

RADIOAKTIVNOST V ČLOVEKOVEM OKOLJU

Bogdan Pucelj* Rafael Martinčič**

V članku so podane osnovne lastnosti radioaktivnosti in njenih bioloških učinkov. Podrobneje je prikazana razširjenost naravne radioaktivnosti v okolju in njeni prispevki k obsevanju človeka. Povzeti so tudi podatki o kontaminaciji okolja z umetnimi radioaktivnimi izotopi, ki so jih povzročile poskusne jedrske eksplozije in nesreča černobilskega reaktorja.

Še slabih sto let ni minilo, odkar je človek odkril naravno radioaktivnost in izdelal prvi umetni vir ionizirajočega sevanja – rentgenski aparat. Petinštirideseto leto mineva, odkar je prvič sprožil nenadzorovano jedrsko reakcijo – eksplozijo – in v naslednjih letih s številnimi jedrskimi poskusnimi eksplozijami dodal biosferi poleg naravnih radioaktivnih izotopov še umetne. In vendar je presenetljivo, kako zlasti v javnosti ne upade zanimanje za vse, kar je povezano z radioaktivnostjo. Zanimanje, še bolj pa strah pred nečim protislovnim, kar zdravi in povzroča raka, kar pod nadzorom daje ogromne količine električne energije, nenadzorovano pa grozi z uničenjem, ki ga človeštvo v vsej svoji zgodovini ni moglo niti slutiti. Za javnost je značilno, da s svojo trenutno pozornostjo in strahom niha zdaj med umetnimi zdaj med naravnimi viri, pri čemer jo zlasti spodbujajo aktualni dogodki ali naključna poročila. Stroka pa po drugi strani sistematsko spremlja vse vidike izpostavitve človeka sevanju in ugotavlja njihovo relativno in absolutno pomembnost ter išče metode za zmanjšanje izpostavitve, s čimer omogoča varnejše življenje.

V nadaljevanju na kratko povzemamo nekaj osnovnih značilnosti virov ionizirajočega sevanja in podajamo osnovno informacijo o njihovih bioloških učinkih. Podrobneje obravnavamo razširjenost naravnih in umetnih virov ionizirajočega sevanja v okolju in njihove prispevke k izpostavitvi človeka.

Osnovne lastnosti ionizirajočega sevanja

Ionizirajoče sevanje sestavljajo elektromagnetno valovanje in delci, ki zaradi velike energije ob prehodu skozi snov ionizirajo atome in molekule. Najpomembnejši so delec alfa, ki je jedro helijevega atoma, delec beta, ki je elektron, in nevtron kot eden od gradnikov atomskega jedra. Elektromagnetna sevanja z energijami v teh področjih imenujemo sevanje gama in X ali tudi rentgensko sevanje.

Za nekatere od teh sevanj je značilna znatna prodornost. Tako je doseg žarkov gama in nevtronov v zraku nekaj sto metrov, elektronov nekaj metrov, medtem ko so delci alfa dokaj neprodorni, saj v zraku dosežejo le nekaj centimetrov. Dosegi v trdni snovi, na primer v tkivu, so nekaj tisočkrat manjši.

Viri sevanja so nestabilna jedra, ki ob radioaktivnem razpadu emitirajo delec ali sevanje gama in pa razne naprave, kot so rentgenski aparati, pospeševalniki in jedrski reaktorji. Zelo pomemben vir za naše okolje so tudi jedrski procesi, ki se odvijajo na zvezdah in Soncu. Poznamo ga pod imenom kozmično sevanje. Vsak radioaktivni izotop karakterizira nekaj osnovnih parametrov, ki so zanj specifični:

Način razpada. Najpogostejša sta razpad alfa in beta. V prvem primeru jedro izseva delec alfa, v drugem pa elektron ali pozitron. Razpad često spremlja emisija žarka gama.

Razpolovni čas. Različni radioaktivni izotopi razpadajo z različno hitrostjo. Kot osnovni podatek običajno navedemo razpolovni čas, to je časovni interval, v katerem razpade polovica začetnega števila jeder. Ta sega od zelo kratkih vrednosti do milijard let.

Aktivnost. Aktivnost radioaktivne snovi je določena s številom razpadov v časovnem intervalu. Meri se v bekerelih. 1 Bq je 1 razpad na sekundo.

V tabeli 1 navajamo podatke za nekatere naravne in umetne izotope.

Biološki učinki sevanja

Veliko virov ionizirajočega sevanja s pridom izkoriščamo v medicini, pri pridobivanju energije, v industriji, raziskavah itd., ob tem pa se že od nekdaj zavedamo tudi njihove nevarnosti za zdravje živih bitij. Tako so skoraj neposredno po izumu rentgenskega aparata (l. 1895 ga je odkril W. Roentgen) opažali hude neposredne zdravstvene posledice pri ljudeh, ki so se prekomerno izpostavljali sevanju. 30 let kasneje so s poskusi na bakterijah odkrili mutagenost sevanja, to je možnost po-

vročanja dednih okvar. Širša javnost pa se je zdravstvenih učinkov ionizirajočega sevanja zavedla šele leta 1945, ko sta bili z atomskima bombama uničeni japonski mesti Hirošima in Nagasaki.

Ob prodiranju skozi tkivo ionizirajoče sevanje poškoduje celice. Pri veliki izpostavitvi sevanju je poškodovan ali uničen znaten delež celic organizma, organa ali tkiva, posledice so resne in se pojavijo hitro po obsevanju. Nastane akutni radiacijski sindrom. Pri nizki izpostavitvi je okvarjen le majhen delež celic, zaradi česar ni prizadeta funkcionalnost organa. Nekateri od teh okvar pa lahko predstavljajo prvo stopnjo razvoja celice v rakasto obliko, kar se pokaže z zakasnitvijo nekaj let do nekaj desetletij po izpostavitvi sevanju. Podobno se okvare spolnih celic lahko pokažejo šele pri potomcih.

Za akutne učinke je značilno, da do njih ne pride, če je izpostavitve sevanju pod določeno vrednostjo, pod pragom. Za zakasnele učinke, kot so kancerogenost in dedni učinki, pa danes previdno privzemamo, da verjetnost za njihov pojav narašča s stopnjo izpostavitve sevanju, torej nimajo praga.

Izpostavitve sevanju in biološke posledice ocenjujemo z efektivno enakovredno dozo (*), ki jo merimo v sievertih (Sv). Pri dozi 1 Sv, ki jo je celo telo prejelo v kratkem času, na primer v nekaj urah, se lahko pojavijo nekateri takojšnji učinki, medtem ko je doza okrog 4 Sv brez zdravniške pomoči že smrtna za približno polovico ljudi. V običajnem življenjskem okolju se srečujemo z dozami, ki znašajo v enem letu okrog tisočinko te vrednosti.

(* Absorbirano dozo D, ki je fizikalna količina, merimo v grayih (1 Gy = 1 J/kg). Biološke učinke bolje napovemo s pomočjo enakovredne doze H, pri kateri s kvalitativnim faktorjem Q upoštevamo vrsto sevanja: $H = Q \cdot D$. Pri neenakomernem obsevanju pa z efektivno enakovredno dozo H_E z utežnimi faktorji w_T upoštevamo različno občutljivost posameznih organov in tkiv: $H_E = w_T \cdot H_T$. Enakovredno in efektivno enakovredno dozo merimo v sievertih (1 Sv = 1 J/kg).

Človek je sevanju izpostavljen, kadar so viri v njegovi okolici in ga obsevajo z emitiranjem prodornih žarkov (zunanje obsevanje). Po drugi strani pa se v organizem vnešeni izotopi z vdihavanjem kontaminiranega zraka, z uživanjem kontaminirane hrane in vode ali z vnosom skozi kožo glede na svoje kemijske lastnosti vgradijo v organe ali tkiva in organizem

* Mag., Inštitut Jožefa Stefana, Univerza E. Kardelja v Ljubljani.

** Dr., Inštitut Jožefa Stefana, Univerza E. Kardelja v Ljubljani.

obsevajo od znotraj (notranje obsevanje). Prodorna sevanja kot so žarki gama, nevtroni, delno elektroni, so pomembna tako za zunanje kot za notranje obsevanje, medtem ko so neprodorna (delci alfa) pomembna le, če njihovi viri prodro v organizem.

Naravni viri sevanja

Človek je bil vedno izpostavljen virom sevanja, ki so povsod v naravi in so sestavljeni iz dveh komponent: kozmičnega sevanja in naravnih zemeljskih radioaktivnih izotopov. Čeprav je večina človeštva izpostavljena podobnemu nivoju sevanja, obstajajo tudi variacije. Na izpostavitve naravnemu sevanju pa vplivajo tudi nekatere dejavnosti. Vsi podatki v tem poglavju so povzeti po (5).

Kozmično sevanje

Zgornjo plast atmosfere neprestano bombardirajo delci zelo visokih energij. To so protoni, delci alfa in težja jedra. Večji del te primarne radiacije je galaktičnega izvora, manjši del pa prihaja s Sonca. V atmosferi ti delci zadevajo v molekule zraka in ob teh procesih se ustvarja sekundarno kozmično sevanje iz elektronov, mezonov, nevtronov itd., ki predstavlja glavni del kozmičnega sevanja na morsk gladini, kajti večina primarne radiacije se absorbira v atmosferi. Intenziteta kozmičnega sevanja narašča z nadmorsko višino, ker je na razpolago vedno tanjša zaščitna plast atmosfere. Tako smo na Triglavu 3,7-krat bolj izpostavljeni kozmični komponenti sevanja kot na morsk gladini.

Dodatno nastajajo ob absorpciji kozmičnega sevanja v atmosferi tudi nekateri radioaktivni izotopi, od katerih sta najpo-

membnejša tritij H-3 in radioaktivni ogljik C-14. Ti kozmogeni izotopi z vremenskimi procesi pridejo do zemeljske površine, kjer se vključijo v naše življenjsko okolje.

Kozmično sevanje največ prispeva k zunanemu obsevanju (355 μSv letno), medtem ko je njegov prispevek k notranjemu obsevanju dokaj nepomemben (15 μSv letno).

Naravni zemeljski radioaktivni izotopi

Poleg kozmogennih radioaktivnih izotopov so bili v okolju vedno tudi dolgoživi izotopi, ki so ostali na Zemlji od njenega nastanka. Najpomembnejši so kalij K-40 z razpolovnim časom $t_{1/2} = 1,28$ milijarde let in dve kompleksni razpadni verigi z začetnima izotopoma uranom U-238 ($t_{1/2} = 4,47$ milijarde let) in torijem Th-232 ($t_{1/2} = 14$ milijarde let), ki s številnimi razpadi alfa, beta in gama preideta v stabilna potomca. Ti izotopi so v vseh zemljah in kameninah. Tako v tipični zemlji najdemo povprečno 370 Bq/kg K-40 in po 25 Bq/kg U-238 in Th-232. V majhnih količinah jih najdemo v hrani in vodi, vgrajujejo pa se tudi v žive organizme. Za ilustracijo povejmo, da je v človeškem telesu okrog 60 Bq/kg K-40.

V razpadnih verigah U-238 in Th-232 sta posebno pomembna razpadna produkta radon Rn-222 in toron Rn-220. To sta plemenita plina in se zato kemijsko ne vežeta z okoljskimi elementi, ampak delno prehajata v atmosfero. Zaradi izhajanja iz tal je v zunanem zraku od 1 do 10 Bq/m³ radona ob znatnih dnevnih in sezonskih variacijah. V zaprtih prostorih se radon delno kopiči, zato so v zgradbah koncentracije tipično okrog 10-krat višje.

Naravni zemeljski radioaktivni izotopi v povprečju prispevajo k zunajemu obsevanju 410 μSv /leto in k notranjemu 1600 μSv /leto. Poudariti moramo, da levji delež notranjega obsevanja izvira iz inhalacije radonovih potomcev.

Prispevek posameznih komponent naravnega sevanja k skupni efektivni enakovredni dozi za področja z običajnim naravnim ozadjem je v tabeli 2. K skupni dozi 2400 μSv /leto večji del prinese notranje (1600 μSv /leto), manjši del pa zunanje obsevanje (800 μSv /leto). Posamezni prispevki k zunanemu, notranjemu in celotnemu obsevanju so prikazani na sliki 1.

Variacije naravnega sevanja

Prispevki k letni dozi v tabeli 2 predstavljajo svetovno povprečje in kot vsako povprečje ne dajo popolne slike o vrednostih za posameznika.

Obširne raziskave stopnje izpostavitve zunanemu sevanju so pokazale, da večina prebivalcev našega planeta živi na območjih, kjer letna doza zunanega sevanja ni znatno drugačna od vrednosti v tabeli 2. Pri tem pa omejene skupine ljudi žive v okolju, kjer so zaradi višjega naravnega ozadja bolj izpostavljene sevanju. Najbolj je znan primer 70 000 ljudi v državi Kerala na jugu Indije, kjer je zaradi visoke vsebnosti torija v talnem pesku naravno ozadje precej višje. Tako del prebivalstva na tem območju prejme tudi do 50-krat večjo letno zunanjo dozo od svetovnega povprečja.

Podobno so prebivalci, ki živijo na visokih nadmorskih višinah, bolj izpostavljeni kozmičnemu sevanju kot tisti v nižinah.

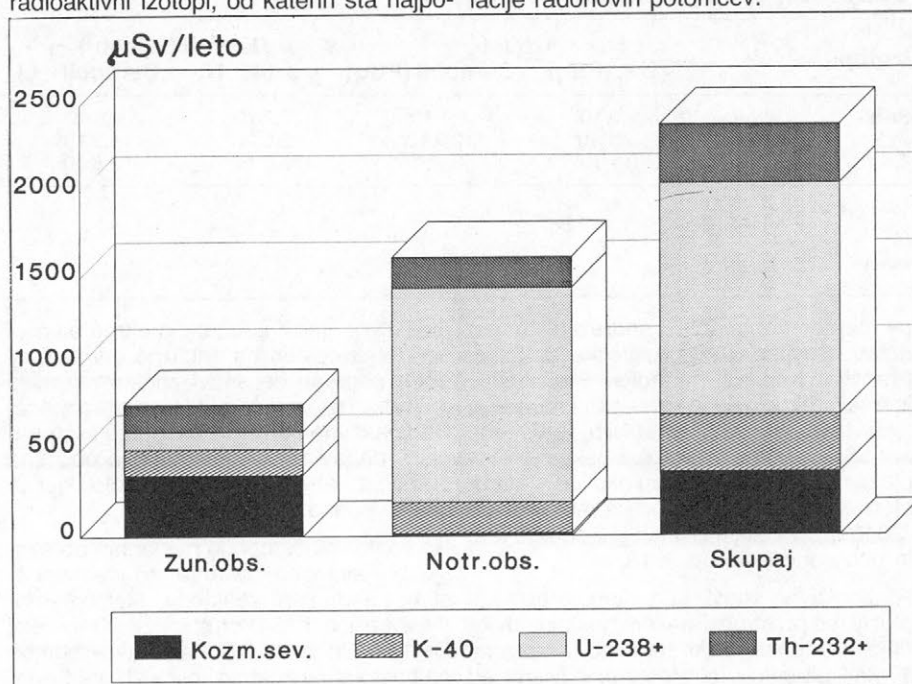
Mnogo znatnejše so razlike v letni dozi notranjega obsevanja, in to zaradi velikega nihanja koncentracije radona v zaprtih prostorih. To so odkrili v sedemdesetih letih, ko so v razvitih državah zaradi varčevanja z energijo začeli tesniti stanovanja. Akcijo je spremljal študij koncentracij raznih polutantov v zaprtih prostorih. Odkrili so izjemno širok razpon koncentracije radona. Medtem ko je svetovno in ameriško povprečje nekaj deset Bq/m³, so v ZDA odkrili v posameznih primerih celo nad 100 000 Bq/m³ radona. Posamične visoke vrednosti so našli tudi v drugih državah. Pokazalo se je, da pride večina radona v zgradbe iz okoljske zemlje, del pa iz gradbenih materialov in zunanega zraka (slika 2).

Iz teh razlogov so v številnih državah že uvedli obsežne študije koncentracije radona v zaprtih prostorih. Postavili so tudi t. i. akcijske nivoje, to je vrednosti celoletnih povprečnih koncentracij radona v določenem bivalnem ali delovnem prostoru, nad katerimi so potrebni sanacijski ukrepi za zmanjšanje koncentracij. Primeri akcijskih nivojev so dani v tabeli 3.

Tehnološko spremenjeni naravni viri

Nekatere človekove dejavnosti povečujejo izpostavitve naravnemu sevanju. Najpomembnejše so letalski promet, nekateri energetski obrati, npr. termoelektrarne na premog, in uporaba fosfatov za proizvodnjo gnojil.

Sodobni letalski promet poteka na višinah med 8 in 12 kilometri. Tam je intenziteta kozmičnega sevanja od 60- do 80-krat



Slika 1. Prispevki različnih virov ionizirajočega sevanja k izpostavitvi človeka naravnemu sevanju (Vir: UNSCEAR 1988, 5)

134 večja kot na morsk gladini. Vendar so prejete doze zaradi kratkotrajnosti poletov zanemarljive v primerjavi z letno naravno dozo.

V premogu so, kot v vseh snoveh, majhne količine naravnih radioaktivnih izotopov K-40, U-238, Th-232. Ob sežiganju se ti izotopi koncentrirajo v pepelu, ki delno pobegne v atmosfero v obliki letečega pepela. Zato je prebivalstvo v okolici termoelektrarne izpostavljeno nekoliko povišanemu naravnemu sevanju. Čeprav so dodatne doze primerljive s tistimi iz okolice jedrske elektrarne, ki so zelo nizke, je njihova škodljivost zanemarljiva v primerjavi s škodljivostjo zaradi kemijske toksičnosti plinov, ki se sproščajo ob sežiganju premoga. Odpadni pepel so včasih uporabljali za izdelavo gradbenih materialov. V takih zgradbah so prebivalci izpostavljeni nekoliko povišanemu sevanju.

Za izdelavo umetnih gnojil se uporabljajo fosfati, ki običajno vsebujejo več U-238 kot zemlja. Zato je izotopov te naravne verige več tudi v samem gnojilu, pa tudi v zemlji, kjer uporabljamo taka gnojila.

Umetni viri sevanja

Umetni viri ionizirajočega sevanja se uporabljajo na različnih področjih. Najbolj razširjena je medicinska uporaba, kjer se z diagnosticiranjem in nadzorom raznih obolenj ter okvar z rentgenskimi aparati in delno z radioaktivnimi izotopi srečujemo skoraj vsi. Medicina zato predstavlja za naravnimi viri najpomembnejši prispevek k izpostavitvi sevanju, ki znaša v razvitih državah povprečno nekaj deset odstotkov naravne doze. Po drugi strani pa je vpliv medicine na obremenitev okolja zanemarljiv.

Viri sevanja so v rabi še v industriji za nadzor tehnoloških procesov, pri raziskavah v fiziki, biologiji, kemiji, medicini itd. Vendar tudi v teh primerih vpliva na okolje praktično ni.

Dejavnost, ki je do sedaj povzročila najširšo kontaminacijo okolja z umetnimi radioaktivnimi snovmi, je bila vojna industrija z izvajanjem poskusnih jedrskih eksplozij. Sledi te dejavnosti je moč najti v slehernem kotičku biosfere.

V znatnem delu Evrope je na drugem mestu kontaminacija z radioaktivnimi snovmi iz črnobilskega reaktorja, ki so jo zaznali skoraj po vsej severni polobli, marsikje pa je celo preseгла kontaminacijo zaradi poskusnih jedrskih eksplozij.

Jedrske eksplozije

Pri jedrskih eksplozijah, ki temeljijo na sprostitvi energije ob razcepu težkih jeder (»atomska« bomba) ali zlitju lahkih jeder (»vodikova« bomba), nastanejo kot stranski produkt ogromne količine radioaktivnih snovi. Prvo poskusno jedrsko eksplozijo so izvedle ZDA 16. 7. 1945 na svojem ozemlju. Že v avgustu 1945 so jedrsko energijo uporabile v vojne namene in z dvema bombama uničile japonski mesti Hirošimo in Nagasaki. Sledile so številne poskusne eksplozije vedno večjih moči,

Tabela 1. Osnovni podatki za nekatere radioaktivne izotope.

Izotop	Razpad	$t_{1/2}$	Naravni	Umetni
H-3	beta	1,23 10 ¹ l.	da	da
K-40	beta, gama	1,38 10 ⁹ l.	da	ne
Sr-90	beta	2,85 10 ¹ l.	ne	da
I-131	beta, gama	8,02 10 ⁰ d.	ne	da
Cs-137	beta, gama	3,02 10 ¹ l.	ne	da
Ra-226*	beta, gama, alfa	1,6 10 ³ l.	da	ne
Pu-239	alfa	2,4 10 ⁴ l.	ne	da

Opomba: * vključno s potomci

Tabela 2. Efektivne enakovredne doze zaradi naravnega sevanja v $\mu\text{Sv}/\text{leto}$.

Vir	Zun. obs.	Notr. obs.	Skupaj
Kozmično sevanje	355	15	370
K-40	150	180	330
U-238 + potomci	100	1240	1340
Th-232 + potomci	160	180	340
Skupaj (zaokroženo)	800	1600	2400

Vir: UNSCEAR 1988 (5)

Tabela 3. Akcijski nivoji za radon v zaprtih prostorih v ZDA in Veliki Britaniji.

Država	Akc. nivo (Bq/m ³)	Vrsta ukrepa
ZDA	< 150 150 – 750 750 – 7500 > 7500	brez ukrepanja sanacija v nekaj letih sanacija v nekaj mesecih takojšnje ukrepanje
Velika Britanija	> 400 100	obstoječe zgradbe – sanacija novogradnje – mejna vrednost

Viri: 1,2

Tabela 4. Primerjava kontaminacije okolja zaradi jedrskih eksplozij in črnobilske nesreče.

Izotop	Izpust		Depozit (kBq/m ²)	
	j. e. (EBq)	Černobil (PBq)	j. e. (45° N)	Černobil – Lj
Sr-90	6,0 10 ⁻¹	8,1 10 ⁻¹	3,2 10 ⁰	4,0 10 ⁻¹
I-131	7,1 10 ²	2,7 10 ²	2,0 10 ¹	1,3 10 ²
Cs-137	9,1 10 ⁻¹	3,7 10 ¹	5,2 10 ⁰	2,6 10 ¹

Opomba: 1 EBq = 1 ExaBq = 1 10¹⁸ Bq
1 PBq = 1 PetaBq = 1 10¹⁵ Bq

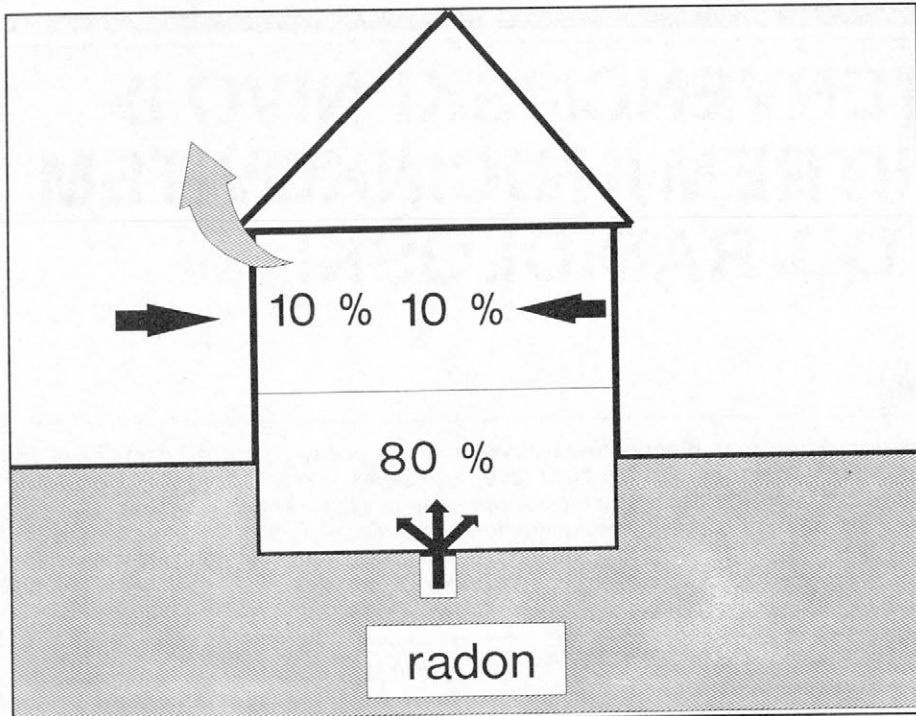
Vir: 4

pri čemer se je ZDA pridružilo še pet držav: Sovjetska zveza, Velika Britanija, Francija, Kitajska in Indija. Preizkušnje jedrskih eksplozij je doseglo vrhunec v letih 1961 in 1962, ko je bilo sproščene kar 55 % celotne energije. Poskusne eksplozije so izvajali v raznih okoljih: v atmosferi (0 do 10 km), pod zemljo (-5 do -2040 m), v velikih višinah (10 do 480 km) in pod vodo (-30 do -610 m).

Radioaktivne snovi, ki nastanejo ob eksploziji, se pri atmosferskem poskusu dvignejo v troposfero, ki sega do 9 oziroma 17 km, ali celo v stratosfero, odvisno od sproščene energije. V troposferi, kjer poteka večina vremenskih procesov, se ra-

dioaktivne snovi zadržujejo okrog en mesec, v stratosferi pa približno eno leto. V obeh primerih se snovi znatno razpršijo in kratkoživi izotopi v veliki meri razpadne. Radioaktivne snovi ob usedanju in izpiranju s padavinami kontaminirajo obsežna območja, lahko tudi celo poloblo, kjer je bila izvedena eksplozija.

Radioaktivni izotopi, ki nastanejo ob eksploziji »atomske« bombe, so identični tistim v jedrskem reaktorju. Najpomembnejši so jod I-131, stroncij Sr-90 in cesij Cs-137. Pri eksploziji »vodikove« bombe pa nastajata v znatnih količinah predvsem H-3 in C-14, ki sta sicer tudi del naravnega inventarja. Nekaj podatkov o celotni



Slika 2. Izvori radona v zgradbah.

sproščeni aktivnosti nekaterih izotopov ob vseh dosedanjih jedrskih eksplozijah je v tabeli 4, kjer so navedeni tudi povprečni površinski depoziti v naši geografski širini (4).

Jedrska energija

Uporaba jedrske energije za proizvodnjo elektrike se je začela l. 1953. Od tedaj je bilo v svetu zgrajenih prek 400 jedrskih elektrarn, ki proizvedejo 17% celotne električne energije, v Franciji celo 70%. Jedrske elektrarne so samo del jedrskega gorilnega ciklusa, ki se začne z izkopom uranove rude, nadaljuje s predelavo rude in izdelavo gorilnih elementov, zaključuje pa z odlaganjem radioaktivnih odpadkov. Ob normalnem delovanju posameznih faz gorilnega cikla, vključno z jedrsko elektrarno, so izpusti radioaktivnih snovi v okolje zelo nizki in zelo malo prispevajo k obsevanju prebivalstva. Tako je npr. prispevek jedrske elektrarne k letni dozi prebivalstva v bližnji okolici manjši od 1% naravne doze. Ta prispevek pa se lahko močno poveča ob jedrski nesreči.

Kontaminacija okolja zaradi černobilske nesreče

Dne 26. 4. 1986 je prišlo v jedrskem reaktorju v Černobilu v Sovjetski zvezi do eksplozije in požara, zaradi česar so ogromne količine radioaktivnih snovi pobegnile v atmosfero. Po sovjetskih podatkih skupno približno 2 EBq. Vetri so radioaktivnost najprej zanesli nad Skandinavijo, potem pa še nad druge dele Evrope in celotno severno poloblo. Stopnja radioaktivne kontaminiranosti okolja je zelo variirala in je bila odvisna od oddaljenosti od kraja nesreče, smeri in hitrosti vetrov in od količine padavin, saj dež radioaktivne snovi zelo učinkovito izpira iz zraka.

V naših krajih se je radioaktivni oblak pojavil v jutranjih urah 30. 4. 1986, kontaminiranje okolja pa je trajalo približno 10 dni. Najbolj je bila onesnažena deževnica, znatno pa tudi nekatera prehrana, zlasti zelenjava, ki jo je neposredno kontaminirala deževnica. Radioaktivni izotopi so bili tudi v zraku. Paša živine na kontaminiranih pašnikih lahko povzroči znaten vnos radioaktivnih snovi v mleko in meso živali. Prepoved paše v začetku maja v naših krajih je ta vnos v največji meri preprečila.

Meritve so pokazale prisotnost približno 30 radioaktivnih izotopov. S stališča ogoženosti prebivalstva so bili glede na ugotovljene koncentracije in radiološke lastnosti najpomembnejši I-131 med kratkoživimi ter Cs-134 in Cs-137 med dolgoživimi. V tabeli 3 so skupaj s podatki za jedrske eksplozije za nekatere izotope prikazani celotni izpusti iz černobilskega reaktorja in pa depozit v Ljubljani. Depozit iz obeh virov je v grobem primerljiv, čeprav je bilo ob jedrskih eksplozijah več Sr-90, v černobilski kontaminaciji pa več I-131 in Cs-137.

Na podlagi merjenih vsebnosti radioaktivnih izotopov v zraku, prehrani in zemlji je bila posredno ocenjena doza prebivalca Slovenije v letu 1986 (3). Ta znaša nekaj deset odstotkov letne doze zaradi naravnega sevanja. Pri tem je bil znaten prispevek kratkoživih izotopov. V naslednjih desetletjih je po dosedanjih izkušnjah pričakovati še nekajkrat višjo skupno dozo. Kljub temu bo celotna izpostavitve sevanju našega prebivalstva zaradi kontaminacije iz černobilskega reaktorja bistveno nižja od tiste, ki smo ji stalno izpostavljeni zaradi naravnega sevanja.

Zaključki

Naravna radioaktivnost je bila vedno del človekovega okolja in predstavlja glavni vir človekove izpostavitve ionizirajočemu sevanju.

Medicinske preiskave z uporabo virov ionizirajočega sevanja predstavljajo drugi najpomembnejši vir izpostavitve, njihov vpliv na okolje pa je zanemarljiv.

Nekatere človekove dejavnosti, kot so poskusne jedrske eksplozije ali nesreča v černobilskem jedrskem reaktorju, so povzročile obširno kontaminacijo okolja z umetnimi radioaktivnimi izotopi.

1. Green, B. M., P. R. Lomas in M. C. O'Riordan, 1988. Action on Radon in UK Homes. Radiat. Prot. Dosim., Vol. 24, Nos. 1-4, 541-5. Proceedings of the Fourth International Symposium on the Natural Radiation Environment, Lisbon, Portugal, December 7-11, 1987.
2. Guimond, R. J., 1988. Reducing Radon Risks: The Approach in the United States, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 24, Nos. 1-4, 483-5. Proceedings of the Fourth International Symposium on the Natural Radiation Environment, Lisbon, Portugal, December 7-11, 1987.
3. Poročilo o meritvah radioaktivnega onesnaženja in ocena doz prebivalstva SR Slovenije v letu 1986 po jedrski katastrofi v Černobilu, SSSR. IJS, delovno poročilo DP-4343, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana (1986).
4. Pucelj, B., 1987. Kontaminacija okolja z radioaktivnimi snovmi: nuklearne eksplozije - černobilska nesreča. Zbornik radova, str. 68-71, XIV jugoslovanski simpozijum za zaščito od zračenja, Novi Sad, 8.-11. junij 1987.
5. United Nations, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1988. Report to the General Assembly, with annexes. United Nations Publication No. E. 88. IX. 7, New York, 1988.

Bogdan Pucelj
Rafael Martinčič

Radioactivity in Environment

Basic information about radioactivity and its biological effects is given. The extent and distribution of natural radioactivity and its contribution to human exposure is presented. In addition, environmental contamination with artificial radionuclides due to test nuclear explosions and the Chernobyl accident is presented.