

# RAK KOT POSLEDICA IZPOSTAVLJENOSTI IONIZIRAJOČEMU SEVANJU

Uroš Čotar

Onkološki inštitut Ljubljana

## Povzetek

Pojavnost raka kot posledica izpostavljenosti ionizirajočemu sevanju (IOS) temelji na dogodkih pri radioloških nesrečah, ko je bilo obsevanih veliko število ljudi in ko so bile prejete doze precej visoke. Pri visokih dozah je verjetnost za pojav raka sorazmerna s prejeto dozo, pri nizkih dozah pa statistično ni več mogoče ugotoviti, ali je bolezen posledica IOS ali drugega dejavnika. Vseeno pa konservativno predpostavljamo, da ne obstaja prag za varno dozo, da je vsaka prejeta doza škodljiva in da je tudi pri majhnih dozah verjetnost za razvoj bolezni sorazmerna z dozo. Tako temelji varstvo pred sevanji na preprečitvi determinističnih učinkov sevanja in znižanju verjetnosti za stohastične učinke na najmanjšo možno mero.

## Definicija

Sevanje ali elektromagnetno (EM) valovanje razvrstimo po energijah od najnižjih do najvišjih (dolgi valovi, radijski valovi, mikrovalovi, IR-sevanje, vidna svetloba, UV-svetloba, RTG-sevanje,  $\gamma$ -sevanje). Od dolgih valov do vidne svetlobe govorimo o neionizirajočem sevanju, medtem ko je ionizirajoče sevanje (IOS) po definiciji sevanje, ki ima dovolj energije, da povzroči ionizacijo (tvorbo nabitih parov) v snovi. Meja za ionizacijo je  $\sim 12$  eV, kar ustreza fotonom valovne dolžine  $\sim 100$  nm, se pravi, da spadajo med IO-sevanje:

- UV-žarki (ekstremna UV-svetloba)
- X-žarki (RTG-cevi, Linac)
- $\Gamma$ -žarki (radioaktivni razpad, jedrske reakcije).

Med IOS pa ne spada samo EM-valovanje, pač pa sem sodijo tudi delci, ki nastajajo pri jedrskih reakcijah (v jedrskih reaktorjih) in jedrskih razpadih (radioaktivne snovi). To so nabiti delci ( $\alpha$ ,  $\beta$  ali protoni) ali nevtroni, ki so nevtralni.

Čeprav se sevanja razlikujejo med sabo po energiji in po načinu nastanka, so pojavi, ki jih povzročajo v snovi, enaki.

## Mehanizem

IO-sevanje pri potovanju skozi snov ionizira snov in na ta način izgublja energijo. Nastali nabiti pari pred rekombinacijo interagirajo s sosednjimi atomi in molekulami in posledično povzročajo kemijske reakcije. Tako nastajajo spremembe v snovi. Spremembe si sledijo v tem časovnem zaporedju:

- fizikalna faza:  $10^{-18}$ s, primarna ionizacija snovi
- fizikalno-kemična faza:  $10^{-12}$ s, sekundarna ionizacija snovi
- kemijska faza:  $10^{-6}$ s, kemično reaktivne snovi reagirajo z okoliškimi molekulami
- biološka faza: spremembe v celicah, tkivih, organih in organizmu. Trajanje je od  $10^{-6}$ s do nekaj desetletij.

Za poškodbe celice je bistvenega pomena poškodba DNK, poškodba ostalih struktur pa niti ne. Da bi prišlo do neposredne poškodbe DNK, se pravi da IOS zadene prav v molekulo, je malo verjetno, saj le-ta predstavlja manjši del volumna v celici. Celica je v veliki meri 70-85-% sestavljena iz vode, zato je pri poškodbah DNK bistvenega pomena fizikalno-kemična in kemična faza, ko IOS ionizira vodne molekule, ki kasneje v vrsti medsebojnih procesov tvorijo najrazličnejše snovi. Od teh sta najpomembnejši in zelo agresivni molekula vodikovega peroksida  $H_2O_2$  in prosti hidroksilni radikal  $OH\cdot$ . Ti kasneje poškodujejo DNK, od reparaturnih mehanizmov v celici pa je odvisno, ali bo napaka popravljena oz. če ne bo, ali bo celica preživela ali ne. Ob celični smrti govorimo o determinističnem učinku sevanja, če celica preživi in se je sposobna deliti, obstaja možnost za razvoj stohastičnih učinkov.

Za deterministične učinke (pordečitev kože, izpadanje las, slabost, katarakta, sterilnost, slabokrvnost...) je znano, da imajo prag, pod katerim se ne pojavijo, resnost pa narašča sorazmerno s prejeto dozo. Ta prag se giblje okrog 1 Gy. Čeprav so opazili spremembe na kromosomih pod prejetimi dozami 1 Gy, pa somatskih učinkov do doze 1 Gy ni.

Pri stohastičnih učinkih (rak, dedni učinki) zaenkrat ni znano, ali imajo prag, zato konservativno predpostavljamo, da vsaka prejeta doza pomeni verjetnost, da se razvijejo. Tudi resnost ni odvisna od prejete doze. Med izpostavitvijo IOS in razvojem bolezni obstaja tako imenovana latentna doba, ki znaša za levkemijo 2-3 leta, za ostale vrste raka pa 5-15 let, za nekatere vrste celo do 30 let.

Za razvoj raka morajo biti izpolnjeni vsi naštetih pogoji: poškodba DNK na točno določenih delih kromosoma → reparaturni mehanizmi v celici napake NE popravijo → celica preživi → celica je sposobna za razmnoževanje. Prav zaradi kompleksnosti in dolgotrajnosti procesov je zelo malo verjetno, da bi se pojavil rak kot posledica enkratnega kratkotrajnega obsevanja. Tudi dolgotrajna izpostavljenost IOS z nizkimi dozami nima za posledico povišane pojavnosti raka. To dokazujejo primeri nekaterih krajev na Zemlji (Iran, Indija, Brazilija, Sudan), kjer je povišano naravno ozadje tudi nekaj 10- do 100-krat v primer-

javi z ostalimi (prejeta doza do 260 mSv/leto). Čeprav tam stalno živijo ljudje, pojavnost raka zaradi tega ni povečana. Prav tako ni povečano število umrlih zaradi raka med milijoni sevalnih delavcev, ki so bili stalno pod dozimetričnim nadzorom 50 let (od pričetka delovanja prvih jedrskih reaktorjev v 60-ih letih). Prejeta doza je bila v povprečju 10-krat višja kot za prebivalce.

## Znanstveni dokazi

Kljub mnogim poskusom, da bi dokazali, da je IOS neposredno odgovorno za razvoj raka, obstajajo dejansko samo redki dogodki, ko je bila populacija številčno dovolj velika, poteklo pa je tudi dovolj časa, da je prišlo do razvoja raka. To sta dogodka, ko sta bili odvrženi atomski bombi na Hirošimo in Nagasaki leta 1945, ter jedrski nesreči v Černobilu leta 1986 in in v Fukušimi leta 2011. Pri ostalih sevalnih nesrečah je bilo udeleženo manjše število ljudi.

- Hirošima in Nagasaki: Med 86.572 preživelimi je 249 ljudi umrlo zaradi levkemije, 7.578 zaradi drugih vrst raka. V primerjavi z drugimi mesti pa lahko le 87 primerov levkemije in 334 primerov drugih vrst raka pripišemo izpostavitvi IOS.
- Černobil: 9 otrok je umrlo zaradi raka ščitnice.
- Fukušima: do sedaj ni bilo žrtev izpostavljenosti IOS, saj je poteklo šele 4 leta od nesreče v elektrarni.

Kljub vsemu lahko izračunamo oz. ocenimo verjetnost za pojavnost raka na podlagi preteklih dogodkov. Ta znaša približno 5 % na kolektivno dozo 1 človek-Sievert. Izračun pokaže sledeče: če bi bili v Sloveniji vsi prebivalci ob radiološki nesreči izpostavljeni efektivni dozi 10 mSv, bi pričakovano število pojavov raka kot posledica obsevanja znašalo približno 1000.

Dedni učinki sevanja so še redkejši od raka in v nasprotju s pričakovanjem, da se bodo pojavile posledice na potomcih žrtev radioloških nesreč in atomskih bomb; teh v naslednjih generacijah ni opaziti.

## Ukrepi za preprečevanje

Na delovnem mestu je zelo pomembno, da se držimo navodil za varno delo in predpisov iz varstva pred sevanji, saj le tako lahko zagotovimo, da pri delu ne bo prišlo do nepotrebne izpostavljanja IOS. Prejete doze pri delu so ob pravilni uporabi zaščitnih sredstev (zaščitni plašči, očala, zaščita za ščitnico, zaščita za brizgo, zaščitno Pb-steklo, težki beton v labirintih pospeševalnikov, elektronski dozimetri) v današnjih časih običajno zelo nizke, praktično so nemerljive, saj šum naravnega ozadja prekrije prejeta dodatno dozo pri delu. Izjema so delavci, kjer pri delu tehnično težko zagotoviti varno zaščito (primer: aplikacija FDG v nuklearni medicini, oz. delo v skladišču radioaktivnega materiala/odpadkov.)

Prav tako so zanemarljivo nizke prejete doze »prebivalcev« (glej razlago pojmov), to je delavcev, ki niso uvrščeni kot sevalno izpostavljeni, in ostalega prebivalstva. Prejete doze zaradi medicinske diagnostike in zdravljenja niso upoštevane. Načelo upravičenosti namreč zagotavlja, da ima posameznik od medicinskega posega več koristi kot je škode zaradi sevanja.

V bivalnem okolju je najbolj problematičen plin radon, ki izhaja iz zemlje in se zadržuje v zaprtih, neprezračenihih prostorih, predvsem kletih. Koncentracije lahko dosežajo in presegajo 1000 Bq/m<sup>3</sup>, vdihavanje radona, predvsem pa njegovih potomcev, ki so težke kovine (Po, Bi, Pb), pa obremeni posameznika s približno polovico skupne letne doze. Zato je smiselno ob novogradnjah izvesti meritve, ki niti ne predstavljajo velikega stroška, ob ugotovljenih povišanih koncentracijah pa izvesti prisilno prezračevanje. V bivalnih prostorih je običajno dovolj, če redno prezračujemo, kar je seveda priporočljivo že iz ostalih zdravstvenih razlogov.

## Zaključek

Zakonodaja iz varstva pred sevanji in varen način dela zagotavljajo, da so prejete doze izpostavljenih delavcev IOS nizke in redno preverjane. Obenem tudi izpostavljenost prebivalstva ni povišana. Vse to zagotavlja, da do determinističnih učinkov sevanja ne more priti, verjetnost za stohastične učinke pa je znižana na najmanjšo možno mero. Pojavnost raka je seveda možno teoretično oceniti (jo izračunati), vendar je težko razlikovati pojav raka, ki ima za povzročitelja IOS od drugih dejavnikov. Tako lahko sklepamo, da IOS ni močan karcinogeni dejavnik.

## Literatura

1. Serša G. Biološki učinki ionizirajočega sevanja, Ljubljana, 2004
2. Koželj, M., Jenčič I., Slapar V., Varstvo pred sevanji, Ljubljana, 2013
3. Morgan K. Z., Turner J. E., Principles of radiation protection, John Wiley & Sons, 1967
4. Goldfinch E. P., Radiation protection theory and practice, Institute of Physics, Bristol & New York, 1989
5. UNSCEAR 2000 Report Vol. II: Sources of ionizing radiation
6. Usposabljanje iz varstva pred sevanji, delovno gradivo, ZVD, 2015
7. Pojmovnik jedrske tehnike in varstva pred sevanjem, Ljubljana 2012
8. <http://www.world-nuclear.org/info/Safety-and-Security/Radiation-and-Health/Nuclear-Radiation-and-Health-Effects/>
9. <https://www.iaea.org/newscenter/focus/chernobyl>

## Razlaga pojmov:

1.  $1 \text{ eV (elektronvolt)} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
2.  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$
3. Radioaktivnost: Lastnost nekaterih atomov, da njihova jedra spontano razpadejo. Pri tem nastajajo nova jedra in sproščena energija. Celoten proces spremlja ena ali več vrst radioaktivnega sevanja ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ).
4. Deterministični učinek: Klinično ugotovljiva okvara obsevanega organa, tkiva ali organizma zaradi poškodovanja celic. Za nastanek posameznega determinističnega učinka so določljive vrednosti doz, pri katerih se deterministični učinek pojavi, za te vrednosti doz pa velja, da je za doze, ki jih presegajo, deterministični učinek večji, če je vrednost doze večja.
5. Stohastični učinek: Statistično ugotovljive okvare zaradi spremenjenih lastnosti obsevanih celic, ki se lahko razmnožujejo. Stohastični učinki, kot so nastanek malignih rakov ali dednih posledic v genih, niso odvisni od doze in zanje prag nastanka ne obstaja, vendar je njihov nastanek verjetnejši pri višji dozi.
6.  $1 \text{ Bq (Bequerel)} = 1 \text{ radioaktivni razpad na sekundo}$
7.  $1 \text{ Gy (Gray)}$  je enota za absorbirano dozo.  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$
8.  $1 \text{ Sv (Sievert)}$  je enota za ekvivalentno/efektivno dozo.  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$
9. Kolektivna doza: Vsota individualnih doz, ki jo je prejela populacija iz nekega vira. Navadno se določa z zmnožkom povprečne individualne doze v populaciji in števila članov populacije.
10. Prebivalec: V splošnem pomenu kateri koli posameznik iz populacije, z izjemo tistih, ki so poklicno ali medicinsko obsevani.
11. Efektivna doza: Vsota uteženih ekvivalentnih doz od notranjega in zunanjega obsevanja po vseh tkivih in organih telesa.