

SEVANJE IN RAK

Damijan Škrk

Povzetek. Mednarodna agencija za raziskovanje raka je leta 2014 pripravila četrto, dopolnjeno različico *Evropskega kodeksa proti raku*. Med dvanajstimi nasveti, kako zmanjšati ogroženost z rakom sta dva povezana s sevanjem. Prvi nasvet govori o previdnosti pri sončenju in drugi o zmanjšanju izpostavljenosti radioaktivnemu plinu radonu. Kožni rak se največkrat razvije zaradi poškodb, ki so nastale zaradi pretiranega in nezdravega izpostavljanja ultravijolični svetlobi. Ključnega pomena so poškodbe kože, še posebej opekline, ki so nastale do 20. leta starosti, čeprav se simptomi kožnega raka pogosto pojavijo šele čez več desetletij. Najbolj ranljivi so torej tisti, ki so vrsto let nezaščiteni izpostavljeni soncu. Radioaktivni plin radon pa daje največji prispevek k izpostavljenosti ljudi ionizirajočemu sevanju. Izpostavljenosti radonu sicer ne moremo preprečiti, lahko pa jo zmanjšamo, predvsem na mestih, kjer se ljudje dalj časa zadržujemo, torej v domovih in na delovnih mestih. Ocenjujejo, da je radon povzročitelj enega od deset primerov pljučnega raka. Nasvet sestoji iz ugotavljanja ravni koncentracije radona v prostorih ter na osnovi tega izvajanje ukrepov za zmanjšanje izpostavljenosti.

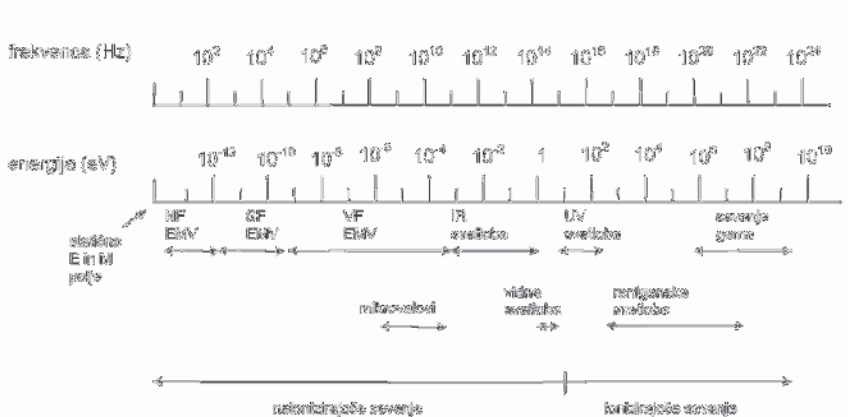
UVOD

Spektroskopija je področje fizike, ki obravnava spektre oziroma porazdelitve elektromagnetnega valovanja po valovni dolžini ali frekvenci ali porazdelitve izsevanih delcev po kinetični energiji. Glede na frekvenco ali valovno dolžino delimo elektromagnetno valovanje na nizko-, srednje- in visokofrekvenčno elektromagnetno valovanje, mikrovalove, infrardeče valove, vidno svetlobo, ultravijolično svetlobo, rentgensko svetlobo in sevanje gama. Valovanje z daljšo valovno dolžino ima nižjo frekvenco in obratno. Največje energije imajo kvanti z najvišjo frekvenco in najkrajšo valovno dolžino. Med naštetimi so to fotoni sevanja gama in visokoenergijski fotoni rentgenske svetlobe (slika 1). Sevanje je prenos energije v obliki toka delcev ali širjenja elektromagnetnega valovanja. Elektromagnetno valovanje je sklopitev električnega in magnetnega polja, ki omogoča širjenje sprememb v električnem in magnetnem polju skozi prostor.

Skupno ime za delce in visokofrekvenčno elektromagnetno valovanje, ki pri prehodu skozi snov povzročajo ionizacije atomov in molekul, je ionizirajoče sevanje. Med glavne oblike ionizirajočega sevanja poleg delcev alfa in beta ter sevanja gama prištevamo še rentgensko svetlobo. Ultravijolična svetloba s frekvencami, manjšimi od 3×10^{15} Hz, vidna in infrardeča svetloba ter elektromagnetno valovanje pa so neionizirajoča sevanja, ker nosijo premalo energije, da bi snov ionizirali [1].

Mednarodna agencija za raziskovanje raka (IARC) od leta 1974 sistematično ocenjuje rakotvorne učinke posameznih snovi in dejavnikov, ki smo jim ljudje izpostavljeni in jih razvršča v pet skupin, in sicer 1, 2A, 2B, 3 in 4. V skupino 1 so uvrščene snovi in dejavniki, za katere obstajajo zadostni

dokazi o rakotvornosti pri človeku. V to kategorijo sodijo npr. tobak, azbest, alkoholne pijače, naravna in umetna ultravijolična (UV) svetloba ter ionizirajoča sevanja. V skupino 2A so razvrščene snovi in dejavniki, ki so verjetno rakotvorni za ljudi, kar je podprto z omejenimi dokazi rakotvornosti pri ljudeh in zadostnimi dokazi pri živalih. V kategorijo 2B so razvrščene snovi in dejavniki, ki so mogoče rakotvorne za človeka. Sem so uvrščene snovi in dejavniki, za katere obstaja omejen dokaz za rakotvornost pri človeku in manj kot zadosten dokaz pri živalih. Poleg npr. steklene volne in kave so v to skupino razvrščena še nizkofrekvenčna magnetna polja in visokofrekvenčna elektromagnetna valovanja. V skupino 3 so razvrščene snovi in dejavniki, za katere ni dovolj ustreznih dokazov o rakotvornosti za človeka, in vse tiste, ki jih ne moremo uvrstiti v nobeno drugo skupino. V skupino 4 spadajo snovi, ki verjetno niso karcinogene.



Slika 1. Spekter elektromagnetnega valovanja s prikazom posameznih vrst valovanja, razvrščenih po frekvenci in energiji kvantov

IARC je leta 2014 pripravil četrto, dopolnjeno različico *Evropskega kodeksa proti raku*. Nova spoznanja o tem, kateri dejavniki so povezani z nastankom raka, ter o ukrepih, kako živeti, da bi zmanjšali ogroženost prebivalstva in zbolewnost ter umrljivost za rakom, so bili povod za to. Med dvanajstimi nasveti, kako zmanjšati ogroženost z rakom sta dva, katerih vzrok je sevanje. Prvi nasvet govori o previdnosti pri sončenju in drugi o zmanjšanju izpostavljenosti radioaktivnemu plinu radonu.

NEIONIZIRAJOČA SEVANJA IN RAK

Visokofrekvenčna elektromagnetna sevanja in nizkofrekvenčna magnetna polja je IARC uvrstil v skupino 2B, v kateri so snovi in dejavniki, ki so mogoče rakotvorni, medtem ko je ultravijolično svetlobo, tako naravno kot tisto v solarijih uvrstil v skupino 1, kjer ni dvoma o njihovi rakotvornosti. V naslednjih poglavjih bodo opisani vplivi vseh treh navedenih vrst neionizirajočih sevanj na zdravje.

Neionizirajoča sevanja, uvrščena v skupino 2B

Znanstveni odbor za nova zdravstvena tveganja (*Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks* – SCENIHR) pri Evropski komisiji je januarja 2015 sprejel mnenje o potencialnih vplivih za zdravje zaradi izpostavljenosti elektromagnetnim sevanjem. Odbor meni, da ni očitnih škodljivih učinkov za zdravje ljudi pri izpostavljenostih, ki so pod mejnimi vrednostim, ki jih določa zakonodaja Evropske Unije (EU).

Visokofrekvenčna elektromagnetna sevanja. Večletne analize uporabe mobilnih telefonov so privedle do ugotovitve o možnem zmernem zvečanju tveganja za pojav glioma, maligne vrste raka na možganih, in akustičnega nevrinoma, benignega tumorja na slušnem živcu. Poudariti pa je treba, da povezava med izpostavljenostjo visokofrekvenčnim elektromagnetnim sevanjem zaradi mobilnega telefona in gliomom ali akustičnim nevrinomom, ne dosega meril za nedvoumno potrditev vzročne povezave. Zato je treba ugotovljeno povezavo med visokofrekvenčnimi sevanji mobilnih telefonov in možganskim tumorjem razumeti kot šibko, a vendar pozitivno, medtem ko je povezava med vsemi drugimi vrstami raka nezadostna za izoblikovanje končnih zaključkov [2].

Uvrstitev sevanja mobilnega telefona v skupino mogoče rakotvornih dejavnikov pa pomeni, da je treba upoštevati načelo previdnosti ter zmanjšati izpostavljenost na najmanjšo možno mero. Obstajajo hipoteze, da so otroci med tretjim in petnajstim letom občutljivejši na elektromagnetna sevanja, zato jih je smiselno ozaveščati, naj čim manj uporabljajo mobilne telefone, kar velja tudi za odrasle. Če je le mogoče, raje uporabljajmo klasični stacionarni telefon. Za zmanjševanje izpostavljenosti sevanju izberemo mobilni telefon z nizko vrednostjo stopnje specifične absorpcije (SAR), manjšo od $0,6 \text{ Wkg}^{-1}$ in uporabljamo komplet za prostoročno telefoniranje. Ko aparat vzpostavlja zvezo, ga držimo stran od glave, saj takrat deluje z največjo oddajno močjo, ušesu ga približamo šele tedaj, ko je zveza vzpostavljena. Izogibamo se pogovorom, ko je signal šibek. Med rabo držimo mobilni telefon na spodnjem delu, s čimer dosežemo, da mobilni telefon ne oddaja z večjo močjo, saj je na zgornji zunanji strani vgrajena antena [2].

Nizkofrekvenčna magnetna polja. Epidemiološke raziskave kažejo na možnost zvečanega tveganja za levkemijo pri otrocih, ki so izpostavljeni magnetnim poljem z vrednostmi gostote magnetnega pretoka večjimi od 0,4 mikroT (24-urno povprečje). Vendar epidemiološki dokazi brez nedvoumnih dokazov kancerogenih vplivov pri odraslih znanstvene razlage mehanizma vpliva na nastanek bolezni ali verodostojnih razlag na podlagi eksperimentov na živalih ali izoliranih celicah niso dovolj trdni za sklep, da takšna polja povzročajo levkemijo pri otrocih. Opaženo povezavo med izpostavljenostjo nizkofrekvenčnim magnetnim poljem in levkemijo pri otrocih je mogoče pripisati tudi drugim razlogom [3].

Načelo previdnosti pa priporoča izvajanje ukrepov, med katere sodijo kontinuirano obveščanje in izobraževanje javnosti ter spodbujanje podjetij za prenos in distribucijo električne energije, naj prostovoljno zmanjšajo izpostavljenost ljudi, kjer je to možno.

Neionizirajoča sevanja kot dejavnik rakotvornosti

Kožni rak dosega eno tretjino vseh primerov raka, ki jih diagnosticirajo na svetu. Izpostavljenost UV-svetlobi je najbolj znan zunanji dejavnik tveganja za nastanek kožnega raka. Ločimo melanomski in nemelanomski rak kože, in sicer glede na vrsto celic, iz katerih se razvije. Najpogostejši vrsti nemelanomskega kožnega raka sta bazalnocelični karcinom (80–85 %) in ploščatocelični karcinom (15–20 %). Tveganje za razvoj teh dveh vrst raka je odvisno od tipa kože in je večje pri ljudeh, ki so bolj dovzetni za sončne opekline. Zlasti ploščatocelični karcinom je povezan s ponavljajočo se dolgotrajno izpostavljenostjo soncu in je pogostejši pri ljudeh, ki delajo na prostem.

Delež malignega melanoma v vseh primerih kožnega raka je med 5 in 10 %, povzroči pa več kot 90 % vseh smrti zaradi kožnega raka; njegova incidenca se še hitro večja. Tveganje za nastanek melanoma je povezano z barvo polti, saj se melanom pojavlja pretežno pri beli rasi in pretežno pri ljudeh svetlih kožnih tipov. Med ljudi, pri katerih je tveganje večje, spadajo rdečelaslasi in svetloslasi ljudje, ki jih sonce pogosto opeče in ki nikoli ne porjavijo ali porjavijo le minimalno, medtem ko je tveganje pri temnopoltih manjše. Tveganje za nastanek melanoma je večje pri ljudeh s pozitivno družinsko anamnezo, tistih, ki so v preteklosti že zboleli za to boleznijo, ter pri ljudeh s številnimi pigmentnimi znamenji in netipičnimi znamenji. V Sloveniji je leta 2011 za malignim melanomom kože na novo zbolelo 481 ljudi [4–7].

Ultravijolična svetloba. Ultravijolična (UV) svetloba je elektromagnetno valovanje z valovno dolžino, krajšo od valovne dolžine vidne svetlobe, vendar daljšo od valovne dolžine rentgenske svetlobe. Pri preučevanju

vpliva UV-svetlobe na zdravje človeka se UV-območje običajno deli na območje UV-A (A kot "aging"— staranje) z valovnimi dolžinami med 380 in 315 nm, UV-B (B kot "burning"— opekline) z valovnimi dolžinami med 315 in 280 nm ter UV-C (C kot "cyto-toxic"— toksičen za celice) z valovnimi dolžinami med 280 in 100 nm. Zaradi absorpcije sončeve UV-svetlobe v ozonski plasti atmosfere Zemljino površino ne doseže svetloba UV-C, UV-B le deloma (5 %), UV-A pa skoraj v celoti (95 %). Jakost UV-svetlobe na Zemljini površini se spreminja z letnim časom, zemljepisno širino, delom dneva in vremenom. Zaradi tanjšanja plasti ozona se jakost sončeve UV-svetlobe v zadnjih desetletjih večja in zato do zemeljskega površja pride več UV-svetlobe kot v preteklosti [4].

Posledice izpostavljenosti ultravijolični svetlobi. Sončni žarki imajo na kožo in človeški organizem pozitivne in negativne učinke. Zmerno izpostavljanje soncu ugodno vpliva na organizem. Omogoča nastajanje vitamina D v koži in krepi obrambno sposobnost organizma, boljša psihično in fizično počutje. Poudariti pa je treba, da je za zadostno tvorbo vitamina D dovolj že vsakodnevna nekaj desetminutna izpostavljenost obraza in rok soncu. Večjo pozornost je zato treba nameniti negativnim učinkom, ki jih delimo na takojšnje in zakasnele.

Takojšnji posledici čezmerne izpostavljenosti kože UV-B-svetlobi, sta porjavlost in sončne opekline. Sončne opekline niso tipične opekline, saj ne nastanejo zaradi toplote, videti pa so kot rdečica in otekline, ki ju spremlja bolečina, pekoč občutek in zvišana temperatura kože. Reakcija nastane približno pol ure po sončenju in je najmočnejše izražena šele po 12 do 24 urah. Prav ta zakasnela reakcija človeka lahko zavede, da se ne umakne s sonca pravočasno.

Zakasnela učinka sta staranje kože in kožni rak. Ker ima UV-A-svetloba daljšo valovno dolžino, prodira v globlje plasti kože in povzroča pospešeno staranje kože. Spremembe so posledica strukturnih sprememb v povrhnjici in usnjici kože in se kažejo kot suha, usnjata in nagubana koža z nepravilnimi pigmentacijami. Sončne opekline, zlasti v otroštvu, so eden pomembnejših dejavnikov tveganja za razvoj malignega melanoma. UV-B-svetloba je glavni vzrok za nastanek opeklin, vendar relativna vloga, ki jo imata UV-A- in UV-B-svetloba pri nastanku melanoma, še vedno ni popolnoma pojasnjena. Zato naj občutljivi posamezniki omejijo izpostavljenost tako UV-B- kot UV-A-svetlobi [4, 7]

Solariji. Ker je uporaba solarijev enako nevarna kot naravno sončenje, je IARC leta 2009 uvrstil tako naravno UV-svetlobo kot tudi UV-svetlobo solarijev v skupino 1 rakotvornih snovi in dejavnikov.

Solarij je naprava, ki vsebuje sijalke kot vir UV-svetlobe in je namenjena umetnemu sončenju v kozmetične namene. Glede na moč UV-A- in UV-B-svetlobe so solariji razdeljeni v štiri razrede. V kozmetične namene se uporabljajo le solariji III. razreda, pri katerih je vrednost gostote pretoka moči za vsako območje UV-A- in UV-B-svetlobe posebej manjša od $0,15 \text{ Wm}^{-2}$. Obe vrsti sevanja lahko poškodujeta DNA v celicah kože. Da bi pospešili proces pridobivanja porjavelosti, v zadnjih letih uporabljajo sijalke, ki proizvajajo višjo raven UV-B-svetlobe. Sončenje v solarijih prav tako povzroča raka. Solariji so za namen pridobivanja porjavelosti na voljo šele zadnjih petindvajset let, zaradi dolge latentne dobe kožnega raka in poškodb oči pa se negativni vplivi na zdravje pogosto pojavijo šele čez daljši čas. Raziskave kažejo, da je pri ljudeh, ki so pred svojim tridesetim letom začeli redno uporabljati solarij, pojav melanoma večji za 75 % [4].

Nasveti za zmanjšanje izpostavljenosti UV-svetlobi

Koža ima obrambne mehanizme, ki jo naravno ščitijo pred sončno svetlobo. V koži nastaja barvilo melanin, ki se po sončenju pomakne v gornje plasti kože, zato po 24 do 72 urah koža potemni. Porjavela koža torej ni znak zdravja, ampak znak obrambe organizma, ki pa ne zadošča za zaščito pred soncem. Najbolj učinkoviti ukrepi zoper razvoj kožnega raka so izogibanje neposrednemu izpostavljanju soncu med 10. in 16. uro, kar velja tudi v bolj oblačnih dneh, oziroma zadrževanje v senci. Pri tem se je treba zavedati, da pesek, voda in sneg odbijajo sončno svetlobo in tako večajo jakost izpostavljenosti. Za zmanjšanje izpostavljenosti soncu je tako pomembna omejitev časa na soncu kot tudi uporaba ustrezne obleke, sončnih očal in pokrival ter sončne kreme. Glede na učinkovitost zaščite imajo sončne kreme različen UV-faktor, ki pove, kolikokrat dlje smo lahko na soncu glede na nezaščiteno kožo. Krema je treba nanesti vsaj 20 do 30 minut, preden smo izpostavljeni soncu, in pozneje vsaj vsaki dve uri, ko smo na soncu. Nanašati jo je treba enakomerno in v zadostni količini, saj nezadostna količina bistveno zmanjša učinkovitost. Krema z zaščitnim UV-faktorjem 30, katere naneseni sloj je pol tanjši od priporočenega, nudi le zaščito, ki bi jo dal ustrezno nanesen sloj kreme z zaščitnim UV-faktorjem 5,5. Po plavanju, močnem znojenju ali brisanju kože je treba kremo ponovno nanesti. Še posebno pomembna je zaščita otroške kože, saj imajo otroci tanjšo in bolj občutljivo kožo kot odrasli. Dojenčkov in malih otrok ne smemo neposredno izpostavljati soncu [4, 7].

V nekaterih državah, npr. v Avstraliji in Braziliji so uporabo solarijev prepovedali, v evropskih državah pa se uvaja prepoved uporabe do 18. leta starosti. Uporabo solarija zato močno odsvetujejo; primerna je le za zdravstvene indikacije.

IONIZIRAJOČA SEVANJA IN RAK

Izpostavljenost ionizirajočim sevanjem je tveganje, ki se mu je treba izogniti, vendar že zaradi naravnih virov sevanja tega v popolnosti ni mogoče doseči. Poleg naravnega ozadja je vzrok za izpostavljenost lahko tudi človeškega izvora. Sem sodi uporaba virov ionizirajočih sevanj in izvajanje sevalnih dejavnosti v zdravstvu, industriji in znanosti ter uporaba jedrske tehnologije. Za zagotovitev varnega dela z viri sevanj in z namenom, da se preprečita ali zmanjšata radioaktivna kontaminacija življenjskega okolja ter izpostavljenost delavcev in prebivalstva, se izvajajo ukrepi varstva pred sevanji.

Učinki ionizirajočih sevanj

Ionizirajoče sevanje povzroči v živi snovi zaporedje fizikalnih, kemičnih in bioloških procesov, ki vodijo do sprememb, katerih posledice so lahko škodljive. O zunanji izpostavljenosti govorimo takrat, ko je vir zunaj telesa, notranja obsevanost pa je posledica vnosa radioaktivne snovi v organizem. Učinke sevanja delimo na naključno razporejene, verjetnostne, tj. stohastične pojave in na vzročno nujne posledice, tj. deterministične.

Stohastični učinki sevanja. Stohastični učinki so naključne narave in torej samo verjetna posledica sevanja. Tako ne moremo z gotovostjo napovedati, kaj se bo zgodilo s poškodovanimi celicami, lahko samo ugotovimo, da je verjetnost za nastanek takšnih sprememb sorazmerna s prejeto dozo, stopnja potencialne škode pa ni odvisna od velikosti doze. Stohastične učinke delimo na somatske in dedne. Prvi zadevajo izpostavljenega posameznika, če pa se posledice pojavijo na potomcih, govorimo o dednih učinkih. To so zakasnele posledice izpostavljenosti ionizirajočim sevanjem in se kažejo v zvečanem številu različnih bolezni ali nepravilnosti v razvoju raznih organov prihodnjih generacij. Med somatske učinke prištevamo nastanek in razvoj raka. Ker je pojav naključen, ne moremo napovedati, pri katerih organizmih se bodo spremembe zgodile in pri katerih ne. Stohastične učinke opazimo le, če primerjamo dve dovolj veliki skupini ljudi, od katerih je bila ena obsevana, druga pa ne. Pogostost pojavljanja kake oblike raka v obsevani skupini bo večja kot v neobsevani. Do černobilske nesreče so se primerjave v glavnem opirale na spremljanje izpostavljenih pacientov, skupin poklicno izpostavljenih delavcev in preživelih po jedrskih eksplozijah. Večja pojavnost raka med preživelimi po jedrskih eksplozijah v Hirošimi in Nagasakiju je potrdila, da lahko tudi nizke ravni izpostavljenosti sprožijo raka. Ker so podatki temeljili skoraj izključno na izpostavljenostih pri visokih dozah, so tveganje pri nizkih dozah ocenili z ekstrapolacijo in sprejeli linearni model odziva doza–učinek. To pomeni, da se stohastičnim učinkom ni mogoče popolnoma izogniti in da tveganje obstaja tudi pri najnižjih dozah.

Model je bil izbran po načelu previdnosti, ki temelji na predpostavki, da ne smemo dopustiti zmote v škodo izpostavljenega [8, 9].

Za ovrednotenje verjetnosti za nastanek določene vrste stohastičnih učinkov z upoštevanjem resnosti njihovih posledic uporabljamo efektivno dozo, dozimetrično količino, ki je merilo tveganja zaradi stohastičnih učinkov. V tabeli 1 so predstavljene ocenjene verjetnosti za nastanek raka na podlagi podatkov dolgotrajnega spremljanja zdravstvenega stanja izpostavljenih skupin ljudi. Verjetnost za nastanek raka, utežena z resnostjo škode in izgubljenimi leti življenja zaradi bolezni, je ocenjena na 0,0041 % pri izpostavljenosti 1 mSv za odrasle med 18. in 64. letom starosti in 0,0055 % za vse starostne skupine, ki vključujejo tudi otroke in mladostnike kot občutljivejši skupini. Verjetnost za nastanek dednih učinkov je nekaj desetkrat manjša in je ocenjena na podlagi poskusov na živalih, saj pri ljudeh dedni učinki zaradi izpostavljenosti niso potrjeni [10].

Tabela 1. Ocenjena verjetnost za nastanek raka in dednih učinkov pri efektivni dozi 1 mSv za odrasle med 18. in 64. letom starosti in za vse starostne skupine

	Rak	Dedni učinki	Skupaj
Odrasli (18–64 let)	0,0041 %	0,0001 %	0,0042 %
Vsi	0,0055 %	0,0002 %	0,0057 %

Deterministični učinki sevanja. Deterministični učinki se pojavijo, kadar je prizadet zadosten delež celic v kakšnem tkivu ali organu. So vzročno nujna posledica sevanja, ki sledi, če obsevanost preseže mejno dozo ali prag, ki je odvisen od vrste izpostavljenega tkiva ali organa. Če bo torej obsevanost presegla dozo praga, se bodo učinki z gotovostjo pojavili, pri nižji izpostavljenosti pa ne. Prag je seveda odvisen od zdravstvenega stanja in starosti obsevane osebe in je tako različen za otroke, odrasle, ostarele in bolne ali zdrave. Stopnja poškodb z velikostjo doze nad pragom narašča. Vzrok za poškodbe organov je smrt matičnih celic, ki so najbolj občutljive na ionizirajoče sevanje. Matične celice so sposobne samopodvojevanja in dozorevanja v specializirane celice, s tem pa zagotavljajo normalno delovanje tkiv in organov.

Izpostavljenost ionizirajočim sevanjem

Izpostavljenost ionizirajočim sevanjem je lahko zunanega ali notranjega izvora. O zunanji izpostavljenosti govorimo takrat, ko je vir zunaj telesa,

notranja obsevanost pa je posledica vnosa radioaktivne snovi v organizem. Notranje obsevanje lahko povzročijo zaužitje kontaminirane hrane, vdihavanje kontaminiranega zraka in vnos radioaktivnih snovi skozi kožo ali odprte rane. Notranja obsevanost z radioaktivnimi snovmi, ki razpadajo z razpadom alfa in beta, je posebej nevarna, saj delci oddajo vso energijo v neposredni bližini mesta razpada.

Povprečna letna efektivna doza ionizirajočih sevanj naravnega izvora kot posledica radioaktivnih snovi v zemeljski skorji (0,5 mSv), vnosa radioaktivnih snovi v telo z zaužitjem – ingestijo in vdihavanjem – inhalacijo (oboje skupaj 0,3 mSv), sevanjem iz vesolja (0,4 mSv) ter izpostavljenosti radioaktivnemu plinu radonu (1,3–1,6 mSv) je v različnih delih Slovenije med 2,5 mSv in 2,8 mSv.

Povprečni Slovenec zaradi uporabe ionizirajočega sevanja letno prejme efektivno dozo 0,7 mSv, ostali viri prispevajo manj kot pol odstotka. Iz navedenega sledi, da radon prispeva med 40 in 45 % k izpostavljenosti zaradi ionizirajočih sevanj in je zato omejevanje prioritetnega pomena [9, 11–13].

Izpostavljenost radonu

Radon v bivalnem in delovnem okolju prispeva največji delež k letni izpostavljenosti zaradi naravnih virov ionizirajočih sevanj in je drugi najpogostejši povzročitelj pljučnega raka, takoj za kajenjem. IARC je radon leta 1988 uvrstil v skupino rakotvornih snovi. Ocenjujejo, da je vsak deseti rak na pljučih posledica radona oziroma njegovih razpadnih produktov. Zelo pomembno je zavedanje povezave med izpostavljenostjo radonu in kajenjem. Evropske študije kažejo, da je kumulativno tveganje smrti za pljučnim rakom do 75. leta starosti za nekadilce 0,41 %, za trajne kadilce pa 10,1 %. Zaradi izpostavljenosti radonu pri koncentraciji 100 Bqm^{-3} se pri nekadilcih tveganje zveča na 0,47 %, pri trajnih kadilcih pa na 11,6 %. Pri koncentraciji 400 Bqm^{-3} se tveganje pri nekadilcih zveča na 0,67 %, pri trajnih kadilcih pa na 16,03 %. Če povemo drugače, je relativno tveganje za pljučnega raka pri trajnih kadilcih 25-krat večje kot pri nekadilcih, v primerih, ko niso izpostavljeni radonu. Pri nekadilcih se relativno tveganje za pljučnega raka pri koncentraciji radona 400 Bqm^{-3} zveča na 1,6, medtem ko je za trajne kadilce že 40. Tveganje za pljučnega raka ostaja zvečano še vrsto let po prenehanju kajenja [14,15].

Radon je naravni radioaktivni žlahtni plin, brez barve, vonja in okusa, ki nastane v razpadni verigi naravnega urana, ki se nahaja praktično povsod v tleh. Uran razpada v torij, razpadni niz pa se nadaljuje s protaktinijem, uranom, torijem in radijem, katerega razpad vodi v radon (slika 2).

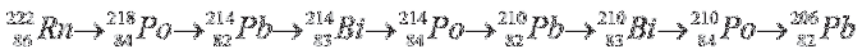


Slika 2. Razpadni niz urana-238: torij-234, protaktinij-234, uran-234, torij-230, radij-226 in radon-222

Pri radioaktivnem razpadu radon odda delce alfa, torej helijeva jedra. Število jeder, ki razpadejo v enoti časa, imenujemo aktivnost. Enota za aktivnost je 1 Bq (becquerel), kar pomeni 1 razpad na sekundo. Pogosto nas bolj kot sama aktivnost zanima njena koncentracija, ki jo zato merimo v enotah Bqm^{-3} . Razpolovni čas radona je 3,8 dni, kar pomeni, da bi na primer njegova koncentracija v zraku 100 Bqm^{-3} padla v 3,8 dneh na 50 Bqm^{-3} , v 7,6 dneh pa na 25 Bqm^{-3} . Koncentracije radona so v zunanjem zraku do nekaj 10 Bqm^{-3} , v notranjem zraku pa od nekaj 10 do nekaj 1000 Bqm^{-3} [14,15].

Od mesta nastanka v zemeljski skorji ali gradbenih materialih potuje radon proti površini, kjer se sprošča v ozračje oziroma se kopiči v zraku zaprtih prostorov, kot so kraške jame, rudniki in kleti v zgradbah. V zgradbe prodira skozi razpoke v betonskih tleh ali stenah, skozi špranje med talno ploščo in zidovi, ob nezadostno zatesnjenih vodovodnih in odtočnih kanalih, jaških ali drugih ceveh ter skozi vse druge morebitne odprtine. Sprošča se tudi pri uporabi plina in vode, posebno pri prhanju, vendar sta ta dva izvira običajno zanemarljiva. Vzrok za višje koncentracije radona v zraku zaprtih prostorov so lahko tudi gradbeni materiali, če vsebujejo več radija. Na vsebnost radona v zraku zaprtega prostora torej odločilno vplivajo značilnosti tal (vsebnost urana, poroznost in tektonski prelomi), na katerih stavba stoji, ter vrsta, starost in kakovost njene izgradnje.

Pri radioaktivnem razpadu radona nastajajo produkti, ki so tudi radioaktivni. Ker so njihovi razpolovni časi krajši od 30 minut, jih imenujemo kratkoživi radonovi razpadni produkti; to so polonij, svinec in bizmut (slika 3).

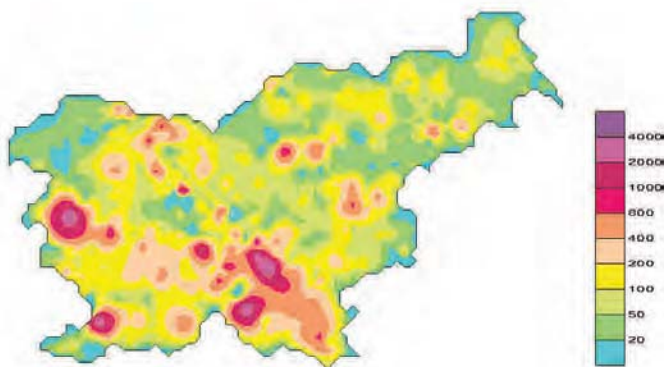


Slika 3. Radon razpada v polonij-218, niz pa se nadaljuje s svincem-214, bizmutom-214, polonijem 214, svincem-210, bizmutom-210, polonijem-210 in konča s stabilnim svincem 206

Medtem ko je radon plin, so njegovi razpadni produkti kovine in zato tvorijo v zraku radioaktivne aerosole. Čeprav je radon radioaktiven, pravzaprav ni hudo nevaren za človeka. Skupaj z zrakom ga sicer vdihnemo, vendar ga

kot plin tudi izdihnemo. Drugače pa je z njegovimi kratkoživimi razpadnimi produkti, ki so vedno v zraku skupaj z radonom. Kot aerosole jih namreč pljuča odfiltrirajo od vdihanega zraka. Na steni dihalnih poti, kjer so se usedli, razpadajo in nastali delci alfa poškodujejo okolno tkivo. Te poškodbe lahko vodijo do raka.

Meritve koncentracije radona v zaprtih prostorih. Za ustrezno ukrepanje v smeri zmanjševanja izpostavljenosti radonu je treba najprej opraviti pregledne meritve in ugotoviti, kje so koncentracije radona visoke. Referenčne vrednosti, skladno z direktivo EURATOM 2013/59 o varstvu pred ionizirajočimi sevanji, naj ne bi bile višje od 300 Bqm^{-3} . Če je referenčna vrednost presežena, je treba ugotoviti, kakšne so izpostavljenosti ljudi, ki se zadržujejo v teh prostorih, in izvajati ukrepe optimizacije izpostavljenosti, ki se lahko izvajajo, tudi če so koncentracije nižje od referenčnih. Visoke vsebnosti radona lahko pričakujemo na področjih, kjer so tla porozna in zato dobro prepustna, torej predvsem na kraških in prodnatih podlagah, nižje vsebnosti radona pa na področjih, ki so slabo prepustna, kot so na primer glinene podlage. Na sliki 4 je zemljevid Slovenije z označenimi koncentracijami radona v Bqm^{-3} .



Slika 4. Radonski zemljevid Slovenije z označenimi koncentracijami radona v zaprtih prostorih v Bqm^{-3} , pripravljen na podlagi izvedenih meritev v vzgojno-izobraževalnih ustanovah, ki so jih izvedli sodelavci Inštituta Jožef Stefan

Ukrepi za zmanjševanje izpostavljenosti radonu v zaprtih prostorih. Ukrepi za zmanjšanje izpostavljenosti radona so lahko prezračevanje prostorov, reorganizacija delovnih nalog in delovnega časa, premestitev ljudi v druge prostore, prenehanje uporabe prostorov, v katerih so ljudje najbolj izpostavljeni

in druge dejavnosti, ki pripomorejo k zmanjšanju izpostavljenosti. Prezračevanje prostorov je najpreprostejši ukrep za znižanje koncentracije radona. Še posebej je učinkovito prezračevanje prostorov zjutraj, s katerim znižamo koncentracijo radona, ki se je nakopičil ponoči. Poleg navedenih ukrepov, se lahko sprejmejo tudi gradbeni posegi, kot so zatesnitev razpok in špranj v tleh objektov, utrditev talne plošče, prezračevanje jaškov, in prezračevanje zemljine pod talno ploščo, če jih je mogoče izvesti in se oceni, da bodo spremembe zadostno prispevale k zmanjšanju izpostavljenosti, primerljivih rezultatov pa ni mogoče doseči z drugimi ukrepi. Ukrepi morajo biti sorazmerni izpostavljenosti in takšni, da se ekonomsko najugodneje doseže čim učinkovitejše in trajno zmanjšanje izpostavljenosti.

Posebej je treba opozoriti na nestrokovno izvedbo energetskih sanacij stavb, ki lahko ne le poslabšajo kakovost zraka v zgradbi, ampak povzročijo tudi zvišanje koncentracije radona. Na področjih z visokimi koncentracijami radona v tleh bi morala biti vsaka novogradnja projektirana in zgrajena tako, da se prepreči prodiranje radona v stavbo ali omogoči prisilno prezračevanje.

Uprava Republike Slovenije za varstvo pred sevanji od leta 2006 izvaja program sistematičnega pregledovanja delovnega in bivalnega okolja ter ozaveščanja prebivalstva o ukrepih za zmanjšanje izpostavljenosti zaradi naravnih virov sevanj, predvsem radona. Program je namenjen zagotavljanju varstva ljudi pred večjo izpostavljenostjo naravnim virom ionizirajočih sevanj na območjih in pri dejavnostih, kjer je tveganje večje.

Delovno in bivalno okolja se pregleduje predvsem tam, kjer so naravnim virom izpostavljeni otroci, mladina in druge občutljivejše skupine prebivalcev. Sistematično pregledovanje delovnega in bivalnega okolja obsega osnovne meritve in oceno izpostavljenosti, ki se izvajajo predvsem v objektih, v katerih je zaradi sestave tal in strukture objekta večja verjetnost za večjo izpostavljenost naravnim virom sevanja. Dodatne meritve, ponovna ocena izpostavljenosti in analiza vzrokov se izvedejo, če osnovne meritve ali ocena doz pokažejo, da je verjetno, da so posamezniki izpostavljeni učinkovitim dozam, višjim od 6 mSv. Pomembno vlogo ima tudi izobraževanje in ozaveščanje prebivalstva o radonu [15].

ZAKLJUČEK

IARC v zvezi z izpostavljenostjo UV-svetlobi kot najpomembnejšemu dejavniku tveganja za nastanek kožnega raka, na katerega lahko vplivamo, opozarja na previdnost pri sončenju, ki naj bo, če že, omejeno na čas pred deseto uro dopoldne in po četrti uri popoldan. Za zmanjšanje izpostavljenosti soncu je treba uporabljati zaščitna oblačila, pokrivala in očala ter kreme z ustreznim zaščitnim UV-faktorjem. Paziti je treba, da nas sonce ne opeče,

zlasti ne otrok, saj je to eden glavnih vzrokov za razvoj kožnega raka. Tudi sončenje v solarijih ni varno, saj je učinek podoben kot pri soncu, zato ga odsvetujejo.

Radioaktivni plin radon prispeva več kot 40-odstotni delež izpostavljenosti zaradi ionizirajočih sevanj in je povzročitelj vsakega desetega pljučnega raka. IARC zato priporoča ozaveščanje prebivalstva o tveganju zaradi izpostavljenosti radonu, ugotavljanje koncentracij radona v bivalnih in delovnih prostorih ter v primerih ugotovljenih zvišanih izpostavljenostih, izvedbo ustreznih ukrepov, od prezračevanja prostorov do gradbenih posegov na objektih. Novogradnje na področjih z visoko koncentracijo radona v tleh morajo biti projektirane in zgrajene tako, da se prepreči prodiranje radona v stavbo ali omogoči prisilno prezračevanje.

LITERATURA

1. Škrk D. Fizikalne osnove rentgenskih metod, In: Jevtič V, Šurlan M, Matela J (editors). Diagnostična in intervencijska radiologija, Splošni del. 1. izdaja. Maribor: Pivec, 2014: 20–6.
2. Projekt FORUM EMS in IZMF. Elektromagnetna sevanja – Mobilni telefoni in zdravje, Ljubljana, november 2014.
3. Projekt FORUM EMS. Električna in magnetna polja – Naprave za distribucijo električne energije, Ljubljana, december 2014.
4. Inštitut za neionizirajoča sevanja in Uprava RS za varstvo pred sevanji. Solariji in zdravje, Ljubljana, oktober 2009.
5. Hočevnar M. Kožni rak. Onkologija. 1. izdaja. Ljubljana: Mladinska knjiga, 2009: 238–44.
6. Greinert R, et al. European Code against Cancer 4th ed. Ultraviolet radiation and cancer. Cancer Epidemiology 2015
7. Rak v Sloveniji 2011. Ljubljana: Onkološki inštitut Ljubljana, Epidemiologija in register raka, Register raka Republike Slovenije, 2015.
8. Škrk D. Varstvo pred ionizirajočimi sevanji, In: Jevtič V, Šurlan M, Matela J (editors). Diagnostična in intervencijska radiologija, Splošni del. 1. izdaja. Maribor: Pivec, 2014. 119–40.
9. McColl N, et al. European Code against Cancer 4th Edition: Ionising and non-ionising radiation and cancer. Cancer Epidemiology 2015.
10. International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, 2007.
11. Poročilo o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti v Republiki Sloveniji leta 2014. Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost; Ljubljana, 2014.
12. United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 Report to General Assembly with Scientific Annexes, New York, 2010.
13. Žontar D, Zdešar U, Kuhelj D, Pekarovič D, Škrk D. Estimated collective effective dose to the population from radiological examinations in Slovenia. Radiol Oncol 2015; 49 (1): 99–106.
14. IAEA Safety Standards Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation, Vienna, 2015.
15. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective, Geneva, 2009.
16. Uradni list RS. Program sistematičnega pregledovanja delovnega in bivalnega okolja ter ozaveščanja prebivalstva o ukrepih za zmanjšanje izpostavljenosti zaradi prisotnosti naravnih virov sevanj, št. 17/2006.