izražaja u narednim generacijama, maksimalno dopuštena doza zračenja za profesionalno neizloženo stanovništvo je deset puta manja od one za profesionalno izloženo (47).

DODATAK

Maksimalno dopuštene doze za profesionalno izloženo osoblje

Maksimalno zakonski dopuštena doza za profesionalno izloženo osoblje iznosi 0,1 rema na tjedan odnosno 5 rema na godinu.

Prilikom izlaganja gonada, krvotvornih organa i očnih leća upotrebljava se formula za izračunavanje doze koja se može primiti na godinu

$$\text{MPD} = 5 (N-18)$$

MPD — (maximum permissible dose) maksimalno dopuštena doza

N — starost u godinama.

Do 18. godine života osoba se ne smije izlagati zračenju profesionalno (46).

Maksimalno dopuštena doza za profesionalno neizloženo stanovništvo

Maksimalno dopuštena doza za profesionalno neizloženo stanovništvo je mnogo manja od one u profesionalno izloženih osoba (zbog mogućih genetskih utjecaja), i to za faktor deset. Tako maksimalno dopuštena doza za stanovništvo iznosi 0,5 rema na godinu (47). Ovdje se ne smije zaboraviti da čovjek u obliku prirodne radioaktivnosti apsorbira godišnje prosječno dozu od 0,1 do 0,2 rema.

Jedinice zračenja

Rendgen (R) je količina X ili gama-zračenja koje u 1 cm³ zraka oslobađa 2,08x10⁹ parova iona. To je jedinica koja izražava dozu X ili gama-zraka apsorbiranih u zraku. Ona odgovara apsorbiranoj energiji od 87,7 erga na gram zraka.

Rad je specijalna jedinica apsorbirane doze. Predstavlja apsorbiranu energiju od 100 erga na gram, tj. 1/100 džula na kilogram bilo koje ozračene supstancije. Dok se rendgen u osnovi odnosi na zrak, rad se primjenjuje na bilo koje tkivo.

Rem (rendgen equivalent medical) jest količina bilo koje vrste zračenja koje će proizvesti isti biološki učinak kao 1 rad gama zraka za koje je QF (faktor kvalitete) jednak jedan.

Rep (rendgen equivalent physical) jest količina bilo koje vrste zračenja koje u organizmu proizvodi po gramu tkiva ionizaciju koja je jednaka ionizaciji što je proizvodi 1 rendgen X ili gama-zraka.

Curie je ona količina radioaktivnog materijala u kojoj ima 3,7x10¹⁰ dezintegracija u sekundi.

Literatura

1. Paschke, R., Chang, W. H. R., Young, D.: Probable Role of Gamma Irradiation in Origin Life, *Science*, 125 (1957) 881.
2. Sambrook, D. K.: Split-Course Radiation Therapy in Malignant Tumors, *Am. J. Roentgenol. Radium Therapy and Nucl. Med.*, 91 (1964) 37.
3. Glasstone, S.: The Effects of Nuclear Weapons: A Review by U. S. Dept. of Defense, Ed. U. S. Atomic Energy Commission, U. S. Government Printing Office, 1957, 4.
4. Saegner, E. L.: Medical Aspects of Radiation Accidents, U. S. Atomic Energy Commission, Cincinnati, 1963.
5. Rihm, A., O'Brien, J. E.: Radiation-A Public Health Problem, *Health News*, 34 (1957) 4.
6. Selove, W., Elkind, M.: Radiation and Man, Special Issue, *Bull. Atom. Sci.*, 14 (1958) 1.
7. Einsenbud, M.: Environmental Radioactivity, Ed. McGraw-Hill, New York, 1963.
8. Elkind, M. M., Whitmore, G. F.: The Radiobiology of Cultured Mammalian Cells, Eds., Gordon and Breach, New York, 1967.
9. Fabrikant, J. I.: Radiobiology, Medical Publishers, Inc., 1972.
10. Lea, D. E.: Action of Radiations on Living Cells, Cambridge Univ Press, London, 1955.
11. Bergonié, J., Tribondeau, I.: Interprétation de quelques résultats de la radiothérapie et essai de fixation d'une technique rationnelle, *Compt. Rend. Acad. Sci.*, 143 (1906) 983.
12. Watson, G. M.: The Effects of Ionising Radiation on Man, *Atomic Energy in Australia*, 18 (1975) 2.
13. Morgan, K. Z.: Reducing Medical Exposure to Ionizing Radiation, *Amer. Ing. Hyg. Ass. J.*, 36 (1975) 325.
14. Harley, J. H.: Radiation Hazards, u: Sax, I. N.: Dangerous Properties of Industrial Materials, Reinhold Publishing Corporation, New York, Chapman and Hall, Ltd, London, 1963, 104.
15. Israëll, H., Israëll, G. W.: Spurenstoffe in der Atmosphäre, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, MBH Stuttgart, 1973, 80—91.

16. *Shilling, C. W.*: Radiation, Eds., Grune and Stratton, N. Y. and London, 1960, 9.
17. *Ramade, F.*: Eléments d'écologie appliquée, Ediscience, McGraw-Hill, Paris, 1974, 378.
18. *Eisenbud, M.*: Sources of Radioactive Pollution, Ed., Stern, A. C., Air Pollution, N. Y., London, 1 (1968) 121.
19. *Eisenbud, M., Petrow, H., Drew, R. T., Roser, F. X., Kegel, G., Cullen, T. L.*: Naturally Occurring Radionuclides in Foods and Waters from the Brazilian Areas of High Radioactivity, The Natural Radiation Environment., The University of Chicago Press, 1964, 837.
20. *Shilling, C. W.*: Radiation, Eds., Grune and Stratton, N. Y. and London, 1960, 11.
21. *Meredith, W. J., Massey, J. B.*: Fundamental Physics of Radiobiology, Eds., Wright, J., and Sons, Bristol, 1972, 15.
22. *Barnes, D. E., Taylor, D.*: Radiation Hazards and Protection, London, 1958, 19.
23. Basic Radiation Protection Criteria, NCRP Report No. 39, NCRP Publ., Washington, D. C., 1971.
24. *Lapp, R. E., Andrens, H. L.*: Nuclear Radiation Physics, Englewood Cliffs, N. Y., Practice-Hall, 1964., 25.
25. *Prasad, K. V.*: Human Radiation Biology, London, 1974, 3.
26. *Rubin, P., Casarett, G. W.*: Clinical Radiation Pathology, Philadelphia, Saunders, 1968, 51.
27. *Evans, R. D.*: The Radium Standard for Bone Seekers-Evaluation of the Data on Radium Patients and Dial Painters, Health. Phys., 13 (1967) 267.
28. *Schwarz, G. S.*: Radiation Hazards to the Human Fetus in present Day Society, Should a Pregnant Woman be Subjected to a Diagnostic X-ray Procedure?, Bull. N. Y. Acad. Med., 44 (1968) 388.
29. *Russel, L. B., Russell, W. L.*: Radiation Hazards to the Embryo and Fetus, Radiology, 58 (1952) 369.
30. *Jablon, S., Kato, H.*: Studies of the Mortality of A-Bomb Survivors, Radiat. Res., 50 (1972) 649.
31. *Nell, J. V., Schull, W. J.*: The Effect of Exposure to the Atomic Bombs on Pregnancy Termination in Hiroshima and Nagasaki, Atomic Bomb Casualty Commission, Publication 461, NAS-NRC, Washington, D. C., 1956.
32. *Ichimaru, M.*: Incidence of Aplastic Anemia in A-Bomb Survivors Hiroshima and Nagasaki, 1964—1968, Radiat. Res., 49 (1972) 461.
33. *Cronkite, E. P.*: Radiation Injury; u: Harrison's Principles of Internal Medicine, Ed., Wintrobe, M., McGraw-Hill Book Comp, N. Y., 1974, 714.
34. *Sarić, M., Majić, D., Beritić, T.*: Biološki učinci ionizirajućeg zračenja; u Patologija rada, Panorama, Zagreb, 1965, 889.
35. *Hempelmann, L. H., Lisco, H., Hoffman, J. G.*: The Acute Radiation Syndrome, Ann. Inter. Med., 36 (1952) 279.
36. *Ellis, F.*: The Relationship of Biological Effect to Dose-Time-Fractionation Factors in Radiotherapy; u: Current Topics in Radiation Research, Eds., Ebert, M., and Howard, A., 4 (1968) 357.
37. *Bross, I. D. J.*: Leukemia from Low-Level Radiation, New Eng. J. Med., 287 (1972) 287.
38. *Lewis, E. B.*: Leukemia and Ionizing Radiation, Science, 125 (1957) 965.
39. *Baum, J.*: Population Heterogeneity Hypothesis on Radiation Induced Cancer, Tex Meeting of the Health Physics Society, 1974.
40. *Neary, G. J., Munsin, R. J., Mole, R. N.*: Chronic Radiation Hazards, Pergamon, London, 1957.
41. *Muller, H. J.*: Radiation and Heredity, Amer. J. Publ. Health, 54 (1964) 1.
42. *Russell, W. L.*: Studies in Mammalian Radiation Genetics, Nucleonics, 23 (1965) 53.
43. *Shilling, C. W.*: Radiation, Eds., Grune and Stratton, N. Y. and London, 1960, 67.

44. *Morgan, K. Z.*: The Need for Radiation Protection, *Radiologic Technology*, 44 (1973) 385.
45. ICRP: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, New York, Pergamon Press, Pub. No., 1958.
46. *Duraković, Z., Markulić-Grgić, Lj., Markulin, D., Kožić, B.*: Djelovanje ionizantnog zračenja na organizam, *Medicinar*, 26 (1975) 173.
47. ICRP: Recommendation of the International Commission on Radiological Protection, No. 67—228, 1967.
48. *Cogle, J. E.*: Biological Effects of Radiation, Eds., Mott, N., Yapp, W. B., Wykeham Publications (London) Ltd., 1971, 94.

Summary

HUMAN EXPOSURE TO IONIZING RADIATION

The paper is a survey of literature data on mean exposure of the human population to ionizing radiation from natural sources, nuclear explosions and sources used for medical and scientific purposes.

The results of current investigations on biological effects of ionizing radiation are described. The effects seem to be linearly related to the dose. This implies that there is no absolutely safe dose of radiation.

For this reason the recommendation of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) is presented.

Special emphasis is laid on a recommendation of the ICRP that a maximum permissible dose (MPD) for members of the public should amount to 0.5 rem a year (which is ten times lower than MPD for occupationally exposed workers), in order to reduce a possibility of genetic disorders in future generations.

*Institute for Medical Research
and Occupational Health, Zagreb*

*Received for publication
May 30, 1977*