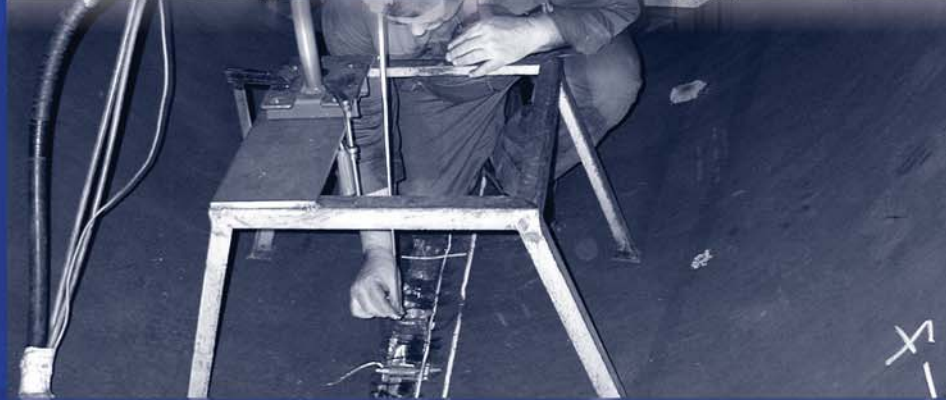




REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR
UPRAVA RS ZA JEDRSKO VARNOST

delo z viri sevanj





REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR
UPRAVA RS ZA JEDRSKO VARNOST

Delo z viri sevanj

Matjaž Koželj
Rudi Erman
Radko Istenič
Milena Černilogar Radež

Ljubljana, 2006

delo z viri sevanj

Delo z viri sevanj

Izdala in založila

Republika Slovenija
Ministrstvo za okolje in prostor
Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost

Za izdajatelja

Andrej Stritar

Besedilo

Matjaž Koželj, Rudi Erman, Radko Istenič, Milena Černilogar Radež

Pregled

Michel Cindro, Marko Giacomelli, Igor Jenčič, Milko Križman, Gregor Omahen,
Igor Osojnik, Andrej Stritar, Leopold Vrankar

Lektorirala

Nina Štampohar

Uredila

Milena Černilogar Radež

Fotografije

Arhiv URSJV, slike: od 1 do 9, 10 (3/4), 11, 12, 18, od 21 do 25.

Arhiv ZVD, slike: od 13 do 17, 19, 20.

Arhiv NE Krško, slike: 10 (1/4).

Oblikovanje naslovne strani

Branka Smodiš

Natisnila:

Tiskarna Hren, Ljubljana

1. izdaja, 1000 izvodov; Ljubljana, 2006

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

621.039.74

539.16

DELO z viri sevanj / Matjaž Koželj ... [et al.] ; [fotografije arhiv URSJV, arhiv ZVD, arhiv NE Krško]. - 1. izd. - Ljubljana : Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava RS za jedrsko varnost, 2006

ISBN-10 961-91914-0-4

ISBN-13 978-961-91914-0-8

1. Koželj, Matjaž, 1955-

229970944

PREGOVOR

Knjižica Delo z viri sevanj je namenjena izvajalcem sevalnih dejavnosti, uporabnikom virov sevanj in tistim, ki se v prihodnje nameravajo ukvarjati s tovrstnimi dejavnostmi. V njej je dovolj znanja in informacij za razumevanje osnovnih zakonitosti sevanj, tako da bodo lahko tisti, ki pri svojem delu kakor koli pridejo v stik z njimi, izbrali primerne načine za varno delo in upoštevali zahteve veljavne zakonodaje iz varstva pred sevanji. Knjižica je tudi pomoč pri pridobivanju ustreznih dovoljenj. Morebitni uporabniki bodo lahko presodili, zakaj in katere pogoje morajo izpolnjevati, da pridobijo ustrezna dovoljenja.

Knjižica je poskus, da v enem izdelku predstavimo:

- fizikalne osnove sevanj in radioaktivnosti,
- osnove bioloških učinkov sevanj,
- osnove varstva pred sevanji,
- splošna navodila za delo v okolju, kjer smo lahko izpostavljeni virom sevanj
- nekatere primere uporabe virov sevanj z zahtevami varstva pred sevanji in tveganje pri uporabi posameznih vrst virov sevanj,
- nadzor nad ionizirajočimi sevanji v Sloveniji in nadzor nad izvajanjem sevalnih dejavnosti ter uporabo virov sevanj, ki ga izvajata Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost (URSVJ) in Uprava Republike Slovenije za varstvo pred sevanji (URSVS).

V knjižici so tako na enem mestu povzete osnovne informacije, ki so potrebne za izvajanje sevalnih dejavnosti, za uporabo virov sevanj in za izvajanje ustrezne zaščite pred sevanji s poudarkom na povezavi z zahtevami obstoječe veljavne zakonodaje. Zavedamo se, da v delu niso zajete vse podrobnosti. Knjižica se konča na stopnji, ko mora izvajalec sevalne dejavnosti izdelati oceno varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji in pisna navodila ter postopke, ki jih morajo imeti za opravljanje dejavnosti vsi izvajalci sevalnih dejavnosti oziroma uporabniki virov sevanj.

Bralce vabimo, da vse pripombe, dopolnitve in predloge za izboljšanje vsebine knjižice pošljejo na URSJV. Samo tako bomo lahko skupaj prispevali k še boljšemu poznavanju pomena skrbnega ravnanja z viri sevanj.

Avtorji

KAZALO

POVZETEK	1
UVOD	3
SEVANJE IN RADIOAKTIVNOST	5
Fizikalne osnove	5
Biološki učinki sevanja	11
Izpostavljenost sevanju in omejitve	17
Zaščita pred sevanjem	18
Merjenje sevanja	28
UPORABA VIROV SEVANJ	35
Radiografija	37
Analitske tehnike in postopki	42
Viri v procesni tehniki in avtomatiki	45
Obsevalne naprave	50
Uporaba odprtih virov sevanj	53
Uporaba virov sevanj na drugih področjih	57
NADZOR NAD VIRI SEVANJ	65
Pristojni upravni organi	65
Nadzor okolja in varstvo prebivalcev	66
Radioaktivni odpadki	68
NADZOR NAD UPORABO	71
Pregled veljavnih slovenskih predpisov	71
Izpolnjevanje temeljnih zahtev	81
Vodenje različnih evidenc	85
Delo odgovorne osebe	86
Delo pooblaščenega izvedenca	87
Prevoz, vnos-iznos, uvoz-izvoz in tranzit	87
DODATKI	89
Dodatek 1: Količine in enote	89
Dodatek 2: Računski primeri	91
VIRI	95

SEZNAM SLIK

Slika 1: Zgradba atoma.....	5
Slika 2: Spekter sevanj.....	6
Slika 3: Prodornost različnih vrst sevanj radioaktivnih snovi.....	8
Slika 4: Radioaktivnost s časom upada.....	10
Slika 5: DNK ter posledice posredne in neposredne izpostavljenosti molekule DNK sevanju (A: prelom na eni verigi DNK, B: prelom na obeh verigah DNK, vendar na različnih mestih, C: prelom na istem mestu obeh verig DNK).....	12
Slika 6: Biološki učinki.....	16
Slika 7: Čas, razdalja in ščit – parametri zaščite pred sevanji.....	19
Slika 8: Zaščitna obleka za delo v področju.....	22
Slika 9: Uporaba tehničnih varnostnih naprav.....	24
Slika 10: Primeri uporabe merilnikov sevanja.....	29
Slika 11: Industrijska radiografija: rentgenski aparat in defektoskop; uporaba.....	39
Slika 12: Rentgenska naprava (levo) in CT (desno).....	40
Slika 13: Naprava za XRF.....	42
Slika 14: Detektor na zajetje elektronov (ECD, Electron Capture Detector).....	44
Slika 15: Merilnika debeline v procesni tehniki: gama (levo), beta (desno).....	46
Slika 16: Merilnika nivojev v industriji pijač in papirni industriji.....	48
Slika 17: Sonda TROXLER.....	49
Slika 18: Obsevalna naprava.....	50
Slika 19: RTG aparat za pregled prtljage.....	57
Slika 20: Statični eliminator.....	58
Slika 21: Odlagališče hidrometalurške jalovine.....	62
Slika 22: Elektronski mikroskop.....	63
Slika 23: Monitoring radioaktivnosti v Sloveniji.....	67
Slika 24: Delež obsevanosti iz posameznih vrst virov sevanj.....	68
Slika 25: Postopek pridobivanja dovoljenj.....	80

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Utežni faktorji sevanja, w_R (ICRP, 1990).....	14
Tabela 2: Tkivni utežni faktorji, w_T (ICRP, 1990).....	17
Tabela 3: Razpolovne debeline in desetdebeline za različne snovi in vire (IAEA, 1996).....	21
Tabela 4: Vrste merilnikov in njihove osnovne značilnosti.....	30
Tabela 5: Razvrstitev virov sevanj glede na tveganje (IAEA, 2003).....	36
Tabela 6: Tipične aktivnosti radioaktivnih izotopov za industrijsko radiografijo in pospeševalne napetosti rentgenskih cevi oziroma pospeševalnikov ter področja uporabnosti (IAEA, 1990).....	37
Tabela 7: Prejeta doza povprečnega prebivalca Slovenije zaradi radioaktivne kontaminacije okolja v l. 2004 (URSJV, 2005).....	66
Tabela 8: Γ faktorji za nekatere vire sevanj.....	91

POVZETEK

V knjižici so osnovne informacije in znanja za ustrezno izvajanje sevalnih dejavnosti in uporabo virov ionizirajočih sevanj. Namenjena je vsem morebitnim izvajalcem sevalnih dejavnosti in uporabnikom virov sevanj, predvsem tistim v industriji in raziskovalnih dejavnostih. Obravnava ionizirajoče sevanje in varno delo z njim. Zaradi krajšega zapisa je v delu namesto "ionizirajoče sevanje" v nadaljevanju največkrat uporabljen samo zapis "sevanje". Na osnovi obravnavanega bo bralec razumel osnovne zakonitosti sevanj, tako da bo pri morebitnem izvajanju sevalnih dejavnosti in uporabi virov sevanj smiselno in ustrezno upošteval zahteve veljavne zakonodaje.

Bralec bo spoznal, da viri sevanj niso samo v jedrski elektrarni in bolnišnicah, da so povsod okoli nas, da je največji vir sevanja, ki smo mu ljudje izpostavljeni, naše življenjsko okolje, to je zrak, ki ga vsak dan dihamo, in da imamo radioaktivne snovi tudi v svojih telesih. Poleg tega smo vsak dan izpostavljeni tudi sevanju iz vesolja ter zemlje. Večina sevanj je naravnega izvora, majhen del pa umetnega, ki je posledica jedrskih poskusov ter nesreč in izpustov. Sevanje koristno uporabljajo na številnih področjih: v papirni, kovinski, gradbeni in prehrabeni industriji, v bolnišnicah in pri raziskavah ... V knjižici je predstavljen delež obsevanosti iz posameznih umetnih in naravnih virov sevanj. Delo zajema fizikalne osnove sevanj, predstavljene so osnove bioloških učinkov sevanj, kratko je opisano prepoznavanje sevalnih poškodb prek njihovih kliničnih pokazateljev, vrste izpostavljenosti sevanju, ki lahko nastanejo zaradi nesreče, in od česa so odvisni biološki učinki. Obravnavana so navodila in zahteve za delo v okolju, kjer smo lahko izpostavljeni virom sevanj. V nadaljevanju obravnava količine, s katerimi se srečujemo v varstvu pred sevanji, omejitve izpostavljenosti sevanjem, zaščito pred sevanji, in osnovne značilnosti ter ustreznost uporabe tistih merilnikov sevanj, ki jih uporabljamo najbolj pogosto. Predstavljeni so uporaba posameznih virov v industriji, raziskavah, medicini in drugod ter nadzor nad viri sevanj, izvajanjem sevalnih dejavnosti in uporabo virov sevanj, kot ga trenutno izvajamo v državi. Dodan je še povzetek zahtev veljavne zakonodaje, ki jih mora izpolnjevati morebitni uporabnik od priglasitve namere o izvajanju sevalne dejavnosti do pridobitve ustreznih dovoljenj. V dodatkih so povzeti osnovni pojmi in količine. Podanih je tudi nekaj računskih primerov.

Avtorji smo prepričani, da vsebina knjižice ne bo samo pomoč pri delu, pač pa bo prispevala tudi k izboljšanju varnostne kulture pri izvajanju sevalnih dejavnosti in uporabi virov sevanj. Bolj ko se uporabniki zavedamo, kako pomembna je skrbnost pri ravnanju z viri sevanj, manjša je verjetnost za morebitni neljubi dogodek ali za veliko gospodarsko škodo.

UVOD

O radioaktivnosti in sevanju veliko govorimo predvsem v negativnem smislu, saj premalo vemo, da bi lahko dejstva, ki se nanašajo na radioaktivnost in sevanje v celoti, znali objektivno oceniti oziroma ovrednotiti. Večkrat slišimo govoriti, kako nevarna je jedrska elektrarna in kako nenehno ogroža naše zdravje zaradi sevanj, na odlaganje radioaktivnih odpadkov v našem kraju nočemo niti pomisliti, pa čeprav so logična posledica naših aktivnosti tako kot vsi drugi bolj ali manj nevarni odpadki. Slišimo tudi, da se sevanje omenja v pogovoru o bolnišnicah in zdravstvenih domovih, manj znana pa je uporaba sevanj na drugih področjih.

Viri sevanj so povsod okoli nas in večina jih je naravnega izvora. Naravni radioaktivni izotopi so v okolju od nastanka Zemlje. Nekateri so razpadli, nekateri pa še vedno razpadajo. Za vse radioaktivne izotope je značilno, da večji del energije sevanja odložijo v našem telesu takrat, ko jih vnesemo v telo z dihanjem, s pitno vodo ali hrano. Več kot polovico doze od naravnega sevanja dobimo zaradi **radona** (in radioaktivnih izotopov, ki iz njega nastanejo). Viri sevanj so tudi v našem telesu.

Poleg virov naravnega sevanja so v okolju tudi različni drugi viri, ki jih je ustvaril človek in jih imenujemo **umetni** ali **antropogeni viri** sevanj.

V nekaj več kot sto letih od izuma rentgenske cevi in odkritja pojava radioaktivnosti so znanstveniki, zdravniki in tehniki uporabili vire sevanj za različne namene. Čeprav so vire sevanj kljub uspešni uporabi ponekod nadomestili drugačni pristopi in metode, ostajajo ti v mnogih primerih nenadomestljivi in jih srečamo v medicini, industriji, energetiki in drugod. To sevanje predstavlja izjemno majhen, praktično zanemarljiv del sevanja, ki mu je prebivalstvo sicer izpostavljeno vsak dan.

Vsebina knjižice je namenjena predvsem izvajalcem sevalnih dejavnosti in uporabnikom virov sevanj v industriji, to je tistim, ki izvajajo dela na področju industrijske radiografije, uporabljajo vire sevanj v procesni tehniki in avtomatiki, analitskih metodah, nadzoru prtljage in pošiljk, geoloških raziskavah, koristila pa bo tudi uporabnikom na drugih področjih, npr. v medicini in raziskavah.

Delo zajema osnovno znanje in informacije, tako da bodo lahko vsi tisti, ki pri svojem delu lahko pridejo v stik z viri sevanj, te pravilno uporabljali, razumeli tveganja in pri njihovi uporabi upoštevali zahteve obstoječe veljavne zakonodaje.

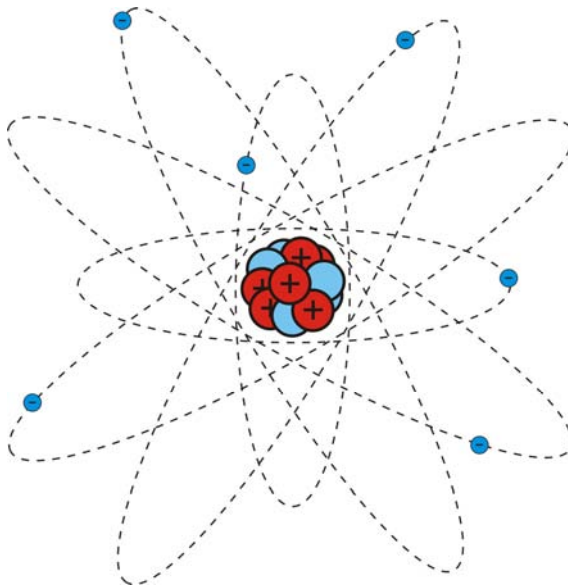
SEVANJE IN RADIOAKTIVNOST

Za razumevanje naslednjih vsebin poglavij, je treba poznati nekatere osnovne fizikalne in druge naravne zakonitosti sevanja.

Fizikalne osnove

Zgradba atoma

Atom je sestavljen iz jedra in elektronske ovojnice. Po ovojnici se gibljejo elektroni z različnimi energijami, ki jih razdelimo v skupine – elektronske lupine. Jedro sestavljajo protoni in nevtroni, najdemo pa ga v središču atoma. Predstavlja skoraj vso maso atoma, čeprav je prostornina jedra v primerjavi s prostornino celotnega atoma zelo majhna. Proton ima pozitiven naboj, nevtron je brez naboja, oba pa imata približno enaki masi. Elektron ima v primerjavi z nevtronom ali s protonom zelo majhno maso in negativen naboj, ki je po velikosti enak naboju protona. Atom je v normalnem stanju električno nevtralen, kar pomeni, da ima v jedru toliko protonov, kolikor ima v elektronski ovojnici elektronov. Elektroni v ovojnici določajo kemijske lastnosti atoma. kateremu elementu pripada atom, določa vrstno število Z , ki pove tudi število protonov v jedru. Skupno število protonov in nevtronov v jedru je masno število A ($A = Z + N$).



Slika 1: Zgradba atoma.

Izotopi so različice istega elementa, ki se razlikujejo po številu nevtronov v jedru. Izotopi kemičnega elementa imajo ob enakem številu protonov različno število nevtronov. Običajno pri zapisu vrstnega števila določenega izotopa kemijskega elementa ne navajamo. Izotop urana, ki ima vrstno število $Z = 92$ in število nevtronov $N = 143$, zapišemo ^{235}U ali U-235. Vsak element ima lahko več izotopov.

Sevanje

Sevanje je prenos energije v obliki toka delcev ali širjenja elektromagnetnih valov. Sevanje delimo na ionizirajoče in neionizirajoče, in sicer glede na učinke, ki ga ima sevanje na snov. Za ionizirajoča sevanja je značilno, da pri prehodu skozi snov iz atomov izbijajo elektrone, preostanek atoma pa imenujemo ion. Ionizirajoče sevanje tako po prehodu snovi za seboj pusti ionske pare: ione in elektrone.

Ionizirajoča sevanja so: sevanje radioaktivnih snovi (sevanje alfa, beta in gama), rentgensko sevanje, nevtronsko sevanje in kozmično sevanje ter delno ultravijolično sevanje. Med neionizirajoča sevanja pa spadajo: večina ultravijoličnega sevanja, vidna svetloba, toplotno sevanje (infrardeče sevanje), mikrovalovi in radijski valovi.

Ionizirajočih sevanj z našimi čutili ne moremo zaznati: ni nam vroče, ne zebe nas, ne vidimo jih ali jih ni mogoče otipati. Njihovo prisotnost lahko ugotovimo samo s pomočjo ustreznih merilnikov.

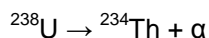


Slika 2: Spekter sevanj.

Sevanje radioaktivnih snovi in radioaktivnost

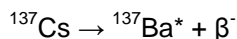
Radioaktivnost je pojav, ko nekatere snovi sevajo zaradi radioaktivnega razpada nestabilnih atomskih jeder elementov, iz katerih so zgrajene. Pri tem se nestabilno jedro spremeni v jedro drugega kemičnega elementa ali pa spremeni svojo notranjo energijo. Take nestabilne atome imenujemo radioaktivni izotopi ali radioizotopi. Pri prehodu v stabilnejše stanje jedra oddajajo energijo na tri načine, ki jih imenujemo razpad alfa (α), razpad beta (β) in razpad gama (γ). Pravimo, da ob tem nastanejo tri vrste sevanja: sevanje alfa, sevanje beta in sevanje gama.

Sevanje alfa je tok delcev α (helijevih jeder), ki jih izsevajo jedra pri razpadu α , npr.:



Z razpadom α razpadajo atomska jedra težkih elementov. Največji stabilen atom je bizmut z atomskim jedrom ^{209}Bi , ki ima 83 protonov (vrstno število) in 126 nevtronov. V naravi obstajajo tudi težji elementi – kot sta torij in uran -, vendar niso stabilni in razpadejo z razpadom α . Torij in uran najdemo v naravi, ker imajo nekateri njihovi izotopi zelo dolge razpolovne čase. Sevanje alfa ni prodorno. V zraku prodre nekaj centimetrov daleč, zaustavi ga že list papirja. Viri sevanj alfa zato ne predstavljajo resne nevarnosti, ko je vir sevanja zunaj telesa - kot zunanji vir sevanja. Nevarni pa so, če razpadajoča jedra prispejo v človekovo telo. Škoda, ki jo delec alfa povzroči celicam v telesu, je zelo velika.

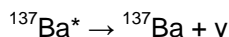
Sevanje beta je tok delcev β (elektronov β^- ali pozitronov β^+), ki nastanejo pri razpadu beta, npr.:



Sevanje beta je prodornejše kot sevanja alfa in prodre v zraku nekaj metrov daleč. Zaustavi ga nekaj mm debela plast aluminija ali stekla. Kot zunanji vir povzroča poškodbe na koži in očesni leči, globlje v telo pa sevanje beta ne prodre.

Večina izotopov po razpadu β še ni stabilnih. V stabilno stanje preidejo tako, da izsevajo foton γ . Oznaka "*" ob simbolu pomeni vzbujeno stanje jedra.

Sevanje gama je tok fotonov γ , ki nastanejo pri razpadu gama, npr.:



Sevanje gama je elektromagnetno valovanje zelo kratke valovne dolžine oziroma visokih energij in visokih frekvenc ter je od vseh vrst radioaktivnih sevanj najprodornejše. Prodornost je odvisna od njegove energije. V zraku lahko fotoni prepotujejo nekaj kilometrov. Pred sevanjem gama se zavarujemo z debelimi plastmi snovi, ki vsebujejo atome težkih elementov. Sevalci gama so nevarni kot zunanji in kot notranji viri sevanj.

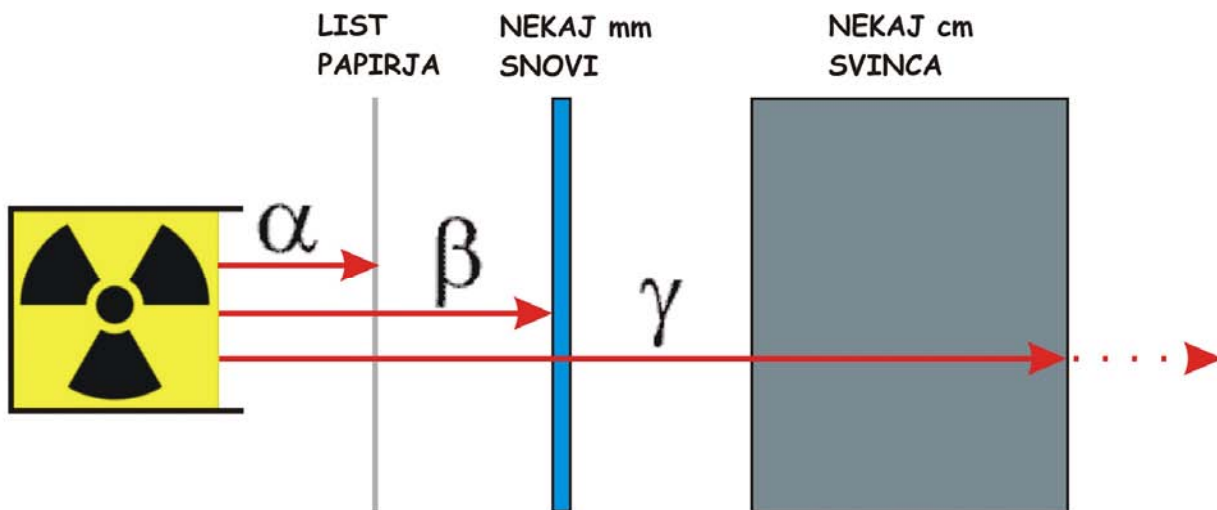
Pri radioaktivnem razpadu velikokrat nastanejo atomska jedra, ki so še vedno nestabilna. Takšna jedra razpadajo tako, da oddajajo sevanje α , β ali γ . Proces se ponavlja, dokler ne nastanejo stabilna jedra. Tak verižni razpad nestabilnih jeter tvori razpadno vrsto.

Druge vrste ionizirajočih sevanj

Nevtronsko sevanje je tok nevtronov (n). Pojavlja se pri jedrskih reakcijah, kot je cepitev v jedrskem reaktorju, ali ga oddajajo radioizotopi, ki se spontano cepijo, kot je element kalifornij ^{252}Cf . V industriji – merilniki gostote in vlage – najpogosteje uporabljamo vir nevtronov visokih energij, ki je zmes americija in berilija $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$. Nevtroni nimajo naboja, zato je nevtronsko sevanje zelo prodorno.

Rentgensko sevanje je elektromagnetno valovanje, ki nastane ob upočasnjevanju in spreminjanju smeri hitrih elektronov v polju atomskega jedra težke kovine in je podobno sevanju gama, le da ima nižjo energijo. Nastane tudi pri nekaterih prehodih elektronov iz vzbujenega v osnovno stanje.

Kozmično sevanje je naravno sevanje, ki prihaja iz vesolja. Sestavljajo ga težki nabiti delci, nevtroni in cela vrsta drugih delcev. Do zemeljskega površja pride le del, ki je predvsem posledica jedrskih reakcij v vrhnjih plasteh atmosfere.



Slika 3: Prodornost različnih vrst sevanj radioaktivnih snovi.

Energija ionizirajočih sevanj

Energija ionizirajočih sevanj je za delo z viri sevanj pomemben podatek, saj je z njo povezana njihova prodornost. Običajno energijo izražamo z enoto elektronvolt eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ VAs}$). Večkrat uporabljamo večji enoti kiloelektronvolt - keV in megaelektronvolt - MeV. Pri tem velja:

$$1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 1000 \text{ keV} = 1\,000\,000 \text{ eV}$$

Energija delcev alfa, ki jih oddaja ^{210}Po , je večja od 5 MeV. Delci beta, ki jih oddaja ^{137}Cs , imajo največjo energijo 1,17 MeV. Energija fotonov gama iz $^{137}\text{Ba}^*$, ki nastane iz ^{137}Cs , je 0,662 MeV.

Interakcija sevanja s snovjo

Pri prehodu skozi snov ionizirajoče sevanje izbija elektrone iz posameznih atomov, zato ti potem niso več električno nevtralni. Nastane ionski par: negativni elektron in pozitivni ostanek atoma (pozitivni ion ali kation). Ta pojav imenujemo **ionizacija**, sevanje pa **ionizirajoče sevanje**.

Nabiti delci alfa in delci beta pri prehodu skozi snov izbijajo elektrone iz posameznih atomov (tvorijo ionske pare) in izgubljajo energijo, vse dokler se ne ustavijo. Celotno razdaljo, ki jo delec v snovi prepotuje, imenujemo **doseg** delca.

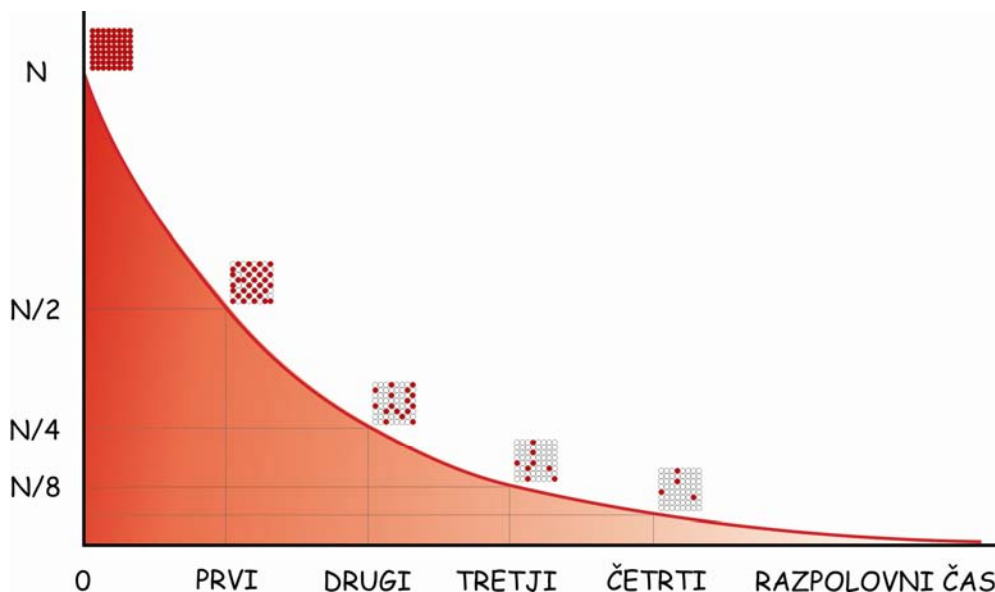
Sevanje gama sodeluje (interagira) z elektroni in jedri atomov. Pri interakciji foton preda del ali celotno svojo energijo elektronu (ali jedru), v snovi pa slej ko prej izgine. Ker lahko napovemo le verjetnost za interakcijo fotona s snovjo, dosega fotonov ne moremo določiti. Intenziteta curka fotonov pri prodiranju skozi snov eksponentno slabi, in to slabitev opišemo z razpolovno debelino snovi. Pri prehodu razpolovne debeline se število fotonov zmanjša na polovico začetne vrednosti, po dveh razpolovnih debelinah na četrtno itd. Razpolovna debelina je odvisna od vrste snovi, iz katere je absorber, in od energije sevanja gama.

Aktivnost

Aktivnost radioaktivne snovi predstavlja število razpadov nestabilnih jeter v eni sekundi. Ena pretvorba (razpad) na sekundo predstavlja aktivnost enega Becquerela – 1 Bq. En gram čistega radija ^{226}Ra ima, na primer, aktivnost kar 37 000 MBq. Ta mera je bila v preteklosti tudi osnova za staro enoto za aktivnost, tj. Curie (1 Ci), ki so jo uporabljali do leta 1980. Stara enota Curie je imenovana po zakoncih Curie in je merilo za aktivnost 1 g radija.

Razpolovni čas

Razpolovni čas ($t_{1/2}$) radioaktivnega izotopa je čas, v katerem se aktivnost zmanjša na polovico (razpade polovica radioaktivnih jeder). Različne radioaktivne snovi imajo različne razpolovne čase: od nekaj delčkov sekunde do več milijard let.



Slika 4: Radioaktivnost s časom upada.

Radioaktivni razpad je statističen pojav: radioaktivna jedra razpadajo naključno in neodvisno, ne pa enakomerno. Število radioaktivnih jeder se eksponentno zmanjšuje s časom. Aktivnost vira po preteku določenega časa t lahko glede na prvotno aktivnost vira A_0 izračunamo po enačbi:

$$A = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{t_{1/2}} t}$$

V praksi je za hitro izračunavanje oziroma ocenjevanje aktivnosti radioaktivnega vira primerno še razmerje

$$A = \frac{A_0}{2^n}$$

Pri čemer za n preprosto vstavimo število razpolovnih časov, ki so minili od začetne aktivnosti A_0 . Na primer, po preteku 7 razpolovnih časov se zmanjša za faktor $2^7 = 128$ kar je manj kot 1% in po 10 razpolovnih časih za faktor $2^{10} = 1024$ kar je manj kot 0,1% začetne aktivnosti.

Biološki učinki sevanja

Sevanje povzroča fizikalne, kemijske in biološke učinke.

Človeško telo je na učinke sevanja zelo občutljivo, posebno velja to za očne leče, spolne celice, celice pljuč, celice jeter in ščitnico. Pri prehodu sevanja skozi človeško telo pride do ionizacije atomov in molekul. Za lažje razumevanje bioloških učinkov sevanja je v nadaljevanju predstavljen vpliv ionizirajočega sevanja na osnovne sestavne dele živega organizma in prepoznavanje sevalnih poškodb prek njihovih kliničnih pokazateljev. Za razumevanje nastanka bioloških učinkov sevanja moramo poznati količine, ki povežejo sevanje – prenos energije iz vira sevanja z njegovimi posledicami v živem organizmu.

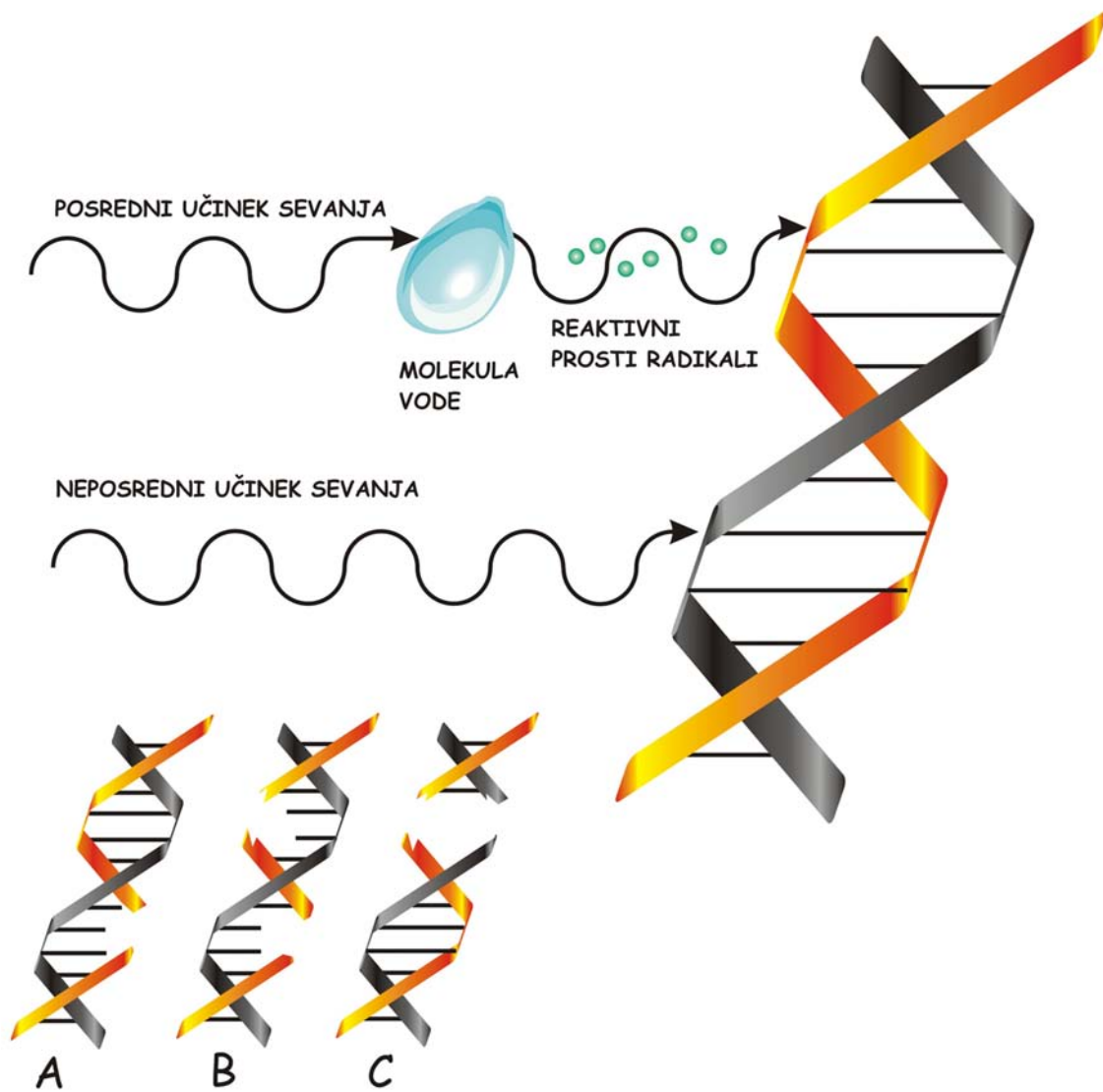
Celica

V človeškem telesu potekajo zapletene življenjske funkcije. Nosilci teh funkcij so organi in tkiva človeškega telesa. Najmanjša življenjska enota človeškega telesa je celica. Posamezne celice, ki opravljajo podobne funkcije, so združene v tkiva, ta pa v organe. Čeprav se posamezne vrste celic med seboj močno razlikujejo, je njihova osnovna zgradba podobna. Celica je sestavljena iz celičnega jedra, citoplazme in celične opne.

Organi človeškega telesa in tkiva rastejo, se ohranjajo in obnavljajo. Ti procesi so možni, ker se celice delijo. Procesu delitve celice pravimo mitotična in poteka v štirih glavnih fazah: profaza, metafaza, anafaza in telofaza. V metafazi se pojavijo kromosomi, ki so nosilci genov. Geni so sestavljeni iz zapletenih organskih makromolekul, dezoksiribonukleinskih kislin (DNK) in so nosilci dednih informacij. Človeška celica ima 23 kromosomskih parov in približno 30000 genov. DNK ima obliko dvojne vijačnice, sestavljene iz manjših gradnikov, ki jih imenujemo nukleotidi.

Neposredna in posredna izpostavljenost DNK sevanju

Celični material je ionizirajočemu sevanju lahko izpostavljen neposredno ali posredno. Pri prehodu ionizirajočega sevanja skozi snov, ki sestavlja celico, lahko pride neposredno do interakcij sevanja in molekule DNK. Sevanje lahko molekuli DNK pretrga katero izmed kemijskih vezi in jo s tem poškoduje. Posredno učinkovanje ionizirajočega sevanja na celico poteka prek učinkovanja prostih radikalov na celico. Ti nastanejo kot posledica ionizacije vode, ki predstavlja skoraj 85 % vsebine celice. Proces imenujemo radioliza vode. Prosti radikali so kemično zelo reaktivni in lahko agresivno delujejo na molekulo DNK ali na druge spojine v celici. Končne posledice so zelo podobne kot pri neposrednem vplivu sevanja na žive organizme.



Slika 5: DNK ter posledice posredne in neposredne izpostavljenosti molekule DNK sevanju (A: prelom na eni verigi DNK, B: prelom na obeh verigah DNK, vendar na različnih mestih, C: prelom na istem mestu obeh verig DNK).

Posledice izpostavljenosti celice sevanju

Posledica izpostavljenosti celice sevanju je manjše ali večje število poškodb DNK in drugih molekul. Če teh poškodb ni preveč in če niso prehude (npr. pretrgana molekula DNK), je zelo verjetno, da bo celica napake popravila. To je možno, ker je molekula DNK sestavljena kot dvojna vijačnica, kar pomeni, da so vse informacije podvojene. Če celica uspe vse napake popraviti, nadaljuje svoje življenje brez posebnih sprememb. Spodnjega praga, pri katerem je celica še sposobna vse napake popraviti, ne poznamo. Zato je postavljena hipoteza, da je lahko vsaka, tudi najmanjša prejeta doza sevanja škodljiva (Linear Non Threshold – LNT).

Če je popravilo delno ali nepopolno, lahko celica umre ali pa se napaka prenese na njene naslednice. V zadnjem primeru govorimo o mutacijah, ki imajo lahko različne posledice.

Učinki sevanja na živo snov in na človeka

Posledice prenosa energije ionizirajočega sevanja na obsevani material oziroma na živo snov so odvisne od energije in vrste sevanja. Upoštevati moramo energijo, ki jo sevanje nosi, oziroma ki jo ima tok delcev, in energijo, ki se absorbira v danem materialu. V primerih, ko gre za živo snov, je določanje posledic zaradi izpostavljenosti sevanju zelo zahtevno. Osnovna količina, s katero ovrednotimo učinek sevanja na snov, je prejeta energija, preračunana na enoto mase snovi. Količino imenujemo **absorbirana doza**. Absorbirana doza je osnovna dozimetrična količina. Če vrsto sevanja označimo z R in obsevano tkivo s T , absorbirano dozo označimo z $D_{T,R}$. Enota za absorbirano dozo je gray (1 Gy = 1 J/kg).

Da bi lahko učinke prenosa energije na živo snov povezali z absorbirano dozo, je bil za vsako vrsto sevanja uveden utežni faktor in vpeljana količina **ekvivalentna doza**, ki jo označimo H_T . Za določeno tkivo ali organ jo zapišemo kot vsoto produktov absorbiranih doz v tkivu ali organu in utežnih faktorjev za vse vrste sevanja. Utežni faktor, ki ga označimo w_R , je faktor brez dimenzij.

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

Vrednosti utežnih faktorjev sevanj w_R se gibljejo od 1 do 20. Ker je utežni faktor brez dimenzij, imata absorbirana in ekvivalentna doza enaki enoti J/kg. Absorbirano dozo izražamo v grayih (Gy) in ekvivalentno dozo v sievertih (Sv). Utežne faktorje sevanj w_R glede na njihovo vrsto navaja Tabela 1.

Tabela 1: Utežni faktorji sevanja, w_R (ICRP, 1990).

Vrste sevanj in energija	Utežni faktor w_R
gama (vse energije)	1
beta (vse energije), mioni	1
nevtroni:	
E < 10 keV	5
10 keV < E < 100 keV	10
100 keV < E < 2 MeV	20
2 MeV < E < 20 MeV	10
E > 20 MeV	5
protoni, razen odzivnih	5
alfa, težka jedra in cepitveni produkti	20

Učinki sevanj na človeka se pojavijo v različnih oblikah, z različnimi časovnimi zakasnitvami in so odvisni od:

- količine absorbirane energije sevanj,
- vrste sevanj,
- načina obsevanja:
 - ali je bilo obsevanje akutno (v kratkem časovnem intervalu) ali kronično (v daljšem časovnem intervalu),
 - ali je bilo obsevanje lokalno (obsevan določen organ ali tkivo) ali obsevano celo telo (celotelesna obsevanost).

Posledice se lahko pojavijo že na obsevani osebi ali šele na njenih potomcih.

Učinke, ki se pojavijo na obsevani osebi, imenujemo somatski učinki. Katera oblika somatskega učinka se bo pojavila, je odvisno od časovne porazdelitve sevanja (akutna obsevanost, kronična obsevanost) in prostorske porazdelitve sevanja (celotelesna obsevanost, obsevanost posameznih delov telesa). Značilne akutne somatske učinke, ki se pojavijo kmalu po obsevanju (zgodnji učinki), delimo na bolezni sevanja (slabost, bruhanje, izpadanje las, pordečitev kože – eritema, spremenjena krvna slika – kromosomske aberacije) in sindrome sevanja (živčni, krvni, prebavnega trakta, molekularni). Somatski učinki se lahko pojavijo tudi z večletno zakasnitvijo (pozni učinki) kot rakaste tvorbe. Če se posledice sevanja pojavijo na potomcih, govorimo o dednih učinkih. Ti so zakasnele posledice zaradi izpostavljenosti sevanjem in se kažejo v povečanem številu mutacij v prihodnjih generacijah. Verjetnost pojava mutacije zaradi sevanj se dopolnjuje z verjetnostjo za naravne, spontane mutacije.

Pri nekaterih učinkih so zaradi izpostavljenosti sevanjem okvare na posameznih celicah v tkivih lahko takšne, da začnejo celice odmirati. Če bo takšnih celic več, lahko pride do bolezenskih znakov v tkivu oziroma organu. To se zgodi, če je število poškodovanih celic večje od določenega najmanjšega deleža, ki je odvisen tudi od vrste tkiva oziroma organa. Obstaja **prag doze**, nad katerim bomo opazili učinke sevanja, pod njim pa ne. Takšne učinke imenujemo **deterministične**, ker lahko z gotovostjo trdimo, da se bodo pri določeni prejeti dozi pojavili, pri nižji pa ne. Primeri determinističnih učinkov so bolezni in sindromi sevanja.

Zaščita pred determinističnimi učinki je enostavna: izpostavljenost dozam, pri katerih opazimo učinke sevanj, je treba preprečiti.

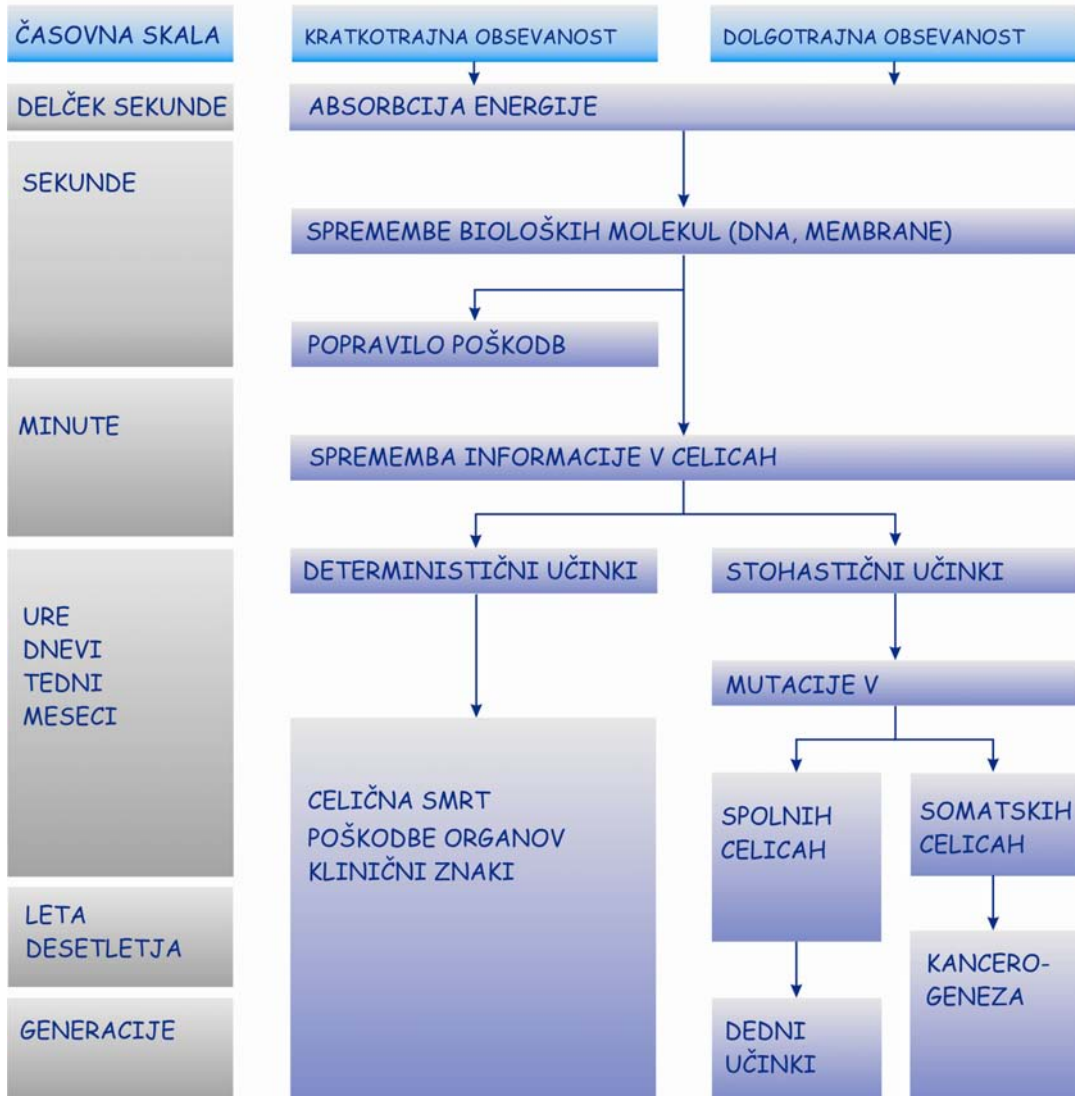
Nekaterih učinkov, ki so posledica sprememb na molekulah DNK, ne opazimo takoj. Učinek se lahko pojavi kasneje v istem tkivu, lahko pa se prenese na potomce (dedni učinki). Če se pojavi kasneje, se lahko začnejo nekontrolirano razmnoževati poškodovane celice (rak). Ne moremo z gotovostjo napovedati, kaj se bo zgodilo s poškodovanimi celicami, lahko samo rečemo, da je **verjetnost takšnih sprememb sorazmerna s prejeto dozo**. Ne moremo napovedati, pri katerih organizmih se bodo zgodile spremembe, pojav je **naključen**. Zato takšne spremembe imenujemo **naključne** ali s tujko **stohastične**.

Stohastične učinke bi opazili le, če bi primerjali dve dovolj veliki skupini ljudi, od katerih je ena bila obsevana, druga pa ne. Pogostost pojavljanja neke oblike raka bi bila v obsevani skupini višja kot v neobsevani. Pri stohastičnih učinkih je zaščita bistveno bolj zapletena kot pri determinističnih, saj se obsevanju ne moremo popolnoma izogniti (tudi zaradi naravnih virov sevanj), in tudi učinkov zaradi izpostavljenosti majhnim dozam sevanja natančno ne poznamo. Zato da ovrednotimo verjetnost za nastanek določene vrste stohastičnih učinkov in njihovih posledic pri neenakomernem obsevanju, je vpeljana količina **efektivna doza E** , ki predstavlja merilo tveganja zaradi stohastičnih učinkov. Izračunamo jo tako, da seštejemo ekvivalentne doze za posamezne organe in pri tem upoštevamo utežne faktorje za posamezne organe:

$$E = \sum_T \cdot w_T \cdot H_T,$$

pri čemer je H_T ekvivalentna doza v organu T , w_T pa utežni faktor za posamezni organ. Enota za efektivno dozo je enaka enoti za ekvivalentno dozo – sievert (Sv). Utežni faktorji so navedeni v Tabeli 2. Določeni so na osnovi spoznanj iz epidemioloških študij preživelih iz Hirošime, Nagasakija, Černobila in drugih radioloških nesreč.

BIOLOŠKI UČINKI



Slika 6: Biološki učinki.

Tabela 2: Tkivni utežni faktorji, w_T (ICRP, 1990).

Tkivo ali organ	Tkivni utežni faktor w_T
spolne žleze (gonade)	0,20
kostni mozeg (rdeči)	0,12
debelo črevo	0,12
pljuča	0,12
želodec	0,12
sečni mehur	0,05
prsa	0,05
jetra	0,05
požiralnik	0,05
ščitnica	0,05
koža	0,01
pokostnica	0,01
ostalo	0,05

Izpostavljenost sevanju in omejitve

Delavci in prebivalstvo so izpostavljeni virom sevanj v delovnem in bivalnem okolju. Država s predpisi določa ukrepe, da zagotovi varno delo z viri sevanj, da se prepreči oziroma zmanjša škoda za zdravje delavcev in prebivalstva ter da se prepreči oziroma zmanjša radioaktivna kontaminacija življenjskega okolja.

Uporaba virov sevanj mora biti **upravičena** glede na pričakovane rezultate. Poleg tega mora biti njena korist v primerjavi s škodo za zdravje ljudi, ki jo takšna dejavnost zaradi uporabe virov sevanj povzroči, večja. Prav tako virov sevanj ne smemo uporabiti, če je mogoče enake rezultate doseči z uporabo drugih, manj tveganih metod.

Vsaka dejavnost, pri kateri uporabljamo vire sevanj, naj bi povzročila izpostavljenost sevanjem le do ravni, ki je tako nizka, kot je to mogoče doseči z razumnimi ukrepi ob upoštevanju gospodarskih in družbenih dejavnikov. Pravimo, da pri izpostavljenosti sevanju uveljavljamo načelo **optimizacije**: vse prejete doze naj bodo čim nižje, tako nizke kot jih je smiselno možno doseči. Kriterij ni zakonsko predpisana mejna doza, izpostavljenost sevanju zmanjšujemo daleč pod zakonske omejitve. Optimizacija je dolžnost vseh izvajalcev sevalnih dejavnosti in uporabnikov virov sevanj.

Mejna vrednost, ki jo sme zaradi dodatne izpostavljenosti sevanju zaradi uporabe virov sevanj prejeti posameznik – prebivalec, je **1 mSv v enem letu**.

Pri tem so izvzeti naravno ozadje in morebitne medicinske preiskave ali zdravljenja posameznika z viri sevanj.

Mejne doze za poklicno izpostavljene morajo izvajalci sevalnih dejavnosti upoštevati pri vsaki dejavnosti. Uporabnik vira sevanja oziroma upravljalec jedrskega ali sevalnega objekta sta odgovorna, da se upoštevajo načela varstva pred sevanji in morata zagotoviti, da prejete doze zaradi izvajanja sevalne dejavnosti ali uporabe vira sevanja ne presežejo mejnih doz, ki so določene s predpisi. Dozne omejitve, ki jih moramo upoštevati pri **poklicni izpostavljenosti**, so:

- omejitev **efektivne doze 20 mSv na koledarsko leto**,
- omejitev **ekvivalentne doze 150 mSv za očesno lečo na leto**,
- omejitev **ekvivalentne doze 500 mSv za kožo na leto**; omejitev se nanaša na povprečno površino 1 cm² kože, in sicer ne glede na izpostavljeni del kože,
- omejitev **ekvivalentne doze 500 mSv na leto za roke, podlakti, noge in gležnje**.

Zaščita pred sevanjem

Za varno delo z viri sevanj ali v okolju, kjer so prisotni viri sevanj, moramo poleg namena uporabe poznati lastnosti virov sevanj in načine obsevanja, ki jih ti viri povzročajo. Na osnovi tako zbranih podatkov je treba izdelati strokovno oceno, iz katere je razvidno, katere ukrepe varstva pred sevanji je pri določeni sevalni dejavnosti in uporabi vira sevanja treba upoštevati in izvajati. S primernim načinom dela in uporabo primernih zaščitnih sredstev poskrbimo, da so doze razumno nizke in pod mejami, ki jih določa zakonodaja. Poleg tega močno zmanjšamo verjetnost za nastanek morebitnih dogodkov, pri katerih bi se lahko nenačrtovano obsevalo delavce ali celo prebivalstvo.

Zato je treba pri izvajanju sevalnih dejavnosti in uporabi virov sevanj zagotoviti, da se ne opušča predpisana ravnanja z viri sevanj. S tem zagotovimo, da se prepreči morebitna nepotrebna, neupravičena in prekomerna obsevanost delavcev in prebivalstva, nenadzorovana uporaba virov sevanj ali nepotrebna gospodarska škoda.

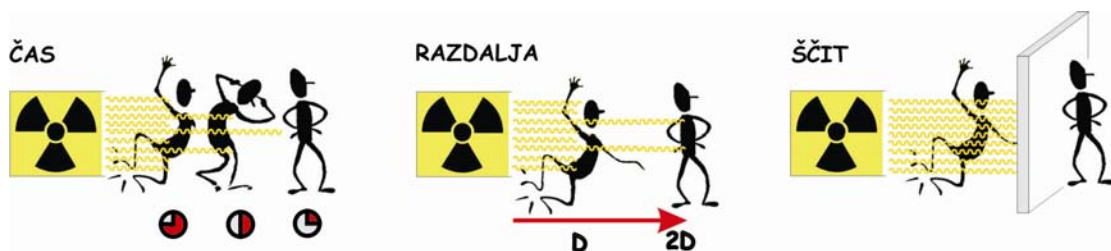
Pri izvajanju aktivnosti v zvezi z zaščito pred sevanjem ločimo dva možna načina izpostavljenosti: zunanja obsevanost in notranja obsevanost.

O **zunani obsevanosti** govorimo takrat, ko je vir sevanja zunaj telesa. Pri delu z viri sevanj je lahko obsevano celo telo delavca ali pa je obsevan samo posamezen del telesa.

Notranja obsevanost je posledica vnosa vira sevanja v organizem, ko sevanje neposredno zadeva občutljive celice posameznih kritičnih organov – to imenujemo interna kontaminacija. Posebno nevarna je interna kontaminacija s sevalci alfa in z nekaterimi sevalci beta. Načini, zaradi katerih se telo interno kontaminira, so lahko: zaužitje kontaminirane hrane, vdihavanje kontaminiranega zraka in vnos radioaktivne snovi skozi kožo ali odprte rane.

Zaščita pred prekomerno zunanjo obsevanostjo

Pri delu z viri sevanj, ki povzročajo zunanjo obsevanost, se izpostavljenosti sevanju običajno ne moremo popolnoma izogniti. Pri tem je pomembno, da izvajalec sevalne dejavnosti za določeno dejavnost izbere vir, ki omogoča doseganje ustreznih rezultatov ob čim manjši izpostavljenosti delavcev in prebivalstva. Pri delu lahko prejeta dozo učinkovito zmanjšamo s primernim načinom dela in uporabo ščitov. Zaščita pred zunanjo obsevanostjo sloni na treh tehničnih parametrih varstva pred sevanji: na omejitvi časa izpostavljenosti, na delu na čimvečji razdalji od vira in na uporabi ščitov, ki oslabijo sevanje.



Slika 7: Čas, razdalja in ščit – parametri zaščite pred sevanji

Čas: Delavec naj čim hitreje opravi svoje delo na območju sevanja. Da doseže čimkrajši čas dela ob viru sevanja, je včasih treba določeno delovno operacijo večkrat vaditi izven območja sevanja na modelu/maketi. Dvakrat, trikrat hitreje opravljeno delo pomeni dvakrat, trikrat manjšo prejeta dozo. Zato ustrezna priprava dela bistveno prispeva k omejevanju izpostavljenosti sevanju. Omejevanje časa izpostavljenosti se pri nekaterih delih doseže tudi z delitvijo dela med več delavcev.

Razdalja: Pri delu naj bo delavec čim bolj oddaljen od vira sevanja. Zato se pri delu uporabljajo posebna orodja in naprave, ki omogočajo delo z virom sevanja z večjih razdalj. Dvakrat večja razdalja pomeni štirikrat manjšo prejeta dozo. Postavljene pregrade na primernih oddaljenostih od virov sevanj pa preprečujejo dostop nepooblaščenim.

Ščit: Zelo dobro bi bilo med vir sevanja in delavca postaviti ščit, ki zmanjšuje snop sevanja, kateremu je delavec izpostavljen, npr: svinčene opeke, svinčene blazine (če je vir sevanja sevalec gama); borirano vodno ali parafinsko bariero (če je vir sevanja sevalec nevtronov) in plast akrilnega stekla ali kombinacije akrilnega stekla in svinca (če je vir sevanja sevalec beta).

Pri izbiri vrste in debeline ščita moramo upoštevati doseg delcev beta v snovi (ščitu) ter oceniti oslabitev sevanja gama oziroma rentgenskih žarkov. Varovanje pred zunanjim sevanjem alfa ni potrebno, ker je zaščita pred njim že zrak oziroma povrhnjica kože.

Sevanje gama sodeluje z elektroni atomov v snovi. Število fotonov pri prehodu skozi snov eksponencialno slabi, kar zapišemo s približno relacijo, ki velja na večjih razdaljah od vira sevanja in ko je debelina ščita veliko manjša od oddaljenosti od vira sevanja:

$$P = P_0 e^{-\frac{\ln 2}{d_{1/2}} d},$$

pri čemer je $d_{1/2}$ **razpolovna debelina** absorberja, ki oslabi začetno število fotonov po prehodu na polovico začetne vrednosti. Razpolovna debelina je odvisna od vrste snovi in energije žarkov gama. Atenuacija (oslabitev) rentgenskega sevanja poteka na podoben način kot atenuacija žarkov gama, le da je sevanje, ki pride iz rentgenske cevi, vedno sestavljeno iz fotonov različnih energij in je izračun bolj zapleten. Če je vir sevanja v ohišju, za steno ali ploščo iz neke snovi, bo hitrost doze praviloma manjša, kot bi bila brez takega **ščita**. Zaradi prisotnosti sipanega sevanja, ki nastane kot posledica odboja na ovirah in sekundarnega sevanja, ki je posledica interakcij primarnega sevanja z gradniki atoma, se moramo o ustreznosti predvidenih ščitov posvetovati z izvedencem za varstvo pred sevanji. Za praktične ocene uporabimo bolj preprosto zvezo, ki daje razmerje med hitrostjo doze na dani razdalji od vira sevanja pri uporabljenem ščitu in brez njega:

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{zašč.} = \left(\frac{dD}{dt}\right)_{nezašč.} \cdot \frac{1}{2^N},$$

pri čemer je N razmerje med debelino ščita d in njegovo razpolovno debelino $d_{1/2}$:

$$N = \frac{d}{d_{1/2}}.$$

Včasih pri izračunih ščitov uporabimo tudi **desetdebelino** $d_{1/10}$, to je debelino snovi, ki sevanje zmanjša za faktor deset. V tem primeru hitrost doze za ščitom izračunamo s pomočjo naslednje formule:

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{zašč.} = \left(\frac{dD}{dt}\right)_{nezašč.} \cdot \frac{1}{10^M},$$

pri čemer je M razmerje med debelino ščita in njegovo desetdebelino. Upoštevati moramo, da enačbe opisujejo samo oslabitev primarnega sevanja, ki prihaja neposredno iz vira sevanja. V ščitih prihaja poleg absorpcije primarnega snopa tudi do sipanja vpadlega sevanja in nastanka sekundarnega sevanja, zaradi katerega je hitrost doze za ščitom lahko tudi nekajkrat večja od izračunane s pomočjo navedenih enačb. Zato vnovič poudarjamo, da se je pri postavitvi ščitov treba posvetovati z izvedencem za varstvo pred sevanji.

Tabela 3: Razpolovne debeline in desetdebeline za različne snovi in vire (IAEA, 1996).

	svinec		železo		beton	
	$d_{1/2}$ [cm]	$d_{1/10}$ [cm]	$d_{1/2}$ [cm]	$d_{1/10}$ [cm]	$d_{1/2}$ [cm]	$d_{1/10}$ [cm]
^{99m}Tc	0,02	n. p.*	n. p.*	n. p.*	n. p.*	n. p.*
^{131}I	0,72	2,4	n. p.*	n. p.*	4,7	15,7
^{137}Cs	0,65	2,2	1,6	5,4	4,9	16,3
^{192}Ir	0,55	1,9	1,3	4,3	4,3	14
^{60}Co	1,1	4,0	2,0	6,7	6,3	20,3
100 kV _p X žarki	0,026	0,087	n. p.*	n. p.*	1,65	5,42
200 kV _p X žarki	0,043	0,142	n. p.*	n. p.*	2,59	8,55

n. p.*: ni podatka

Zaščita pred prekomerno notranjo obsevanostjo



Slika 8: Zaščitna obleka za delo v področju, kjer so zrak in površine močno kontaminirani.

Z ustrežno zaščito pred prekomerno notranjo obsevanostjo želimo preprečiti vnos radioaktivne snovi v telo. Nadzor nad radioaktivnimi snovmi, zaradi katerih lahko pride do interne kontaminacije, je možen samo, preden jih vnesemo v telo. Zato moramo preprečiti kontaminacijo kože in vnos v telo z vdihavanjem ali morda celo z zaužitjem. To dosežemo s primernim načinom dela in z zaščitno opremo, ki preprečuje ali omejuje kontaminacijo delovnega okolja, ter s hkratno uporabo osebnih zaščitnih sredstev (maska, rokavice). Pri delu na območjih, kjer so na površinah ali v zraku prisotne radioaktivne snovi ali zgolj obstaja možnost njihove prisotnosti (kontaminirana površina ali zrak), je prepovedano jesti, piti ali kaditi. Delavec se mora pred vstopom v takšna kontaminirana delovna področja ustrezno zaščititi, tako da uporablja posebna zaščitna oblačila, in če je treba, uporabiti tudi ustrezno opremo za zaščito dihal.

Tveganje pri uporabi virov sevanj

Pri uporabi virov sevanj se delavci, ki delajo z njimi, in posamezniki – prebivalci ne morejo izogniti dodatni obsevni izpostavljenosti. Prejeta doza, ki jo lahko prejmejo zaradi uporabe virov sevanj, je merilo za **sevalno tveganje** in je praviloma povezano z verjetnostjo za nastanek stohastičnih učinkov.

Pri oceni tveganja, ki je sestavni del **ocene varstva izpostavljenih delavcev** za izvajanje posamezne sevalne dejavnosti, se upoštevajo tudi doze, ki bi jih delavci (in prebivalci) lahko prejeli ob morebitnem nastanku izrednega dogodka. Pri izdelavi ocene je treba upoštevati tudi verjetnost za nastanek takega dogodka.

Tveganje, ki ga povezujemo z izvajanjem sevalne dejavnosti ali uporabo vira sevanja, je odvisno predvsem od vira sevanja (vrste, energije in količine sevanja, ki ga vir sevanja oddaja, ter od vrste uporabljenega vira – odprt ali

zaprt). Na stopnjo tveganja bistveno vpliva način uporabe vira in uporaba postopkov oziroma navodil, ki jih je treba upoštevati pri uporabi oziroma pri izvajanju sevalne dejavnosti.

Ukrepi pri delu z viri sevanj

Ukrepe, ki so namenjeni zaščititi pri delu z viri sevanj, razdelimo na administrativne ukrepe in na uporabo tehničnih varnostnih naprav. Zavedati se moramo, da so administrativni ukrepi neposrednemu uporabniku virov sevanj v večini primerov precej tuji. Z administrativnimi ukrepi so predpisana merila za varno delo z viri sevanj. Osnovni administrativni ukrep je nadzor, ki ga glede ravnanja z viri sevanj izvaja država: nadzor izvajanja sevalnih dejavnosti, uporabe virov sevanj in izvajanja ukrepov za zmanjševanje izpostavljenosti delavcev in prebivalcev. Administrativni ukrepi so zahteve za varstvo izpostavljenih delavcev oziroma prebivalcev in pomenijo izpolnjevanje zahtev temeljev varstva pred sevanji. Ukrepi zajemajo vse od izdelave ocene varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji, razdelitev območij na nadzorovana in opazovana, izdelavo delovnih postopkov, vodenje zahtevanih evidenc in pripravo načrta ukrepov za primer izrednega dogodka.

Za delo na območju virov sevanj je treba zagotoviti ustrezne tehnične varnostne naprave in o njihovem namenu ter uporabi seznaniti in usposobiti uporabnika vira sevanja. Pravilna namestitvev ščitov in pregrad ter uporaba zaščitne opreme zagotavljajo, da bo izpostavljenost sevanju tako nizka, kot je to razumno mogoče doseči.

Veljavna zakonodaja zahteva, da se morajo delodajalci o izdelavi ocene varstva pred sevanji, delovnih pogojih izpostavljenih delavcev, obsegu izvajanja ukrepov varstva pred sevanji na opazovanih in nadzorovanih območjih, preverjanju učinkovitosti teh ukrepov, rednem umerjanju merilne opreme in preverjanju uporabnosti zaščitne opreme posvetovati s pooblaščenimi izvedenci varstva pred sevanji.

Varnostna kultura

Varnostna kultura je pogoj za uspešno izvajanje ukrepov pri delu z viri sevanj. Varnostna kultura v splošnem označuje visoko zavzetost vseh posameznikov in organizacij, ki lahko vplivajo na sevalno varnost, spoštovanje odgovornosti in predpisanih postopkov, dobro usposobljenost in nenehno usposabljanje osebja ter kakovostno upravljanje in vodenje organizacije, katere dejavnost je izvajanje sevalne dejavnosti oziroma uporaba vira sevanja. Vsi delavci in vodstvo se morajo zavedati, da so vsa dela pomembna za varnost, da se vsak človek lahko zmoti ali kaj spregleda ter da je marsikatero delo možno opraviti še bolje, kot je bilo opravljeno.

Varnostna kultura seveda ni zagotovilo, da bo sevalna varnost absolutna, je pa nujen pogoj za učinkovito izvajanje zaščitnih ukrepov, za izboljševanje sevalne varnosti, zmanjšanje izpostavljenosti ter za zmanjšanje tveganja za nepredvidene in izredne dogodke.

Oprema prostorov

Delodajalec mora na robu nadzorovanega območja (ali opazovanega območja, če tako sledi iz zahtev ocene varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji), kjer se uporablja vire sevanj in na drugih primernih vidnih mestih namestiti oznake, ki opozarjajo na prisotnost virov sevanj, lastnosti vira na tem območju in tveganje, povezano s tem virom.



Slika 9: Uporaba tehničnih varnostnih naprav.

Prostor, v katerem izvajamo sevalno dejavnost oziroma v njem uporabljamo vir sevanja, mora biti zgrajen in opremljen tako, da zagotavlja optimalno zaščito vsakomur, ki je v bližini. Splošna načela glede opremljenosti prostora se ne razlikujejo bistveno glede na to, kateri vir bomo uporabljali. Velikost prostora mora biti izbrana primerno glede na velikost in lastnosti vira sevanja ali obsevalne naprave.

Pri nameščanju ščitov je treba natančno vedeti, kam bo usmerjen koristen del snopa sevanja. V tej smeri je namreč potrebno namestiti ustrezen primarni ščit, ki prepreči prehod sevanja iz za to namenjenega prostora prek sprejemljive ravni. Poleg primarnega ščita se lahko znatno zmanjša dostop sevanja na neželena področja tudi z uporabo ustreznih zaslonk. Kakšen primarni ščit potrebujemo in na kolikšni razdalji ga bomo namestili, določi izvedenec varstva pred sevanji na osnovi znanih podatkov o vrsti vira in energiji njegovega sevanja. Kolikšna mora biti debelina ščita, je odvisno od njegovih razpolovnih debelin ali desetdebelin. Pri opremitvi prostorov moramo biti pri uporabi nekaterih virov sevanj posebno pozorni tudi na prisotnost sipanega ali sekundarnega sevanja, ki ni zanemarljivo. Viri sipanega sevanja so lahko predmet, ki se preiskuje, ohišje rentgenske naprave ter tla ali stene prostora. Prostor je po posvetu z izvedencem iz varstva pred sevanji treba opremiti s ščiti tako, da se sipano in sekundarno sevanje ne širi navzven iz predvidenega prostora. Sipano in sekundarno sevanje ima praviloma nižje energije kot sevanje v primarnem snopu, vendar delež prispevka k hitrostim doz zaradi sipanega in sekundarnega sevanja ni zanemarljiv, zato so predlagane debeline ščitov za sipano in sekundarno sevanje približno polovica debeline primarnega ščita.

Pri uporabi naprav z viri sevanj v izven za to posebej namenjenim prostorom je treba zagotoviti naslednje zaščitne ukrepe: koristen snop sevanja moramo usmeriti praviloma proti tlom ali vstran, tja kjer ni ljudi. Smiselno uporabimo premične ščite in druga varovala, postavimo opozorilne oznake NEVARNOST SEVANJA in naprave za zvočno in svetlobno alarmiranje, ki opozarjajo na prisotnost sevanj. Tisti, ki izvajajo sevalno dejavnost, in ostali morebitni prisotni morajo biti kar najbolj oddaljeni od virov sevanj. V okolici virov sevanj, kjer tveganje ni zanemarljivo, je treba prepovedati in fizično preprečiti dostop osebam, ki z njimi ne delajo.

Zaščitne ukrepe je treba upoštevati tudi v bližini kontejnerjev in vsebnikov, v katerih vire sevanj shranjujemo ali jih prevažamo. Pri tem nam kot vodilo služijo oznake na vsebniku, ki imajo podatke o virih sevanj, ki so v vsebniku, in osnovno informacijo o možnih hitrostih doz v bližini vsebnika.

Vstopanje v prostore

Dostop na nadzorovano območje je omejen. Delodajalec mora z administrativnimi ukrepi (dovolilnice za delo), s fizičnimi ovirami, ključavnicami, z avtomatskimi zapahi in drugimi ustreznimi sredstvi zagotoviti, da se prepreči dostop nepooblaščenim. V prostore, v katerih se uporabljajo naprave z viri sevanj, npr. industrijska radiografija v zaprtem prostoru, vstopamo skozi zaščitna vrata ali labirinte. Vhodna vrata v prostor morajo biti izdelana in zavarovana tako, da preprečijo, da bi lahko kdor koli nevede in nenamerno vstopil v prostor, medtem ko bi v njem potekala sevalna dejavnost (uporaba zvočnih in svetlobnih signalov, zapiranje, varnostna stikala). Vrata morajo imeti mehanizem, ki pri poskusu vstopa prekine koristen snop sevanja. V prostore, ki so namenjeni izvajanju sevalne dejavnosti, smejo imeti dostop samo osebe, ki:

- so seznanjene s tveganjem, ki je povezano z delom,
- imajo ustrezno znanje o zaščitnih ukrepih varstva pred sevanji, ki jih je treba izvajati pri delu,
- so seznanjene s pisnimi navodili za delo,
- so na osnovi opravljenega zdravniškega pregleda sposobne opraviti dela in naloge, pri katerih so izpostavljene sevanju,
- so vključene v program osebne dozimetrije.

Izvajanje nadzornih meritev

Na območju, kjer se izvajajo sevalne dejavnosti ali uporabljajo viri sevanj, mora delodajalec oziroma od njega imenovana odgovorna oseba za varstvo pred sevanji redno preverjati ravni sevanj, morebitno kontaminacijo delovnega okolja in delovne razmere – opravljati mora nadzorne meritve. Preverjanje mora biti ustrezno in zadostno tako, da se ocenijo vse delovne razmere, ki se nanašajo na izpostavljenost sevanju na delovnih mestih. Preverjamo hitrost doze, kjer pa je potrebno, pa še naravo in vrsto sevanj, koncentracijo ter vrsto radioizotopov v zraku in fizikalno ter kemično sestavo radioaktivne snovi. Pogostost nadzora, način in vrsto izvajanja meritev in vrednotenje merskih rezultatov določi pooblaščen izvedenec iz varstva pred sevanji. Predpisan nadzor je opisan v oceni varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji.

Osebna varovalna oprema in nadzor osebne izpostavljenosti

V območju, kjer se izvajajo sevalne dejavnosti ali uporabljajo viri sevanj, mora delodajalec zagotoviti, da delavci uporabljajo primerno osebno varovalno opremo, ki po potrebi vključuje zaščitna oblačila, zaščitne predpasnike, rokavice, ščite za posamezne organe in opremo za zaščito dihal. Delavci

morajo imeti na voljo ustrezna navodila za pravilno uporabo osebne varovalne opreme in biti z njimi tudi seznanjeni.

Delodajalec mora zagotoviti redne meritve osebnih doz. Ocena doz mora vsebovati prispevek zaradi zunanjega in notranjega obsevanja. Uradne meritve zaradi zunanjega obsevanja se izvajajo s pasivnimi termoluminiscentnimi dozimetri (TLD), ki jih je treba imeti pripete na gornjem delu telesa v višini prsnice. Za osebni nadzor trenutne obsevanosti na delovišču, kjer je možna večja izpostavljenost, pa se dopolnilno uporabljajo osebni elektronski dozimetri, ki delavca z alarmom opozorijo na previsoke hitrosti doz in morebitno previsoko prejeto dozo pri opravljanju dela ter omogočajo takojšnje odčitavanje prejete doze. Prejeto dozo zaradi notranjega obsevanja določimo na osnovi meritev radioaktivne kontaminacije zraka in delovnih površin ali z meritvijo aktivnosti celega telesa.

Ukrepanje v primeru izrednega dogodka

Pri delu z viri sevanj so možni izredni dogodki, pri katerih se zmanjša sevalna varnost. Kako lahko pride do izrednega dogodka in kako ta vpliva na sevalno varnost, je odvisno od vrste vira sevanja, namena in načina uporabe ter okolja, kjer se vir sevanja uporablja. Zato je pred pridobitvijo dovoljenja za izvajanje sevalne varnosti med drugim treba ugotoviti možnosti za nastanek izrednih dogodkov in pripraviti načrt ukrepov za njihovo preprečevanje ter načrt ukrepov za odpravo posledic. Ta strokovna presoja je del Ocene varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji.

Izvajalec sevalne dejavnosti mora izdelati postopek za ukrepanje v primeru izrednega dogodka. S postopkom morajo biti seznanjeni vsi neposredni uporabniki vira sevanja. Delodajalec je dolžan delavce seznaniti tako z možnimi izrednimi dogodki in ukrepi za njihovo preprečevanje, kot tudi s postopki za odpravo posledic izrednih dogodkov, jih usposobiti za izvajanje ustreznih ukrepov in postopkov ter priskrbeti ustrezno zaščitno opremo. V primeru izrednega dogodka mora delodajalec zagotoviti čimprejšnjo oceno učinkovitosti in ekvivalentnih doz vseh oseb, ki so bile izpostavljene sevanju. Če je prišlo do izrednega dogodka ali če obstaja sum, da je prišlo do nenačrtovanega zunanjega obsevanja, se pasivni dozimetri zamenjajo takoj po dogodku, pooblaščen izvajalec dozimetrije pa nemudoma oceni dozo. Če obstaja sum, da je prišlo do nenačrtovane notranje kontaminacije, je treba oceniti dozo zaradi notranjega obsevanja. To naredimo na podlagi meritev celotne radioaktivnosti v telesu ali kritičnih organih izpostavljenega delavca in na podlagi meritev koncentracije radioizotopov v bioloških vzorcih. Če je prišlo do površinske kontaminacije oseb, je treba oceniti ekvivalentno dozo na kožo zaradi zunanjega obsevanja in morebitno dozo zaradi vnosa radioizotopov v telo skozi kožo, sluznico ali odprte rane.

Merjenje sevanja

Merjenje sevanja temelji na fizikalnih in kemičnih učinkih, ki jih povzroči sevanje pri prehodu skozi snov. Posledice prehoda ionizirajočega sevanja skozi snov so: nastanek prostih elektronov in ionov v snovi (ionizacija), nastanek vzbujenih atomov, segrevanje snovi, nastanek mikroskopskih poškodb snovi in jedrske reakcije v snovi. Posledica zaviranja nabitih delcev v snovi (predvsem β) je tudi nastanek zavornega sevanja.

Količine in enote

Osnovne količine, ki opisujejo sevanje in ki jih uporabljamo v varstvu pred sevanjem, razdelimo na:

- količine, ki opisujejo spremembe stanja radioaktivne snovi: aktivnost, razpolovni čas;
- količine, ki se nanašajo na interakcijo sevanja v snovi: energija ionizirajočega sevanja, povprečna ionizacijska energija, predana energija, absorbirana doza, kerma, obsevna doza (ekspozicija);
- izpeljane operativne količine, ki se uporabljajo izključno za namene varstva pred sevanji: ekvivalentna doza, efektivna doza.

Količine so opisane v Dodatku 1.

Merilniki sevanja

Merilniki nam dajejo podatke o sevanju. Ti so odvisni od načina meritve in uporabljenega detektorja. Merimo lahko pogostost sunkov na sekundo (cps) ali na minuto (cpm), hitrost doze ali prejeto dozo. Nekateri bolj izpopolnjeni merilniki nam dajo podatke o površinski kontaminaciji, energiji sevanja, spektru sevanja ali celo vrsti radioizotopa.

Osnovni deli merilnikov sevanja so:

- detektor sevanja, kjer pride do interakcije,
- vir napetosti,
- ojačevalnik,
- prikaz meritve, ki je lahko digitalni ali analogni.

Značilnosti uporabe posameznih vrst prenosnih merilnikov za nadzor delovnega okolja lahko v grobem razdelimo na tri kategorije:

- merjenje hitrosti doz gama in rentgenskih žarkov (npr. na ohišju vsebnika z virom),
- iskanje in določitev površinske kontaminacije alfa ali beta,
- iskanje izgubljenih virov (primer izrednega dogodka).



Slika 10: Primeri uporabe merilnikov sevanja.

V Tabeli 4 so navedeni najprimernejši merilniki za posamezna področja uporabe in njihove značilnosti.

Tabela 4: Vrste merilnikov in njihove osnovne značilnosti.

Področje uporabe	Detektor	Značilnosti
Merjenje hitrosti doz gama in rentgenskih žarkov	Nal scintilator	<ul style="list-style-type: none"> · najbolj občutljiv detektor, · primeren za merjenje prisotnosti virov nizkih aktivnosti, · slabo odporen na poškodbe, · pri nizkih energijah so izmerjene vrednosti višje od dejanskih.
	plastični scintilator	<ul style="list-style-type: none"> · mehansko bolj odporen kot Nal scintilator, · manj občutljiv kot Nal scintilator, · ni poudarjene energijske odvisnosti odziva pri nizkih energijah.
	cilindrična Geiger Müller (GM) cev (energijsko kompenzirane GM cevi)	<ul style="list-style-type: none"> · občutljivost je bistveno nižja kot pri scintilatorjih, · pri nizkih energijah so izmerjene vrednosti višje od dejanskih (ne velja za energijsko kompenzirane cevi!), · mehansko zelo odporen · cenovno ugoden.
	ionizacijska celica	<ul style="list-style-type: none"> · odziv neodvisen od energije, · mehansko občutljiva, · nekatere izvedbe so občutljive na vlago, · primerna tudi za močnejša polja sevanja (za vire sevanj večjih aktivnosti).
	cilindrična GM cev	<ul style="list-style-type: none"> · mehansko zelo odporna, · preobčutljiva za nizke energije (ne velja za energijsko kompenzirane GM cevi), · starejši merilniki lahko v zelo močnem polju odpovejo.
Iskanje in določitev alfa kontaminacije	alfa scintilator (ZnS)	<ul style="list-style-type: none"> · občutljiv detektor, · velika površina, · neobčutljiv na ostale vrste sevanj · enostaven za uporabo, · pri uporabi je treba paziti, da se zaščitna folija ne poškoduje.

Področje uporabe	Detektor	Značilnosti
Iskanje in določitev alfa kontaminacije	proporcionalni števec s pretokom ali občasnim dopolnjevanjem plina	<ul style="list-style-type: none"> · občutljiv detektor, · meri tudi sevanje beta (možna je izbira načina delovanja), · velika površina, · zamudna priprava.
	zaprti proporcionalni števec	<ul style="list-style-type: none"> · manj občutljiv detektor, · meri tudi sevanje beta (možna je izbira načina delovanja), · majhna površina.
Iskanje in določitev beta kontaminacije	GM cev z okencem (stransko okence ali ponvičasta GM cev)	<ul style="list-style-type: none"> · trpežen, enostaven za uporabo, · majhna površina, · ne loči sevanja alfa in sevanja beta, · ni primeren za meritve močno kontaminiranih površin, · je poceni.
	proporcionalni števec s pretokom ali občasnim dopolnjevanjem plina	<ul style="list-style-type: none"> · zelo občutljiv detektor, · velika površina, · meri tudi sevanje alfa (možna je izbira načina dela), · posebej je primeren za merjenje žarkov beta nizkih energij.
	zaprti proporcionalni števec	<ul style="list-style-type: none"> · enostavna uporaba, · meri tudi sevanje alfa (možna je izbira načina dela), · majhna površina, · občutljivost je podobna GM cevi, vendar je primeren tudi za bolj kontaminirane površine.
	beta scintilator (organski ali Csl – za nizke energije)	<ul style="list-style-type: none"> · občutljiv detektor za detekcijo sevalcev beta nizkih energij, · možno je pregledovanje tudi večjih površin.
Iskanje izgubljenih virov sevanj	plastični scintilator	<ul style="list-style-type: none"> · značilnosti, podobne kot pri beta scintilatorju, · za iskanje virov so primerni merilniki z ločenimi detektorji, ki jih pritrdimo na poseben nosilec ali obesimo na vrvico in tako učinkoviteje pregledujemo tla, prostore ali predmete.
	NaI scintilator	

Osnovna navodila za delo z merilniki

Osnovno navodilo za vsakega uporabnika merilnika sevanja je: **“SPOZNAJ SVOJ MERILNIK!”** Še pred uporabo merilnika je treba poznati podatke o **namenu, osnovnih značilnostih in omejitvah uporabe merilnika**. Razumeti moramo namen in funkcijo posameznih **stikal** in **oznak na zaslonu**. Starejši merilniki imajo analogni prikaz – kazalnik – in več skal, na katerih so označene merske vrednosti in enote. Novejši merilniki imajo številčni prikaz, enote pa so označene posebej. Kaj merilnik kaže oziroma katero skalo (enote) uporabljamo, je odvisno od merilnika oziroma načina delovanja merilnika. Pri odčitavanju meritev moramo upoštevati nekaj navodil.

- Samo nekateri merilniki, in sicer tisti, ki merijo sevanje gama, lahko pokažejo dejansko hitrost doze (običajno je navedena kar v enotah $\mu\text{Sv/h}$ ali mSv/h). Hitrost doze sevanja gama lahko merimo z GM cevjo, z ionizacijsko celico, s proporcionalnim detektorjem in scintilacijskim detektorjem.
- Merilniki, ki kažejo hitrost doze, so umerjeni tako, da kažejo pravo vrednost samo v polju sevanja gama. Če je prisotno sevanje beta (ali alfa) in če merilnik ali način meritve nista primerno prirejena, je prikazana vrednost hitrosti doze napačna. Običajno sevanje beta izločimo z dodatnim ščitom, ki je vgrajen v merilnik. Za žarke alfa je dovolj, če merilnik odmaknemo nekaj centimetrov od vira. Ščit lahko (namenoma) umaknemo in merimo sevanje gama in beta, vendar ne smemo uporabljati nastavitve za hitrost doze ($\mu\text{Sv/h}$, mSv/h), pač pa nastavitvev za hitrost sunkov (cps).
- Skoraj vsi merilniki sevanj, razen ionizacijske celice, kažejo pogostost sunkov kot število sunkov na sekundo (cps) ali na minuto (cpm). Ta način meritve je osnovni način meritve pri vseh merilnikih, ki merijo površinsko kontaminacijo. Kaj to število pomeni in kako ovrednotimo rezultat, je odvisno od merilnika in detektorja. Merilnik ima praviloma priloženo ali vgrajeno v programsko opremo tabelo, ki za točno določene vire in način meritve prevede pogostost sunkov (cps) v hitrost doze ($\mu\text{Sv/h}$, mSv/h) oziroma pri merilnikih kontaminacije v površinsko kontaminacijo (običajno v $\text{Bq}/100\text{ cm}^2$). Takšne pretvorbe so možne, vendar so izmerjene vrednosti prave samo takrat, ko poznamo vir (npr., ko v laboratoriju uporabljamo samo eno vrsto radioizotopa). Če vira oziroma njegovih značilnosti ne poznamo, je ustrezno merilo za prisotnost sevanja lahko samo prikaz pogostosti sunkov.
- Nobeden izmed merilnikov ne kaže aktivnosti vira. V določenih pogojih je možno iz meritve in dodatnih podatkov (razdalja med virom in merilnikom, značilnosti vira, podatkov o možnem absorberju med virom in merilnikom) manj ali bolj grobo oceniti aktivnost.

Kaj moramo še vedeti pri uporabi merilnikov?

Merilniki sevanja so občutljive naprave, zato je z njimi treba pri prevozu in uporabi ravnati pazljivo. Pred uporabo merilnika je treba preveriti: ali je umeritev merilnika še veljavna, stanje baterij, delovanje merilnika.

Delovanje merilnika je najbolje preveriti v znanem okolju oziroma na mestu, kjer smo prepričani, da ni drugih virov sevanj razen naravnih. Merilnik **mora pokazati vrednost ozadja**, ki je posledica prisotnosti naravnih virov sevanj v našem okolju (če imamo merilnik, ki meri hitrosti doz, naj bi pokazal vrednosti od približno $0,05 \mu\text{Sv/h}$ do $0,10 \mu\text{Sv/h}$; če pa imamo merilnik, ki kaže pogostost štetja, je vrednost ozadja različna od merilnika do merilnika). Najbolje je, da hitrost doze ocenimo v okolju, kjer smo prepričani, da ni drugih virov razen naravnih. Proizvajalec običajno zapiše orientacijske vrednosti ozadja v navodilih. Merilnik je smiselno vklopiti izven območja, kjer želimo meriti sevanje, in se območju (ali domnevno kontaminirani površini) približati s prižganim merilnikom. Tako bomo hkrati preverili delovanje merilnika in se, v določenih primerih, zavarovali pred morebitno izpostavljenostjo sevanju. Pri meritvah ozadja oziroma nizkih vrednostih hitrosti doz ali kontaminacij se bodo zaradi statističnega značaja radioaktivnega razpada številke na prikazovalniku merilnika ali kazalec merilnika med meritvijo močno spreminjali. Prisotnost kontaminacije na površinah, ki jih pregledujemo, pomeni tudi, da lahko merilnik kontaminiramo. Zato je v okoljih, kjer je možna kontaminacija, smiselno prek merilnika dati prosojno polietilensko vrečko. Tega seveda ne smemo narediti takrat, ko z merilniki merimo sevanje alfa ali beta nizkih energij.

Osebna dozimetrija

Za določanje izpostavljenosti posameznega delavca zunanjemu sevanju se uporabljajo detektorji sevanja, ki jih ima delavec pri sebi ves čas med opravljanjem dela na območju vira sevanja. V uporabi so predvsem termoluminiscentni detektorji (TLD), s katerimi se določijo prejete doze posameznega delavca. Za izvajanje posameznih nalog ali za dnevni operativni nadzor prejetih doz se v zadnjih letih uporabljajo elektronski (dnevni) dozimetri, ki so dejansko majhni prenosni elektronski merilniki sevanja. TLD je majhna "tabletko" iz kristalov, kot npr. $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ ali LiF , ki absorbirajo del energije sevanja. Po obsevanju se elektroni znotraj kristala preselijo v valenčni pas z višjo energijo. Ujete elektrone sprostimo tako, da kristal segrejemo. Ko se vrnejo v prvotni valenčni pas (z nižjo energijo), odvečno energijo oddajo v obliki vidne svetlobe. Količina oddane vidne svetlobe je sorazmerna energiji, ki se je absorbirala v kristalu. Segrevanje in meritve oddane svetlobe se opravita v posebnih čitalnikih, ki rezultate meritve preračunajo v prejeta dozo.

UPORABA VIROV SEVANJ

Uporaba virov sevanj je zelo raznolika. Če za uporabo virov sevanj v medicini lahko trdimo, da jo pozna večina ljudi, poteka uporaba virov v industriji in raziskovalni dejavnosti nekoliko manj opazno. Če izvzamemo jedrsko energetiko, o kateri se občasno kaj sliši, je uporaba virov sevanj v industriji, raziskovalni dejavnosti in drugod deležna relativno malo pozornosti in zanimanja.

Moderna industrija uporablja vire sevanj, ker se izkažejo kot najbolj uporabni, učinkoviti in zanesljivi v določenih postopkih, na številnih mestih pa predvsem zato, ker posredujejo informacije, ki jih drugače sploh ni mogoče dobiti. V industriji se večinoma uporabljajo različni zaprti viri, pri katerih praviloma ne more priti do kontaminacije. Za posebne namene in občasno se uporabljajo tudi radioaktivni izotopi v takšnih oblikah, ki jih prištevamo med odprte vire sevanj.

Raziskovalna dejavnost uporablja vire sevanj predvsem za določanje zgradbe in lastnosti posameznih materialov. Podobno kot v medicini, se radioaktivni izotopi uporabljajo tudi za označevanje in sledenje posameznih spojin in snovi v kemijskih in bioloških procesih.

Posebnost nekaterih virov, ki se uporabljajo v raziskovalne namene (kot so raziskovalni jedrski reaktorji, različni pospeševalniki), je, da niso ozko specializirani in na njih poteka več različnih dejavnosti, hkrati pa se uvajajo nove in spreminjajo stare. Dodatna značilnost je tudi to, da so to močni viri, ki proizvajajo ionizirajoča sevanja velike prodornosti in zahtevajo posebne zaščitne ukrepe.

Dejansko je uporabo virov sevanj težko strogo ločiti na industrijo, raziskovalno dejavnost in medicino, kajti metode in pristopi, ki se uporabljajo, so dostikrat podobni in med seboj povezani. Tako proizvodnja radioaktivnih izotopov za medicinske in nekatere raziskovalne namene poteka na reaktorjih, ki se hkrati uporabljajo za raziskovalne namene. Po drugi strani pa se enake naprave lahko uporabijo za industrijsko delo (npr. kontrolo kvalitete) ali za raziskovalno delo v raziskovalni ustanovi.

Pomembno je, da se zavedamo, da tveganje pri delu z različnimi viri sevanj ni enako. Zato je Mednarodna agencija za atomsko energijo v dokumentu IAEA TECDOC 1344 radioaktivne vire razdelila na pet skupin/kategorij. V prve tri skupine so uvrščeni viri sevanj, ki lahko ob neustreznem ravnanju povzročijo trajne poškodbe na človeku ali celo smrt. Takih virov sevanj v Sloveniji ni veliko. Razvrstitev virov, ki jo prikazuje Tabela 4, je bila opravljena glede na verjetnost potencialne obsevanosti, glede na vrsto vira in glede na njegovo aktivnost.

Tabela 5: Razvrstitev virov sevanj glede na tveganje (IAEA, 2003).

K [*]	Viri sevanj	Tveganje
1	<ul style="list-style-type: none"> – termo-električni generatorji – obsevalne naprave – teleterapija – nož gama 	izjemno nevarni viri sevanj (zelo visoko tveganje)
2	<ul style="list-style-type: none"> – industrijska gama radiografija – brahiterapija z visokimi in s srednjimi hitrostmi doz 	zelo nevarni viri sevanj (visoko tveganje)
3	<ul style="list-style-type: none"> – viri sevanj v procesni tehniki in avtomatiki: <ul style="list-style-type: none"> · merilniki nivojev, gostote in debeline, · merilniki na plavajočih bagrih, · merilniki masnih pretokov, ki vsebujejo vire sevanj velike aktivnosti, · merilniki za vrtno opremo; – karotaža vrtin z viri sevanj 	nevarni viri sevanj (zmerno tveganje)
4	<ul style="list-style-type: none"> – brahiterapija z nizkimi hitrostmi doz (razen očesnih aplikatorjev in trajnih vsadkov) – merilniki debeline (sevalci beta) in nivoja (americij, gama) – prenosni merilniki z viri sevanj za merjenje gostote in vlage – merilniki kostne gostote – statični eliminatorji 	manj nevarni viri sevanj (majhno tveganje)
5	<ul style="list-style-type: none"> – brahiterapija z nizkimi hitrostmi doz, vključno z očesnimi aplikatorji in trajnimi vsadki – viri sevanja za rentgensko fluorescenco (XRF) – detektor na zajetje elektronov (ECD) – viri sevanj za Mössbauerjevo spektrometrijo – preverjanje naprav za pozitronsko emisijsko tomografijo (PET) 	viri sevanj so nad mejo izvzetja (zelo majhno tveganje)

K^{*}: kategorija

V tem poglavju so predstavljeni primeri uporabe virov sevanj v industriji, delno medicini in raziskovalnih dejavnostih ter izobraževanju. Predstavljen je osnovni način delovanja, kateri viri sevanj se za določeno dejavnost uporabljajo, ukrepi varstva pred sevanji, ki jih je nujno treba izvajati pri delu s temi viri sevanj, in morebitna tveganja pri njihovi uporabi.

V Sloveniji je v uporabi skoraj 900 rentgenskih aparatov, od tega več kot 700 v medicini, skoraj 700 zaprtih virov sevanj, od tega nekaj deset v medicini, ostale uporabljajo v industriji in raziskavah. Nekaterih izmed navedenih virov sevanj v Sloveniji ne uporabljamo in jih nismo uporabljali niti v preteklosti, zaradi preglednosti in popolne informacije pa so v nadaljevanju kratko predstavljeni tudi nekateri taki viri sevanj.

Radiografija

Industrijska radiografija

Industrijska radiografija je ena izmed neporušnih metod za odkrivanje napak v materialih ali izdelkih (npr. odlitkih) in zvarih ali spojih pri sestavljenih elementih ali konstrukcijah. Temelji na opazovanju preseвне slike opazovanega predmeta, ki jo ustvarimo s pomočjo snopa rentgenskih žarkov ali žarkov gama. Slika se zabeleži na filmu, ki ga pregledamo in shranimo kot del dokumentacije o opravljeni preiskavi.

Kot radiografske vire sevanj uporabljamo močne rentgenske cevi s pospeševalnimi napetostmi do 400 kV_p ali defektoskope. To so posebni vsebniki, v katerih so za potrebe preiskav nameščeni radioaktivni izotopi: kobalt ⁶⁰Co, iridij ¹⁹²Ir, tulij ¹⁷⁰Tm, iterbij ¹⁶⁹Yb ali selen ⁷⁵Se. Izbira vira sevanja je odvisna od vrste preiskave in debeline materiala, ki ga želimo preiskati. V Tabeli 6 so prikazane tipične aktivnosti radioaktivnih izotopov in pospeševalne napetosti rentgenskih cevi ter področja njihove uporabnosti.

Tabela 6: Tipične aktivnosti radioaktivnih izotopov za industrijsko radiografijo in pospeševalne napetosti rentgenskih cevi oziroma pospeševalnikov ter področja uporabnosti (IAEA, 1990).

Viri rentgenskih žarkov	do 8 MV	140-400 kV _p	60-140 kV _p	60-140 kV _p	
Vir sevanja	⁶⁰ Co	¹⁹² Ir	¹⁷⁰ Tm	¹⁶⁹ Yb	⁷⁵ Se
Tipična aktivnost	100 GBq	1 GBq-1TBq	1 TBq	0,1 TBq	n.p.
Maksimalna aktivnost	100 TBq	10 TBq	10 TBq	0,4 TBq	
Preiskovani material	Optimalne debeline za pregled				
- jeklo	50-150 mm	10-60 mm	2,5-12,5 mm	15 mm	n.p.
- lahke zlitine	150-450 mm	40-190 mm	7,5-37 mm	45 mm	

Obe vrsti virov za industrijsko radiografijo (rentgenski aparati in radioaktivni izotopi) imajo svoje prednosti in slabosti. V Sloveniji uporabljajo obe vrsti in sicer je bilo konec leta 2005 registriranih 25 radioaktivnih izotopov, ki so visoko aktivni viri sevanj in so uvrščeni v drugo skupino kot zelo nevarni. Radiografske postopke ponekod izvajajo znotraj stalnega tehnološkega procesa na stacionarnih napravah znotraj proizvodnega obrata, največkrat pa se postopki izvajajo na terenu. Pri izvedbi postopka morata sodelovati vsaj dve osebi (operater naprave in njegov pomočnik), ki morata nositi osebni pasivni dozimeter in elektronski dozimeter, ki z zvočnim alarmom opozarja na prekoračitev operativne mejne hitrosti doz.

Uporaba rentgenskega aparata

Prednost uporabe rentgenskega aparata je, da ga po uporabi lahko izklopimo, s čimer prekinemo tudi vsa sevanja. Lahko spreminjamo pospeševalno napetost in tok ter s tem prodornost in količino rentgenskih žarkov. So pa običajno veliki in nerodni za prenašanje ter zahtevajo močan in zanesljiv vir napajanja. Idealni so za nadzor kakovosti med serijsko proizvodnjo (npr. kontrola odlitkov ali avtomobilskih pnevmatik), kjer so nameščeni v posebnih prostorih. Prostorji so izdelani tako, da je operater izven tega prostora. Stalna postavitve omogoča učinkovito ščitenje. Ker pa je treba zaradi transporta vzorcev prostor pogosto odpirati, morajo biti na vseh dostopnih mestih nameščene tehnične varnostne naprave – varnostna stikala in alarmne naprave. Pri uporabi rentgenske naprave je treba zagotoviti, da po uporabi ni več koristnega snopa sevanja. Tveganje v primeru uporabe stacionarno (stalno) nameščenih rentgenskih radiografskih naprav je zmerno. Po prenehanju uporabe je treba strokovno uničiti rentgensko cev.

Uporaba defektoskopa

Prednost uporabe defektoskopa je, da je bistveno lažji in ne zahteva vira napajanja, zato je enostavneje opraviti preiskavo na terenu, npr. na nekem cevovodu, kovinski konstrukciji ali rezervoarju. Slabost je, da ga po uporabi ni mogoče izklopiti in je zato treba izvajati vse ukrepe varstva pred sevanji tudi takrat, ko ni v uporabi. Po uporabi moramo z merilnikom hitrosti doz preveriti, ali je vir dejansko v zaščitenem položaju v zaščitnem vsebniku.

Zaščitni vsebniki se smejo uporabljati samo za hranjenje in prevoz virov do tistih aktivnosti virov sevanj, ki jih je določil proizvajalec oziroma pooblaščen izvedenec iz varstva pred sevanji. Ustrezati morajo mednarodnim zahtevam za transport. Defektoskop je treba redno vzdrževati in vsaj enkrat na leto opraviti test puščanja vira na dostopnih površinah zaščitnega vsebnika oziroma vodilih za vir ter upoštevati navodila proizvajalca opreme za zgodnje odkrivanje možnih napak.



Slika 11: Industrijska radiografija: rentgenski aparat in defektoskop; uporaba.

Tveganje pri delu z radioaktivnimi viri dodatno povečuje transport virov (vedno je prisotna verjetnost za nastanek prometne nesreče), relativna majhnost opreme in prenosljivost zaščitnega vsebnika (obstaja verjetnost kraje) ter majhnost vira (vir lahko ukradejo, se lahko izgubi, morebitni najditelj izgubljenega vira pa je lahko izpostavljen sevanju, ne da bi za to sploh vedel). Radiografski vir je dovoljeno hraniti le v posebej določenih in zavarovanih prostorih. Problem so tudi izrabljeni viri, ki jih je treba vrniti proizvajalcu. V primeru, da jih ne moremo vrniti, postanejo radioaktivni odpadki, ki ga je treba oddati javni službi za ravnanje z radioaktivnimi odpadki.

Če radiografske postopke izvajamo izven stalnega tehnološkega procesa, uporabljamo prenosne radiografske naprave. Postopek opravimo neposredno

na gradbišču ali v proizvodnem delu industrijskega obrata. V takšnem primeru je treba zaščito oceniti in izvesti za vsak primer posebej. Vnaprej je treba določiti in označiti meje ograjenega območja. Ostale delavce, ki bi lahko bili v bližini, pa moramo seznaniti z ustreznimi ukrepi varstva pred sevanji oziroma poskrbeti, da v času uporabe vira sevanja niso v teh prostorih ali na območju uporabe vira sevanja. Snop sevanja je treba omejiti in ustrezno usmeriti, tako da zmanjšamo nepotrebno obsevanje, in če je možno, uporabiti prenosne ščite za sprejemnikom slike. Neposredno pred in med snemanjem je treba uporabiti zvočne ali svetlobne opozorilne signale, ki opozarjajo, da poteka obsevanje.

O pregledih, testih in vzdrževalnih posegih na opremi je treba evidenco voditi v skladu s predpisi.

Medicinska (diagnostična) radiografija

Medicinska (diagnostična) radiografija ali radiologija je medicinska veja, katere nastanek je vezan na odkritje rentgenske cevi. Rentgenske naprave omogočajo preiskave poškodb ali bolezni skeleta in različnih organov.



Slika 12: Rentgenska naprava (levo) in CT (desno).

Preiskava temelji na preslikavi, ko se na filmu (ali posebni plošči) zabeleži presečna slika preiskovanega dela telesa. Ker različna tkiva (kosti, mišice, maščobno tkivo ...) različno absorbirajo rentgenske žarke, lahko zdravnik na sliki vidi zgradbo pa tudi poškodbe ali bolezenske spremembe tkiv.

Za razliko od medicinske radiografije, kjer se preiskava naredi s časovno kratkim in relativno močnim obsevanjem, je možno s pomočjo posebnih ojačevalnikov slike opazovati tudi spremembe v realnem času (fluoroskopija),

pri čemer se uporabi šibkejše, vendar neprekinjeno sevanje. Ta pristop je izredno pomemben pri preiskavah, pri katerih uporabljajo različna kontrastna sredstva (npr. pri preiskavah srca, prebavil), ali pri kirurških posegih (interventna radiologija).

Zelo izpopolnjene novejšje rentgenske naprave v kombinaciji z zmogljivimi računalniki (Computed Tomography – CT, računalniška tomografija) omogočajo zdravnikom rekonstrukcijo dvodimenzionalne slike preseka posameznega dela telesa; več takih presekov lahko združijo v tridimenzionalno sliko organa.

Kot vire sevanj uporabljamo rentgenske cevi napetosti na območju od 30 do 400 kV_p. (pri mamografiji celo samo od 23 do 24 keV). Pri tem je izbrana napetost odvisna od vrste preiskave.

Varstvo pred sevanji v medicini zajema delavce in paciente, vendar to presega okvir tega dela. Pri medicinski radiografiji uporabljamo rentgenske naprave, ki sevajo samo takrat, ko so pod napetostjo. Zato je izpostavljenost sevanju omejena samo na čas, ko naprava deluje in ni tveganja, ko naprava ne deluje. Operater rentgenske naprave je med preiskavo za zaščitno steno ali v ločenem prostoru, tako da je zaščiten pred sipanim sevanjem, katerega viri so pacient, ohišje rentgenske naprave ter tla ali stena, odvisno od usmerjenosti koristnega snopa naprave. Pri interventni radiologiji, pri določenih posegih pa tudi pri diagnostični radiologiji, so v prostoru s pacientom ena ali več oseb, ki sodelujejo pri posegu. Te osebe morajo uporabljati osebno varovalno opremo, kot so predpasniki iz materiala, ki vsebuje svinec, očala, zaslone, posebne zavese (blazine, napolnjene s svinčeniimi zrni), stalne ali premične ščite. Odvisno od načina in vrste radiološkega posega se podobna osebna varovalna oprema uporabi tudi za pacienta. Nikakor pa delavec ne sme biti izpostavljen primarnemu snopu sevanja.

Nevtronska radiografija

Nevtronsko radiografijo uporabljamo za neporušne preiskave materialov, ki so zgrajeni iz lahkih elementov in kovin predvsem v letalski industriji, za preglede turbin ali ventilov.

Nevtronska radiografija je preiskava, pri kateri nevtroni potujejo skozi preiskovanec. Nevtrone, ki zapustijo preiskano snov, moramo s konverterji pretvoriti v nabite delce, ki jih lahko nato zaznamo bodisi na filmu bodisi z detektorjem naboja.

Za to preiskavo se običajno uporablja radioizotop kalifornij ²⁵²Cf, ki ima maso od 0,1 do 10 mg. Uporabljamo tudi nevtrone, ki so proizvedeni v reaktorju ali v pospeševalniku.

Zahteve varstva pred sevanjem so v osnovi podobne tistim za industrijsko (rentgensko in gama) radiografijo.

Analitske tehnike in postopki

Rentgenska fluorescenca

Rentgensko fluorescenco (XRF, X-Ray Fluorescence) uporabljamo za določanje vsebnosti različnih vrst atomov v vzorcu, za hitro in neporušno ugotavljanje sestave (predvsem površin) vzorcev oziroma deležev posameznih atomov v njej. Vzorci so lahko nekovinski ali kovinski materiali, surovine ali polizdelki v industriji, odpadne kovine, geološki vzorci. Metodo uporabljamo tudi za sledenje elementov, analizo rud na terenu, sestavo zlitin.



Za vire sevanj lahko uporabljamo rentgenske cevi delovnih napetosti do 60 kV_p pri električnem toku od 2 do 60 mA ali radioaktivne izotope nizkih energij (železo ⁵⁵Fe, plutonij ²³⁸Pu, prometij ¹⁴⁷Pm, americij ²⁴¹Am, kadmij ¹⁰⁹Cd, gadolinij ¹⁵³Gd, kobalt ⁵⁷Co). Radioaktivni izotopi so vgrajeni v prenosne merilnike. Njihove aktivnosti so od 40 MBq do 40 GBq (od 1 do 1000 mCi).

Slika 13: Naprava za XRF.

Kot posledica ionizacije, ki nastane v snovi pri prehodu rentgenskih žarkov, v večini atomov nastanejo sekundarni rentgenski žarki, ki so značilni za posamezne vrste atomov. Če je teh žarkov dovolj, da jih lahko analiziramo (določimo njihovo energijo oziroma valovno dolžino), lahko tudi določimo, v kateri vrsti atomov so nastali. Intenzivnost žarkov da tudi podatke o količini elementa v snovi.

Energije uporabljenih gama oziroma rentgenskih žarkov so nizke in se je pred njimi mogoče učinkovito ščititi. Pri stacionarnih napravah, ki uporabljajo rentgenske cevi, so vsi deli naprave znotraj posebnega ohišja in je izpostavljenost možna le v primeru, ko bi hkrati odpovedalo več varnostnih mehanizmov. V primeru odpovedi varnostne zaslone obstaja pri prenosnih merilnikih XRF možnost izpostavljenosti neposrednemu sevanju iz vira.

Sevalno tveganje pri uporabi **rentgenske fluorescenc** je majhno.

Rentgenska difrakcija

Rentgensko difrakcijo (XRD, X-Ray Diffraction) uporabljamo za določanje zgradbe posameznih kristalov (monokristali) ali vzorcev. S pomočjo rentgenske difrakcije je bila iz uklonske slike rentgenskih žarkov določena tudi zgradba DNK.

Viri sevanj so rentgenske cevi, ki imajo pospeševalne napetosti običajno okrog 40 kV_p in moč do 3 kW.

Z analizo uklonjenih žarkov na posameznih kristalih ali množici kristalov lahko določimo kristalno strukturo, položaje posameznih vrst atomov v kristalni strukturi, kristalne faze v vzorcu, velikost kristalov in napetosti ter stopnjo kristaličnosti. Ko z ozkim snopom rentgenskega sevanja posvetimo na neko snov, se žarki uklonijo, velikost odklona pa je značilna za posamezno kristalno snov. Zaradi kratke valovne dolžine rentgenskih žarkov, ki je primerljiva z dimenzijami atomov in medatomske razdalje v snovi, lahko iz interferenčne slike, ki nastane s seštevanjem rentgenskih žarkov, ki se sipajo na posameznih atomih, sklepamo o zgradbi snovi.

Naprave imajo rentgenske cevi, katerih neposredno sevanje (primarni žarek) lahko hitro povzroči opekline na koži ali poškodbo oči, kar velja tudi za daljšo izpostavljenost uklonjenemu žarku ali sipanemu in sekundarnemu sevanju. Zato proizvajalci z različnimi ščiti in varnostnimi stikali, ki morajo zadoščati zahtevi varne odpovedi, poskrbijo, da pri delu ne pride do izpostavljenosti uporabnika naprave. Za sevalno varnost je pomembno, da je naprava tehnično brezhibna in strokovno pregledana, uporabniki naprave pa morajo upoštevati navodila proizvajalca. Večja možnost za nezgodo je med servisiranjem naprave, ki jo lahko naredi samo oseba, ki jo usposobi in pooblasti proizvajalec naprave.

Sevalno tveganje pri uporabi rentgenske difrakcije je majhno.

Detektor na zajetje elektronov

Detektor na zajetje elektronov (ECD, Electron Capture Detector) uporabljamo za detekcijo različnih spojin, ki vsebujejo halogene elemente (flor, klor, brom ali jod), fosfor ali NO₂ (pesticidi in polutanti), pri plinski kromatografiji in za detekcijo eksploziva.

Detektor je ionizacijska celica, v kateri se s pomočjo nizkoenergijskih žarkov beta ionizira nosilni plin. Tok skozi celico, ki je sicer konstanten, se zmanjša, ko v nosilnem plinu nastanejo posamezne faze, ki so posledica analize vzorca v koloni plinskega kromatografa.

Detektor je zgrajen v obliki škatlice z dvema odprtinama, ki omogočata pretok plinov. V škatlici je folija z nanosenim nikljem ^{63}Ni aktivnosti do 1 GBq (10 mCi). V starejših detektorjih pa je nanešen tritij ^3H aktivnosti 20 GBq (500 mCi).



Slika 14: Detektor na zajetje elektronov (ECD, Electron Capture Detector).

Viri, ki se uporabljajo, so odprti, in zato je mogoče, da manjše količine radioaktivnega materiala kontaminirajo delovne površine. Redno čiščenje in radiološki nadzor močno zmanjšata verjetnost, da bi lahko prišlo do večje kontaminacije delovnega okolja. Zato je pomembna redna kontrola in preverjanje kontaminacije. Temperature, pri katerih se uporablja tritij, morajo biti natančno določene v tehničnih navodilih. S tem preprečimo njegovo uhajanje.

Aktivacijska analiza

Aktivacijsko analizo uporabljamo za analizo majhnih koncentracij elementov v snovi. Ugotavljamo lahko morebitno prisotnost polutantov. S to metodo določamo vsebnost silicija, kroma ali aluminija v analizah rud in določamo vsebnost kisika pri proizvodnji jekla. Metodo uporabljamo tudi za analizo lokalne sestave tal.

Viri sevanj, ki se uporabljajo, so: raziskovalni jedrski reaktorji (pri nas TRIGA), možna pa je tudi uporaba nevtronskih virov, kot so americij-berilij $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ aktivnosti od 40 GBq do 4 TBq (od 1 Ci do 100 Ci), kalifornij ^{252}Cf v količinah do 1 mg in nevtronski generatorji napetosti 14 MeV.

Če s hitrimi ali termičnimi nevtroni obstreljujemo vzorec, bodo nevtroni v vzorcu povzročili reakcijo v atomskih jedrih elementa. Jedra teh elementov nato emitirajo takojšnje ali zapoznele žarke gama in reakcijske produkte. Izotopi, ki nastanejo pri reakcijah, so mnogokrat radioaktivni in jih lahko s

posebnimi postopki identificiramo. Največkrat za meritev uporabimo gama spektrometrijo. Na osnovi meritev lahko sklepamo, iz katerih atomskih jeder so nastala nova jedra oziroma tudi njihovo vsebnost v vzorcu, ki ga analiziramo.

Pri delu z aktiviranimi vzorci iz jedrskega reaktorja obstaja možnost kontaminacije in izpostavljenosti visoki aktivnosti kratkoživih radioizotopov po aktivaciji. Možna je tudi nepredvidena visoka aktivnost vzorca zaradi prisotnosti neznanih izotopov (elementov). Zato delo z aktiviranimi vzorci zahteva nadzor hitrosti doz in kontaminacije. Z njimi se lahko dela v nadzorovanem območju. Tveganje pri delu je majhno.

Viri v procesni tehniki in avtomatiki

Merilniki debeline

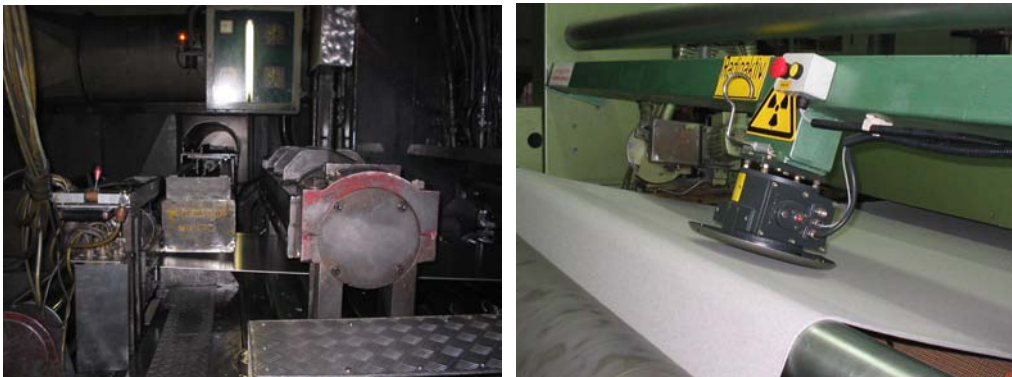
Merilniki debeline delujejo na osnovi: oslabitve (absorbicije) curka gama, sipanja delcev beta, sipanja žarkov gama in rentgenske fluorescence. Glede na vrsto uporabe so viri sevanja lahko sevalci gama, sevalci beta ali rentgenske cevi.

Radioaktivni izotopi, ki se največ uporabljajo pri preiskavah z merilniki, ki delujejo na osnovi oslabitve (absorbicije) curka gama in sipanja delcev gama, so: americij ^{241}Am , cezij ^{137}Cs in plutonij ^{238}Pu . Aktivnosti sevalcev gama so od 0,4 do 40 GBq (od 10 mCi do 1000 mCi), v posameznih primerih tudi več. Viri sevanj, ki jih običajno uporabljamo pri preiskavah z merilniki, ki delujejo na osnovi sipanja delcev beta, so: prometij ^{147}Pm , kripton ^{85}Kr , talij ^{204}Tl , stroncij $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, americij ^{241}Am in cezij ^{137}Cs . Aktivnosti sevalcev beta so običajno od 40 MBq do 40 GBq (od 1 mCi do 1000 mCi). Radioaktivni izotopi, ki se največ uporabljajo pri preiskavah, ki delujejo na osnovi rentgenske fluorescence, so: železo ^{55}Fe (aktivnosti od 0,2 do 0,8 GBq), tritij ^3H (aktivnosti 40 GBq), plutonij ^{238}Pu (aktivnosti 1GBq) in americij ^{241}Am (aktivnosti od 4 do 40 GBq).

Pri merjenju debeline z merilnikom, ki deluje na osnovi oslabitve curka gama, sta vir sevanja in detektor vsak na svoji strani preiskovanega vzorca ali snovi. Sevanje gre skozi vzorec in stopnja absorpcije je merilo za debelino ali gostoto vzorca. Tako lahko iz izhodnega signala detektorja sklepamo o debelini oziroma količini snovi. Vrsto sevanja, kakovost snopa in intenziteto sevanja izberemo ustrezno glede na vrsto izbrane meritve oziroma preiskave. Takšne merilnike uporabljamo za merjenje debelin vzorcev (kovinske folije, steklo, plastika, guma) in tudi kot merilnike gostot, nivojev in pretokov. Podobno metodo uporabljamo za merjenje gostote kosti pri medicinski preiskavi osteoporoze.

Merilnike, ki delujejo na osnovi sipanja žarkov gama, uporabljamo za določanje debelin, ki so večje od dosega sevalcev beta (lahke zlitine, steklo, plastika, guma); za merjenje debeline sten cevovodov, zbiralnikov, raznih posod; za merjenje vsebnosti pepela v premogu; za merjenje količine in ugotavljanje prisotnosti premoga na strojih za drobljenje premoga.

Merilnike, ki delujejo na osnovi sipanja delcev beta, uporabljamo za merjenje tankih vzorcev papirja, plastike in gume, za določanje količine tobaka v cigaretah ter za merjenje umazanije in polutantov na vzorčevalnih filterih. V primerih, ko imamo material prevlečen z drugo snovjo, pri čemer je zadostna razlika ali v atomski masi ali v gostoti teh dveh materialov oziroma snovi, se ta metoda uporablja za določanje debeline prevleke na podlagi. Pri tej vrsti preiskave je detektor vgrajen v bližino vira, tako da je usmerjen proti snovi, ki ji merimo debelino ali gostoto. V tem primeru detektor meri sipano sevanje. Količina tega sevanja je odvisna od debeline ali gostote snovi, ki jo preiskujemo. Detektor je vgrajen v bližino vira, tako da je usmerjen proti snovi, ki ji merimo debelino ali gostoto. V tem primeru bo detektor meril sipano sevanje, katerega količina je prav tako odvisna od debeline ali gostote snovi. Metodo uporabljamo za merjenje gostote snovi z majhno atomsko maso, pri katerih metoda (z določanjem količine prepuščenih žarkov gama) s slabitvijo curka žarkov gama ni dovolj občutljiva.



Slika 15: Merilnika debeline v procesni tehniki: gama (levo), beta (desno).

Merilnike, ki delujejo na osnovi rentgenske fluorescence, uporabljamo za merjenje debeline plastične prevleke na kovinski podlagi in za merjenje debeline kovinske prevleke na kovinski podlagi. Zadnjo preiskavo uporabljamo v primerih, ko imamo zelo majhno razliko v atomskih vrstnih številih med elementi kovin (npr. kositer in cink na železu, žlahtne kovine na bakru).

Za merjenje debeline plastične zaščite kovine ali galvanskega nanosa na kovinski podlagi uporabljamo absorpcijo karakterističnih rentgenskih žarkov, ki nastanejo v osnovni kovinski plasti zaradi obsevanja z žarki gama (pojav fluorescence). V prvem primeru se del karakterističnih žarkov absorbira, medtem ko potujejo skozi plastično prevleko, njihova intenzivnost po izstopu iz plastičnega nanosa pa je merilo za njegovo debelino. V drugem primeru so karakteristični žarki vzbujeni v kovinski podlagi in kovinskem galvanskem nanosu. Žarke iz podlage lahko s primernim filtrom odstranimo, izmerjena intenzivnost karakterističnih žarkov po izstopu iz galvanskega nanosa pa je merilo za njegovo debelino.

Pri opisanih merilnikih se uporabljajo viri sevanj, ki jih glede na tveganje uvrščamo med nevarne in manj nevarne vire. Običajno so radioaktivni viri nameščeni na posameznih napravah v tehnološkem procesu v zaščitnih vsebnikih, ki so stacionarno pritrjeni na napravah. Zaščitni vsebnik mora imeti zaslonko. Njen položaj mora biti jasno razviden. Dostopa do vsebnika in koristnega snopa sevanja morata biti označena. Pred vzdrževalnimi deli na tehnološki napravi je treba zagotoviti in preveriti, da je zaslonka na vsebniku zaprta, napetost na RTG pa izključena. Vir sevanja in vsebnik je treba redno vzdrževati posebno tam, kjer so razmere (vlaga, prah, temperatura) takšne, da lahko škodljivo vplivajo na vsebnik in delovanje zaslonke.

Zaščitni vsebniki morajo biti jasno označeni, delavci pa seznanjeni o njihovi prisotnosti in prisotnosti vira sevanja. To je posebej pomembno v tehnoloških procesih, kjer se več virov nahaja v različnih delih tehnološkega postopka. Z naprav, ki se več ne uporabljajo, je treba vire sevanj odstraniti, kar lahko naredijo samo primerno usposobljeni delavci.

Viri sevanj, ki se uporabljajo, so glede na namen različnih oblik in velikosti. Ta oprema je namenjena večletni uporabi in potrebuje zelo malo ali nič vzdrževanja. Merilniki so po navadi nameščeni na takšnih mestih, kjer se ljudje običajno ne zadržujejo. S časom se na opremi lahko nabere prah in druga nečistoča, ki lahko kmalu prekrijeta oznake. Obstaja veliko primerov, da imajo podjetja nameščenih več takih merilnikov. V primerih, ko se evidence ne vodijo dosledno, lahko pride do opustitve nadzora nad tovrstnimi viri sevanj. V primerih, ko podjetje opremo bodisi prodaja bodisi menja dejavnost, obstaja velika verjetnost, da se takšen vir izgubi.

Pri merilnikih, ki delujejo na osnovi sipanja delcev beta, je treba biti pozoren, da se uporabnik vira sevanja ne obseva s primarnim snopom sevanja. To je mogoče zagotoviti z uporabo ustreznih ščitov in zaslonk, tako da zagotovimo, da sevanje pride samo do vzorca, ki ga preiskujemo. Tam, kjer so zaslonke nameščene, je treba jasno označiti, kaj pomeni njihova lega. Posebna pozornost je potrebna pri zamenjavi vira.

Za varno delo z merilniki, ki delujejo na osnovi sipanja žarkov gama, morajo biti zagotovljeni vsebnik, ki zagotavlja primerno ščitenje, in zaslone, ki se avtomatsko zaprejo, ko vir ni v uporabi. Na vsebniku morajo biti jasne oznake, ki označujejo položaj zaslone. Dostop do vsebnika in koristnega snopa sevanja mora biti fizično omejen. V primeru prenosnih virov sevanj mora biti zagotovljeno, da se zaslonka ne odpre, razen v primeru, ko je vzorec pravilno nameščen pred virom.

Tveganje pri uporabi tovrstnih virov sevanj je majhno do zmerno.

Merilniki nivojev

Merilnike uporabljamo za merjenje nivojev v posodah različnih dimenzij.

Žarki gama ali rentgenski žarki potujejo od vira, ki je nameščen na eni steni posode, do detektorja, ki je nameščen na nasprotni strani posode (npr. silosa). Količina žarkov, ki bo prispela do detektorja, je odvisna od absorpcije v snovi oziroma količine snovi, ki zapolnjuje posodo. Tako lahko iz izhodnega signala detektorja sklepamo o nivoju v posodi. V nekoliko poenostavljeni izvedbi bi detektor zaznal samo, ali je količina snovi nad ali pod določenim nivojem (nivojsko stikalo). Izpopolnjene izvedbe pa omogočajo prikaz bolj natančnih podatkov o nivoju v posodi (visok nivo, nizek nivo).



Slika 16: Merilnika nivojev v industriji pijač in papirni industriji.

Rentgenski žarki in americij ^{241}Am aktivnosti do 4 GBq (100 mCi) se uporabljajo za merjenje nivojev tekočine v pločevinkah in steklenih kontejnerjih. Cezij ^{137}Cs in kobalt ^{60}Co aktivnosti, ki je izbrana glede na vrsto vzorca in je lahko v območju od 2 GBq do 80 GBq (od 50 mCi do 2 Ci), se uporabljata za meritev nivojev v velikih rezervoarjih in silosih, pri čemer so aktivnosti izbrane glede na vrsto snovi in velikost rezervoarja (silosa).

Za ravnanje z virom sevanja morajo biti zagotovljeni vsebnik, ki zagotavlja primerno ščitenje, in zaslonke, ki se samodejno zaprejo, če preiskava ne poteka. Na vsebniku morajo biti jasne oznake, ki označujejo položaj zaslonke. Bližina mesta, kjer je merilnik nameščen, mora biti dodatno fizično zavarovana. Dostop v notranjost rezervoarjev ali silosov mora biti prepovedan, razen kadar so zaslonke na merilniku zaprte. V primeru prenosnih virov sevanj mora biti zagotovljeno, da se zaslonka ne odpre, razen v primeru, ko je naslonjena na posodo, v kateri merimo nivo.

Potencialno tveganje pri delu z merilniki nivojev je nizko do zmerno.

Merilniki vlage in gostote

Merilnik vlage in gostote, najbolj znan kot TROXLER sonda, ima vgrajena dva vira sevanj: za merjenje vlage in za merjenje gostote.

Za merjenje vlage ima vgrajen detektor, ki je posebej občutljiv za ugotavljanje prisotnosti vodikovih atomov (voda, ogljikovodiki). Uporabljajo ga gradbeniki pri gradnji cest, za določanje sestave tal v vrtinah – karotaža vrtin (Well Logging), za merjenje vlage kmetijskih površin in merjenje vlage v gradbenem materialu. Vir sevanja je običajno $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$ ali ^{252}Cf .

Merilnik vlage in gostote deluje na principu upočasnjevanja hitrih nevtronov. Hitri nevtroni, ki jih ustvari vir, sodelujejo z atomi preiskovanega vzorca – trki z jedri lahkih atomov, predvsem z jedri atomov vodika. Detektor spustimo v izvrtino in merimo tiste nevtrone, ki so se elastično sipali in termalizirali. Iz njihove intenzivnosti lahko nato določimo vsebnost vlage v prostoru, kjer so se nevtroni sipali in termalizirali.

Oprema je velikokrat izdelana tako, da vsebuje še vir, ki meri gostoto.



Slika 17: Sonda TROXLER.

Za merjenje gostote ima merilnik običajno vgrajen cezij ^{137}Cs ali kobalt ^{60}Co . Aktivnosti virov so približno 0,37 GBq (10 mCi). Metodo uporabljamo za določanje gostote prsti, podlage, gramoza, asfalta, materiala v rudnikih, pri preiskavah naftnih polj in za preiskovanje podlag za temelje v gradbeni industriji. Iz količine žarkov gama, ki se sipajo ali absorbirajo v znani vrsti snovi, je mogoče določiti, kakšni sta gostota ali poroznost snovi. Žarki gama

se namreč močnejše sipajo na težkih atomih. Vire sevanj, ki so vgrajeni v merilnik vlage in gostote, uvrščamo med manj nevarne. Merilniki so večinoma prenosljivi, zaradi česar so velikosti njihovih vgrajenih ščitov omejene. Posledica tega je, da so hitrosti doz na površinah merilnika relativno velike (tudi več kot $100 \mu\text{Sv/h}$, nekaj $\mu\text{Sv/h}$ na 1 m od površine). Pri prevozu in hranjenju je potrebna ter zahtevana še posebna embalaža. Na spodnji strani merilnika je zaslonka, ki je med merjenjem odprta, ali pa se vir celo spusti v merilno vrtino, tako da so hitrosti doz lahko še večje. Zato mora operater preprečiti dostop ostalih delavcev v njegovo bližino, sam pa omejiti zadrževanje na potreben čas za pripravo in izvedbo meritve.

Operater mora imeti tudi merilnik hitrosti doz, s katerim preveri, če je vir sevanja po uporabi pravilno nameščen v ohišju in ali je položaj zaslonke pravilen – ta mora biti po končani uporabi v zaprtem položaju.

Pri uporabi, vzdrževanju in servisiranju merilnika je treba upoštevati navodila proizvajalca. Podobno kot pri prenosnih radiografskih virih predstavlja dodatno tveganje transport merilnika, obstajajo pa še možnost kraje in izgube ali poškodbe virov. Morebitno tveganje pri delu z merilniki vlage in gostote je nizko do zmerno.

Obsevalne naprave

Teleterapija

Teleterapija se uporablja za zdravljenje širokega spektra rakastih obolenj.



Slika 18: Obsevalna naprava.

Pri teleterapiji rakasto tkivo obsevamo z žarki gama, rentgenskimi žarki ali elektroni, ki so natančno usmerjeni proti rakastemu tkivu. Obsevamo večkrat iz različnih smeri, tako da so tkiva v okolici obsevana samo enkrat, rakasto tkivo pa obsevamo večkrat. Doza, s katero je obsevano rakasto tkivo, je tako velika, da ga uniči. Za teleterapijo so nekoč uporabljali predvsem kobalt ^{60}Co aktivnosti od 100 TBq do 500 TBq (od 2,5 kCi do 12,5 kCi), ki ima žarke gama visokih energij. Uporabljali so tudi cezij ^{137}Cs aktivnosti od 50 TBq do 100 TBq.

Danes radioizotope vedno bolj nadomešča uporaba tako imenovanih linearnih pospeševalnikov (LINAC). Ti proizvajajo rentgenske žarke visokih energij in sicer od 4 MeV do 40 MeV. Vedno bolj so v uporabi rentgeni napetosti od 20 kV_p do 250 kV_p.

Vire sevanj, ki jih uporabljamo pri teleterapiji, prištevamo med izjemno nevarne vire (lahko povzročijo trajne poškodbe v nekaj minutah in smrtno nevarne poškodbe v manj kot eni uri). Obsevanje pacienta pri teleterapiji izvajamo v posebej zaščiteneh prostorih z daljinskim upravljanjem. Operater je izven prostora, kjer poteka obsevanje. Ko je izvor izven zaščitene delo ohišja v položaju za obsevanje, morajo biti vključeni avtomatski alarmi in varnostna stikala. Če odpovejo avtomatski mehanizmi za transport vira, morata biti omogočena ročni poseg in hiter dostop do pacienta. Operater mora imeti možnost, da neodvisno ugotovi, ali je vir zares v zaščitenem položaju v ohišju. Posebno kritična operacija je menjava vira, ki zahteva posebno opremo, in jo sme izvajati samo posebej usposobljeno osebje.

Teleterapija je sevalna dejavnost z visokim tveganjem.

Brahiterapija

Brahiterapija se uporablja za zdravljenje širokega spektra rakastih obolenj.

Brahiterapija je terapija, pri kateri vir vstavijo neposredno v rakasto tvorbo in je zato obsevanje tkiva lokalno. Obstajajo trije načini brahiterapije: intersticijska brahiterapija (uporabljajo jo onkologi), pri čemer vir sevanja vstavijo v vodilo in ga kirurg operativno vstavi v tumor; intrakavitarna brahiterapija, ko vir vstavijo v votel organ; površinska brahiterapija, pri čemer vir namestijo na površino telesa.

Uporaba virov sevanj za potrebe brahiterapije je zelo raznolika. Predvsem uporabljajo sevalce beta oziroma sevalce beta-gama. V preteklosti so uporabljali predvsem radij ²²⁶Ra, danes pa so ga nadomestile igle, ki vsebujejo cezij ¹³⁷Cs aktivnosti od 20 GBq do 100 GBq (od 1 do 10 mCi), iridij ¹⁹²Ir aktivnosti do 0,4 TBq (8 mCi), kobalt ⁶⁰Co aktivnosti do 0,7 TBq (14 Ci), in za površinsko terapijo stroncij ⁹⁰Sr aktivnosti 1,5 GBq (30 mCi). Za trajno implantacijo uporabljajo zlato ¹⁹⁸Au.

Vire sevanj, ki jih uporabljamo v brahiterapiji, uvrščamo med zelo nevarne vire (lahko povzročijo trajne poškodbe v nekaj deset minutah in smrtno nevarne poškodbe v nekaj urah ali dnevih), ali če gre za manjše vire, med manj nevarne vire. Pri teh je malo verjetno, da bo prišlo do trajnih poškodb, možne so začasne poškodbe osebe, ki je bila v bližini vira več tednov.

Pacienta se pri brahiterapiji obseva v posebej zaščiteneh prostorih s posebno napravo z daljinskim upravljanjem. Operater je med postopkom v posebnem

prostoru. Med postopkom, ko je vir izven ohišja, morajo biti vključeni opozorilni alarmi.

Na onkološkem inštitutu izvajajo še ročno vstavljanje aplikatorjev, nekaj deset na leto. Ročnega vstavljanja je vedno manj.

Tudi pri brahiterapiji morata biti mogoča ročni poseg, če odpovejo avtomatski mehanizmi za transport vira od zaščitnega vsebnika do pacienta, in hiter dostop do pacienta. Operater mora imeti možnost, da ugotovi, ali je po aplikaciji vir zares v zaščitenem položaju v ohišju. Zaradi majhnosti virov in večjega števila virov v uporabi je možnost morebitne izpostavljenosti še dodatno povečana. Posebej moramo biti pozorni na to, da so po aplikaciji viri ustrezno shranjeni.

Pri brahiterapiji gre za dejavnost z visokim tveganjem. V kolikor pride do kakršnega koli odstopanja, obstaja velika verjetnost prekomerne izpostavljenosti operaterjev.

Sterilizacija in modificiranje lastnosti materialov

Uporaba metode je najbolj znana v medicini. Uporabljajo jo za sterilizacijo medicinskih pripomočkov. Doze dosegajo vrednosti do 35 kGy. Na drugih področjih je uporaba zelo raznolika, nove možnosti pa se vsak dan razvijajo in vključujejo: izboljšanje izolacije vodnikov za uporabo pri visokih temperaturah, proizvodnjo toplotno skrčljivih materialov za embaliranje, vulkanizacijo gum, proizvodnjo lesno-plastičnih kompozitov za doseganje boljših mehanskih lastnosti; vezavo črnila ali drugih dodatkov na papir, kovino, les ali plastiko; nanos prevlek ali tankih slojev na papir, filme ali folije; vezavo magnetnih prevlek za avdio in video trakove.

Pri sterilizaciji in modifikaciji lastnosti materialov uporabljajo neposredne učinke sevanja. Pri modifikaciji lastnosti materialov, kot so polimeri, sevanje povzroči nastanek prostih kemijskih vezi med makromolekulami, ki prispevajo k polimerizaciji snovi (cross-linking), ali sproži polimerizacijo v posebnih prevlekah (curing). Neposredno sevanje uporabljajo tudi za ustvarjanje prostih kemijskih vezi na površini snovi (grafting).

Za sterilizacijo največ uporabljajo kobalt ^{60}Co , ki seva visokoenergijske žarke gama, nekoliko daljši razpolovni čas (5,3 leta) pa omogoča večletno delo z istim virom. Tipične aktivnosti virov, ki se uporabljajo za sterilizacijo, so približno 10^5 TBq. Uporabljajo še cezij ^{137}Cs aktivnosti do 10^5 TBq, curke elektronov visokih energij do 10 MeV (predvsem za polimerizacijo snovi) in curke elektronov nizkih energij (od 0,15 MeV do 0,30 MeV) za obdelavo površin.

Pri sterilizaciji in modificiranju lastnosti snovi se uporabljajo izjemno močni viri in izjemno visoke hitrosti doz. Osnovna zahteva pri uporabi teh virov je, da nobena oseba ne sme biti v prostoru, kjer poteka obsevanje, razen če so viri (običajno jih je več) v popolnoma zaščitenem položaju oziroma so obsevalne naprave izklopljene. To se doseže s kombinacijo varnostnih naprav in administrativnega nadzora ter stalno delujočih alarmnih monitorjev. Pri načrtovanju in vzdrževanju takih sistemov je treba upoštevati tudi vpliv sevanja na varnostne sisteme (npr. izolacija električnih vodnikov), kar lahko trajno zmanjša zanesljivost teh sistemov. Vse varnostne naprave morajo biti izdelane v skladu z upoštevanjem načela varne odpovedi. Postavitve in zamenjava virov zahtevata posebno opremo in posebej usposobljeno osebje.

Sterilizacija hrane

S sterilizacijo hrane se doseže daljši rok trajanja in prepreči prenašanje nalezljivih bolezni. Sterilizacija hrane je dovoljena za 220 proizvodov v okoli 40 državah.

Doze do 1 kGy se uporabljajo za preprečevanje klitja užitnih gomoljev in korenin, zatiranje škodljivcev in mrčesa v pridelkih, zaviranje zorenja (predvsem sadja). Doze od 1 do 10 kGy se uporabljajo za podaljšanje uporabnosti prehrabnenih izdelkov, predvsem mesa in zmanjšanje prisotnosti mikroorganizmov v različnih prehrabnenih izdelkih.

Viri sevanj, ki jih uporabljamo pri aplikaciji, so žarki gama, ki jih sevata radioizotopa kobalt ^{60}Co ali cezij ^{137}Cs aktivnosti do 4 PBq (10^{15}Bq), curki elektronov energij do 10 MeV ali rentgenski žarki energij do 5 MeV.

Zaradi izjemno visokih hitrosti doz, ki so proizvedene pri tovrstnih aplikacijah, je tudi tu treba dosledno upoštevati vse zahteve varstva pred sevanji.

Uporaba odprtih virov sevanj

Radioizotopske sledilne tehnike

Osnovni princip uporabe radioizotopskih sledilnih tehnik (tracerskih tehnik) z radioaktivnimi indikatorji je, da z indikatorjem (tracerjem) označimo snov v sistemu. Sistem je lahko industrijski proces, biološki proces ali funkcija. S pomočjo občutljivih detektorjev sledimo označeno snov skozi sistem ali proces. Velikokrat ravnamo tako, da kvantitativno ovrednotimo vzorec, ki ga vzamemo iz sistema, ali z ustreznim merilnikom izmerimo sevanje zunaj sistema.

Indikatorji (tracerji) morajo biti v enaki obliki (agregatnem stanju) kot snov, ki jo preiskujemo. Z ustreznimi merilniki jih je mogoče enostavno zaznati že pri nizkih koncentracijah. Princip delovanja indikatorja mora biti takšen, da ne vpliva na delovanje sistema.

Uporaba v industriji

V industriji uporabljamo metodo za določanje oziroma merjenje dinamike mešanja tekočin, za ugotavljanje in določanje puščanja toplotnih izmenjevalnikov ter za sledenje odpadnih tekočin. Pri določanju dinamike mešanja tekočin v industrijskih mešalnikih eni od tekočin dodamo kratkoživi radioaktivni izotop in z meritvijo aktivnosti tekočine v posameznih delih mešalnika določamo hitrost mešanja. Pri določanju puščanja toplotnih izmenjevalnikov v grelno tekočino ali paro dodamo radioaktivni izotop in merimo aktivnost druge tekočine. Aktivnosti virov so odvisne od vrste aplikacije.

Viri sevanj, ki jih v industriji za ta namen največ uporabljamo, so zlato ^{198}Au , tehnecej $^{99\text{m}}\text{Tc}$, cink ^{65}Zn in mangan ^{54}Mn .

Uporaba v nuklearni medicini

Nuklearna medicina je področje medicine, pri kateri se uporabljajo radioaktivni izotopi kot indikatorji za diagnosticiranje bolezni ali terapijo v obliki radiofarmakov. Vir sevanja (radioaktivni izotop) je del spojine, ki jo pacient zaužije, vdihne ali mu jo zdravnik vbrizga z injekcijo. Zaradi sevanja, ki ga oddaja, je možno s pomočjo merjenja zunaj telesa ugotoviti kje je in kako se ta spojina obnaša v telesu. Tako je mogoče sklepati o delovanju posameznih organov. V posameznih primerih je na tak način mogoče celo obsevati samo specifičen organ in na ta način zdraviti pacienta.

Nuklearna medicina uporablja kratkožive izotope, ki morajo omogočiti izvedbo preiskave, hkrati pa dovolj hitro razpasti oziroma se izločiti iz telesa, da ne obsevajo pacienta po nepotrebnem. Tako danes skoraj 85% vseh preiskav opravijo s pomočjo spojin, v katerih je radioaktivni tehnecej $^{99\text{m}}\text{Tc}$ aktivnosti do 800 MBq, ki ima razpolovni čas 6,02 ure. Tehnecej pridobijo iz molibdenskega generatorja (kjer ^{99}Mo z razpolovnim časom 66 ur razpada v $^{99\text{m}}\text{Tc}$). Za preiskave ščitnice uporabljajo jod ^{131}I z aktivnostjo nekaj MBq. Radioizotopi, ki se še uporabljajo, so tritij ^3H , ogljik ^{14}C , selen ^{75}Se , talij ^{201}Tl , jod ^{125}I , ksenon ^{133}Xe , galij ^{67}Ga itd. Količina in vrsta radioizotopa sta odvisni od vrste preiskave in od pacienta.

Preiskovalna metoda, ki je še bolj učinkovita od klasičnih metod nuklearne medicine, je pozitronska emisijska tomografija (PET), pri kateri uporabljajo radioaktivne izotope, ki sevajo pozitrone (elektrone s pozitivnim nabojem). Žal

je metoda tudi precej dražja, ker je večinoma vezana na uporabo ciklotrona za proizvodnjo primernih kratkoživih radioaktivnih izotopov. Najpogosteje uporabljen izotop za PET je fluor ^{18}F .

Primer uporabe virov sevanj v nuklearni medicini je zdravljenje raka na ščitnici, kjer uporabljamo radioaktivni izotop jod ^{131}I aktivnosti od 4 GBq do 8 GBq (od 100 mCi do 200 mCi). Poleg joda, se za terapijo uporabljajo še fosfor ^{32}P , stroncij ^{89}Sr , itrij ^{90}Y itd.

Uporaba odprtih virov predstavlja dodatno tveganje zaradi možne razpršitve radioaktivnih snovi v okolje.

Med potekom preiskave z indikatorji (tracerji) so količine radioaktivnih snovi, s katerimi ravnamo, zelo majhne. V primerih, ko uporabljamo večje aktivnosti, je na mestu aplikacije možno povečano tveganje zaradi zunanega sevanja. Navadni zaščitni ukrepi in ukrepi za preprečevanje širjenja kontaminacije običajno zadoščajo za varno uporabo.

Za varstvo pred sevanji v nuklearni medicini je ugodno, da so vsi radionuklidi kratkoživi. Posegi se izvajajo v ločenih prostorih, ki morajo ustrezati zahtevam za delo z odprtimi viri sevanj (posebne zahteve glede tal in delovnih površin, prirejenih za lažjo dekontaminacijo in omejevanje širjenja kontaminacije, prezračevanje, zbiranje radioaktivnih odpadkov, zaščitna oblačila), strožje pa so zahteve za prostore in osebje, ki izvaja radiokemične postopke, povezane s pripravo radiofarmakov. Obvezni sta osnovna oprema za ukrepanje ob izrednem dogodku in osnovna merilna oprema za merjenje kontaminacije površin in osebne kontaminacije.

Paciente po opravljenih preiskavah (ali terapiji) lahko odpustijo domov, kljub temu da njihovo telo še vedno vsebuje radiofarmak. Kdaj je to možno, je določeno s predpisi, vendar mora biti pacient pisno seznanjen s tveganjem za domače in pravilnim ravnanjem za omejevanje njihove izpostavljenosti sevanju.

Radioaktivne svetilne barve

Uporaba radioaktivnih svetilnih barv je raznolika. Uporabljajo se predvsem kot stalni viri svetlobe brez napajanja. Majhni viri se uporabljajo v kronometrih, številčnicah in optičnih sistemih. Močnejši viri sevanj se uporabljajo za označevanje zasilnih izhodov.

Vir energije je snov (npr. plin), ki vsebuje radioaktivne izotope, radioaktivno sevanje pa povzroči nastanek svetlobe v fluorescenčni snovi. Pogosto jih uporabljamo v steklenih ceveh, ki so napolnjene s plinom, ki vsebuje tritij, stene pa so premazane s fluorescenčno snovjo. Druga redkejša oblika so

svetilne barve iz fluorescenčne snovi, kjer je tritij običajno prisoten kot del tritiranega polistirena v laku.

Najbolj je razširjena uporaba tritija ^3H , uporablja pa se še prometij ^{147}Pm . Poleg teh dveh radioaktivnih izotopov, katerih uporaba je dovoljena, se ponekod uporablja še kripton ^{85}Kr . Večina teh virov sevanj je pod mejo izvzetja. Uporaba radija ^{226}Ra je že dlje časa prepovedana, vendar je v obliki svetilnih premazov še marsikje prisoten, predvsem ga najdemo na starih številčnicah ur ali drugih merilnikov, ki so se uporabljali za vojne namene, zato ga nemalokrat odkrijemo kot vir sevanja med odpadnimi kovinami. Aktivnosti manjših virov so od 1 GBq do 8 GBq (od 25 mCi do 200 mCi), veliki viri pa lahko vsebujejo aktivnosti do 400 GBq (10 Ci) ali celo več.

Pri novejših radioaktivnih svetilnih barvah uporabljamo beta sevalce nizkih energij, zato je tveganje zaradi zunanega sevanja majhno. Vire je treba zavarovati pred morebitnimi poškodbami, ker uhajanje plinov iz ohišij ali poškodbe svetilnih premazov predstavljajo potencialno tveganje, še posebej za kontaminacijo delovnega okolja predvsem v primerih, ko se ravna z večjim številom takšnih predmetov. Pri starejših barvah, ki še vsebujejo radij ^{226}Ra , je to tveganje bistveno večje. Potencialno tveganje predstavljajo razlitje in nenameren vnos vira sevanja v telo ali morebitna najdba predmeta, ki je bil nekoč premazan z radijem ^{226}Ra .

Okrepitev električnega obloka

Z uporabo virov dosežemo izboljšanje odzivnih časov določenih vrst elektronskih stikal in večjo ponovljivost delovanja velikih plinskih prenapetostnih odvodnikov, ki se uporabljajo pri zaščiti telekomunikacijske opreme.

Električni oblok se ustvari med dvema elektrodama, če potencialna razlika doseže določeno vrednost, ki je odvisna od razdalje med njima in od plina, ki je med njima. Če je vir sevanja nameščen v neposredno bližino elektrod, je napetost, pri kateri pride do preboja in nastanka obloka, veliko bolj učinkovita in ponovljiva. Tovrstna oprema lahko vsebuje radioaktivni plin ali pa elektrode dejansko vsebujejo nekaj radioaktivne snovi.

Uporabljajo se naslednji viri: kripton ^{85}Kr aktivnosti 50 kBq (1,2 μCi) ali tritij ^3H aktivnosti 1 MBq (25 μCi) v obliki plinov ter uran ^{238}U aktivnosti 50 MBq (1,2 mCi) in prometij ^{147}Pm aktivnosti 200 kBq (5 μCi) v trdi obliki.

Pri teh sistemih se uporabljajo zelo majhne količine radioaktivne snovi, vendar mora biti oprema ustrezno označena, tako da je iz oznak razvidna prisotnost radioaktivnih snovi in da je ob koncu uporabe zagotovljeno ustrezno odlaganje. Med vzdrževanjem moramo biti previdni, da se ne poškodujejo stekleni deli, ki vsebujejo radioaktivne pline.

Uporaba torija

V industriji obstaja vrsta aplikacij, pri katerih uporabljajo torij zaradi njegovih fizikalnih, kemijskih in metalurških lastnosti. Vse primere uporabe torija obravnavamo kot uporabo odprtih virov sevanj. Pri tem je treba upoštevati osnovne zahteve varstva pred sevanji. Torij uporabljajo v mrežicah plinskih svetilk, majhne koncentracije torija se uporabljajo kot primes magneziju v ohišju letalskih motorjev, uporabljali so ga v katodah elektronk ali kot del antirefleksnega sloja optičnih leč, še vedno ga najdemo kot primes materialu nekaterih varilnih elektrod.

Letne meje vnosa in ustrezne izpeljane vrednosti za torij so zelo nizke. Pri uporabi omenjenih izdelkov je treba skrbeti, da se prepreči kontaminacija zraka.

Uporaba virov sevanj na drugih področjih

Rentgenski aparati za pregled prtljage

Na letališčih, v poštnem prometu, na mejnih prehodih in drugod uporabljajo posebno obliko rentgenskih aparatov – pretočne rentgenske aparate za pregled prtljage, poštnih pošilk, kontejnerjev in tovorov za odkrivanje prepovedanih in nevarnih snovi ter predmetov. Prtljago ali pošiljko, ki jo pregledujejo, položimo na tekoči trak, s katerim se premakne v zaprti del aparata, tam pa jo presevajo z rentgenskim sevanjem. Naprave uporabljajo zelo občutljive detektorje za rentgenske žarke, sliko pa ustvarijo s pomočjo računalnika. Detekcijski sistem (rentgenska cev in detektorji za zajem slike) pretočnega rentgenskega aparata je v zaprtem delu aparata. Sevanje iz rentgenske cevi je usmerjeno proti detektorju, oboje pa je v ohišju pretočnega kanala, skozi katerega na tekočem traku potuje preiskovani predmet.



Slika 19: RTG aparat za pregled prtljage.

Ko je predmet v kanalu, to zaznajo fotocelice v kanalu in sprožijo delovanje rentgenskega aparata. Sliko pregleda operater rentgenskega aparata na monitorju, ki je nameščen na nadzornem mestu v neposredni bližini aparata. Uporaba pretočnega rentgenskega aparata zaradi njegove zasnove ni tvegana sevalna dejavnost.

Kljub temu pa je pomembno, da so delavci, ki aparat uporabljajo, seznanjeni s postopki za varno delo z njim. Po prenehanju uporabe je treba rentgensko cev strokovno uničiti.

Statični eliminatorji

Pri proizvodnji ali obdelavi materialov, ki so dobri izolatorji, se na njih nabere statični naboj. Največ statičnega naboja se nabere tam, kjer se druga od druge hitro ločujeta dve površini, ki sta sestavljeni iz različnih materialov (npr. v proizvodnji plastike, papirja in gume, ko se material odstranjuje od valjev). Statični naboj in nabiranje prašnih delcev povzročata težave pri nadaljnji obdelavi. Material se uspešno razelektri skozi ioniziran zrak, ki ga ustvarijo žarki alfa iz radioaktivnega vira.



Za odstranjevanje statičnega naboja v industriji uporabljajo polonij ^{210}Po , ki je nanešen na tanko folijo ali pa je v obliki t. i. mikrosfer vgrajen v lepljivo osnovo. Statični eliminatorji s polonijem imajo aktivnosti do 8 MBq (200 mCi). Priprave za razelektritrev ne potrebujejo napajanja in so zato posebej primerne za odstranjevanje statičnega naboja v delovnem okolju, kjer so prisotna vnetljiva topila. Zagotoviti je potrebno, da topilo ne reagira z osnovnim materialom, v katerem je vgrajen radioaktivni vir.

Slika 20: Statični eliminator

Statične eliminatorje prištevamo med manj nevarne vire, tveganje pri delu z njimi pa je majhno oziroma zanemarljivo. Ker so postavljeni na stalnih mestih v tehnološkem procesu, je treba zavarovati dostop do njih in jih posebej označiti. Tveganje je povezano z morebitno poškodbo vira in verjetnostjo, da se lahko tudi razprši. Posegi v napravo so dovoljeni samo primerno usposobljenim delavcem.

Radioaktivni strelovodi

Radioaktivni strelovodi delujejo podobno kot statični eliminatorji. Strelovodi z vgrajenim virom sevanja delujejo tako, da razelektrijo naboj v okolici strelovoda in ga usmerjajo vanj. Tovrstna uporaba se vse bolj opušča in nadomešča z uporabo strelovodov, ki ne vsebujejo radioaktivnih snovi.

Pri strelovodih uporabljajo radij ^{226}Ra , americij ^{241}Am aktivnosti do 30 MBq (750 μCi) ali europij ^{152}Eu in ^{154}Eu aktivnosti okrog 20 GBq. Ker se uporaba radioaktivnih strelovodov opušča, potencialno tveganje za okolje in prebivalstvo predstavljajo tisti, ki se več ne uporabljajo in ki še niso oddani v skladišče radioaktivnih odpadkov, in zato lahko nenamerno zaidejo med odpadne kovine.

Ionizacijski javljalniki požara

Ionizacijski javljalniki požara so verjetno najbolj razširjene naprave, ki vsebujejo radioaktivni vir. Javljalnik je sestavljen iz majhne odprte ionizacijske celice in vsebuje šibak vir žarkov alfa. Zaradi ionizacije zraka z žarki alfa ionizacijska celica nenehno prevaja tok, ob prisotnosti dimnih delcev pa se tok zmanjša. To zazna občutljiva elektronika in sproži alarm. Javljalnike požara z radioaktivnim virom danes nadomeščajo z optičnimi. Ti so manj občutljivi za manjše dimne delce, ki so prisotni pri hitro razvijajočih se požarih z malo saj. V praktično vseh javljalnikih požara je izotop americij ^{241}Am aktivnosti (za domačo uporabo) približno 37 kBq, lahko tudi več. V industriji najdemo tudi kemične detektorje, ki so namenjeni zaznavanju nevarnih in strupenih plinov. V takih detektorjih so v uporabi viri americij ^{241}Am z aktivnostmi približno 5 MBq, ali nikelj ^{63}Ni aktivnosti približno 0,37 GBq, v nekaterih starejših javljalnikih pa najdemo tudi radij ^{226}Ra . Javljalniki požara vsebujejo vire, ki jih prištevamo med nenevarne. Njihova posamična uporaba ne predstavlja sevalnega tveganja, pri delu z večjim številom javljalnikov (servisiranje) pa je tveganje zmerno. Med servisiranjem je treba zaradi potencialne kontaminacije delovnih površin zagotoviti preverjanje kontaminacije s primernim merilnikom. Med čiščenjem in servisiranjem javljalnikov požara se moramo zavedati, da je vir sevanja, americij ^{241}Am , močan sevalec alfa, da pri nestrokovnem čiščenju in servisiranju (odstranjevanje zaščit z vira sevanja) lahko poškodujemo vir sevanja in kontaminiramo delovne površine in okoliški zrak. Zato pri tej aktivnosti obstaja velika verjetnost notranje kontaminacije z delci alfa. Pozornost zahtevajo predvsem večji, industrijski detektorji plinov, ki vsebujejo vire sevanj z večjo aktivnostjo. Prisotnost morebitne kontaminacije je treba sproti preverjati in po potrebi delovne površine dekontaminirati. Zaradi razpršene postavitve velikega števila merilnikov v uporabi, je potrebna zanesljiva evidenca.

Termo-električni generatorji

Uporaba termo-električnih generatorjev pokriva zelo široko področje: od srčnih vzbujevalnikov do komunikacijskih in navigacijskih naprav na nenaseljenih območjih ali morju. Zaradi visoke cene in tveganja pri uporabi je bila v preteklosti, verjetno pa je tako še danes, uporaba termo-električnih generatorjev za komunikacijske in navigacijske potrebe najbolj razširjena za vojaške namene. Za miroljubne namene je najbolj znana uporaba za napajanje vesoljskih sond, ki se uporabljajo za raziskovanje osončja, in za napajanje nekaterih satelitov.

Delovanje termo-električnega generatorja temelji na ustvarjanju razlike temperatur med dvema komponentama. To razliko temperatur kot termočlen uporabimo za proizvodnjo električne energije. Toploto za ustvarjanje temperaturne razlike proizvede primeren radioaktivni vir, ki lahko takšno baterijo poganja zelo dolgo.

Za opremo, namenjeno komunikacijskim in navigacijskim napravam ali za napajanje nekaterih satelitov, uporabljajo stroncij ^{90}Sr aktivnosti do 1 PBq (20 kCi), kobalt ^{60}Co aktivnosti do 1 PBq (20 kCi), plutonij ^{238}Pu aktivnosti do 1 TBq (35 Ci) in prometij ^{147}Pm aktivnosti do 2 TBq (70 Ci).

Stroncij in kobalt uporabljajo kot vir energije za razsvetlavo pri nižjih napetostih in za oddajnike, ki morajo delovati daljši čas brez vzdrževanja.

Prometij in plutonij nizkih aktivnosti uporabljajo za proizvodnjo električne energije pri srčnih vzbujevalnikih.

Pri srčnih vzbujevalnikih je treba zagotoviti dosledno vodenje evidenc. Po končani uporabi se mora vir odložiti v ustrezno skladišče radioaktivnih odpadkov. Enako velja tudi za ostale uporabe. Vendar je treba posebej poudariti, da so aktivnosti, ki se uporabljajo pri termo-električnih generatorjih, izjemno visoke, dodatne težave pa povzročajo še radiotoksičnost radioizotopov. Ker so naprave za telekomunikacijo brez neposrednega nadzora, se lahko v primeru kraje, zapustitve ali popolne izgube nadzora zgodijo zelo resne nesreče, kar se je v preteklosti že večkrat pripetilo.

Prav tako je uporaba pri raziskavah v vesolju in uporaba satelitov povezana z možnostjo padca satelita ali nezgode pri izstrelitvi, kar povzroča dodatno tveganje kjer koli na Zemlji. Tveganje je povezano z možnostjo, da lahko kdor koli najde ostanke naprave, ki vsebujejo dele termo-električnega generatorja. Osnovni zaščitni ukrep v tem primeru je, da je javnost seznanjena tudi z možnostjo take najdbe.

Nenamerno kopičenje naravnih radioizotopov

Posebnost nekaterih tehnologij v industriji je tudi nenamerno kopičenje oziroma povečanje koncentracije naravnih radioizotopov v materialih ali delih tehnološkega procesa nad nivojem izvetja (**NORM – Naturally Occurring Radioactive Materials** in **TENORM – Technologically Enhanced NORM**), največkrat torija ali urana in njihovih potomcev. V teh primerih ne gre za uporabo virov sevanj, pač pa je kopičenje radioizotopov stranski produkt (učinek) neke tehnologije, ki povečuje prisotnost virov sevanj in s tem skupno aktivnost. Zato izvajanje take dejavnosti zahteva uporabo dodatnih zaščitnih ukrepov in postopkov.

Najbolj razširjen primer nenamerne koncentracije radioaktivnih snovi je predelava fosfatov (tovarne fosforne kisline, proizvodnja in uporaba umetnih gnojil in detergentov). Posledica reakcije med fosfatno kamnino (ki je v osnovi kalcijev fosfat) z žveplovo kislino je namreč usedanje radijevega sulfata, ki nastaja iz majhnih količin urana v fosfatni kamnini. Radijev sulfat se nabira na notranjih površinah naprav v tovarnah, kjer zato hitrosti doz dosežejo povečane vrednosti (od 5 do 10 $\mu\text{Gy/h}$, v posameznih primerih pa celo do 50 $\mu\text{Gy/h}$). Največje tveganje v takih primerih je povezano z vzdrževalnimi deli v tovarnah, ki zahtevajo ustrezen pristop. Kontaminirani deli pa so radioaktivni odpadki. Podoben pojav srečamo pri uporabi kalijevih gnojil.

Povečana naravna radioaktivnost (radij, torij in potomci) je na naftnih poljih znana že nekaj desetletij. Pri vrtnanju v vrtine se radioaktivne snovi koncentrirajo v usedlinah v notranjosti cevovodov in opreme. Nastale usedline povzročajo dvojno težavo, kot vir zunanjega sevanja in kot vir kontaminacije pri vzdrževalnih posegih. Specifična aktivnost usedlin lahko doseže vrednosti od 0,5 Bq/g do 5000 Bq/g. Hitrosti doz na stiku naprav z zmerno količino usedlin pa lahko dosežejo vrednosti nekaj deset $\mu\text{Gy/h}$. Kot posledica petrokemijske industrije se v ceveh kopičijo obloge, v katerih je radij ^{226}Ra . Ta pojav so ugotovili tudi pri proizvodnji Ti-dioksida.

Veliko rud vsebuje majhne, vendar ne zanemarljive količine torija ali urana. Sevalno tveganje v teh primerih pride do izraza v določenih delih tehnološkega procesa, npr. pri iskanju, pridobivanju, obogatitvi, ločevanju ter nadaljnji predelavi rud in surovin (nafta, zemeljski plin, rude – pridobivanje aluminija, bakra, cinka, svinca, kositra, posebnih kovin, redkih zemelj). Radioaktivni izotopi običajno ostanejo koncentrirani v žilindri.

Drugi primeri, pri katerih je v industriji tudi možna kontaminacija predmetov in odpadkov (drobirja ...) z naravnimi radioaktivnimi izotopi: pri ustavitvi ali sanaciji objektov proizvodnje in predelave uranove rude, na področju premogovništva, npr. naprave za rudniško odvodnjavanje (kalij ^{40}K , svinec ^{210}Pb , radij ^{226}Ra), v delih naprav vodnogospodarskih dejavnosti, v

industrijskih proizvodih (npr. varilne elektrode, deli strojev, ventilacije ter odvodi dimnih plinov, cirkonij in monazit, ki ju vsebujejo livarski dodatki), v gradbenih materialih (skrilavec, sadra, granit, boksit), v papirni industriji, v optični industriji (cirkonijeve peski), v mulju pri pripravi vode, ognjeodporni materiali (obloge peči), v kemični industriji.



Slika 21: Odlagališče hidrometalurške jalovine.

Osnovna vodila za varstvo pred sevanjem pri NORM ali TENORM so, da se zavedamo možnosti, da je lahko prisotna radioaktivna snov, da se redno izvajajo meritve, s katerimi lahko ugotavljamo morebitno prisotnost sevanj in da vsi sodelujoči poskrbijo za izvajanje primernih zaščitnih ukrepov. Redno čiščenje delovnih prostorov zagotavlja omejevanje širjenja kontaminacije zaradi prisotnosti majhnih količin radioaktivne snovi in preprečuje nenamerno kontaminacijo osebja.

Nenamerna generacija rentgenskih žarkov

Kjer koli imamo prisotno zaustavljanje pospešenih elektronov, se srečamo tudi z zavornim sevanjem. To je lastnost rentgenske cevi, ki jo s pridom uporabljamo v rentgenskih napravah. Tako zavorno sevanje nastane tudi v nekaterih napravah, kjer ga ne želimo. Zato že proizvajalec teh naprav poskrbi za ustrezno zaščito.

Nenameren nastanek rentgenskih žarkov kot tudi zavornega sevanja lahko povzroči tudi kombinacija vakuuma in visoke napetosti.

Primeri, kjer nastajajo rentgenski žarki zaradi zavornega sevanja in jih ne želimo, so: razne varilne naprave, elektronski mikroskopi, visokonapetostna stikala in masni spektrometri. Poleg naštetih sem sodijo še razne visokonapetostne naprave, s katerimi preverjamo prebojnost ter visokonapetostne vakuumske naprave.



Slika 22: Elektronski mikroskop.

Sevalno tveganje pri delu s takimi napravami je običajno zanemarljivo, ker ustrezno izdelana ohišja naprav absorbirajo praktično vse zavorno sevanje. V izjemnih primerih, predvsem pri starejših napravah ali napravah, ki so posebej zgrajene in niso del tipske proizvodnje, obstaja možnost izpostavljenosti sevanju. V teh primerih se moramo posvetovati z izvedencem za varstvo pred sevanji in poskrbeti za ustrezne ukrepe.

Viri sevanj, ki jih uporabljamo za umerjanje naprav

Na številnih področjih uporabljamo vire sevanj za umerjanje najrazličnejše opreme in merilnikov. Viri sevanj, ki jih uporabljamo, so velikokrat nad mejo izvzetja. Najbolj razširjeni viri sevanj, ki jih uporabljamo v ta namen, so cezij ^{137}Cs , plutonij ^{239}Pu , kobalt ^{60}Co in stroncij ^{90}Sr . Običajno imajo ti viri sevanj tako nizke aktivnosti, da niti za uporabnike niti za okolje in prebivalce ne predstavljajo dodatnega tveganja. V primerih, ko so njihove aktivnosti nad mejo izvzetja, je pri njihovi uporabi treba upoštevati zahteve veljavne zakonodaje.

NADZOR NAD VIRI SEVANJ

Pristojni upravni organi

Nadzor nad viri sevanj v državi opravljata ministrstvo, pristojno za okolje (Ministrstvo za okolje in prostor, MOP), in ministrstvo, pristojno za zdravje (Ministrstvo za zdravje, MZ). Upravna organa, ki izvajata nadzor, sta **Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost (URSJV)** in **Uprava Republike Slovenije za varstvo pred sevanji (URSVS)**. Za nadzor in urejanje prevoza radioaktivnih snovi in fizičnega varovanja jedrskih in sevalnih objektov je pristojno tudi Ministrstvo za notranje zadeve.

Upravna organa nadzorujeta izvrševanje zakonov, drugih predpisov in splošnih aktov s področja sevalne oziroma jedrske varnosti z izdajanjem dovoljenj, soglasij in odločb ter inšpekcijskim nadzorom. Poleg tega upravna organa opravljata svetovalno vlogo, skrbita za različne evidence, izvajata mednarodno sodelovanje ter opravljata ostale strokovne in upravne naloge določene s predpisi.

URSJV je pristojen za opravljanje upravnih in strokovnih zadev, ki se nanašajo na:

- jedrsko in sevalno varnost jedrskih objektov,
- promet, prevoz in ravnanje z jedrskimi in radioaktivnimi materiali,
- nadzor in materialno bilanco jedrskih materialov,
- fizično zaščito jedrskih materialov in jedrskih objektov,
- odgovornost za jedrsko škodo,
- usposobljenost osebja uporabnikov jedrskih objektov in njihovo šolanje, ter zagotavljanje kakovosti s tega področja,
- nadzor nad izvajanjem radiološkega monitoringa,
- zgodnje obveščanje ob jedrskih in sevalnih nesrečah,
- mednarodno sodelovanje na področju dela uprave ter na druge naloge, določene s predpisi.

URSVS je pristojen za opravljanje strokovnih in upravnih zadev, ki se nanašajo na naslednja področja:

- izvajanje dejavnosti in uporabe virov sevanj v zdravstvu in veterinarstvu,
- varovanje zdravja ljudi pred škodljivimi vplivi ionizirajočih sevanj,
- sistematično pregledovanje delovnega in bivalnega okolja zaradi izpostavljenosti ljudi naravnim virom sevanj,
- izvajanje monitoringa radioaktivne kontaminacije živil in pitne vode,

- omejevanje, zmanjševanje in preprečevanje zdravju škodljivih vplivov neionizirajočih sevanj,
- mednarodno sodelovanje na področju dela uprave ter na druge naloge, določene s predpisi.

Nadzor okolja in varstvo prebivalcev

V Sloveniji že več desetletij v različnem obsegu izvajamo nadzor okolja in varstvo prebivalcev – monitoring radioaktivnosti v okolju. V začetku je bil namenjen ugotavljanju posledic globalne kontaminacije na našem ozemlju zaradi jedrskih poskusov in černobilske nesreče, pozneje pa tudi ugotavljanju izpostavljenosti v povezavi z delovanjem jedrskih objektov. Namen monitoringa radioaktivnosti je:

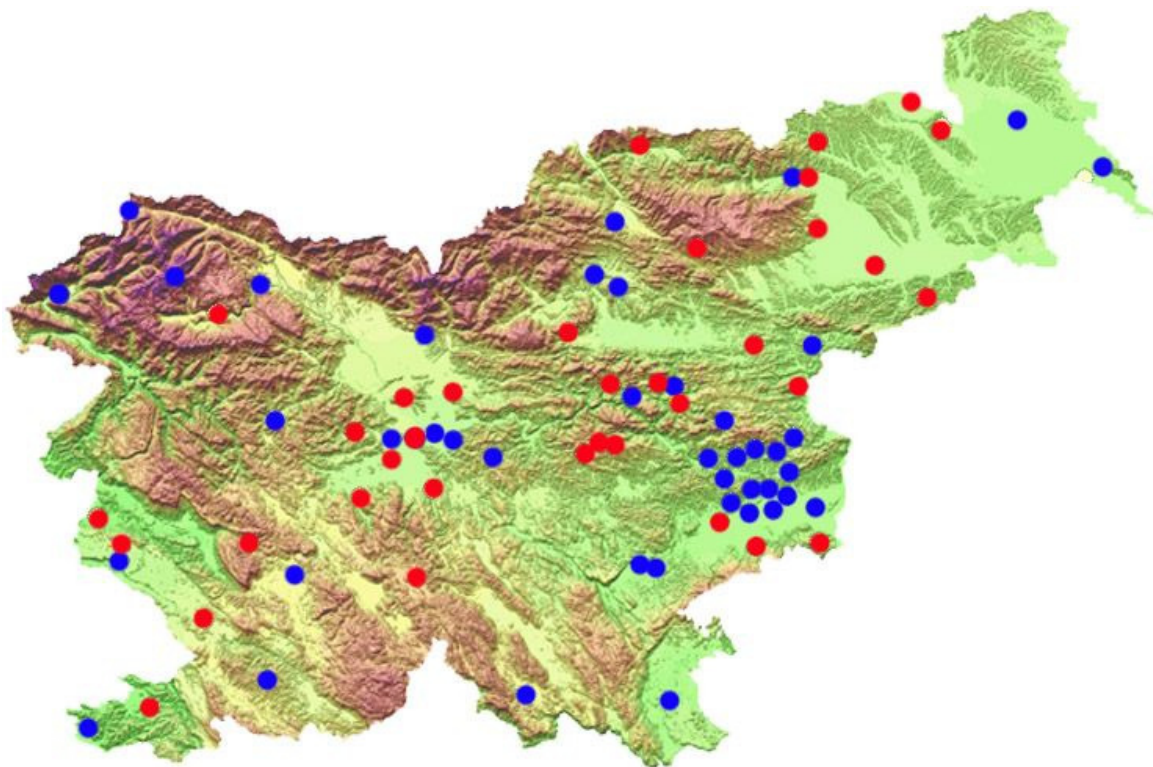
- ocena obremenjenosti prebivalstva zaradi radioaktivnosti v okolju,
- ugotavljanje trendov izpostavljenosti prebivalstva zaradi radioaktivnosti okolja,
- zagotavljanje pridobivanja podatkov za zgodnje ukrepanje v primeru nenadnega povečanja radioaktivnosti v okolju,
- ocena sevalnih vplivov obratovanja jedrskih in sevalnih objektov na okolje.

Monitoring radioaktivnosti v okolju obsega trajno in občasno merjenje radioaktivnosti v zraku, zunanje sevanje gama, vsebnost radionuklidov v površinskih in podzemnih vodah, radioaktivnost tal, padavin, radioaktivnost pitne vode, živil in krme.

Tabela 7: Prejeta doza povprečnega prebivalca Slovenije zaradi radioaktivne kontaminacije okolja v l. 2004 (URSJV, 2005).

Prenosna pot	Efektivna doza [μSv/leto]
Inhalacija (¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr)	<0,01
Ingestija:	
– hrana (¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr)	2,2
– pitna voda (¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr; Ljubljana)	0,05
Zunanje sevanje	6,4
Skupaj v letu 2004 (zaokroženo)	8,6

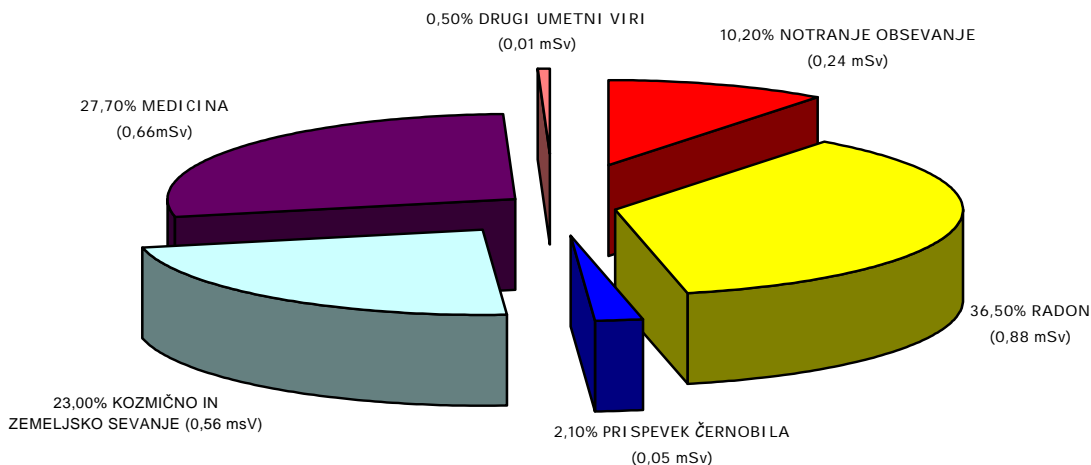
Monitoring radioaktivnosti v okolju poteka v obliki stalnega radiacijskega opozorilnega monitoringa, ki se izvaja z mrežo merilnikov zunanjega sevanja po celi Sloveniji in avtomatskimi merilniki radioaktivnosti zraka ob raziskovalnem reaktorju TRIGA in NE Krško, ter nadzora splošne radioaktivne kontaminacije okolja, ki se izvaja z vzorčenjem in meritvami vzorcev površinskih in pitnih vod, zraka, tal, hrane, živalske krme in meritvami zunanjega sevanja gama na določenih točkah po vsej Sloveniji.



Slika 23: Monitoring radioaktivnosti v Sloveniji.

Podatki so namenjeni spremljanju izvajanja sevalnih dejavnosti in takojšnjemu opozarjanju v primeru povišanih hitrosti doz zunanjega sevanja oziroma kontaminacije zraka zaradi morebitne sevalne ali jedrske nesreče.

Meritve zunanjega sevanja gama v Sloveniji, ki se opravljajo v sklopu nadzora splošne radioaktivne kontaminacije okolja, že več let za povprečno letno vrednost doze zunanjega sevanja gama dajo vrednost 0,8 mSv/leto. Skupni prispevek zunanjega sevanja, prisotnost naravnih radionuklidov v okolju in kozmičnega sevanja pa je 2,4 mSv/leto. Slika 24 prikazuje delež obsevanosti iz posameznih vrst virov sevanj.



Slika 24: Delež obsevanosti iz posameznih vrst virov sevanj.

Radioaktivni odpadki

Radioaktivni odpadki (RAO) so snovi, ki so ostanek od dejavnosti, pri katerih se uporabljajo viri sevanj, in jih ne potrebujemo več. Njihova aktivnost še presega zakonsko določeno mejo za odpravo nadzora, tako da jih ne smemo obravnavati enako kot druge komunalne odpadke. Radioaktivne odpadke je treba odložiti v posebno odlagališče, ki je namenjeno izključno njihovem skladiščenju oziroma dokončnemu odlaganju. V naši državi je za ravnanje z radioaktivnimi odpadki zadolžena Agencija za radioaktivne odpadke (ARAO). Dejavnosti ARAO obsegajo:

- prevzem radioaktivnih odpadkov v objektih in napravah za začasno skladiščenje, njihovo prevažanje v obdelavo, skladiščenje in odlaganje;
- prevzem radioaktivnih odpadkov na kraju nastanka v primeru nesreč z viri sevanj in nesreč pri prevozu radioaktivnih snovi;
- prevzem radioaktivnih odpadkov v primeru, ko povzročitelja radioaktivnih odpadkov ni mogoče ugotoviti ali določiti;
- ravnanje s prevzetimi radioaktivnimi odpadki na predpisan način, tako da ni ogroženo zdravje ljudi zaradi zunanje in notranje obsevanosti in da ne pride do radioaktivnega onesnaženja okolja;

- obdelavo in pripravo radioaktivnih odpadkov za skladiščenje in odlaganje;
- upravljanje Centralnega skladišča radioaktivnih odpadkov v Brinju.

Stroške ravnanja z radioaktivnimi odpadki plača povzročitelj radioaktivnih odpadkov oziroma njihov imetnik, če jih je od povzročitelja prevzel ali pridobil na drug način. Če povzročitelja radioaktivnih odpadkov ni mogoče ugotoviti ali določiti, prevzame odgovornost za ravnanje z radioaktivnimi odpadki država.

RAO delimo na dve skupini glede na aktivnost, vrste radionuklidov in sproščanje toplote: nizko in srednje radioaktivne (NSRAO) in visoko radioaktivne odpadke (VRAO).

Med nizkoradioaktivne odpadke štejemo kontaminirane zaščitne obleke, čistilne pomožne materiale, kontaminirana orodja in podobne predmete, ki se uporabljajo v jedrski elektrarni, pa tudi pomožne materiale iz medicine in znanosti (npr. brizge in steklenina, ki je bila uporabljena pri radioaktivni diagnostiki in terapiji).

Sredneradioaktivni odpadki so predvsem razni filtri in gošče (ti tipično nastajajo v jedrski elektrarni), medicinski izvori za diagnostiko in terapijo ter industrijski izvori.

Nizko- in sredneradioaktivni odpadki vsebujejo večinoma kratkožive radionuklide, tako da se njihova aktivnost v nekaj 100 letih že zelo zmanjša. Zaradi te značilnosti jih zakonodaja obravnava skupaj. Označujemo jih s kratico NSRAO.

Med visokoradioaktivne odpadke prištevamo izrabljeno in predelano jedrsko gorivo. Ti odpadki vsebujejo cepitvene produkte, ki nastanejo v jedrskem gorivu.

NADZOR NAD UPORABO

Pregled veljavnih slovenskih predpisov

Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti

Osnovni dokument, ki ureja varstvo pred ionizirajočimi sevanji in uporabo virov sevanj v Sloveniji, je **Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (uradno prečiščeno besedilo, ZVISJV-UPB2, Ur. list RS, št. 102/2004 z dne 21. 9. 2004)**.

Namen zakona je urejanje varstva pred ionizirajočimi sevanji, zato da se zmanjša škoda za zdravje ljudi in radioaktivna kontaminacija življenjskega okolja zaradi ionizirajočih sevanj zaradi uporabe virov sevanj do najmanjše možne mere in se hkrati omogoči razvoj, proizvodnja in uporaba virov sevanj in izvajanje sevalnih dejavnosti.

Za vir sevanja, ki je namenjen pridobivanju jedrske energije, zakon ureja izvajanje ukrepov jedrske varnosti, in če gre za uporabo jedrskega blaga, tudi posebnih ukrepov varovanja.

Zakon določa tudi organizacijo pristojnih upravnih organov in inšpektorjev.

Poleg splošnih določb zakon vsebuje poglavja o izvajanju sevalnih dejavnosti, varstvu ljudi pred ionizirajočimi sevanji, sevalni in jedrski varnosti, izdaji, podaljšanju, spremembah, odvzemu in prenehanju veljavnosti dovoljenj, fizičnem varovanju jedrskih snovi in jedrskih objektov, neširjenju jedrskega orožja in varovanju jedrskega blaga, spremljanju stanja radioaktivnosti okolja, sanaciji posledic izrednega dogodka, poročilu o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti, zbirkah podatkov o virih sevanj in sevalnih dejavnostih, financiranju varstva pred ionizirajočimi sevanji in jedrske varnosti, nadomestilu za omejeno rabo prostora zaradi jedrskega objekta, upravnih nalogah in inšpekcijskem nadzorstvu, kazenskih odločbah ter prehodne in končne določbe. Zakon vsebuje izhodišča in splošna določila, ki se nanašajo na varstvo pred sevanji, uporabo virov sevanj in jedrsko varnost, podrobnosti oziroma izvršilna določila pa so prepuščena uredbam, ki jih sprejme Vlada RS oziroma pravilnikom, ki jih sprejmejo posamezna ministrstva ali v soglasju z drugimi ministristvi.

I izvršilni predpisi

Po Zakonu o varstvu pred ionizirajočimi sevanji so za pripravo izvršilnih predpisov odgovorni: Vlada RS, Ministrstvo za okolje in prostor, Ministrstvo za zdravje in Ministrstvo za notranje zadeve. Predvidoma bo zakon podprt z desetimi uredbami vlade, ki med ostalim določajo **temeljne varnostne standarde za varstvo zdravja delavcev in prebivalstva pred nevarnostmi zaradi ionizirajočega sevanja**, štirinajstimi pravilniki ministra za okolje in prostor, ki se nanašajo **na področje sevalne in jedrske varnosti**, devetimi pravilniki ministra za zdravje, ki se nanašajo **na varstvo ljudi pred ionizirajočimi sevanji, radiološke posege in uporabo virov sevanj v zdravstvu in veterinarstvu**, ter dvema pravilnikoma ministra za notranje zadeve, ki se nanašata **na fizično varovanje jedrskih snovi, jedrskih objektov in sevalnih objektov**.

Do prve polovice leta 2006 so bile sprejete naslednje **uredbe** oziroma **pravilniki**, ki se nanašajo na izpolnjevanje zakonskih zahtev pred dejanskim začetkom uporabe vira, izpolnjevanje temeljnih varnostnih standardov in zahtev varstva pred sevanji delavcev in prebivalstva med in po prenehanju uporabe vira sevanja, ter zakonskih obveznosti povezanih s tem.

Uredba o sevalnih dejavnostih (Ur. list RS, št. 48/2004, UV1) določa, za katere vire ionizirajočih sevanj ni potrebna priglasitev upravnemu organu; merila za razvrščanje posameznih del v okviru izvajanja sevalnih dejavnosti z odprtimi viri sevanj; kdaj se lahko opusti nadzor nad radioaktivnimi snovmi; sevalne dejavnosti, za katere je treba pridobiti dovoljenje; vrste virov, ki jih je treba vpisati v register virov, in vrste virov, za katere je treba pred uporabo pridobiti dovoljenje za uporabo; merila za razvrščanje objektov med sevalne objekte in manj pomembne sevalne objekte ter merila za časovno veljavnost dovoljenj.

Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih (Ur. list RS, št. 49/2004, UV2) določa mejne doze za izpostavljene delavce, praktikante, študente, nerojene otroke in posameznike – prebivalce; pomen in definicije pojmov in količin, ki se uporabljajo pri izračunu doz; način uporabe mejnih doz in doznih ograd; mejne vrednosti kontaminacije zraka, pitne vode, živil, človekovega telesa, površin delovnega in življenjskega okolja ter različnih izdelkov.

Pravilnik o obveznostih izvajalca sevalne dejavnosti in imetnika virov ionizirajočih sevanj (Ur. list RS, št. 13/2004, SV8) določa merila za razvrstitev in označitev delovišč na nadzorovana in opazovana območja ter pogoje dela in obveznosti delodajalca glede nadzora varstva pred sevanji; merila za razvrstitev izpostavljenih delavcev v kategoriji A in B glede na pričakovano izpostavljenost pri: normalnem delu ter glede na verjetnost in

velikost potencialne izpostavljenosti pri izrednih dogodkih; pogoje, način izvajanja, obseg in pogostost ugotavljanja sevanja na delovnem mestu; poročanje o prejetih dozah v primerih izvajanja intervencijskih ukrepov ali opravljanja izjemnih nalog; obveznosti delodajalca glede posebnega varstva pred sevanji za praktikante in študente; organizacijsko zasnovo enote varstva pred sevanji v jedrskih in sevalnih objektih; zahteve glede izobrazbe, usposabljanja in preverjanja usposobljenosti delavcev, ki delajo v enotah varstva pred sevanji, in odgovornih oseb za varstvo pred sevanji; zahteve glede izobrazbe, usposabljanja, seznanjanja in preverjanje usposobljenosti delavcev, praktikantov in študentov, obveznosti glede varstva pred sevanji delavcev zunanjega izvajalca sevalne dejavnosti.

Pravilnik o pogojih in metodologiji za ocenjevanje doz pri varstvu delavcev in prebivalstva pred ionizirajočimi sevanji (Ur. list RS, št. 115/2003, SV5) določa pogoje za opravljanje izjemnih nalog (ko načrtovane doze presegajo mejne doze), vsebino in obseg ocene varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji ter obliko vloge za potrditev ocene varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji; zahteve glede spremembe ocene varstva izpostavljenih delavcev; metodologijo za ocenjevanje doze zaradi zunanjih sevanj in doze zaradi vnosa radioaktivnih snovi v telo; mejne doze za izpostavljenost radonu; zbiranje in dokumentiranje meritev zunanjih doz; metodologijo za ocenjevanje vnosa radionuklidov in radioaktivne kontaminacije in metodologijo za ocenjevanje doz referenčnih skupin prebivalstva.

Pravilnik o izvajanju zdravstvenega nadzora izpostavljenih delavcev (Ur. list RS, št. 2/2004, SV6) določa obseg in vsebino zdravstvenega nadzora izpostavljenih delavcev, glede na kategorijo njihove razvrstitve in območja virov sevanj, v katerem delo poteka; zdravstvene zahteve, ki jih morajo izpolnjevati delavci; izredni zdravstveni nadzor; dekontaminacijo in nadaljnje zdravljenje delavcev v primerih preseganja mejnih doz; zahteve za presojo ocene izpolnjevanja posebnih zdravstvenih zahtev za določeno delo v delovnem okolju in odrejenih ukrepov zdravstvenega nadzora delavcev; zdravstveni nadzor po prenehanju dela; pogoje, ki jih morajo izpolnjevati pooblaščen zdravniki in evidence zdravstvenega nadzora delavcev.

Pravilnik o pooblašcanju izvajalcev strokovnih nalog s področja ionizirajočih sevanj (Ur. list RS, št. 18/2004, SV7) določa pogoje in način preverjanja izpolnjevanja pogojev za izvajanje del pooblaščenega izvedenca za posamezna področja varstva pred sevanji; pogoje za osebe, ki izvajajo tehnične preglede virov sevanj; pogoje in način preverjanja izpolnjevanja pogojev za izvajanje nalog dozimetrije; osnove organiziranosti službe za dozimetrijo; način preverjanja izpolnjevanja pogojev za izvajanje del pooblaščenega izvedenca medicinske fizike.

Pravilnik o uporabi virov sevanj in sevalni dejavnosti (Ur. list RS, št. 27/2006, JV2-SV2), ki določa tehnične zahteve za tipsko odobritev virov sevanj, obliko priglasitve namere, vsebino vloge za pridobitev dovoljenja za izvajanje sevalne dejavnosti in vsebino vloge za pridobitev dovoljenja za uporabo vira sevanja, ravnanje z viri sevanj, obliko in način vodenja registrov sevalnih dejavnosti, virov sevanj ter jedrskih in sevalnih objektov; v skladu z Direktivo Sveta 2003/122/EURATOM pa določa tudi dodatne zahteve za visokoaktivne vire sevanj in vire sevanj neznanega izvora, da se prepreči čezmerna izpostavljenost delavcev in prebivalstva zaradi nezadostnega nadzora nad visokoaktivnimi viri sevanj in viri sevanj neznanega izvora.

Poleg zgoraj naštetih predpisov so sprejeti še naslednji pravilniki Ministrstva za zdravje:

Pravilnik o delovanju strokovnega sveta za vprašanja varstva ljudi pred ionizirajočimi sevanji, radioloških posegov in uporabe virov sevanj v zdravstvu in veterinarstvu (Ur. list RS, št. 62/2003, SV1), ki določa način delovanja strokovnega sveta ter način in obliko dajanja strokovnih mnenj ter predlogov.

Pravilnik o pogojih za uporabo virov ionizirajočih sevanj v zdravstvu (Ur. list RS, št. 111/2003, SV3), ki določa splošna načela in ureja varstvo pacientov in drugih oseb zaradi medicinske diagnostike in/ali zdravljenja, pri poklicnih preventivnih pregledih, pri programih zgodnje diagnostike; varstvo oseb, ki sodelujejo pri programih diagnostičnega ali terapevtskega medicinskega oziroma biomedicinskega raziskovanja; ureja izpostavljenost v okviru pravno-medicinskih postopkov ter ureja varstvo prostovoljcev, ki pomagajo pri negi in skrbi za udobje pacientov, in drugih oseb, ki so izpostavljeni sevanjem v zdravstvu.

Pravilnik o načinu vodenja evidenc o osebnih dozah zaradi izpostavljenosti ionizirajočim sevanjem (Ur. list RS, št. 33/2004, SV4), ki določa način upravljanja s podatki o osebnih dozah izpostavljenih delavcev; roke za posredovanje podatkov v centralno evidenco doz; obveznosti in način posredovanja podatkov iz centralne evidence doz pristojnemu upravnom organu, izpostavljenim delavcem in delodajalcem ter poročanje in način upravljanja s podatki o opravljenih radioloških posegih.

Pravilnik o uporabi tablet kalijevega jodida (Ur. list RS, št. 142/2004, SV9), ki ureja razdelitev in preventivno uporabo tablet kalijevega jodida v primeru jedrske nesreče.

V postopku sprejemanja so še naslednji pravilniki in uredbe, ki se nanašajo na sevalno varnost in varno uporabo virov sevanj:

- Uredba o merilih za razvrščanje izrednih dogodkov, ki nastanejo pri obratovanju objekta ali uporabi vira sevanja (UV10),
- Pravilnik o zagotavljanju kakovosti v jedrskih in sevalnih objektih (JV5),
- Pravilnik o radioaktivni dekontaminaciji in intervencijah (JV6),
- Pravilnik o radioaktivnih odpadkih (JV7),
- Pravilnik o monitoringu radioaktivnosti (JV10),
- Pravilnik o pogojih za uvoz, izvoz ali tranzit radioaktivnih in jedrskih snovi (JV12), in
- Pravilnik o tipskih odobritvah virov ionizirajočih sevanj (JV13).

Do sprejetja novih pravilnikov se uporabljajo še pravilniki, ki so bili sprejeti po starem zakonu:

- Pravilnik o mestih in časovnih presledkih za sistematične preiskave deleža radionuklidov v življenjskem okolju, o zgodnjem odkrivanju in obveščanju o radioaktivni kontaminaciji življenjskega okolja (Ur. list SFRJ, št. 40/86, Z1),
- Pravilnik o načinu, obsegu in rokih sistematičnih preiskav kontaminacije z radioaktivnimi snovmi v okolici jedrskih objektov (Ur. list SFRJ, št. 51/86, Z2),
- Pravilnik o načinu zbiranja, evidentiranja, obdelave, hrambe, dokončne odložitve in izpuščanja radioaktivnih odpadnih snovi v človekovo okolje (Ur. list SFRJ, št. 40/86, Z3),
- Pravilnik o največjih mejah radioaktivne kontaminacije človekovega okolja in o dekontaminaciji (Ur. list SFRJ, št. 8/87 in 27/90, Z9).

Postopek za pridobitev dovoljenj

Postopek pridobitve dovoljenja za izvajanje sevalne dejavnosti in uporabe vira določa Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti.

Namen postopka je ugotoviti in zahtevati izpolnitev vseh potrebnih pogojev za izvajanje sevalne dejavnosti in varno uporabo vira sevanja ter predvideti zahteve za varstvo delavcev in prebivalstva.

Postopek poteka v treh korakih: prigrasitev namere, pridobitev dovoljenja za izvajanje sevalne dejavnosti in pridobitev dovoljenja za uporabo vira sevanja ali pridobitev potrdila o vpisu v register virov sevanj.

1. korak: prigrasitev namere (9. in 10. člen ZVISJV-UPB2)

Oseba, ki namerava:

- proizvajati, predelovati, uporabljati, skladiščiti, pošiljati, vnašati iz držav članic EU, iznašati v države članice EU, uvažati, izvažati ali

odlagati radioaktivne snovi, jih le posedovati ali z njimi kako drugače rokovati,

- proizvajati, vnašati iz držav članic EU, uvažati, vzdrževati ali izvajati dejavnost z napravo ali opremo, ki sama ali zaradi sestavnih delov oddaja ionizirajoča sevanja zaradi obratovanja pri električni napetosti večji od 5 kV,
- izvajati dejavnost, ki jo določi vlada kot sevalno dejavnost, za katero izvajanje je treba pridobiti dovoljenje,

mora svojo namero priglasiti Upravi RS za jedrsko varnost. Če gre za uporabo radioaktivnih snovi ali naprav ter opreme v zdravstvu ali veterinarstvu ali za izvajanje sevalne dejavnosti v zdravstvu ali veterinarstvu, je namero treba priglasiti Upravi RS za varstvo pred sevanji. 3. člen Uredbe o sevalnih dejavnostih (UV1) določa, kdaj priglasitev ni potrebna.

Za priglasitev namere se šteje tudi:

- vloga za izdajo dovoljenja za uvoz, izvoz in tranzit jedrskih snovi, radioaktivnih odpadkov in izrabljenega goriva,
- vloga za izdajo dovoljenja za uvoz in izvoz radioaktivnih snovi,
- prijava tranzita radioaktivnih snovi,
- vloga za uporabo vira sevanja, če gre za vir sevanja, ki je glede namena rabe in značilnosti ionizirajočega sevanja enak viru sevanja, za katerega je zavezanec že pridobil dovoljenje za uporabo,
- vloga za izdajo okoljevarstvenega soglasja, če gre za izvajanje sevalne dejavnosti v sevalnem objektu ali jedrskem objektu.

Priglasitev namere vsebuje najmanj naslednje podatke:

- ime in sedež gospodarske družbe, zavoda ali druge organizacije ali samostojnega podjetnika posameznika, ki namerava izvajati sevalno dejavnost,
- ime in naslov osebe, ki zastopa izvajalca sevalne dejavnosti,
- podatke o sevalni dejavnosti in uporabljenem viru sevanja, vključno s podatki o lokaciji,
- podatke o začetku in času trajanja izvajanja sevalne dejavnosti oziroma o času vnosa iz držav članic EU, uvoza, nabave, odprodaje, iznosa iz države članice EU, izvoza, odstranitve ali razgradnje vira sevanja.

V roku **5 dni** bo upravni organ stranko obvestil, ali mora za priglašeno dejavnost oziroma vir sevanja **vložiti zahtevo za pridobitev ustreznega dovoljenja**.

2. korak: pridobitev dovoljenja za **izvajanje sevalne dejavnosti** (11. in 12. člen ZVISJV)

Uprava RS za jedrsko varnost izda dovoljenje za:

- upravljanje in razgradnjo sevalnega objekta ali jedrskega objekta,
- namerno dodajanje radioaktivnih snovi pri proizvodnji in izdelovanju predmetov splošne rabe ter uvoz ali izvoz takega predmeta,
- uporabo rentgenskih naprav, virov sevanj in pospeševalnikov delcev, razen elektronskih mikroskopov, če ne gre za uporabo v zdravstvu ali veterinarstvu,
- odlaganje, predelavo ali vnovično uporabo radioaktivnih snovi ali materialov, ki vsebujejo radioaktivne snovi in izvirajo iz uporabe virov sevanj ali izvajanja sevalnih dejavnosti,
- za izdelovanje ali razvoj opreme in tehnologije, ki je jedrsko blago,
- za prevoz jedrskih snovi,
- vzdrževanje, proizvodnjo, umerjanje ali druga podobna dela, ki se jih izvaja na virih sevanj, če to ni vključeno v katero od prej navedenih dejavnosti,
- izvajanje del v nadzorovanem območju, če iz ocene varstva izpostavljenih delavcev sledi, da bi lahko delavci prejeli učinkovito dozo nad mejno dozo za posameznika iz prebivalstva (8. člen Uredbe o sevalnih dejavnostih, UV1).

Uprava RS za varstvo pred sevanji izda dovoljenje za:

- namerno dodajanje radioaktivnih snovi pri proizvodnji in izdelovanju zdravil ter uvoz ali izvoz takega zdravila,
- namerno dajanje radioaktivnih snovi osebam za medicinsko zdravljenje ali raziskave,
- namerno dajanje radioaktivnih snovi živalim za veterinarski pregled, zdravljenje ali raziskave, če to vpliva na izpostavljenost,
- uporabo rentgenskih naprav, virov sevanj in pospeševalnikov delcev v zdravstvu ali veterinarstvu, razen elektronskih mikroskopov,
- opravljanje tehničnih pregledov virov sevanj, ki se jih uporablja pri izvajanju sevalne dejavnosti v zdravstvu in veterinarstvu,
- vzdrževanje, umerjanje ali druga podobna dela, ki se jih izvaja na virih sevanj, če to ni vključeno v katero od prej navedenih dejavnosti.

Vlogi je treba priložiti:

- podatke o organizacijski enoti varstva pred sevanji (jedrski ali sevalni objekti) ali odgovorni osebi za varstvo pred sevanji (sklep o imenovanju z navedenimi pooblastili, dokazila o usposobljenosti), ki je lahko tudi zunanji sodelavec, če je to v skladu z oceno varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji,

- oceno varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji (ki jo lahko po posvetu s pooblaščenim izvedencem izdelata izvajalec sevalne dejavnosti oziroma jo izdelata pooblaščen izvedenec varstva pred sevanji oziroma pooblaščen organizacija), ki mora biti izdelana po metodologiji, določeni v Pravilniku o pogojih in metodologiji za ocenjevanje doz pri varstvu delavcev in prebivalstva pred ionizirajočimi sevanji (Pravilnik SV5),
- potrdilo ocene varstva izpostavljenih delavcev, ki ga izda Uprava RS za varstvo pred sevanji,
- tehnično dokumentacijo o vrsti uporabljenega vira sevanja,
- podatke o načinu uporabe ter ukrepih varstva pred sevanji glede uporabljene vrste virov sevanj.

Najkasneje v 60 dneh bo upravni organ izdal dovoljenje, ki velja samo do določenega datuma. Hkrati z izdajo dovoljenja bo upravni organ sevalno dejavnost vpisal v **register sevalnih dejavnosti**.

3. korak: pridobitev dovoljenja za uporabo vira sevanja ali potrdila o vpisu v register virov sevanj (9. člen UV1)

Dovoljenje za uporabo vira sevanja je treba pridobiti za:

- zaprti vir sevanja, pri katerem aktivnost ali specifična aktivnost več kot 10-krat presega raven izvzetja za aktivnost oziroma za specifično aktivnost,
- napravo z zaprtim virom sevanja, pri kateri hitrost doze, ki jo izmerimo 10 cm od katere koli dostopne površine naprave, v kateri je zaprti vir sevanja, presega 1 $\mu\text{Sv/h}$,
- električno napravo, ki deluje pri napetosti nad 30 kV in pri kateri hitrost doze 10 cm od katere koli dostopne površine presega 1 $\mu\text{Sv/h}$,
- odprti vir sevanja, katerega aktivnost presega raven izvzetja,
- za spremembe na viru sevanja ali pri njegovi uporabi, če:
 - gre za poseg ali spremembo na viru sevanja, ki lahko vpliva na pogoje varstva pred ionizirajočimi sevanji,
 - se vir sevanja, ki se uporablja kot nepremičen vir, premesti v drug prostor istega objekta ali v drug objekt.

Vlogi je treba priložiti:

- oceno varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji,
- tehnično dokumentacijo o viru sevanja, pogojih za njegovo uporabo in hrambo, ukrepih varstva pred sevanji v zvezi z uporabo, o vzdrževanju, ravnanju ob izrednih dogodkih in ravnanju z odpadnimi radioaktivnimi snovmi,
- podroben opis vira sevanja in opis prostora, kjer se bo vir sevanja uporabljal,

- opis ukrepov varstva posameznikov pred sevanji in fizičnega varovanja vira sevanja,
- načrt ravnanja z radioaktivnimi odpadki, ki nastajajo zaradi uporabe vira sevanja,
- opis izpustov odpadnih radioaktivnih snovi v okolje,
- veljavno dovoljenje za izvajanje sevalne dejavnosti,
- dokazilo, da je bila priglašena namera o uporabi vira sevanja (če je ta predpisana).

Upravni organ bo najkasneje v 60 dneh izdal dovoljenje za uporabo vira sevanja, ki bo veljalo samo do določenega datuma in bo vsebovalo navedbo obveznosti lastnika dovoljenja glede tehničnih pregledov in vzdrževanja vira ter ukrepe po prenehanju veljavnosti dovoljenja.

Potrdilo o vpisu v register virov sevanja je treba pridobiti za:

- zaprti vir sevanja, pri katerem aktivnost ali specifična aktivnost presega raven izvzetja za aktivnost oziroma za specifično aktivnost, vendar ne več kot 10-krat,
- napravo z zaprtim virom sevanja, pri kateri hitrost doze, izmerjene 10 cm od katere koli dostopne površine naprave, v kateri je zaprti vir sevanja, ni večja od 1 $\mu\text{Sv/h}$, za napravo pa ni odobrena tipska odobritev skladno s predpisi o tehničnih zahtevah za proizvode in o ugotavljanju skladnosti,
- električno napravo, ki deluje pri napetosti, ki ni večja od 30 kV, in pri kateri hitrost doze, izmerjene 10 cm od katere koli dostopne površine naprave, ni večja od 1 $\mu\text{Sv/h}$, za napravo pa ni odobrena tipska odobritev skladno s predpisi o tehničnih zahtevah za proizvode in o ugotavljanju skladnosti,
- vir sevanja, ki zamenjuje izrabljeni vir sevanja, za katerega uporabo je bilo pridobljeno dovoljenje za uporabo vira sevanja, če je bila v dovoljenju določena občasna zamenjava vira sevanja in če zamenjava ne vpliva na pogoje varstva pred ionizirajočimi sevanji iz dovoljenja za uporabo vira sevanja.

Vlogi je treba priložiti veljavno dovoljenje za izvajanje sevalne dejavnosti.

Za vlogo za vpis v register virov sevanja se šteje tudi vlagateljova priglasitev namere o nakupu ali drugem načinu pridobitve vira sevanja (14. člen ZVISJV-UPB2). Upravni organ najkasneje v 30 dneh izda potrdilo o vpisu v register virov sevanja.

Dovoljenja ali potrdila o vpisu vira sevanj v register **ni treba pridobiti** za uporabo javljalnikov požarov, ki vsebujejo izotop americij ²⁴¹Am z aktivnostjo, ki ne presega 3 MBq, če hitrost doze 10 cm od katerekoli dostopne površine javljalnika požarov ni večja od 1 $\mu\text{Sv/h}$.



Slika 25: Postopek pridobivanja dovoljenj.

Pridobitev potrdila za zunanje izvajalce

Zunanji delavci ali delavci zunanjega izvajalca sevalne dejavnosti, ki občasno opravljajo dela v nadzorovanem območju sevalnega ali jedrskega objekta, morajo izpolnjevati enake zahteve za varstvo delavcev, kot jih morajo izpolnjevati delavci imetnika dovoljenja za izvajanje sevalne dejavnosti. Za izpolnjevanje zahtev je odgovoren zunanji izvajalec, neposredno odgovornost za specifične zahteve varstva pred sevanji v nadzorovanih območjih pa nosi upravljavec objekta, v katerem delavci zunanjega izvajalca izvajajo dela.

Če gre za tujo pravno osebo, ki izvaja dela v nadzorovanem območju, mora zunanji izvajalec pridobiti potrdilo za opravljanje sevalne dejavnosti, kot to zahteva zakon. Potrdilo se izda na osnovi dovoljenja za izvajanje sevalne dejavnosti, ki je izdano v matični državi zunanjega izvajalca, pod pogoji in po postopkih, ki so enakovredni pogojem in postopkom za pridobitev dovoljenja za izvajanje sevalne dejavnosti po ZVISJV. Vlogi za pridobitev potrdila je treba priložiti overjen prevod originalnega dovoljenja in pooblastilo za zastopanje domačega zastopnika. V kolikor izdaja potrdila ni možna, zunanji izvajalec lahko pridobi tudi dovoljenje po postopku, ki je opisan v prejšnjem poglavju.

Med zunanje izvajalce sevalne dejavnosti se štejejo tudi delavci, ki servisirajo ali zamenjujejo vir sevanja in morajo prav tako dobiti dovoljenje za izvajanje sevalne dejavnosti.

Izpolnjevanje temeljnih zahtev

Odgovornost za izpolnjevanje zahtev temeljev varstva pred sevanji je odgovornost tako imetnika vira oziroma tistega, ki je pridobil dovoljenje za izvajanje sevalne dejavnosti in uporabo vira in ta vir uporablja, ali je delodajalec, kot tudi tistih, ki s temi viri delajo (23. člen ZVISJV).

Zaradi varstva izpostavljenih delavcev, praktikantov in študentov mora delodajalec pri izvajanju sevalne dejavnosti:

- zagotoviti izdelavo ocene varstva izpostavljenih delavcev in izdelati načrt optimizacije varstva ljudi in okolja pred ionizirajočimi sevanji v vseh delovnih pogojih,

Ocena varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji je strokovna ocena, s katero se predhodno oceni naravo in velikost sevalnega tveganja za izpostavljene delavce, praktikante in študente. Obliko in vsebino ocene varstva določa Pravilnik o pogojih in metodologiji za ocenjevanje doz pri varstvu delavcev in prebivalstva pred ionizirajočimi sevanji (SV5).

- predhodno pregledati načrte prostorov in naprav glede varstva pred sevanji,

V postopku strokovne presoje, ki je del priprave ocene varstva izpostavljenih delavcev, pooblaščenim izvedencem pregleda načrte prostorov in naprav (tehnično dokumentacijo). Ustrezne načrte je treba priložiti tudi vlogi za izdajo dovoljenja za izvajanje sevalne dejavnosti in vlogi za izdajo dovoljenja za uporabo vira sevanja.

- razvrstiti in označiti delovišča v nadzorovana ali opazovana,

Merila za razvrstitev in označitev delovišč na nadzorovana in opazovana območja ter pogoje dela in obveznosti delodajalca na nadzorovanih in opazovanih območjih glede nadzora varstva pred sevanji določa Pravilnik o obveznostih izvajalca sevalne dejavnosti in imetnika vira ionizirajočih sevanj (SV8). Za razvrstitev delovišč in določitev mej je odgovoren delodajalec, ki razvrstitev in razmejitev opravi v sodelovanju s pooblaščenim izvedencem varstva pred sevanji ter je del ocene varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji.

- razvrstiti izpostavljene delavce v dve kategoriji glede na doze in tveganja,

Razvrstitev delavcev v kategoriji A in B se opravi zato, da se določi ustrezen nadzor izpostavljenih delavcev (podrobnejša določila o nadzoru so v Pravilniku o obveznostih izvajalca sevalne dejavnosti in imetnika vira ionizirajočih sevanj, SV8, in v Pravilniku o izvajanju zdravstvenega nadzora izpostavljenih delavcev, SV6).

- izdelati pisne delovne postopke in jih izvajati,

Različni pisni postopki so del administrativnega zagotavljanja sevalne varnosti in nadzora (Pravilnik o obveznostih izvajalca sevalne dejavnosti in imetnika vira ionizirajočih sevanj, SV8) kot tudi del širšega sistema zagotavljanja kakovosti. Delavci morajo biti seznanjeni s postopki in jih uporabljati pri svojem delu. Zahteva obsega izdelavo in uporabo pisnih postopkov in navodil, povezanih z obratovanjem ali upravljanjem objekta ali uporabo vira sevanja, ter seznanitev delavcev s postopki oziroma navodili; pisna navodila morajo vsebovati opis poteka dela, zaščitne ukrepe za delavce, ki delajo v nadzorovanem območju, ukrepe v primeru izrednega dogodka ter imena in naloge oseb, odgovornih za varstvo pred sevanji; navodila morajo biti izdelana glede na vrsto in lastnosti vira sevanja ter dela s tem virom v jeziku, ki ga delavec razume; navodila morajo biti na razpolago na delovnem mestu, nameščena ločeno za vsak vir ali opravilo posebej.

- usposabljanje delavcev, praktikante in študente glede varstva pred sevanji, obnavljanje znanja in preverjanje usposobljenosti,

Usposabljanje iz varstva pred sevanji izvajajo pooblaščen pravne osebe. Seznam izobraževalnih programov ter program in način opravljanja strokovnega izpita za opravljanje nalog varstva pred sevanji in odgovorne osebe za varstvo pred sevanji ter obseg, vsebine in pogoje seznanjanja, usposabljanja in preverjanja usposobljenosti izpostavljenih delavcev, praktikantov in študentov določa Pravilnik o obveznostih izvajalca sevalne dejavnosti in imetnika vira ionizirajočih sevanj (SV8). Delavci organizacijskih enot varstva pred sevanji in odgovorne osebe v določenih dejavnostih opravljajo strokovni izpit vsaki dve leti, ostale odgovorne osebe pa na pet let. Delavci opravljajo izpit iz varstva pred sevanji vsakih pet let.

- jih seznanjati s tehničnimi, z zdravstvenimi in administrativnimi postopki glede upravljanja ali uporabe vira sevanja, pisnimi postopki za delo,
- jih seznaniti o tveganjih za zdravje, posebej pa seznaniti ženske o nujnosti zgodnje naznanitve nosečnosti in dojenja,

Takoj ko noseča ženska delodajalca obvesti o nosečnosti, jo mora delodajalec premestiti na delovno mesto, kjer se ne dela z viri sevanj. Če pa noseča ženska sama želi še naprej delati z viri sevanj, ji mora delodajalec zagotoviti take pogoje, da bo ekvivalentna doza za nerojenega otroka tako nizka, kot je to razumno mogoče doseči, in da ta doza v preostalem obdobju nosečnosti ne bo preseгла mejne doze za posameznika iz prebivalstva (1 mSv). Delodajalec mora doječo žensko takoj, ko ga ta obvesti o svojem stanju, začasno premestiti na delovno mesto, kjer ni tveganja za radioaktivno kontaminacijo telesa (20. člen ZVISJV).

- izvajati nadzorne ukrepe vključno z meritvami sevanja v delovnem okolju in osebno dozimetrijo,

Način ugotavljanja izpostavljenosti delavca določa Pravilnik o obveznostih izvajalca sevalne dejavnosti in imetnika vira ionizirajočih sevanj (SV8). Metodologijo določanja izpostavljenosti določa Pravilnik o pogojih in metodologiji za ocenjevanje doz pri varstvu delavcev in prebivalcev pred ionizirajočimi sevanji (SV5), vodenje evidenc o prejetih dozah pa Pravilnik o načinu vodenja evidenc o osebnih dozah zaradi izpostavljenosti ionizirajočim sevanjem (SV4).

- zagotoviti dovolj zaščitne opreme in preverjati njeno učinkovitost ter postopkov zaščite in reševanja,

Potrebna zaščitna in osebna varovalna oprema za delo z virom ionizirajočih sevanj je določena v oceni varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji. V oceni so navedena tudi potrebna zaščitna sredstva in načrt ukrepov za preprečevanje izrednih dogodkov ter načrt ukrepov za odpravo posledic izrednega dogodka. Osnovne zahteve glede osebne varovalne opreme so podane v 13. členu Pravilnika o obveznostih izvajalca sevalne dejavnosti in imetnika vira ionizirajočih sevanj (SV8). Brezhibnost in učinkovitost opreme se preverja najmanj enkrat na leto, pri zaščitnih sredstvih, ki se uporabljajo pri delu z odprtimi viri razreda I in II, pa najmanj enkrat na pol leta.

- redno umerjati merilnike in preverjati pravilnost uporabe,

Zahteve glede merilne opreme podaja Pravilnik o obveznostih izvajalca sevalne dejavnosti in imetnika vira ionizirajočih sevanj (SV8). Delodajalec je za izvajanje nadzornih meritev dolžan zagotoviti merilno opremo ustrezne kakovosti glede na namen uporabe, o čemer se posvetuje s pooblaščenim izvedencem varstva pred sevanji. Merilna oprema mora biti umerjena pri ustanovi, ki je akreditirana za umerjanje ali ima tak status na osnovi mednarodnih dogovorov. Delodajalec mora voditi dnevnik preverjanj merilne opreme ter hraniti dokumentacijo o merilni opremi, popravilih opreme in umerjanjih.

- zagotoviti zdravstveni nadzor,

Zdravstveni nadzor izpostavljenih delavcev zagotavlja delodajalec, izvajajo pa pooblaščeni zdravniki. Zdravstveni nadzor se lahko nadaljuje tudi po prenehanju dela (na osnovi pobude pooblaščenega zdravnika in odredbi Ministrstva za zdravje). Podrobnejša določila glede zdravstvenega nadzora izpostavljenih delavcev so v Pravilniku o izvajanju zdravstvenega nadzora izpostavljenih delavcev (SV6). Pravilnik določa obseg in vsebino zdravstvenega nadzora izpostavljenih delavcev glede na kategorijo njihove razvrstitve in območja virov sevanj, v katerem delo poteka, ter zdravstvene zahteve, ki jih morajo izpolnjevati izpostavljeni delavci, nadzor po prenehanju zaposlitve, izredni zdravstveni nadzor, ravnanje v primeru preseganja mejnih doz in zahteve glede vodenja evidenc, pogoje, ki jih morajo za izvajanje zdravstvenega nadzora izpolnjevati pooblaščeni zdravniki.

Glede zdravstvenega nadzora moramo razlikovati med kategorijama delavcev A in B. Poleg preventivnih zdravstvenih pregledov, ki se opravijo pred začetkom dela, se izvajajo tudi usmerjeni obdobjni zdravstveni pregledi, ki se opravijo enkrat na leto za izpostavljene

delavce kategorije A in enkrat na tri leta za izpostavljene delavce kategorije B.

- takoj obvestiti pristojna ministrstva v primerih preseganja mejnih doz, kontaminacije delovnega okolja ali izrednega dogodka.

Zagotovljena mora biti priprava in seznanitev delavcev s postopki za ukrepanje ob izrednih dogodkih ter zagotovitev potrebne opreme. Zagotovljeno mora biti obveščanje pristojnih organov v primeru preseganja mejnih doz, kontaminacije delovnega okolja ali izrednih dogodkov.

Ne glede na obveznosti delodajalca mora izpostavljeni delavec, praktikant in študent, kolikor je mogoče, sam prispevati k izvajanju ukrepov varstva pred sevanji.

Vodenje različnih evidenc

Osnovne evidence, ki jih vodijo upravni organi, so register sevalnih dejavnosti, register virov sevanj in register sevalnih in jedrskih objektov:

- register sevalnih dejavnosti vsebuje podatke o izvajalcih sevalnih dejavnosti in z njimi povezano zbirko listin,
- register virov sevanj vsebuje podatke o priglašeni virih sevanj, virih sevanj, za katere je bilo izdano potrdilo o vpisu v register, in virih sevanj, za katere je bilo izdano dovoljenje za uporabo in z njimi povezano zbirko listin,
- register sevalnih in jedrskih objektov vsebuje podatke o objektih, ki imajo status sevalnega objekta, manj pomembnega sevalnega objekta ali status jedrskega objekta in z njimi povezano zbirko listin.

Evidence zdravstvenega nadzora izpostavljenih delavcev vodijo in dopolnjujejo v pisni ali elektronski obliki izvajalci zdravstvenega nadzora izpostavljenih delavcev v skladu z Zakonom o zbirkah podatkov s področja zdravstvenega varstva (Uradni list RS, št. 65/00).

Zbiranje podatkov o **osebnih dozah izpostavljenih delavcev** določa 33. člen ZVISJV in Pravilnik o načinu vodenja evidenc o osebnih dozah zaradi izpostavljenosti ionizirajočim sevanjem. **Zbirke podatkov o osebnih dozah izpostavljenih delavcev** upravljajo:

- delodajalci za osebne doze svojih in zunanjih delavcev,
- pooblaščen zdravniki za osebne doze izpostavljenih delavcev, za katere opravljajo zdravstveni nadzor,

- Uprava RS za varstvo pred sevanji za osebne doze vseh izpostavljenih delavcev. Podatke o dozah delavcev sporoča URSVS pooblaščen izvajalec dozimetrije.

Delodajalci morajo voditi **evidenco radioaktivnih snovi, aparatov in naprav z vgrajenimi viri sevanj ter rentgenskih in drugih aparatov, ki proizvajajo ionizirajoče sevanje** ter jih najmanj enkrat letno popisati.

Poleg tega morajo delodajalci zagotoviti pogoje za hrambo ter **evidenco kroženja in porabe virov sevanj**, da se prepreči njihova izguba ali nekontrolirana uporaba.

Če gre za premični vir ionizirajočih sevanj, mora delodajalec **voditi evidence nadzorovanih območij** (4. člen SV8).

Delo odgovorne osebe

Izvajalec sevalne dejavnosti, ki ne upravlja jedrskega ali sevalnega objekta, mora imenovati **odgovorno osebo za varstvo pred sevanji**, ki izpolnjuje pogoje, zapisane v 28. členu Pravilnika SV8.

Odgovorna oseba za varstvo pred sevanji skrbi za visoko varnostno kulturo in dobro stanje varstva pred sevanji, zlasti pa za:

- načrtovanje in izvajanje ukrepov varstva pred sevanji v skladu z ZVISJV,
- izdelavo pisnih postopkov za nadzorovanje nadzorovanega območja, vodenje evidenc nadzorovanih območij (če gre za premični vir) in pisnih navodil za varno delo na nadzorovanem območju,
- pravočasno napotitev izpostavljenih delavcev na zdravniški pregled v skladu s predpisom, ki določa obseg zdravstvenega nadzora izpostavljenih delavcev, ki delajo na opazovanem in nadzorovanem območju,
- pravočasno napotitev delavcev na obnavljanje znanja iz varstva pred ionizirajočimi sevanji,
- obveščanje delodajalca in delavcev glede vsega potrebnega s področja varstva pred sevanji.

Izvajalec sevalne dejavnosti, ki ne upravlja jedrskega ali sevalnega objekta, lahko za odgovorno osebo za varstvo pred sevanji imenuje tudi zunanjega sodelavca, če je to v skladu z oceno varstva izpostavljenih delavcev.

Delo pooblaščenega izvedenca

Pooblaščen izvedenec za varstvo pred sevanji je pravna ali fizična oseba, ki jo pooblasti pristojno ministrstvo. Imeti mora zahtevano izobrazbo in biti usposobljena za izvajanje fizikalnih, tehničnih oziroma radiološkokemijskih testov, ki so potrebni za ocenjevanje doz ter za svetovanje pri ukrepih varstva prebivalstva pred sevanji.

Delodajalci se s pooblaščenimi izvedenci posvetujejo o izdelavi ocene varstva izpostavljenih delavcev pred sevanji, delovnih pogojih izpostavljenih delavcev, obsegu izvajanja ukrepov varstva pred sevanji na opazovanih in nadzorovanih območjih, preverjanju učinkovitosti teh ukrepov, rednem umerjanju merilne opreme in preverjanju uporabnosti zaščitne opreme.

Pooblaščen izvedenci morajo o svojem delu redno poročati pristojnemu ministrstvu.

Prevoz, vnos-iznos, uvoz-izvoz in tranzit

Za prevoz radioaktivnih snovi se uporabljajo **določbe Zakona o prevozu nevarnega blaga (ZPNB, Ur. list RS, št. 79/1999, 96/02, 2/04 in 101/05)**. Zakon o prevozu nevarnega blaga ureja pogoje za prevoz nevarnega blaga za posamezne vrste prometa, dolžnosti oseb, ki sodelujejo pri prevozu, pogoje za embalažo in vozila, imenovanje varnostnega svetovalca, usposabljanje oseb, ki sodelujejo pri prevozu, pristojnosti državnih organov in nadzor nad izvrševanjem zakona. Zakon velja za prevoz nevarnega blaga v cestnem prometu, v železniškem prometu, po morju in celinskih vodah ter v zračnem prometu.

Mednarodni cestni prevoz nevarnega blaga ureja evropski sporazum - ADR.

Za vnos iz in iznos v države članice EU, za uvoz in izvoz ter tranzit jedrskih in radioaktivnih snovi se uporabljajo **določbe Zakona o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (ZVISJV-UPB2, Ur. list RS, št. 102/04)**. URSJV izdaja **dovoljenja** za vnos iz in iznos v države članice EU, za uvoz in izvoz ter za tranzit jedrskih in radioaktivnih snovi. URSVS izdaja **dovoljenja** za vnos iz in iznos v države članice EU, za uvoz in izvoz ter za tranzit radioaktivnih snovi, ki se uporabljajo v zdravstvu ali veterinarstvu.

V postopku izdaje dovoljenj se presoja ukrepe sevalne in jedrske varnosti v celotnem poteku odpošiljanja radioaktivnih snovi na ozemlju Republike Slovenije. Dovoljenje se izda samo, če ima prejemnik teh snovi dovoljenje za izvajanje sevalne dejavnosti.

DODATKI

Dodatek 1: Količine in enote

Aktivnost je število razpadov v časovni enoti (enota: $Bq = s^{-1}$). Določena je kot količnik $A = \frac{dN}{dt}$, pri čemer je dN pričakovano število spontanih jedrskih prehodov v časovnem intervalu dt .

Razpolovni čas predstavlja čas, ki je potreben, da aktivnost določenega radioaktivnega izotopa pade na polovico njegove začetne vrednosti.

Energija ionizirajočega sevanja (E ; enota: J, eV) je energija, ki se emitira, prepusti ali zadrži v nekem izvoru ali materialu (energija gama žarkov, energija beta žarkov, energija alfa žarkov).

Povprečna ionizacijska energija ($W = \frac{E}{N}$; enota: J, eV) je količnik začetne energije ionizirajočih delcev, ki se prenese v snov, in povprečnega števila nastalih ionskih parov. Vrednost \bar{N} vključuje tudi ione, ki se ustvarijo s pomočjo zavornega sevanja ali kake druge vrste sekundarnega sevanja.

Predana energija ($E = E_{in} - E_{out} + \sum Q$; enota: J, eV) predstavlja energijo ionizirajočega sevanja, ki je predana snovi v dani prostornini. E_{in} je energija sevanja, ki vpade v snov – vsota energije, brez mirovne energije – vseh naelektrenih in naelektrenih ionizirajočih delcev, ki so vpadli v snov. E_{out} je energija sevanja, ki izide iz snovi – vsota vseh energij, brez mirovne energije, vseh naelektrenih ionizirajočih delcev, ki zapustijo prostornino. $\sum Q$ je vsota vseh sprememb (povečanj in zmanjšanj) mirovnih energij jeder in elementarnih delcev v katerikoli jedrski transformaciji, ki poteka v opazovanem delu snovi.

Absorbirana doza ($D = \frac{d\bar{E}}{dm}$; enota: $Gy = Jkg^{-1}$), je količnik srednje predane energije $d\bar{E}$ in mase obsevanega materiala dm . Absorbirana doza je seštevek vseh vrst sevanja, ki obstaja v polju sevanja, ki ga obravnavamo.

Kerma ($K = \frac{dE_{tr}}{dm}$; enota: $Gy = Jkg^{-1}$) je kratica za Kinetic Energy Released in Material. Kot dozimetrična količina se uporablja kot ocena učinka

neposrednega ionizirajočega sevanja v snovi. Definirana je kot vsota vseh začetnih kinetičnih energij vseh naelektrenih ionizirajočih delcev, sproščenih zaradi nenaelektrenih ionizirajočih delcev, dE_{ir} in obsevanega materiala mase dm .

Ekspozicija ali obsevna doza ($X = \frac{dQ}{dm}$; enota: $\text{As}\cdot\text{kg}^{-1}$) je količnik

absolutne vrednosti skupnega naboja ionov enakega predznaka v zraku, dQ (kadar so vsi elektroni sproščeni/ustvarjeni s pomočjo ionizirajočih fotonov, popolnoma zaustavljeni), in mase zraka v opazovanem prostoru.

Ekvivalentna doza ($H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$; enota: $\text{Sv} = \text{Jkg}^{-1}$) je, kadar

sestavljajo sevalno polje različna sevanja z različnimi vrednostmi w_R in je $D_{T,R}$ povprečna absorbirana doza v organu ali tkivu T , definirana kot seštevek produktov utežnih faktorjev sevanja in povprečnih absorbiranih doz v organih ali tkivih.

Efektivna doza ($E = \sum_T w_T H_T$; enota: $\text{Sv} = \text{Jkg}^{-1}$) je definirana kot seštevek

ekvivalentnih doz, ki so vsaka posebej pomnožene z ustreznim tkivnim utežnim faktorjem, pri čemer je H_T ekvivalentna doza v tkivu T in w_T tkivni utežni faktor za tkivo T .

Dodatek 2: Računski primeri

Ovisnost hitrosti doze od oddaljenosti vira sevanja

Pri pripravi dela, predvsem na terenu, moramo delovišče ograditi na takšni oddaljenosti od (točkastega) vira sevanja, da zunaj postavljenih ovir hitrosti doz ne bodo presegale vrednosti, ki jih imamo določene v oceni varstva pred sevanji. Pri virih gama žarkov hitrost doze (v mGy/h) na neki določeni razdalji od točkastega vira lahko izračunamo, če poznamo aktivnost vira in vrsto vira:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\Gamma \cdot A_C}{r^2} \quad \Leftrightarrow \quad \text{hitrost doze} = \frac{\text{gama faktor} \times \text{aktivnost}}{(\text{razdalja})^2},$$

pri čemer je

Γ - faktor, v katerem je **upoštevana vrsta vira**. V Tabeli 8 so podane vrednosti za nekatere vire. Pri uporabi vrednosti za Γ moramo biti pozorni na enote – tabelirane vrednosti so v $\frac{mGy \cdot m^2}{h \cdot GBq}$;

A_C - **aktivnost** vira v **GBq**. Hitrost doze je premo sorazmerna aktivnosti vira;

r - **razdalja** v m. Ovisnost od razdalje je **obratno sorazmerna kvadratu razdalje**. Zato hitrost doze hitro pada, ko se oddaljujemo od vira. Tudi obratno velja, hitrost doze hitro narašča, ko se viru približujemo. Pri majhnih razdaljah hitrost doze močno naraste, in zato virov **nikoli** ne prijemamo z rokami, ampak samo s primernim orodjem (pincete, posebne prijemalke, manipulator).

Tabela 8: Γ faktorji za nekatere vire sevanj.

izotop	$\Gamma \left[\frac{mGy \cdot m^2}{h \cdot GBq} \right]$
^{60}Co	0,35
^{99m}Tc	0,022
^{131}I	0,059
^{137}Cs	0,081
^{192}Ir	0,13
^{226}Ra	0,22

Pri večjih virih, ki niso točkasti (npr. palica, plošča ali tla s kontaminirano površino), je hitrost doze približno obratno sorazmerna z oddaljenostjo od vira.

Ocena aktivnosti najdenega vira sevanja

Velikokrat se zgodi, da najdemo vir sevanja, z merilniki pomerimo hitrosti doz, če imamo na voljo merilnik, ki omogoča spektrometrijo, lahko določimo, za kateri vir sevanja gre – oceniti pa moramo njegovo aktivnost. Vir sevanja je po navadi zaščiten v vsebniku, ki je lahko iz svinca ali osiromašenega urana. Ocenimo debelino ščita in izračunamo število razpolovnih debelin materiala, iz katerega je vsebnik (ali deset debelin). Iz enačbe

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{\text{zašč.}} = \left(\frac{dD}{dt}\right)_{\text{nezašč.}} \cdot \frac{1}{2^N}$$

izračunamo hitrost doze v primeru, da vir ne bi bil zaščiten. Iz izračunanega podatka, izbrane oddaljenosti od vira (npr 0,1 m) in enačbe

$$\frac{dD}{dt} = \Gamma \cdot \frac{A_C}{r^2}$$

izrazimo/ocenimo aktivnost vira sevanja. Tovrstna ocena je zelo približna, saj moramo upoštevati, da je izmerjena hitrost doze vsota primarnega sevanja vira in sekundarnega sevanja.

Ocena aktivnosti vira sevanja

Velikokrat moramo oceniti zdajšnjo aktivnost vira sevanja, ki je bodisi v hrambi bodisi je vgrajen v napravi. Iz podatkov na viru razberemo vrsto vira, datum njegove izdelave in njegovo začetno aktivnost. Zanima nas njegova zdajšnja aktivnost, da bi preverili ustreznost njegove uporabe. Razpolovni čas vira sevanja poznamo iz tehnične dokumentacije o viru sevanja, starost vira (t) določimo glede na datum njegove izdelave. Aktivnost vira sevanja izračunamo po eni izmed enačb:

$$A = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{t_{1/2}} t} \quad \text{ali} \quad A = \frac{A_0}{2^n},$$

pri čemer n v drugi enačbi pomeni število razpolovnih dob.

Ocena ekvivalentne/efektivne doze

Našli smo vir sevanja in bili kar nekaj časa (Δt) v njegovi bližini. Hitrost doze smo izmerili. Zanima nas, kolikšno dozo smo prejeli. Prejeto dozo lahko grobo ocenimo tako, da znane podatke vstavimo v enačbo:

$$D_{T,r} = \dot{D} \cdot \Delta t = \frac{D}{dt} \cdot \Delta t,$$

tako da pri tem upoštevamo, da smo imeli opraviti samo z gama sevalci (utežni faktor sevanja je enak 1) in da smo bili obsevani enakomerno po vsem telesu.

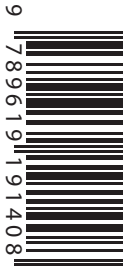
VIRI

1. *IAEA Practical Radiation Safety Manual; Manual on Shielded enclosures* (Teaching (International Atomic Energy Agency, Vienna, 1996).
2. *IAEA Safety Series No.102: 1990 Recommendations for the Safe Use and Regulation of Radiation Sources in Industry, Medicine, Research and Teaching* (International Atomic Energy Agency, Vienna, 1990).
3. *IAEA TS-R-1, Safety Standards for protecting people and the environment; Regulations for the Safe Transport of Radioactive materials, 2005 Edition; Safety Requirements.*
4. *IAEA-TECDOC-1344, 2003: Categorization of radioactive sources* (International Atomic Energy Agency, Vienna, 2003).
5. *Evropski sporazum o mednarodnem cestnem prevozu nevarnega blaga (ADR)* (Ur. list RS, št. 9/05).
6. *ICRP Publication 60: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection* (International Commission on Radiological Protection, Report 60, Pergamon Press, 1990).
7. *ICRU 33, Radiation Quantities and Units* (International Commission on Radiation Units and Measurements, Report 33, USA, 1986).
8. *ICRU 51, Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry* (International Commission on Radiation Units and Measurements, Report 51, USA, 1993).
9. *Mele I., Vse o sevanju, kar ne veste, pa bi želeli*, RAOPIS št. 14, Agencija za radioaktivne odpadke, 2006.
10. *Pravilnik o obveznostih izvajalca sevalne dejavnosti in imetnika vira ionizirajočih sevanj* (Ur. list RS, št. 13/2004, SV8).
11. *Pravilnik o pogojih in metodologiji za ocenjevanje doz pri varstvu delavcev in prebivalstva pred ionizirajočimi sevanji* (Ur. list RS, št. 115/2003, SV5).
12. *Pravilnik o izvajanju zdravstvenega nadzora izpostavljenih delavcev* (Ur. list RS, št 2/2004, SV6).
13. *Pravilnik o pooblaščenju izvajalcev strokovnih nalog s področja ionizirajočih sevanj* (Ur. list RS, št. 18/2004, SV7).
14. *Pravilnik o delovanju strokovnega sveta za vprašanja varstva ljudi pred ionizirajočimi sevanji, radioloških posegov in uporabe virov sevanja v zdravstvu in veterinarstvu* (Ur. list RS, št. 62/2003, SV1).
15. *Pravilnik o pogojih za uporabo virov ionizirajočih sevanj v zdravstvu* (Ur. list RS, št. 111/2003, SV3).
16. *Pravilnik o načinu vodenja evidenc o osebnih dozah zaradi izpostavljenosti ionizirajočim sevanjem* (Ur. list RS, št. 33/2004, SV4).
17. *Pravilnik o uporabi tablet kalijevega jodida* (Ur. list RS, št. 142/2004, SV9).

18. *Pravilnik o uporabi virov sevanja in sevalni dejavnosti* (Ur. l. RS št. 27/2006).
19. *Pravilnik o mestih in časovnih presledkih za sistematične preiskave deleža radionuklidov v življenjskem okolju, o zgodnjem odkrivanju in obveščanju o radioaktivni kontaminaciji življenjskega okolja* (Ur. list SFRJ, št. 40/86, Z1).
20. *Pravilnik o načinu, obsegu in rokih sistematičnih preiskav kontaminacije z radioaktivnimi snovmi v okolici jedrskih objektov* (Ur. list SFRJ, št. 51/86, Z2).
21. *Pravilnik o načinu zbiranja, evidentiranja, obdelave, hrambe, dokončne odložitve in izpuščanja radioaktivnih odpadnih snovi v človekovo okolje* (Ur. list SFRJ, št. 40/86, Z3).
22. *Pravilnik o največjih mejah radioaktivne kontaminacije človekovega okolja in o dekontaminaciji* (Ur. list SFRJ, št. 8/87 in 27/90, Z9).
23. *Serša G., Biološki učinki ionizirajočega sevanja*, ZVD, Ljubljana, 2004.
24. *Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih* (Ur. list RS, št. 49/2004, UV2).
25. *Uredba o sevalnih dejavnostih* (Ur. list RS, št. 48/2004, 9/2006, UV1).
26. *Zakon o prevozu nevarnega blaga* (ZPNB, Ur. List RS, št. 79/99, 96/02, 2/04 in 101/05).
27. *Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti* (uradno prečiščeno besedilo, ZVISJV-UPB2, Ur. list RS, št. 102/2004).
28. *Zbirka varnostnih standardov št. ST-1, 1996: Predpisi za varen prevoz radioaktivnih snovi*; neuraden prevod dokumenta, ki ga je izdala Mednarodna agencija za atomsko energijo, Dunaj, 1996.

REPUBLIKA SLOVENIJA
URADNA PUBLIKACIJA
LJUBLJANA, 2011

ISBN-10 961-91914-0-4



*Vsi, ki smo kakorkoli udeleženi
pri izvajanju sevalnih dejavnosti
in uporabi virov sevanj, se moramo zavedati,
da so vsi ukrepi pomembni za varnost,
da se vsak človek lahko zmoti ali kaj spregleda
ter da je marsikatero delo možno opraviti
še boljše kot je bilo opravljeno.*

Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost
www.ursjv.gov.si

delo ljudi in z njimi