

Obsah

1. ZÁKLADY RADIAČNEJ OCHRANY	5
1.1 HISTORICKÉ ASPEKTY RADIAČNEJ BEZPEČNOSTI	5
1.2 VÝVOJ NORIEM RADIAČNEJ OCHRANY	6
1.3 ŽIARENIE OKOLO NÁS - RADIAČNÉ POZADIE	9
1.4 ZÁKLADNÉ POJMY RADIAČNEJ OCHRANY	15
1.5 ZÁKLADNÉ PRINCÍPY RADIAČNEJ OCHRANY	17
1.6 ZABEZPEČENIE RADIAČNEJ OCHRANY NA PRACOVISKU	20
2. DOZIMETRICKÁ TERMINOLÓGIA, VELIČINY A JEDNOTKY	23
2.1 ZÁKON RÁDIOAKTÍVNEJ PREMENY. KONŠTANTA PREMENY	23
2.2 AKTIVITA	24
2.3 ABSORBOVANÁ DÁVKA	25
2.4 KERMA. EXPOZÍCIA	26
2.5 DÁVKOVÝ EKVIVALENT, EKVIVALENTNÁ DÁVKA	29
2.6 EFEKTÍVNA DÁVKA	30
2.7 ÚVÄZOK DÁVKY	31
2.8 KOLEKTÍVNA EFEKTÍVNA DÁVKA	33
3. BIOLOGICKÉ HĽADISKÁ RADIAČNEJ OCHRANY	34
3.1 ZÁKLADNÉ BIOFYZIKÁLNE PROCESY	34
3.2 DETERMINISTICKÉ NÁSLEDKY (TKANIVOVÉ REAKCIE)	37
3.3 STOCHASTICKÉ NÁSLEDKY. RIZIKO RAKOVINY A DEDIČNÝCH ÚČINKOV	40
3.4 NÁSLEDKY OŽIARENIA ZÁRODKU A PLODU	43
4. ZDROJE ŽIARENIA V JADROVEJ ELEKTRÁRNI	44
4.1 JADROVÝ REAKTOR AKO ZDROJ ŽIARENIA	44
4.2 ZDROJE ŽIARENIA VZNIKAJÚCE AKTIVÁCIOU	45
4.3 ZDROJE ŽIARENIA VZNIKAJÚCE PRI ŠTIEPENÍ	47
4.4 OŽIARENIE OBYVATEĽSTVA V DÔSLEDKU EXHALÁTOV JADROVEJ ELEKTRÁRNE	49
4.5 MONITOROVANIE OŽIARENIA PRACOVNÍKOV. OPERAČNÉ VELIČINY.	51
4.6 KONCEPCIA ZDÔVODNITEĽNÉHO RIZIKA PRI VYUŽÍVANÍ JADROVEJ ENERGIE.	54
5. DETEKCIA A MERANIE IONIZUJÚCEHO ŽIARENIA	56
5.1 ZÁKLADNÉ PROCESY DETEKcie ŽIARENIA	56
5.2 DETEKTORY POUŽÍVANÉ V JADROVEJ ENERGETIKE	57
5.3 PLYNOVÉ DETEKTORY	58
5.3.1 Ionizačné komory	59
5.3.2 Iné plynové detektory	61
5.4 SAMONAPÁJACIE (EMISNÉ) DETEKTORY	63
5.5 POLOVODIČOVÉ DETEKTORY	64
5.6 SCINTILAČNÉ DETEKTORY	66
5.7 DETEKTORY NA MERANIE DÁVOK	67
5.7.1 Filmové dozimetre	67
5.7.2 Tužkové dozimetre	68
5.7.3 Termoluminiscenčné (TLD) a fotoluminiscenčné (FLD, RPLD) dozimetre.	68
5.7.4 Stopové detektory	70
5.7.5 Aktivačné detektory	71
5.7.6 Havarijné dozimetre	72
POUŽITÁ LITERATÚRA	74

Otázky ku skúške

1. Radiačné pozadie a jeho skladba.
2. Rádioaktívna látka a rádioaktívny žiarič.
3. Charakteristiky zdrojov ionizujúceho žiarenia. Aktivita, expozícia, kerma.
4. Veličiny a jednotky používané v radiačnej ochrane. Dávka, efektívna dávka, ekvivalentná dávka.
5. Základné princípy radiačnej ochrany. Limity ožiarenia.
6. Deterministické účinky Ožiarenia – tkanivové reakcie.
7. Riziko rakoviny a dedičných následkov ožiarenia.
8. Účinky ionizujúceho žiarenia na ľudský organizmus. Príznaky ožiarenia.
9. Biologicky najvýznamnejšie rádionuklidy vznikajúce pri činnosti reaktora.
10. Celková efektívna dávka za rok. Určovanie vnútornej a vonkajšej kontaminácie.
11. Detektory používané na meranie dávkového príkonu.
12. Detektory používané na meranie povrchovej kontaminácie.
13. Detektory používané na gama-spektrometriu. HPGe detektor.
14. Detektory používané na osobnú dozimetriu. TLD dozimeter.
15. Monitorovanie ožiarenia pracovníkov. Operačné veličiny.

1. Základy radiačnej ochrany

1.1 Historické aspekty radiačnej bezpečnosti

Na sklonku 19. storočia boli urobené dva významné objavy, ktoré znamenali začiatok intenzívneho výskumu a využitia ionizujúceho žiarenia. Koncom roka 1895 (8. novembra) Wilhelm Conrad Röntgen (nemecký fyzik, profesor vo Würzburgu) oznámil objav doteraz neznámych lúčov, ktoré nazval X - lúče. Neskôr tieto lúče na jeho počesť nazvali röntgenovými lúčmi. O pár mesiacov neskôr (3. marca 1896) Antoine Henri Becquerel (francúzsky fyzik, Paríž) objavil pri výskume luminiscencie solí uránu prirodzenú rádioaktivitu. Ukázalo sa, že najmä Röntgenov objav má veľký význam pre ľudstvo, pretože ho úspešne možno aplikovať v medicíne pre diagnostické a terapeutické účely. Skutočne, X - lúče sa veľmi rýchlo začali v lekárskej praxi využívať. Tak napríklad v januári roku 1896 úspešne použil rtg. lúče Emil Grubbé na liečenie pokročilého karcinómu prsníka. Vo februári toho istého roku Frost uskutočnil prvé diagnostikovanie pomocou röntgenových lúčov. Kells a Rolins použili rtg. lúče po prvýkrát v stomatológii.

Po týchto prvých povzbudzujúcich správach sa však čoskoro začali objavovať aj menej optimistické oznámenia o ochoreniach, ktoré novo objavené lúče spôsobovali. Medzi prvými postihnutými boli predovšetkým experimentátori, ktorí nový objav propagovali a verejne demonštrovali (vo väčšine prípadov na sebe). Ochorenia, ktoré vznikali následkom tejto činnosti, boli zapríčinené predovšetkým nevedomosťou a nedostatočnými znalosťami o účinkoch žiarenia na biologický objekt.

Už v marci roku 1896 Edison uverejnil správu o poškodení zraku rtg. žiarením. V júni 1896 Tesla varoval experimentátorov pred blízkym kontaktom s rtg. trubicami. O dva roky neskôr Thompson začal pri práci s rtg. lúčmi používať ochranný hliníkový filter.

Nielen rtg. žiarenie vyvolávalo obavy z možného poškodenia ľudského organizmu. V marci roku 1898 Schmidt objavil rádioaktivitu thória. V júni 1898 manželia Curieovi objavili prvok polónium, v decembri ohlásili objav rádia a navrhli termín "rádioaktivita", ktorý sa všeobecne ujal. V tomto roku Willard objavil lúče g. V roku 1902 Rollins experimentálne dokázal, že rtg. lúče môžu byť smrteľné pre vyššie formy života. Bolo preto potrebné nejakým spôsobom merať množstvo ionizujúceho žiarenia. V roku 1904 Saboro a Moiré zaviedli systém kalorimetrickej dozimetrie. V roku 1905 Franklin navrhol jednotku ionizácie. V roku 1911 bol stanovený a zavedený medzinárodný rádiový etalón a jednotka aktivity Curie. A v roku 1915 boli predložené návrhy, súvisiace s ochranou pred röntgenovými lúčmi a boli odsúhlasené Medzinárodnou röntgenologickou spoločnosťou.

Pre ľudstvo bol veľmi významný objav štiepenia uránu. Štiepenie jadier uránu objavili Hahn a Strassman v roku 1939. Už v roku 1942 (12. decembra) bol postavený prvý experimentálny jadrový reaktor Fermim, v ktorom sa po prvýkrát uskutočnila riadená štiepna reťazová reakcia. Začala éra jadrového zbrojenia, ktorej prvým negatívnym dôsledkom bolo bombardovanie miest Hirošima a Nagasaki v roku 1945. Päťdesiate a šesťdesiate roky sa zapíšu do dejín ako šialené zbrojné preteky jadrových veľmocí, kedy počty atmosferických a pozemných pokusov atómových zbraní dosahovali niekoľko desiatok ročne na oboch stranách.

Po prvýkrát začala jadrová energia slúžiť ľudstvu mierovým spôsobom v roku 1954, keď jadrová elektrárňa v Obninsku (ZSSR) dodala do siete prvé kilowathodiny elektrickej energie. I keď jej výkon (5 MW) nemal praktický význam, odvtedy datujeme éru jadrovej energetiky a radiačná bezpečnosť sa stala atribútom jadrovej bezpečnosti.

Modernú spoločnosť si už nevieme predstaviť bez širokého využitia zdrojov ionizujúceho žiarenia. Ich použitie je rozmanité a môžeme ich nájsť v priemyselnej výrobe (defektoskopy, ožarovače, meradlá, hlásiče, stopové techniky), medicíne (diagnostika a terapia), v jadrovej energetike a v iných oblastiach (veda a výskum, bezpečnostné kontroly poštových zásielok a batožiny pri preprave a pod.). Čoraz viac ľudí prichádza priamo či nepriamo do styku s ionizujúcim žiarením. Aby tento okruh ľudí a ich okolie neboli vystavené nebezpečenstvu a aby nedošlo k ohrozeniu ich zdravia vplyvom ionizujúceho žiarenia, je treba zabezpečiť ich ochranu pred týmto nebezpečenstvom. Je samozrejmé, že pracovníci, ktorí z profesionálnych dôvodov prichádzajú do styku s ionizujúcim žiarením, musia mať dostatočné vedomosti o vlastnostiach tohoto žiarenia, o jeho interakcii s hmotným prostredím, jeho účinkoch na biologické objekty, o spôsoboch merania jeho množstva a metódach ochrany pred ním.

1.2 Vývoj noriem radiačnej ochrany

Jednou zo základných pravidiel pri radiačnej ochrane je limitovanie ožiarovania. Pre limitovanie sa používajú ročné limitné hodnoty efektívnej dávky. Historicky sa tento pojem vyvíjal ako "najvyššia prípustná dávka", ktorá predstavuje takú dávku, ktorá v svetle súčasných vedomostí nemá nebezpečný vplyv na ľudský organizmus.

Treba si však uvedomiť, že je veľmi zložitú štatisticky spoľahlivo preukázať účinky malých dávok (t.j. dávok, mierne prevyšujúcich pozadie). Najvyššie prípustné dávky sú teda také dávky, ktoré pri každodennej expozícii počas mnohých rokov nevyvolajú neregenerovateľné zmeny v ľudskom organizme. O tom, že zodpovedne stanoviť hornú hranicu najvyššej prípustnej dávky je zložitá záležitosť, svedčí fakt, že bola mnohokrát znižovaná. Uvedieme **chronológiu vývoja noriem radiačnej ochrany**:

r. 1902 - W. Rollins sformuloval bezpečnú úroveň pre zdravie človeka také prostredie, v ktorom pri expozícii po dobu 7 minút fotografický film nesčerná (táto expozícia zodpovedá asi 90 mSv za deň).

r. 1915 - Britská Röntgenologická spoločnosť predniesla prvé návrhy na ochranu pred rtg. žiarením (napríklad používanie ochranných filtrov a pod.)

r. 1921 - Britská Röntgenologická spoločnosť publikovala prvé normy pre ochranu pred röntgenovým žiarením.

r. 1925 - na 1. Medzinárodnom rádiologickom kongrese bola ustanovená Medzinárodná komisia pre rádiologické jednotky (ICRU). Funguje dodnes a zaoberá sa metrológiou a šandardizáciou.

r. 1928 - na 2. Medzinárodnom rádiologickom kongrese bola navrhnutá jednotka ožiarovania **röntgen** (R), ktorá bola oficiálne prijatá v roku 1931. Na kongrese bola ustanovená Medzinárodná komisia pre radiačnú ochranu (ICRP). ICRP vydáva doporučenia a navrhuje radiačné limity.

r. 1931 - NCRP (Národný výbor pre radiačnú ochranu v USA) schválil jednotku expozície "röntgen" (R).

r. 1934 - Ten istý výbor navrhol stanoviť hornú prahovú hranicu externého ožiarenia na 0,2 R/deň, ktorá bola neskôr znížená na 0,1 R/deň ($\sim 2,58 \cdot 10^{-5}$ C/kg.deň alebo približne 1 mGy/deň pre gama žiarenie v tkanive). Predpokladalo sa, že hodnoty expozície pod prahovou hodnotou nespôsobujú nebezpečie. Ďalej sa predpokladalo, že personál môže takúto expozíciu dostať počas nejakého časového úseku, alebo niekoľkých časových intervalov, pričom nenastane zmena krvného obrazu, ani nedôjde k poškodeniu kože či pohlavných orgánov. Limit v praxi znamenal, že pracovník musel dodržiavať určitú vzdialenosť od žiariča a súčasne dobu práce, aby nedošlo k jeho prekročeniu. Vzdialenosť a čas boli a sú najjednoduchšími spôsobmi ochrany pred ožiareními z externých zdrojov žiarenia.

r. 1946 - NCRP upúšťa od prahovej koncepcie, ktorá sa používala pred 2. svetovou vojnou. Široké používanie rádioaktívnych látok (najmä v súvislosti s vývojom jadrovej zbrane) počas vojny vzbudilo určité znepokojenie, ktoré viedlo ku vzniku nových doporučení v súvislosti s ochranou pred žiarením. Ku koncu vojny skupina výskumníkov, vrátane NCRP, ktorí sa zaoberali otázkami ochrany pred žiarením, sa priklonila k "bezprahovej" koncepcii, podľa ktorej neexistuje absolútne bezpečná dávka. Zdalo sa rozumným predpokladať, že akékoľvek, i malé množstvo žiarenia, môže spôsobiť poškodenie, najmä však reprodukčných orgánov.

r. 1949 - Na konci 40-tych rokov vznikla potreba rozpracovať pravidlá radiačnej ochrany aj pre obyvateľstvo. Bol prijatý pojem "RBÚ" (relatívna biologická účinnosť jednotlivých druhov žiarenia, dnes QF - faktor kvality, radiačný váhový faktor w_R), a bola zavedená jednotka ekvivalentnej dávky rem ($\text{rem} = 10^{-2} \text{Sv}$). Na návrh NCRP bola stanovená dovolená dávka 0,3 rem/týždeň = 3 mSv/ týždeň.

ICRP (Medzinárodná komisia pre radiačnú ochranu) vyslovila nasledovné požiadavky:

1. Znížiť najvyššiu dovolenú dávku o 50%, t.j. na hodnotu 50 mrem/deň (0,5 mSv/deň).
2. Pri ožiarení považovať za kritický orgán krvotvorné orgány a stanoviť pre ne najvyššiu prípustnú dávku vo výške 300 mrem/týždeň (3 mSv/týždeň).
3. Doporučiť tieto hodnoty koeficientu RBÚ: Pre röntgenovské, γ a β lúče RBÚ=1, pre tepelné neutróny RBÚ=5, pre rýchle neutróny a častice α RBÚ=10.

r. 1954 - Prijatie koncepcie "ALAPA" (As Low as Practically Achievable - Tak nízko, ako je to prakticky dosažiteľné).

r. 1956 - Z iniciatívy ICRP bola stanovená najvyššia prípustná dávka vo výške 5 rem·rok⁻¹ (50 mSv·rok⁻¹).

r. 1957 - ICRP doporučila hodnotu 120 mSv·rok⁻¹ za podmienky, že priemerná dávka nepresiahne hodnotu 50 mSv·rok⁻¹ pre osoby staršie ako 18 rokov, pre obyvateľstvo 5 mSv·rok⁻¹.

r. 1958 - Nazhromaždené experimentálne údaje o ožiarení malými dávkami viedli ICRP k ďalšiemu znižovaniu dávok a to na 100 mrem/týždeň (1 mSv/týždeň), avšak kvôli väčšej pružnosti pri používaní týchto pravidiel bolo dovolené absolvovať do 3 rem (30 mSv) počas ľubovoľného štvrtroka v danom roku za podmienky, že celková ročná dávka nepresiahne hodnotu 5 rem (50 mSv). Taktiež bola stanovená kumulovaná dávka k danému veku, ako aj veľkosť expozície jednotlivých orgánov ľudského organizmu. Z odporúčaní ICRP 1958 vychádzala Vyhláška MZ SR

č.65/1972 (analogická k vyhláške MZ ČR č. 59/1972) a jej platnosť bola zrušená až vyhláškou MZ SR č. 12/2001.

r. 1977 - ICRP vydala doporučení č. 26, ktoré zásadne ovplyvnili radiačnú ochranu. Zavedené pravidlá sa považujú za moderný prístup k radiačnej ochrane. K systému limitovania dávok bola pripojená požiadavka optimalizácie a odôvodniteľnosti v radiačnej ochrane.

r. 1990 - ICRP vydala doporučení č. 60, ktorými sa zmenili prístupy k radiačnej ochrane a sprísnil limity a prístupy k hodnoteniu ožiarenia. Zavádza sa nové chápanie zdravotného poškodenia ako miery radiačného poškodenia zahrňujúcu rakovinu vedúcu k úmrtiu (fatálna rakovina), dedičné poškodenie, ale aj rakovinu nevedúcu k úmrtiu (nefatálna rakovina).

Koeficienty rizika oproti doporučeniu ICRP 26 boli zvýšené 3x, pre pracovníkov bol celkový koeficient rizika stanovený na $5,6 \cdot 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$. ICRP ďalej odporúča nové limity v radiačnej ochrane, ktoré sú dnes aktuálne aj u nás. Najpodstatnejšie nové informácie pre nový odhad rizika vzniku rakoviny pochádzajú z pokračujúceho sledovania skupiny viac ako 90 000 žijúcich obetí z Hirošimy a Nagasaki.

Pri uplatňovaní princípov radiačnej ochrany sa zásadný dôraz kladie na optimalizáciu radiačnej ochrany a v tomto zmysle sa potláča úloha limitovania dávok.

Ak zdôvodnenie činnosti a optimalizácia ochrany boli a sú uskutočňované efektívne, len vo výnimočných prípadoch by malo dôjsť k aplikácii limitov individuálnych dávok.

Doporučenie ICRP 60 tvorí základ mnohých medzinárodných a národných noriem a predpisov radiačnej ochrany. Na Slovensku to bola Vyhláška MZ SR č. 12/2001, ktorú nahradilo Nariadenie Vlády SR 345/2006. V Medzinárodnom merítku sa pre oblasť jadrovej energie odporúča norma IAEA Safety Standards 115 z roku 1996, ktorá tiež vychádza z ICRP 60. Zákom č. 355/2007 Z.z. o ochrane, podpore a rozvoji verejného zdravia bola do slovenskej legislatívy prijatá aj Smernica Rady 96/29/Euratom z 13. mája 1996, ktorá stanovuje základné bezpečnostné normy ochrany zdravia pracovníkov a obyvateľstva pred nebezpečenstvami vznikajúcimi v dôsledku ionizujúceho žiarenia.

V marci 2007 bolo prijaté nové **Doporučenie ICRP 103**, ktoré nahradili predchádzajúce ICRP 60 z roku 1990. ICRP 103 aplikuje, rozvíja a konsoliduje nové poznatky a trendy z oblasti biofyziky. Upresňuje hodnoty radiačných a tkanivových váhových faktorov na určovanie ekvivalentnej a efektívnej dávky. Zachováva hlavné princípy radiačnej ochrany: *odôvodniteľnosť, optimalizácia a limitovanie ožiarenia*. Princípy odôvodniteľnosti a optimalizácie sa rozpracovávajú pre všetky plánované i havarijné situácie pri činnostiach vedúcich k ožiareniu. Na zabezpečenie princípu limitovania pre všetky relevantné zdroje ožiarenia, sa zavádzajú medzné dávky a referenčné úrovne pre plánované a havarijné situácie (dose and risk constraints, reference levels for emergency and existing exposure situations). Limity ožiarenia zostávajú nezmenené.

Ďalšou rozpracovanou novou oblasťou v ICRP 103 je prístup k preukazovaniu radiačnej ochrany životného prostredia.

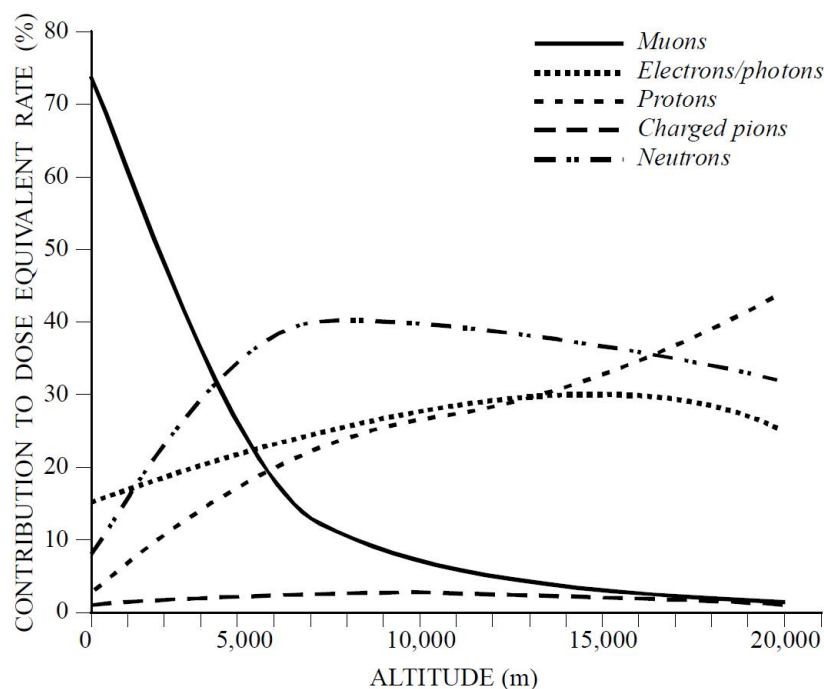
Aplikácia nových odporúčaní na Slovensku je teraz v rukách dozorných orgánov a ich postoj k napĺňaniu nových prístupov. Všeobecne sa očakáva, že odporúčania sa premietnu do národných noriem a zákonov do roku 2015.

1.3 Žiarenie okolo nás - radiačné pozadie

Obyvatelia zemegule sú neustále vystavovaní ionizujúcemu žiareniu, ktoré nazývame **radiačné pozadie**. Jeho zdrojmi sú:

Prírodné radiačné pozadie: tvorí najväčšiu časť ožiarenia obyvateľstva, pričom je to nevyhnutná súčasť života ľudstva. Jedným zo zdrojov prírodného radiačného pozadia je **kozmicke žiarenie**. Spôsobujú ho vysokoenergetické ($E=10^{19}$ eV) protóny (90%) a jadrá He (10%), ktoré k nám priletujú z kozmu. Prenikajú až do vzdialenosti 20 km od zemského povrchu, kde interagujú s časticami atmosféry. Pri interakcii vzniká sekundárne vysokoenergetické žiarenie, ktoré tvoria mezóny, neutróny, protóny, prípadne mäkkšie žiarenie fotónov gama. Príspevok jednotlivých typov sekundárneho žiarenia k celkovej dávke závisí od nadmorskej výšky a je uvedená na obrázku 1.1.

Veľkosť kozmického žiarenia je rôzna v rôznych zemepisných šírkach. Efektívna dávka od kozmického žiarenia sa odhaduje hodnotou asi $0,3 \text{ mSv} \cdot \text{rok}^{-1}$.



Obr. 1.1 Príspevok jednotlivých typov sekundárneho kozmického žiarenia k celkovej dávke v závislosti na nadmorskej výške

Ďalšími zdrojmi prírodného radiačného pozadia sú **prírodné rádionuklidy**, väčšinou žiariče gama, ktoré sa nachádzajú vo vzduchu, v horninách a v pôde.

Podľa pôvodu prírodné rádionuklidy rozdeľujeme do troch skupín:

1. **Kozmogénne rádionuklidy** vznikajú interakciou kozmického žiarenia. Medzi najrozšírenejšie izotopy tohto druhu patria prvky uvedené v tabuľke 1.1.

2. **Pôvodné primordiálne rádionuklidy**, ktoré sa nachádzajú na Zemi od jej vzniku. Do tejto skupiny patria v prírode sa vyskytujúce rádionuklidy s polčasom premeny $T_{1/2} > 10^8$ rokov. Prvky ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th a ^{235}Np sú východzími prvkami tzv. rozpadových radov, v ktorých vznikajú **sekundárne primordiálne rádionuklidy**. Najrozšírenejším primordiálnym rádionuklidom, ktorý nie je členom rozpadových

radov je ^{40}K (v prírodnom draslíku sa nachádza 0,0117% tohto izotopu). Aktivita draslíka sa v rôznych potravinách pohybuje na úrovni desiatok až stoviek $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Tab. 1.1 Hlavné kozmogénne rádionuklidy a ich vlastnosti

Nuklid	Doba polpremeny, $T_{1/2}$	Typ premeny	Energia žiarenia, (MeV)	Produkcia, ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
^3H	12,26 rokov	β^-	0,0186	0,12-1,3
^7Be	53 dní	γ, ϵ	0,477	0,021-0,035
^{10}Be	$2,7\cdot 10^6$ rokov	β^-	0,56	0,04-0,1
^{14}C	5730 rokov	β^-	0,156	2,0-2,6
^{22}Na	2,58 roka	$\beta^+, \gamma, \epsilon$	0,54	-
^{32}Si	700 rokov	β^-	0,1	$2\cdot 10^{-4}$
^{32}P	14,3 rokov	β^-	1,71	$1\cdot 10^{-4}$
^{33}P	25 dní	β^-	0,25	$1\cdot 10^{-4}$
^{35}S	86,7 dní	β^-	0,168	$2\cdot 10^{-4}$
^{36}Cl	$3\cdot 10^5$ rokov	β^-, ϵ	0,71	-
^{39}Cl	55 min	β^-, γ	1,91; 2,18; 3,43	-

ϵ - znamená elektrónový záchyt

3. **Sekundárne primordiálne rádionuklidy**: sú rádionuklidy, ktoré patria k tzv. rozpadovým radom. Rozoznávame štyri rozpadové rady, ktoré charakterizuje štartovací prvok: ^{238}U začína urán-rádiový rad, ^{235}U (^{239}Pu) urán-aktíniový rad, ^{232}Th tórový rad, ^{235}Np neptúniový rad. Produktami rozpadových radov sú rôzne prírodné rádionuklidy, napr.: Bi, Ac, Po, Ra, Pb, Rn, Tl a pod. V literatúre sa bežne udávajú len prvé tri rozpadové rady, pretože ich štartovacie rádionuklidy majú dostatočne dlhú dobu polpremeny aby sa ešte nachádzali v prírode v dostatočnom množstve. Neptúniový rad sa vyskytuje v prírode len sčasti, pretože štartovací rádionuklid má malú dobu polpremeny a v prírode sa prakticky už nevyskytuje. Okrem týchto dominantných rozpadových radov sa v prírode nachádzajú aj menšie, ktoré sa bežne v literatúre neuvádzajú, napr. uhlík ^{14}C , ktorý je významný kozmogénny rádionuklid sa mení na stabilný dusík ^{14}N .

Tab. 1.2 Priemerný obsah ^{40}K , ^{226}Ra a ^{232}Th v niektorých stavebných materiáloch

Materiál	$^{40}\text{K}(\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1})$	$^{226}\text{Ra}(\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1})$	$^{232}\text{Th}(\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1})$
Tehla	614	50	50
Betón	419	30	20
Kamene	724	50	35
Cement	248	30	18
Bridlice	632	64	35
Pórobetón	403	130	60
Obklady	380	80	50
Dlažba	730	70	60
Farbivá	141	1220	220
Omietky	160	70	60
Hlína	518	60	50
Popolček	600	130	80

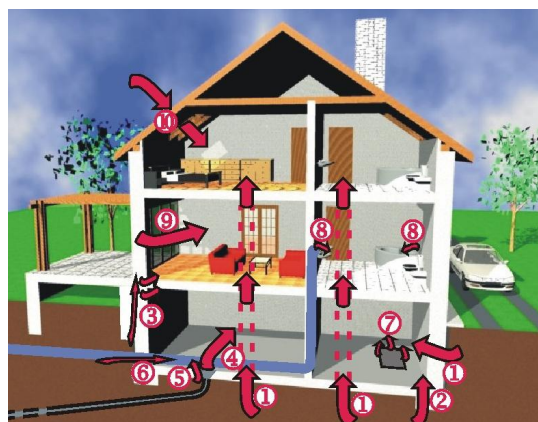
Zdrojmi vnútorného ožiarenia človeka sú predovšetkým rádionuklid draslíka ^{40}K a rádionuklidy rozpadových radov uránu a tória. Priemerný obsah ^{40}K , ^{226}Ra a ^{232}Th v niektorých stavebných materiáloch je v tabuľke 1.2. V ľudskom organizme sa nachádzajú v rovnovážnej koncentrácii v dôsledku nepretržitého vstupu potravinovým reťazcom, vodou a atmosferickým vzduchom. Veľkosť vonkajšieho ožiarenia, ktoré spôsobujú prírodné rádionuklidy, sa odhaduje na $0,32 \text{ mSv}\cdot\text{rok}^{-1}$, vnútorného na $0,37 \text{ mSv}\cdot\text{rok}^{-1}$. Celkovo teda od prírodného pozadia dostáva človek ročne približne 1 mSv . Táto hodnota môže byť rapídne zvýšená v oblastiach so zvýšeným výskytom radónu.

Radón je rádioaktívny plyn, ktorý postupuje do budov zo zeme a zo stavebných materiálov. Zdroje radónu v pozemných stavbách sú znázornené na obr. 1.2. Alfa premenou z radónu vznikajú rádioaktívne dcérske produkty. Dýchaním samotný radón a aj jeho dcérske produkty vo forme aerosólov postupujú do pľúc, kde spôsobujú lokálne ožiarenie, ktoré môže spôsobiť rakovinu. Podiel radónu na ožiarení obyvateľstva sa v rôznych regiónoch výrazne odlišuje.

Mapa radónového rizika SR je na obrázku 1.3. Územím s nízkymi radónovým rizikom je územie, na ktorom je meraním zistené, že objemová aktivita radónu v pôdnom vzduchu je menšia než $10 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ v dobre priepustných, $20 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ v stredne priepustných a $30 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ v slabo priepustných základových pôdach.

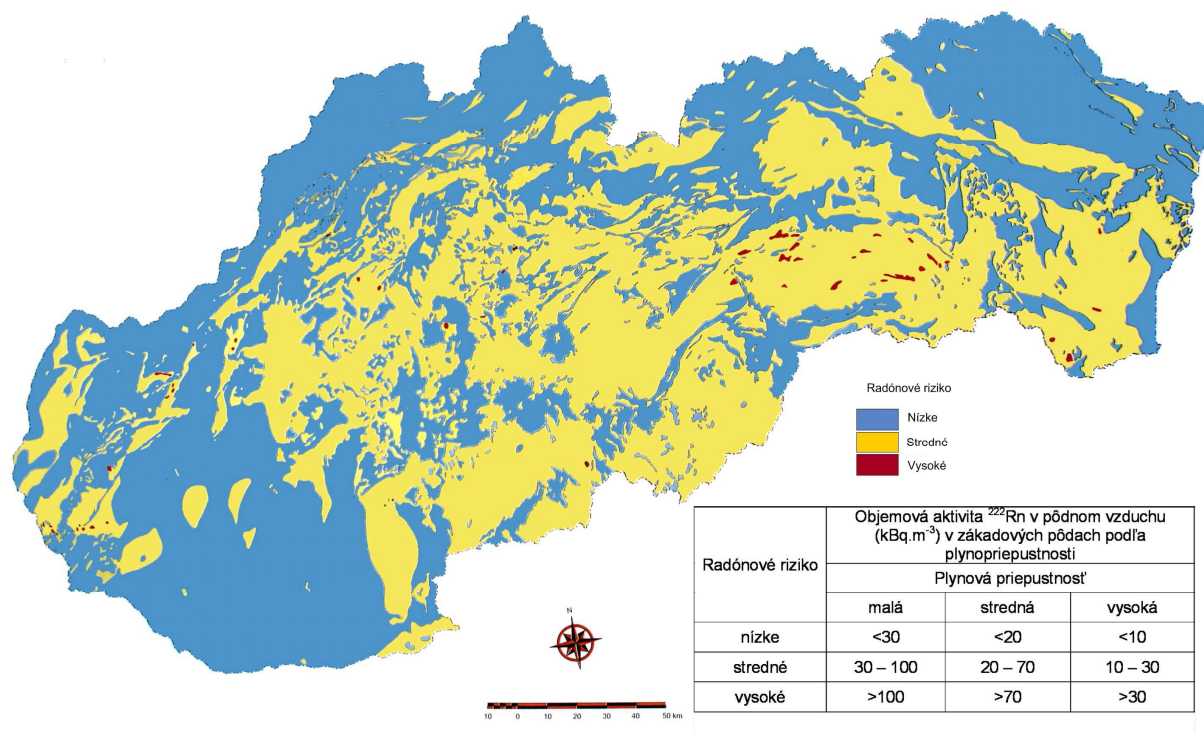
V miestnostiach určených na bývanie alebo pobyt osôb súčet podielov ekvivalentnej objemovej aktivity radónu v priemere za rok k hodnote $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ a podielu príkonu dávkového ekvivalentu gama žiarenia v určených miestach k hodnote $2 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ nesmie byť väčší ako 1. Ak táto požiadavka nie je splnená, vykonajú sa úpravy k zníženiu ožiarenia; až do vykonania stavebno-technických úprav sa ožiarenie obmedzí náhradnými opatreniami, najmä zmenou režimu ich používania.

Pri výstavbe alebo prestavbe stavieb sa postupuje tak, aby v miestnosti určenej na bývanie alebo pobyt osôb nebola ekvivalentná aktivita radónu v priemere za rok vyššia než $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ a zároveň príkon dávkového ekvivalentu gama žiarenia v jej ľubovoľnom mieste vo výške 1 m od podlahy a vo vzdialenosti aspoň $0,5 \text{ m}$ od stien nepresiahol $1 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. Táto požiadavka sa považuje za splnenú, ak sú budovy postavené na území s nízkym radónovým rizikom, zo stavebných materiálov s hmotnostnou aktivitou ^{226}Ra , ktorá neprevyšuje $120 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ a ak sa v nich používa voda s objemovou aktivitou radónu, ktorá neprevyšuje hodnotu $50 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$.



1. Difúziou konštrukciami spodnej stavby
2. Trhlinami medzi stenou a podlahou
3. Trhlinami z rozdielneho sadania základov
4. Prístup kanalizáciou a potrubiami
5. Netesnosťami okolo podlahových otvorov
6. Netesnosťami okolo prestupov inštalácií
7. Netesnosťami okolo poklopov revízných šácht
8. Uvoľňovanie z vody dodávanej do objektu
9. Exhalácia zo stavebných materiálov
10. Zo vzduchu z ventilácie

Obr. 1.2 Zdroje radónu v objektoch pozemných stavieb



1.3 Mapa radónového rizika Slovenska (zdroj: www.uranpres.sk)

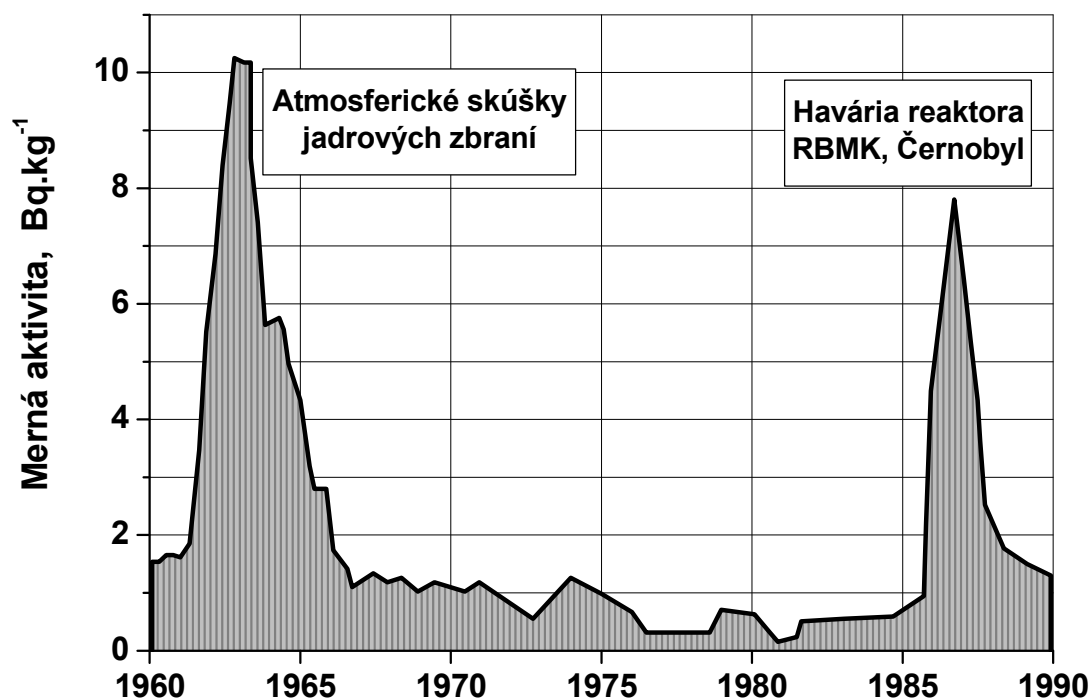
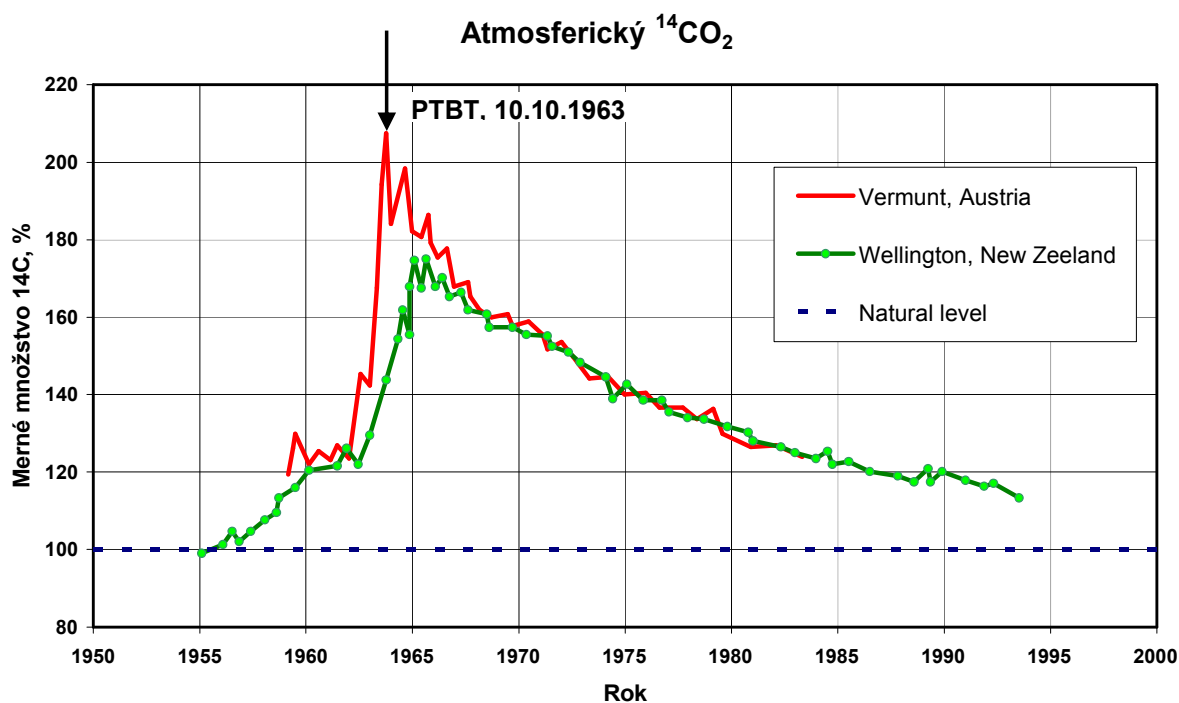
Technogénne radiačné pozadie je spôsobené hlavne stavebnými materiálmi, ďalej umelými hnojivami, ktoré môžu obsahovať zvýšenú hladinu rádionuklidov uránového a tórového radu. K nim treba prirátat' účinok prírodných rádionuklidov (^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{40}K), ktoré sa nachádzajú v úletoch tepelných elektrární, ktoré spaľujú fosílné palivá. Do technogénneho pozadia patrí aj žiarenie rôznych svietiacich farieb, používaných v ciferníkoch rôznych prístrojoch (rádionuklidy ^{226}Ra , ^{147}Pm , ^3H), štartéry v svietidlách, tyristory (rádionuklidy ^{87}Kr , ^{147}Pm , ^{232}Th), hlásiče požiarov (^{241}Am) a iné.

Podstatnú časť technogénneho pozadia tvoria stavebné materiály. Dávkový príkon v tehlových a betónových budovách dosahuje $0,05 - 0,07 \mu\text{Gy}\cdot\text{hod}^{-1}$, v drevených - $0,06 \mu\text{Gy}\cdot\text{hod}^{-1}$. Čím sú stavby budov mohutnejšie, tým je človek viac chránený pred žiarením, pochádzajúcim z pôdy a vzduchu, avšak zvyšuje sa podiel žiarenia, ktoré pochádza zo stavebných materiálov. Kritérium vhodnosti použitia stavebných materiálov z hľadiska obsahu prírodných rádionuklidov stanovuje *Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky o požiadavkách na obmedzenie ožiarovania z radónu a ďalších prírodných rádionuklidov* (406/1992 Z.z.) ako aj stavebný zákon SR.

Zhodnotiť množstvo žiarenia, ktoré emitujú minerálne hnojivá, je obtiažne vzhľadom na rozdielnosť intenzity ich používania. Podľa odhadov je veľkosť nimi spôsobenej dávky asi $7,5 \mu\text{Sv}\cdot\text{rok}^{-1}$.

Technogénne pozadie prispieva do celkového radiačného pozadia hodnotou o niečo väčšou, ako $1,05 \text{ mSv}\cdot\text{rok}$.

Globálny rádioaktívny spad je dôsledok skúšok jadrových zbraní a v našich oblastiach aj havárie v Černobyle. Spôsobuje vnútorné ožiarovanie (^{90}Sr , ^{137}Cs) a ožiarovanie vonkajšie (^{137}Cs). Merania Jeho hodnota je oceňovaná na $20 \mu\text{Sv}\cdot\text{rok}^{-1}$. Po zákaze skúšok jadrových zbraní táto hodnota klesá.

Obr. 1.4 Aktivita ^{137}Cs v ľudskom tele ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)Obr. 1.5 Relatívne množstvo rádioaktívneho ^{14}C v atmosfére v dôsledku atmosférických testov jadrových zbraní. Pokles je badať po podpise zmluvy o zákaze atmosférických testov (PTBT - Partial Test Ban Treaty) v novembri 1963.

Ožiarenie v dôsledku medicínskych procedúr. Odhaduje sa, že na jedného obyvateľa pripadá v priemere jedna röntgenová diagnostika ročne (röntgenografia 0,44, röntgenoskopia 0,19, fluoroskopia 0,37). Podľa odhadov môže dosiahnuť celotelová efektívna dávka z týchto procedúr $1,5 \text{ mSv}\cdot\text{rok}^{-1}$. Používanie

rádiofarmaceutických prípravkov túto dávku zvyšuje len nepatrne (výnimku tvorí používanie rádionuklidu ^{131}I).

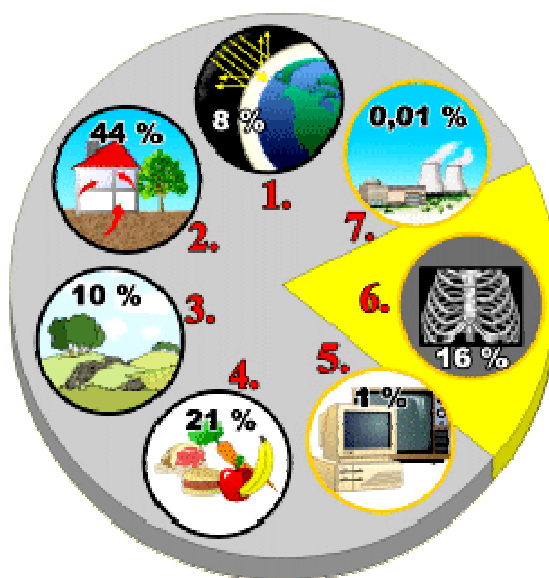
Na lekárske ožiarenie sa nevzťahuje limitovanie dávok. Cieľom nádorovej terapie je doceliť likvidáciu nádorového ložiska pri zachovaní zdravého okolitého tkaniva. Ožiarenie pacientov pri jednotlivých diagnostických procedúrach nesmie prekročiť tzv. smerné hodnoty lekárskeho vyšetrenia. Príklady sú uvedené v tabuľke 1.3.

Celkovo môžeme povedať, že priemerná efektívna dávka je asi 3,5 mSv/rok; z toho stavebné materiály a radón spôsobujú 44% (najmä vnútorné ožiarenie pľúc), vnútorné ožiarenie spôsobené potravinami 21%, lekárske aplikácie 14%, žiarenie zemskej kôry 10%, kozmické žiarenie 8%, priemyselné aplikácie 1%, jadrové zariadenia 0,01%. Podiely jednotlivých zložiek sú znázornené na obrázku 1.6.

Tab. 1.3 Smerné hodnoty pre vyšetrenie počítačovou tomografiou

Vyšetrenie	Dávka (na jedno vyšetrenie) [mGy]
Hlava	50
Bedrová chrbtica	35
Brucho	25

Dávky sa merajú v osi rotácie v tkanivovo-ekvivalentných fantómoch, ktorých výška je 15 cm a priemer je 16 cm na vyšetrenie hlavy a 30 cm na vyšetrenie bedrovej chrbtice a brucha.



Obr. 1.6 Zdroje prírodného a umelého žiarenia

1. Kozmické žiarenie; 2. Radón; 3. Žiarenie zemskej kôry; 4. Vnútorné zdroje; 5. Priemyselné aplikácie; 6. Lekárske aplikácie; 7. Žiarenie z jadrovej energetiky

1.4 Základné pojmy radiačnej ochrany

Radiačná ochrana je ochrana ľudí a životného prostredia pred ožiareními a pred jeho účinkami vrátane prostriedkov na jej dosiahnutie. Radiačná ochrana je jedným z determinujúcich faktorov ovplyvňujúcich úroveň verejného zdravia, na ktoré sa zameriava systém verejného zdravotníctva. Legislatívny rámec verejného zdravotníctva je tvorený Zákonom č. 355/2007 Z.z. o ochrane, podpore a rozvoji verejného zdravia. Základné bezpečnostné požiadavky na ochranu zdravia pracovníkov a obyvateľov pred ionizujúcim žiarením sú ustanovené v Nariadení vlády 345/2006 Z.z.

V oblasti radiačnej ochrany zákon 355/2007 uvádza základné pojmy:

ionizujúce žiarenie je žiarenie prenášajúce energiu vo forme častíc alebo elektromagnetických vln s vlnovou dĺžkou 100 nm alebo kratšou alebo frekvenciou $3 \cdot 10^{15}$ Hz alebo vyššou, ktoré má schopnosť priamo alebo nepriamo vytvárať ióny,

prírodné ionizujúce žiarenie je ionizujúce žiarenie prírodného zemského alebo kozmického pôvodu,

ožiarenie je vystavenie pôsobeniu ionizujúceho žiarenia,

lekárske ožiarenie je ožiarenie pacientov v súvislosti s určením ich diagnózy alebo liečby, ožiarenie zamestnancov v súvislosti so sledovaním ich zdravotného stavu, ožiarenie osôb v súvislosti s preventívnymi zdravotnými programami, ožiarenie zdravých jednotlivcov alebo pacientov, ktorí sa dobrovoľne zúčastňujú na lekárskech alebo biomedicínskych výskumných programoch a ožiarenie osôb v súvislosti s vyšetreniami na účely vypracovania lekárskeho posudku,

limit ožiarenia je hodnota ročnej alebo päťročnej efektívnej dávky alebo ročnej ekvivalentnej dávky, ktorá zodpovedá hornej hranici prijateľného rizika stochastického poškodenia zdravia v dôsledku ožiarenia pre jednotlivca aj spoločnosť a ktorá vylučuje výskyt deterministických účinkov ožiarenia,

smerná hodnota je stanovená hodnota ukazovateľa alebo kritérium, ktorého nesplnenie alebo prekročenie spravidla vyžaduje vykonanie primeraného opatrenia na zabezpečenie radiačnej ochrany,

medzná dávka je obmedzenie budúcej dávky jednotlivca, ktorá môže byť spôsobená daným zdrojom ionizujúceho žiarenia, a ktorá sa používa v etape plánovania alebo projektovania pri optimalizácii radiačnej ochrany,

zdroj ionizujúceho žiarenia je rádioaktívny žiarič, prístroj alebo zariadenie schopné emitovať ionizujúce žiarenie alebo produkovať rádioaktívne látky,

prírodný zdroj ionizujúceho žiarenia je zdroj ionizujúceho žiarenia prírodného zemského alebo kozmického pôvodu,

umelý zdroj ionizujúceho žiarenia je zdroj ionizujúceho žiarenia iný ako prírodný zdroj ionizujúceho žiarenia,

rádioaktívny žiarič je rádioaktívna látka, ktorej aktivita a hmotnostná aktivita presahujú hodnoty aktivity a hmotnostnej aktivity uvedené v osobitnom predpise*,

uzavretý rádioaktívny žiarič je rádioaktívny žiarič, ktorého konštrukcia zabezpečuje tesnosť a za podmienok bežného používania vylučuje únik rádioaktívnych látok,

otvorený rádioaktívny žiarič je rádioaktívny žiarič, ktorý nespĺňa podmienky uzavretého rádioaktívneho žiariča,

nepoužívaný žiarič je rádioaktívny žiarič, ktorý sa už pri činnosti vedúcej k ožiareniu nepoužíva a s jeho ďalším používaním sa už nepočíta; uzavretý rádioaktívny žiarič, ktorý nemá platné osvedčenie uzavretého žiariča dlhšie ako 12 mesiacov, sa považuje za nepoužívaný,

opustený žiarič je uzavretý rádioaktívny žiarič, ktorý nie je pod administratívnou kontrolou, pretože jej nikdy nepodliehal alebo preto, že bola kontrola zanedbaná a žiarič bol opustený, stratený, nesprávne umiestnený, ukradnutý alebo odovzdaný novému vlastníkovi bez riadneho oznámenia príslušnému orgánu alebo bol odovzdaný prijímateľovi bez jeho upovedomenia,

rádioaktívna látka je každá látka, ktorá obsahuje jeden alebo viac rádionuklidov, ktorých aktivita, alebo hmotnostná aktivita alebo objemová aktivita nie je z hľadiska radiačnej ochrany zanedbateľná,

rádioaktívna kontaminácia je kontaminácia ľubovoľného materiálu, povrchu alebo prostredia alebo jednotlivca rádioaktívnymi látkami; ak ide o ľudské telo, rádioaktívna kontaminácia je vonkajšia kontaminácia kože a vnútorná kontaminácia bez ohľadu na spôsob príjmu rádionuklidov,

kontrolované pásmo sú priestory pracoviska s kontrolovaným vstupom, na ktorom sa vykonávajú činnosti vedúce k ožiareniu, podliehajúce osobitným požiadavkám s cieľom zabezpečiť radiačnú ochranu a zamedziť šíreniu rádioaktívnej kontaminácie,

inštitucionálny rádioaktívny odpad je rádioaktívny odpad vznikajúci pri činnostiach vedúcich k ožiareniu so zdrojmi ionizujúceho žiarenia s výnimkou vyhorelého jadrového paliva a rádioaktívnych odpadov z jadrových zariadení; inštitucionálnym rádioaktívnym odpadom sú aj nepoužívané žiariče,

pracovník je zamestnanec alebo osoba samostatne zárobkovo činná, vystavená pri vykonávaní pracovnej činnosti ožiareniu, ktoré môže prekročiť niektorý z limitov ožiarovania ustanovených pre obyvateľov,

externý dodávateľ služieb je fyzická osoba-podnikateľ alebo právnická osoba, ktorá na základe zmluvy s držiteľom povolenia na činnosť vedúcu k ožiareniu vykonáva činnosť vedúcu k ožiareniu v kontrolovanom pásme zriadenom držiteľom povolenia,

externý pracovník je pracovník kategórie A podľa osobitného predpisu*, ktorý vykonáva činnosť v kontrolovanom pásme, pričom nie je zamestnancom držiteľa povolenia na činnosť vedúcu k ožiareniu.

rádionuklid je druh atómov, ktoré majú rovnaký počet protónov, rovnaký počet neutrónov, rovnaký energetický stav a ktoré podliehajú samovoľnej premene v zložení alebo v stave atómových jadier.

**osobitným predpisom sa aktuálne rozumie NV SR 345/2006 Z.z.*

1.5 Základné princípy radiačnej ochrany

Ochrana ľudského organizmu pred účinkami ionizujúceho žiarenia znamená predovšetkým ochranu pred vonkajším ožiarением, pôvodcom ktorého sú rádionuklidy a zdroje žiarenia, nachádzajúce sa v našom okolí, ako aj ochrana pred ožiarением vnútorným, ktoré spôsobujú rádionuklidy, ktoré vnikli do organizmu (cez kožu, dýchacím ústrojenstvom, alebo zažívacím traktom).

1. princíp:

Činnosť vedúcu k ožiarению možno vykonávať, len ak je **odôvodnená**; za odôvodnenú sa považuje taká činnosť vedúca k ožiarению, pri ktorej zdravotná ujma, ktorú môže táto činnosť spôsobiť, je vyvážená predpokladaným prínosom pre osobu alebo pre spoločnosť.

2. princíp:

Každý, kto vykonáva činnosť vedúcu k ožiarению, je povinný zabezpečiť, aby počet ožiarенých osôb, úroveň a pravdepodobnosť ich ožiarения boli trvalo udržiavané **tak nízko, ako je možné racionálne dosiahnuť** pri zvážení ekonomických a spoločenských hľadísk (ALARA).

3. princíp:

Každý, kto vykonáva činnosti vedúce k ožiarению, je povinný obmedzovať ožiarение tak, aby ožiarение osôb zo všetkých vykonávaných činností **neprekročilo limity ožiarения**.

Radiačná ochrana je systém technických a organizačných opatrení na obmedzenie ožiarения. Ak je práca spojená s možnosťou ožiarения osôb, musia byť splnené požiadavky na ochranu zdravia definované legislatívou.

Činnosť vedúca k ožiarению je akákoľvek ľudská činnosť, ktorá môže zvýšiť ožiarение osôb z existujúcich zdrojov ionizujúceho žiarenia okrem procesu ožiarения v prípade radiačnej nehody alebo radiačnej havárie.

ad 1.) Odôvodnenie činnosti vedúcej k ožiarению

Všetky nové druhy činností vedúcich k ožiarению sa musia pred svojím prvým zavedením do praxe alebo prvým povolením odôvodniť.

Odôvodnenia existujúcich druhov činností vedúcich k ožiarению sa musia prehodnotiť, keď sa získajú nové a významné poznatky o ich pôsobení alebo následkoch.

ad 2.) Optimalizácia radiačnej ochrany

Optimalizácia radiačnej ochrany sa vykonáva kvalitatívnymi a kvantitatívnymi metódami. Pri optimalizácii radiačnej ochrany sa zvažujú len alternatívy, ktoré nevedú k ožiarению, ktoré by prevyšovalo limity ožiarения alebo medzné dávky, ak sú pre daný zdroj ionizujúceho žiarenia alebo danú činnosť vedúcu k ožiarению určené.

Pri určovaní medzných dávok pre jednotlivú činnosť vedúcu k ožiarению alebo pre jednotlivý zdroj ionizujúceho žiarenia úrad alebo príslušný regionálny úrad zohľadní doterajšie skúsenosti s podobnými činnosťami alebo zdrojmi ionizujúceho žiarenia tak, aby úroveň radiačnej ochrany nebola nižšia, ako sa už v praxi dosiahla a uváži možný vplyv iných činností vedúcich k ožiarению a zdrojov ionizujúceho žiarenia tak,

aby celkové ožiarenie zo všetkých zdrojov ionizujúceho žiarenia nebolo vyššie ako príslušné limity ožiarenia. Požiadavky, postupy a smerné hodnoty na preukázanie optimalizácie radiačnej ochrany sú uvedené v prílohe č. 4 nariadenia vlády 345/2006 Z.z.

ad 3.) Limitovanie ožiarenia

Pracovať so zdrojmi ionizujúceho žiarenia a nakladať s inštitucionálnymi rádioaktívnymi odpadmi môžu odborne spôsobilé osoby, ktoré dosiahli 18 rokov veku.

Osoby vo veku od 16 rokov do 18 rokov môžu vykonávať činnosti vedúce k ožiareniu len z dôvodu prípravy na povolanie.

Činnosti vedúce k ožiareniu, pri ktorých efektívna dávka môže byť vyššia ako 1 mSv ročne alebo ekvivalentná dávka môže byť vyššia ako jedna desatina limitu ožiarenia očnej šošovky, kože a končatín, môžu vykonávať len pracovníci kategórie B. Činnosti vedúce k ožiareniu, pri ktorých efektívna dávka môže byť vyššia ako 6mSv ročne, alebo ekvivalentná dávka môže byť vyššia ako tri desatiny limitu ožiarenia očnej šošovky, kože a končatín, môžu vykonávať len pracovníci kategórie A.

Limity ožiarenia sa členia na:

- a) limity pre obyvateľov,
- b) limity pre pracovníkov,
- c) limity pre praktikantov a študentov.

Limity ožiarenia sa nevzťahujú na

- a) lekárske ožiarenie osôb, ktorým sa poskytuje zdravotná starostlivosť,
- b) ožiarenie osôb, ktoré sa okrem svojich pracovných povinností vyplývajúcich z výkonu povolania alebo z pracovného pomeru dobrovoľne starajú o pacientov vystavených lekárskeho ožiareniu, alebo týchto pacientov navštevujú, alebo žijú s nimi v spoločnej domácnosti, keď boli po aplikácii rádionuklidov prepustení zo zdravotníckeho zariadenia,
- c) dobrovoľníkov zúčastňujúcich sa lekárskeho a biomedicínskych výskumných programov.

Limity ožiarenia pracovníkov sú:

- a) efektívna dávka 100 mSv počas piatich za sebou nasledujúcich kalendárnych rokov, pričom efektívna dávka v žiadnom kalendárnom roku nesmie prekročiť 50 mSv,
- b) ekvivalentná dávka v očnej šošovke 150 mSv v kalendárnom roku,
- c) ekvivalentná dávka v koži 500 mSv v kalendárnom roku, ktorá sa určuje ako priemerná dávka na ploche jedného cm^2 najviac ožiarenej kože bez ohľadu na veľkosť ožiarenej plochy kože,
- d) ekvivalentná dávka v horných končatinách od prstov až po predlaktie a v nohách od chodidiel až po členky 500 mSv v kalendárnom roku.

Limity efektívnej dávky sa vzťahujú na súčet efektívnej dávky z vonkajšieho ožiarenia v kalendárnom roku a úväzkov efektívnej dávky z jednotlivých príjmov rádioaktívnej látky v kalendárnom roku zo všetkých zdrojov ionizujúceho žiarenia, ktorým bol pracovník vystavený pri výkone činností vedúcich k ožiareniu.

Limity ožiarenia tehotných žien a dojčiacich matiek

Limit ožiarenia tehotných žien pracujúcich na pracovisku so zdrojmi ionizujúceho žiarenia sa ustanovuje tak, aby od času, keď tehotná žena oznámi tehotenstvo prevádzkovateľovi, až do konca tehotenstva súčet efektívnych dávok z vonkajšieho ožiarenia a úväzkov efektívnych dávok z vnútorného ožiarenia plodu neprekročil 1 mSv. Keď žena oznámi tehotenstvo prevádzkovateľovi, ožiarenie plodu sa bezodkladne obmedzí úpravou podmienok práce tak, aby bolo nepravdepodobné, že súčet efektívnych dávok z vonkajšieho ožiarenia a úväzkov dávok z vnútorného ožiarenia plodu aspoň po zostávajúci čas tehotenstva prekročí 1 mSv.

Práca tehotnej ženy na pracovisku so zdrojmi ionizujúceho žiarenia sa považuje za prácu spojenú so špecifickým rizikom. Vykonávať prácu v kontrolovanom pásme pracoviska so zdrojmi ionizujúceho žiarenia a prácu, pri vykonávaní ktorej je pravdepodobné, že súčet efektívnych dávok z vonkajšieho ožiarenia a úväzkov dávok z vnútorného ožiarenia plodu po celý čas tehotenstva prekročí 1 mSv, je tehotným ženám zakázaná.

Ak žena, ktorá pracuje v kontrolovanom pásme pracoviska s otvorenými rádioaktívnymi žiaričmi, oznámi prevádzkovateľovi, že dojčí dieťa, prevádzkovateľ ju bezodkladne vyradí z práce v kontrolovanom pásme a úpravou podmienok práce dojčiacej ženy obmedzí ožiarenie dojčat'a príjmom rádionuklidov z kontaminovaného materského mlieka.

Limity ožiarenia praktíkantov a študentov sú od kalendárneho roku, v ktorom tieto osoby dovŕšia 16. rok veku, do konca kalendárneho roku, v ktorom dovŕšia 18. rok veku:

- a) efektívna dávka 6 mSv v kalendárnom roku,
- b) ekvivalentná dávka v očnej šošovke 50 mSv v kalendárnom roku,
- c) ekvivalentná dávka v koži 150 mSv v kalendárnom roku, ktorá sa určuje ako priemerná dávka na ploche 1 cm² najviac ožiarenej kože bez ohľadu na veľkosť
 - a) ožiarenej plochy kože,
 - d) ekvivalentná dávka v rukách od prstov až po predlaktie a v nohách od chodidiel až po členky 150 mSv v kalendárnom roku.

Mladší praktíkanti a študenti majú limit ako u obyvateľstva, starší ako pracovníci so zdrojmi žiarenia.

Limity ožiarenia obyvateľov sú:

- a) efektívna dávka 1 mSv v kalendárnom roku,
- b) ekvivalentná dávka v očnej šošovke 15 mSv v kalendárnom roku,
- c) ekvivalentná dávka v koži 50 mSv v kalendárnom roku, ktorá sa určuje ako priemerná dávka na ploche 1 cm² najviac ožiarenej kože bez ohľadu na veľkosť ožiarenej plochy kože.

Výnimočné ožiarenie môže podstúpiť len pracovník kategórie A dobrovoľne a po predchádzajúcom preukázateľnom poučení o rizikách spojených s výnimočným ožiarením. K návrhu na výnimočné ožiarenie pri vykonávaní činnosti vedúcej k ožiareniu vydáva úrad rozhodnutie, v ktorom povolí prekročenie limitov ožiarenia konkrétnych pracovníkov („autorizované limity“), ktoré nesmú prekročiť dvojnásobok

limitov ožiarenia pracovníkov. Výnimočné ožiarenie nie je prípustné u tehotných a dojčiacich žien.

1.6 Zabezpečenie radiačnej ochrany na pracovisku

Radiačná ochrana pracovníkov pri vykonávaní činnosti vedúcej k ožiareniu sa zabezpečuje najmä:

- a) odôvodnením činnosti a optimalizáciou radiačnej ochrany v rámci pracovných podmienok vrátane vopred vykonaného ohodnotenia charakteru a rozsahu možného ohrozenia zdravia pracovníkov, rizík spojených s pripravovanou činnosťou a pravidelným prehodnocovaním podľa skúseností z prevádzky,
- b) vymedzovaním sledovaných pásem a kontrolovaných pásem na pracovisku so zreteľom na odhad očakávaného ožiarenia pri bežnej prevádzke a pravdepodobnosť a rozsah potenciálneho ožiarenia,
- c) kategorizáciou pracovníkov,
- d) zabezpečením sústavného dozoru nad radiačnou ochranou, regulačných a kontrolných opatrení, vybavením pracoviska prístrojmi, zariadeniami a pomôckami v dostatočnom množstve a v dostatočnej kvalite na zabezpečenie meraní uvedených v monitorovacom pláne, v havarijnom pláne alebo v programe zabezpečovania kvality; vybavením pracovníkov osobnými ochrannými pracovnými prostriedkami so zodpovedajúcim tieniacim účinkom a ochrannými pomôckami,
- e) monitorovaním pracovných podmienok vo vymedzených ochranných pásmach a tam, kde je to potrebné, aj osobným monitorovaním,
- f) zdravotným dohľadom.

Pred uvedením pracoviska, na ktorom sa vykonávajú činnosti vedúce k ožiareniu, do prevádzky sa

- a) vymedzia a označia ochranné pásma:
 - 1. kontrolované pásmo,
 - 2. sledované pásmo,
 - 3. pásmo s obmedzeným prístupom,
- b) pracovisko vybaví prístrojmi, zariadeniami a pracovnými pomôckami v súlade s monitorovacím plánom, havarijným plánom a povolením na činnosť vedúcu k ožiareniu,
- c) zabezpečí vybavenie pracovníkov na pracoviskách so zdrojmi ionizujúceho žiarenia relevantnými osobnými ochrannými pracovnými prostriedkami (ďalej len „ochranný prostriedok“) s dostatočným tieniacim účinkom, najmä plášťami, zásterami, okuliarmi, rukavicami, a pracovnými pomôckami, najmä pinzetami, kliešťami, tieniacimi ochrannými obalmi a kontajnermi,
- d) zabezpečí vybavenie pracovníkov kategórie A osobnými dozimetrami,
- e) zabezpečí sústavný dozor nad dodržiavaním požiadaviek na bezpečnú prevádzku pracoviska odborným zástupcom a zamestnancom, ktorý riadi práce so zdrojmi ionizujúceho žiarenia.

Kontrolované pásmo sa vymedzuje tam, kde by efektívna dávka z ožiarenia mohla prekročiť 6 mSv alebo ekvivalentné dávky by mohli prekročiť tri desatiny príslušných limitov ožiarenia pracovníkov.

Sledované pásmo sa na pracovisku, kde sa vykonáva činnosť vedúca k ožiareniu, vymedzuje všade tam, kde sa očakáva, že efektívna dávka by mohla byť vyššia ako 1 mSv za rok alebo ekvivalentná dávka by mohla byť vyššia ako jedna desatina limitu ožiarenia očnej šošovky, kože a končatín.

Na účely monitorovania a zdravotného dohľadu sa pracovníci zaraďujú do kategórie A alebo do kategórie B. **Pracovník kategórie A** je pracovník, ktorého efektívna dávka z ožiarenia pri pracovnej činnosti môže byť väčšia ako 6 mSv za obdobie jedného kalendárneho roka alebo ekvivalentná dávka z ožiarenia pri pracovnej činnosti môže byť väčšia ako tri desatiny ustanovených limitov ožiarenia očnej šošovky, kože a končatín. **Pracovník kategórie B** je pracovník, ktorý nie je klasifikovaný ako pracovník kategórie A.

Prevádzkovateľ musí pracovníkov, praktikantov a študentov **vopred preukázateľne informovať o:**

- a) charaktere a rozsahu možného ohrozenia zdravia,
- b) rizikách spojených s ich prácou a o prípadnej zdravotnej ujme s tým spojenej,
- c) všeobecných postupoch radiačnej ochrany a opatreniach, ktoré sa musia prijať, najmä o tých, ktoré zodpovedajú prevádzkovým a pracovným podmienkam vzťahujúcim sa na danú činnosť všeobecne a na jednotlivé pracoviská a práce, na ktoré môžu byť pridelení,
- d) dôležitosti dodržiavania zdravotných, technických a administratívnych požiadaviek radiačnej ochrany,
- e) význame a nutnosti včasného oznámenia tehotenstva z dôvodu rizík ožiarenia plodu a rizika rádioaktívnej kontaminácie dojčťa v prípade vnútornej kontaminácie rádionuklidmi.

Cieľom informovania je získanie základných znalostí radiačnej ochrany nevyhnutných na výkon práce na pracovisku. Rozsah informácií závisí od charakteru vykonávanej činnosti.

Prevádzkovateľ je povinný najmenej **raz ročne zabezpečiť školenie** pracovníkov, praktikantov a študentov tak, aby boli dostatočne oboznámení nielen so všeobecnými pravidlami a postupmi v radiačnej ochrane, ale najmä s opatreniami týkajúcimi sa radiačnej ochrany pri práci s konkrétnymi zdrojmi ionizujúceho žiarenia na pracovisku pri bežnej prevádzke a za predvídateľných odchýlok od tejto prevádzky alebo pri vzniku mimoriadnej radiačnej situácie. O realizácii školení a preverení vedomostí pracovníkov, praktikantov a študentov je prevádzkovateľ povinný viesť písomné záznamy. Rozsah školení závisí od charakteru vykonávanej činnosti.

Zdravotný dohľad nad pracovníkmi je založený na zásadách, ktorými sa všeobecne riadi ochrana zdravia pri práci. Zdravotný dohľad vykonáva v rámci preventívnej zdravotnej starostlivosti o pracovníkov. Pracovníci kategórie A musia byť pod zdravotným dohľadom. Zdravotný dohľad môže príslušný regionálny úrad v odôvodnených prípadoch nariadiť aj pracovníkom kategórie B.

Zdravotný dohľad zahŕňa tieto lekárske preventívne prehliadky:

- a) vstupnú, vykonanú vždy pred zaradením pracovníka do kategórie A; jej cieľom je posúdiť zdravotnú spôsobilosť zastávať predpokladané pracovné miesto ako pracovník kategórie A,
- b) periodickú, vykonávanú u pracovníkov kategórie A najmenej jedenkrát ročne; jej cieľom je overiť, či je pracovník z hľadiska zdravotnej spôsobilosti i naďalej schopný plniť svoje povinnosti pri vykonávaní činností vedúcich k ožiareniu,
- c) mimoriadnu, vykonávanú v prípadoch, ak existuje odôvodnené podozrenie, že došlo ku zmene zdravotného stavu pracovníka kategórie A, alebo došlo ku prekročeniu niektorého z limitov ožiarovania pracovníkov a treba posúdiť podmienky na ďalšie vystavenie vplyvom žiarenia pri práci. Prehliadku taktiež môže nariadiť príslušný regionálny úrad.
- d) výstupnú.

2. Dozimetrická terminológia, veličiny a jednotky

2.1 Zákon rádioaktívnej premeny. Konštanta premeny

Rádioaktívna premena je náhodný proces. Za určitý časový interval dt sa premení časť jadier dN z celkového počtu rádioaktívnych jadier N .

Úbytok jadier dN následkom rádioaktívnej premeny bude úmerný celkovému počtu rádioaktívnych ešte nerozpadnutých jadier N a dĺžke časového intervalu dt

$$-dN = \lambda N dt \quad (2.1)$$

kde λ je konštanta úmernosti.

Integrovaním výrazu (2.1) v časovom intervale 0-t za predpokladu, že v čase $t = 0$, $N = N_0$, dostaneme **zákon rádioaktívnej premeny**:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

kde N_0 je počet rádioaktívnych jadier v čase $t = 0$,

$N(t)$ - stredný počet ešte nerozpadnutých jadier v čase t ,

λ - konštanta premeny (rozpadová konštanta).

Vidíme, že rádioaktívna premena je náhodný proces, ktorý sa riadi exponenciálnym rozdelením.

Konštanta premeny λ charakterizuje časovú nestálosť rádioaktívneho nuklidu, je to vlastne intenzita premeny. Jednotkou konštanty premeny je s^{-1} . Pre daný rádionuklid v danom energetickom stave ju definujeme ako podiel pravdepodobnosti dP , že jadro tohto rádionuklidu podľahne za malý časový interval dt rádioaktívnej premene a tohto časového intervalu.

Konštanta premeny je konštantou pre daný rádionuklid.

Okrem konštanty premeny λ rýchlosť rozpadu charakterizuje **doba polpremeny $T_{1/2}$** , čo je stredný časový interval, za ktorý sa samovoľne premení polovica rádionuklidu.

Ak dosadíme do vzťahu (2.2) $N = \frac{N_0}{2}$, $t = T_{1/2}$, dostaneme vzťah medzi konštantou premeny λ a dobou polpremeny $T_{1/2}$:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (2.3)$$

Prevrátenú hodnotu konštanty premeny $t = \frac{1}{\lambda}$ nazývame strednou dobou života rádioaktívnych jadier. **Stredná doba života** udáva čas za ktorý klesne počet rádioaktívnych jadier e krát, čo vyplýva zo zákona rozpadu.

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} = N_0 \cdot e^{-1} = \frac{N_0}{e} \cong 0,368 N_0 \quad (2.4)$$

kde **$e = 2,718....$** je základ prirodzených logaritmov.

S polčasom premeny súvisí **stredná doba života** podľa vzťahu:

$$t = \frac{T_{1/2}}{\ln(2)} \cong 1,44 \cdot T_{1/2} \quad (2.5)$$

2.2 Aktivita

Aktivita vyjadruje podiel strednej hodnoty počtu spontánných jadrových premien z daného energetického stavu dN vyskytujúcich sa v množstve rádionuklidu za malý časový interval dt a tohto časového intervalu. (Definícia STN ISO 31-10)

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (2.6)$$

Aktivita je úmerná aj počtu rádioaktívnych jadier podľa vzťahu: **A = λ N**.

S aktivitou súvisia ďalšie veličiny, uvedené v tabuľke 2.1.

Tab. 2.1 Veličiny odvodené od aktivity

Veličina			Jednotka		
Názov	Značka	Definícia	Názov	Značka	Rozmer
molárna aktivita	a_n	$a_n = \frac{A}{n}$	becquerel na mol	Bq mol ⁻¹	s ⁻¹ mol ⁻¹
hmotnostná aktivita	a_m	$a_m = \frac{A}{m}$	becquerel na kilogram	Bq kg ⁻¹	kg ⁻¹ s ⁻¹
objemová aktivita	a_V	$a_V = \frac{A}{V}$	becquerel na meter kubický	Bq m ⁻³	m ⁻³ s ⁻¹
plošná aktivita	a_S	$a_S = \frac{A}{S}$	becquerel na meter štvorcový	Bq m ⁻²	m ⁻² s ⁻¹
dĺžková aktivita	a_l	$a_l = \frac{A}{l}$	becquerel na meter	Bq m ⁻¹	m ⁻¹ s ⁻¹
rýchlosť emisie (emanácia) aktivity	$\dot{A}$	$\dot{A} = \frac{A}{t}$	becquerel za sekundu	Bq·s ⁻¹	s ⁻²

n - látkové množstvo rádioaktívnej látky o aktivite A

m - hmotnosť rádioaktívnej látky o aktivite A

V - objem rádioaktívnej látky o aktivite A

S - plocha na ktorej je aktivita A rozložená

l - dĺžka na ktorej je aktivita A rozložená

t - časový interval, za ktorý sa rovnomerne uvoľňuje aktivita A

V prípade nerovnomerného rozdelenia aktivity je potrebné použiť diferenciálne definície odvodených veličín.

Keďže λ je pre daný druh jadier konštanta, aktivita bude závisieť iba od počtu rádioaktívnych jadier. Preto aktivita A bude klesať exponenciálne, teda tak, ako sa mení počet jadier

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

kde A_0 je začiatková aktivita, t.j. aktivita v čase $t = 0$.

Hlavnou jednotkou aktivity A je s^{-1} . Hlavná jednotka aktivity má podľa SI názov becquerel (Bq).

Medzi staré, dnes už nepoužívané jednotky aktivity patria aj 1 curie = 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq (presne), 1 rutherford = 1 Rd = 10^6 Bq = 1 MBq, 1 eman = 3,7 Bq/l vody alebo vzduchu a 1 mache = 3,64 eman = 13,47 Bq/l vzduchu.

Pre kvalitatívnu charakteristiku obsahu ^{90}Sr v rôznych objektoch sa používa tzv. stronciová jednotka. Stroncium je chemickým analógom vápnika. Preto sa niekedy používa veličina, charakterizujúca pomer stroncia k vápniku v sledovanom objekte (pôde, rastlinách, potrave, kostiach a pod.). Jedna stronciová jednotka (1 Srj) zodpovedá koncentrácii 37 mBq ^{90}Sr na 1 g Ca. Podobne pre cézium v pomere k draslíku: 1 CsJ = 37 mBq ^{137}Cs na 1 g K.

Tabuľka č. 2.2 Merné hmotnosti a hmotnostné aktivity niektorých rádioaktívnych prvkov

Izotop	Hmotnosť [g/Bq]	a_m [Bq/g]
^{232}Th	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^3$
^{226}Ra	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$3,7 \cdot 10^{10}$
^{235}U	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$79,3 \cdot 10^3$
^{238}U	$8,1 \cdot 10^{-5}$	$12 \cdot 10^3$

2.3 Absorbovaná dávka

Absorbovaná dávka [Gy = $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$] v danom bode pre každé IŽ je podiel strednej odovzdanej energie $d\bar{e}$ látky v objemovom elemente dV a jeho hmotnosti dm .

$$D = \frac{d\bar{e}}{dm} \quad (2.8)$$

Hlavnou jednotkou dávky je 1 joule na 1 kilogram = $1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Jej názov je gray (Gy): $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. V minulosti bol jednotkou dávky 1 rad (skratka z anglického "radiation absorbed dose"). Vzťah medzi nimi je $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$.

Dávka popisuje odovzdávanie energie za určitý časový úsek. Pojem dávka používame v súvislosti s ľubovoľným druhom žiarenia a s ľubovoľným absorbátorom (ožarovaným objektom). Dávka závisí od ožarovaného materiálu, preto sa pre presnosť uvádza aj látka, ku ktorej sa vzťahuje, napr. D_{vzd} - vzduch, D_{tk} - tkanivo...

Keďže biologické účinky žiarenia v značnej miere závisia od energie absorbovanej ľudským organizmom, absorbovaná dávka je určitou mierou na posudzovanie stupňa radiačného poškodenia organizmu. Používanie tejto jednotky je výhodné, pretože množstvo absorbovanej energie je ľahko merateľné napr. kalorimetrickými metódami. Treba si však uvedomiť, že biologické účinky žiarenia sú rozličné pre rôzne druhy žiarenia napriek tomu, že organizmus absorboval to isté množstvo energie. Pri posudzovaní biologických účinkov žiarenia je teda potrebné poznať nielen množstvo odovzdanej (absorbovanej) energie, ale aj spôsob jej odovzdávania a druh žiarenia, ktorým táto energia bola odovzdaná.

Dávka teda charakterizuje iba energetické účinky žiarenia. Pri posudzovaní biologických účinkov rôznych druhov žiarenia ju používame iba orientačne.

Okamžitú situáciu popisuje dávkový príkon. **Príkon absorbovanej dávky** (dávkový príkon) vyjadruje prírastok dávky dD v časovom intervale dt delený časovým intervalom dt .

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (2.9)$$

Hlavnou jednotkou dávkového príkonu je 1 joule za sekundu na 1 kilogram = 1 Watt na 1 kilogram = $1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, teda **Gy** s⁻¹. Jej rozmer je $\text{m}^2 \text{ s}^{-3}$.

Prenos energie fotónov na látku prebieha v dvoch krokoch. Najprv sa energia primárnych fotónov premení na kinetickú energiu sekundárnych elektrónov prípadne na pokojovú a kinetickú energiu elektrón - pozitronových párov. Následne sa táto energia odovzdáva v okolí miesta interakcie, čo sa prejavuje ionizáciou a excitáciou atómov. Časť energie sa môže odniesť na značné vzdialenosti prostredníctvom rozptýlených comptonovských fotónov, charakteristického žiarenia X, brzdného žiarenia sekundárnych elektrónov alebo anihilačných fotónov.

Z hľadiska prenosu energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabitú sekundárne častice sa preto používa **koeficient prenosu energie** $m_{tr} [\text{m}^{-1}]$

$$\frac{m_{tr}}{r} = \frac{K}{\Psi} \quad \text{alebo} \quad \frac{m_{tr}}{r} = \frac{\frac{K}{\Psi}}{y} = \frac{K}{\Psi y} \quad (2.10)$$

Ψ je fluencia energie a vyjadruje vlastne sumárnu energiu postupujúcu žiarením do látky s hmotnosťou dm , pričom vznikajú nabitú častice so sumárnou kinetickou energiou dE_k , ktorá charakterizuje kermu K . Pre monoenergetické žiarenie platí:

$$\Psi = \Phi \cdot E \quad (2.11)$$

Časť odovzdanej energie sa odnesie mimo uvažovaného objemu. To zohľadňuje **koeficient absorpcie energie** $m_E = m_{tr} (1-G) [\text{m}^{-1}]$, kde G je časť energie nabitých častíc, stratená ako brzdné žiarenie. Analogicky ku vzťahu (2.10) platí:

$$\frac{m_E}{r} = \frac{D}{\Psi} \quad (2.12)$$

2.4 Kerma. Expozícia.

Dávka sa vzťahuje k odovzdávaniu energie látke v danom mieste, teda z vytvorených nabitých častíc na častice látky. Ak sú primárne častice nenabité, prvým krokom je interakcia s látkou, vytvorenie nabitých častíc a odovzdanie energie nabitým časticiam. Tento krok popisuje **kerma** (Kinetic Energy Released in MAtter). Vzťahuje sa teda len na nenabité častice a pre danú látku

Kerma K je podiel strednej hodnoty súčtu začiatočných kinetických energií dE_k všetkých nabitých častíc, uvoľnených nepriamo ionizujúcimi časticami v danom objeme príslušnej látky, a hmotnosti dm látky obsiahnutej v tomto objeme.

$$K = \frac{dE_k}{dm} \quad (2.13)$$

dE_K je sumárna počiatočná kinetická energia všetkých nabitých častíc v uvažovanom objeme dV uvoľnených nenabitými časticami žiarenia.

Hlavnou jednotkou kermy je 1 joule na 1 kilogram = 1 J.kg⁻¹. Jednotka sa nazýva gray Gy.

Ionizačné účinky žiarenia, t.j. množstvo elektrického náboja vytvoreného žiarením v jednotkovom objeme vzduchu charakterizuje **expozícia** X . Je to podiel strednej hodnoty súčtu elektrických nábojov dQ všetkých iónov s rovnakým znamienkom, vzniknutých v nejakom množstve vzduchu (po dolete všetkých elektrónov, t.j. negatrónov a pozitronov), uvoľnených dopadajúcimi fotónmi γ v objemovom elemente vzduchu a hmotnosti dm tohto objemu vzduchu

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (2.14)$$

Ionizácia, ktorá je vyvolaná absorpciou brzdného žiarenia, vysielaného sekundárnymi elektrónmi, sa do súčtu elektrických nábojov Q nezahrňuje. S výnimkou tohto rozdielu je ožiarenie podľa uvedenej definície ionizačným ekvivalentom kermy vo vzduchu.

Hlavnou jednotkou ožiarenia X je 1 coulomb na 1 kilogram (C.kg⁻¹). (V minulosti sa používala jednotka röntgen R = 2,58.10⁻⁴ C.kg⁻¹ alebo 1 C.kg⁻¹ = 3876 R). Ožiarenie veľkosti 1 C.kg⁻¹ vytvorí v jednom kg vzduchu za normálnych podmienok 6,25.10¹⁸ iónových párov, pričom sa absorbuje energia 2,125.10²⁰ eV=34 J. Jeden röntgen potom predstavuje energiu na jeden kg vzduchu resp. absorbovanú dávku vo vzduchu 34.2,58.10⁻⁴ J.kg⁻¹=8,77.10⁻³ J.kg⁻¹=8,77 mGy.

Z röntgenu boli odvodené aj ďalšie jednotky (u nás sa už nepoužívajú ale v USA, Rusku...bežne). V radiačnej ochrane sa používala jednotka rem - biologický ekvivalent röntgenu (röntgen ekvivalent man), definovaná ako dávka žiarenia, ktoré v človeku vyvolá rovnaký biologický účinok ako 1 R röntgenového žiarenia vzniknutého v röntgenovej lampe s napätím 250 kV.

Expozícia je historicky najstaršou dozimetrickou veličinou. Jej nevýhodou je, že je definovaná len pre fotónové žiarenie vo vzduchu. V radiačnej ochrane ju postupne vytláča kerma. V metrológii žiarenia sa však stále často využíva vďaka presnej metodike jej absolútneho merania.

Expozičný príkon $\dot{X}$ je časová (t) zmena ožiarenia X

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad (2.15)$$

kde dX znamená strednú hodnotu prírastku (expozičie) v časovom intervale dt .

Hlavnou jednotkou ožarovacieho príkonu $\dot{X}$ je 1 ampér na 1 kilogram = coulomb na kilogram za sekundu.

Expozičná výdatnosť V_X je súčin ožarovacieho príkonu $\dot{X}$ a druhej mocniny vzdialenosti od stredu rádionuklidového zdroja I^2 v ktorom je ožarovací príkon definovaný

$$V_X = I^2 \cdot \dot{X} \quad (2.16)$$

Hlavnou jednotkou ožarovacej (expozičnej) výdatnosti V_X je 1 ampér krát 1 štvorcový meter na 1 kilogram - $A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$.

Vo vzťahu (2.16) $\dot{X}$ znamená ožarovací príkon zdroja fotónov (žiarenia γ) vo vzdialenosti I od stredu zdroja žiarenia.

Merná ožarovacia (expozičná) výdatnosť B_X je podiel ožarovacej výdatnosti V_X rádioaktívnej látky s emisiou fotónov aktivity A a tejto aktivity

$$B_X = \frac{V_X}{A} \quad (2.17)$$

Hlavnou jednotkou mernej ožarovacej výdatnosti B_X je 1 coulomb krát 1 štvorcový meter na 1 kilogram = $C \cdot m^2 \cdot kg^{-1} = A \cdot s^1 \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$.

Zo vzťahov (2.16) a (2.17) dostaneme

$$B_X = \frac{I^2 \dot{X}}{A} \quad (2.18)$$

z čoho pre ožarovaciu rýchlosť dostaneme:

$$\dot{X} = \frac{B_X A}{I^2} \quad (2.18)$$

Pri fyzikálnych výpočtoch sa používa expozičná konštanta gama G , ktorá charakterizuje bodový zdroj fotónového žiarenia (neberie do úvahy rozptyl a absorpciu žiarenia v zdroji samotnom a jeho obale). Pre malé zdroje s tenkým puzdrom približne platí:

$$\dot{X} = \frac{G \times A}{I^2} \quad [C \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}] \quad (2.19)$$

Pre ožiarenie X dostaneme:

$$X = G \frac{A \cdot t}{I^2} \quad [C \cdot kg^{-1}] \quad (2.20)$$

Vzťah (2.20) je dôležitý, pretože vyjadruje vzťah expozície X s aktivitou žiariča, pracovnou vzdialenosťou I a dobou vykonávania pracovného úkonu.

Tabuľka 2.3 Hodnoty expozičnej konštanty gama niektorých rádionuklidov

Nuklid	$G \cdot 10^{20} [C \cdot m^2 \cdot kg^{-1}]$	Nuklid	$G \cdot 10^{20} [C \cdot m^2 \cdot kg^{-1}]$
^{16}N	284	^{88}Rb	65,20
^{19}O	98	^{89}Rb	230
^{24}Na	351	^{92}Sr	127
^{40}K	15	^{129}I	0,38
^{51}Cr	5	^{133}I	73
^{52}Mn	348	^{134}I	244
^{59}Fe	119	^{137}Cs	62,8
^{60}Co	249	^{140}La	215
^{57}Ni	195	^{226}Ra	175
^{88}Kr	187	^{235}U	14,30

Veličiny spojené s expozíciou sú postupne nahradzované veličinami odvodenými od kermu. Expozičnej výdatnosti zodpovedá veličina kermová výdatnosť, expozičnej konštanty gama zodpovedá kermová konštanta gama. Vzťahy medzi týmito veličinami sú analogické:

Kermová výdatnosť $V_{K,d}$ je súčin príkonu kermu $\dot{K}_d$ vyvolaného vo vzduchu fotónmi o energii väčšej ako δ a druhej mocniny vzdialenosti od stredu rádionuklidového zdroja I^2 v ktorom je príkon kermu definovaný:

$$V_{K,\delta} = I^2 \cdot \dot{K}_d \quad (2.21)$$

Kermová konštanta gama je podiel kermovej výdatnosti bodového žiariča a aktivity tohto žiariča:

$$G^d = \frac{V_{K,d}}{A} \quad (2.22)$$

2.5 Dávkový ekvivalent, ekvivalentná dávka

Už sme spomenuli, že nestačí poznať dávku, aby bolo možné posúdiť závažnosť či pravdepodobnosť škodlivých účinkov na ľudský organizmus, ktoré môže vyvolať ožiarenie za neurčených podmienok. V dozimetrii sa preto ukázalo výhodnejším zaviesť ďalšiu veličinu, ktorá by lepšie charakterizovala významnejšie škodlivé účinky ožiarenia, najmä neskoršie stochastické účinky. Na vyjadrenie rozdielov biologickej účinnosti rozličných druhov ionizujúceho žiarenia alebo rozličných podmienok ožiarenia sa v ochrane pred žiarením používajú veličiny získané násobením absorbovanej dávky príslušnými modifikujúcimi faktormi. Veličina, ktorá všetky uvedené skutočnosti zohľadňuje, sa nazýva **dávkový ekvivalent H**. Dávkový ekvivalent v ľubovoľnom mieste biologického väziva je daný vzťahom

$$H = D \cdot Q \cdot N^* \quad [Sv] \quad (2.23)$$

kde D - absorbovaná dávka, [Gy]

Q - faktor kvality, [1 (bezrozmerná veličina)]

N - súčin všetkých ďalších (v súčasnosti ešte neznámych) modifikujúcich faktorov. V súčasnosti hodnota $N = 1$. a teda sa nemusí pri výpočte zohľadňovať.

* - norma STN ISO 31-10 obsahuje uvedenú definíciu, iná norma STN 01 1310 už zohľadňuje odporúčanie ICRU vypustiť hodnotu N .

Pri presných výpočtoch sa využíva dávkový ekvivalent v závislosti od presnej veličiny lineárneho prenosu energie L .

$$H = \int_L Q(L) D_L dL \quad (2.24)$$

- D_L - rozdelenie dávky podľa lineárneho prenosu energie.

Tab.2.4 Výpočet faktora kvality $Q(L)$.

Lineárny prenos energie L , keV/m	faktor kvality $Q(L)$
menej ako 10	1
10 až 100	$0,32 \cdot L^{-2,2}$
viac ako 100	$300 \cdot L^{-0,5}$

Doporučenie ICRP miesto dávkového ekvivalentu navrhuje podobne definovanú veličinu: ekvivalentnú dávku. Akostný faktor bol nahradený radiačným váhovým faktorom w_R , pomocou ktorého môžeme určiť ekvivalentnú dávku v tkanive:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad [\text{Sv}] \quad (2.25)$$

kde $D_{T,R}$ je stredná absorbovaná dávka v biologickom tkanive T spôsobená žiarením typu R . Radiačný váhový faktor w_R vyjadruje rozdielny biologický účinok jednotlivých druhov ionizujúceho žiarenia. Názov hlavnej jednotky dávkového ekvivalentu a ekvivalentnej dávky je sievert (Sv) = J.kg⁻¹.

Tabuľka 2.5 Hodnoty radiačného váhového faktora w_R

Druh žiarenia a jeho energia	w_R , (ICRP 60)	w_R , (ICRP 103)
Fotóny všetkých energií	1	1
Elektróny všetkých energií	1	1
Neutróny, energia E		spojitá funkcia:
< 10 keV	5	$2,5 + 18,2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}, E_n < \text{MeV}$
10 keV - 100 keV	10	
100 keV - 2 MeV	20	$5,0 + 17,0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}, 1\text{MeV} < E_n < 50\text{MeV}$
2 MeV - 20 MeV	10	
> 20 MeV	5	$2,5 + 3,25e^{-[\ln(0,04E_n)]^2/6}, E_n > 50\text{MeV}$
Protóny > 2 MeV	5	2
α - častice, fragmenty, ťažké jadrá	20	20

Primárnym limitom v radiačnej ochrane je limit efektívnej dávky.

2.6 Efektívna dávka

Efektívna dávka E je súčtom ekvivalentných dávok H_T vo všetkých orgánoch alebo v tkanivách vynásobených príslušným tkanivovým váhovým faktorom w_T .

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad [\text{Sv}] \quad (2.26)$$

Tabuľka 2.6 Tkanivový váhový faktor w_T

Tkanivo, orgán	Tkanivový váhový faktor w_T , (ICRP 60)	Tkanivový váhový faktor w_T , (ICRP 103)
Gonády	0,20	0,08
Červená kostná dreň	0,12	0,12
Hrubé črevo	0,12	0,12
Pľúca	0,12	0,12
Žalúdok	0,12	0,12
Močový mechúr	0,05	0,04
Mliečna žľaza	0,05	0,12
Pečeň	0,05	0,04
Pažerák	0,05	0,04
Štítna žľaza	0,05	0,04
Koža	0,01	0,01
Povrchy kostí	0,01	0,01
Slinná žľaza	-	0,01
Mozog	-	0,01
Ostatné orgány a tkanivá	0,05	0,12

Limity efektívnej dávky sa vzťahujú na celkovú efektívnu dávku v danom kalendárnom roku E , ktorá sa počíta ako súčet efektívnej dávky z vonkajšieho ožiarovania a vnútorného ožiarovania vyjadreného vo forme úväzkov efektívnej dávky z jednotlivých príjmov rádioaktívnej látky inhaláciou a ingesciou v kalendárnom roku zo všetkých zdrojov ionizujúceho žiarenia, ktorým sú vystavené osoby pracujúce so zdrojmi žiarenia alebo jednotlivci z obyvateľstva.

$$E = E_{\text{external}} + E_{\text{ing}} + E_{\text{inh}} \quad (2.27)$$

Úväzok dávky je teda priradený do roku, kedy nastala vnútorná kontaminácia (E_{ing} , E_{inh}) aj keď ožiarenie sa počíta a reálne môže trvať dlhšie obdobie (počítame 50 rokov pre pracovníkov a 70 rokov pre obyvateľstvo).

2.7 Úväzok dávky

Úväzok efektívnej dávky $E(t)$ je daný vzťahom

$$E(t) = \sum_T w_T H_T(t) = \sum_T w_T \cdot \int_{t_0}^{t_0+t} \dot{H}_T(t) dt \quad (2.28)$$

Je to časový integrál efektívnej dávky za čas t od príjmu rádionuklidu.

Pri výpočte úväzku efektívnej dávky sa u osôb starších ako 18 rokov veku počíta s obdobím 50 rokov a u osôb mladších ako 18 rokov veku s obdobím 70 rokov od príjmu rádionuklidov, ak nie je uvedené inak. Jednotkou úväzku efektívnej dávky je sievert.

Úväzok ekvivalentnej dávky $H_T(t)$ je časový integrál príkonu ekvivalentnej dávky v orgáne alebo tkanive T za čas t od príjmu rádionuklidu, ktorý jednotliviec prijme v dôsledku požitia alebo vdýchnutia rádionuklidov.

$\dot{H}_T(t)$ - je príslušný príkon ekvivalentnej dávky v orgáne alebo tkanive T v čase t ,
 t - je čas, v rozsahu ktorého sa vykonáva integrovanie.

V údají $\dot{H}_T(t)$ je čas t vyjadrený v rokoch. Jednotkou úväzku ekvivalentnej dávky je sievert.

Príjem rádionuklidu do organizmu sa bežne počíta pre príjem potravinou alebo dýchaním. Iné cesty sú zanedbateľné a uvažujú sa len v mimoriadnych prípadoch (napríklad cez otvorené rany). Obvykle vieme vyjadriť prijaté množstvo vo forme aktivity.

Príjem rádionuklidov potravinou $I_{j,ing}$ sa vypočíta takto:

$$I_{j,ing} = \sum_P a_{Pj} \cdot P_P \quad [Bq] \quad (2.29)$$

a_{Pj} je priemerná ročná merná aktivita j -tého rádionuklidu v potravině P a vode $[Bq/kg, \text{ resp. } Bq/l]$,

P_P je spotreba potravy P v jednom roku $[kg \text{ resp. } l]$.

Ročnú spotrebu potravy je potrebné určiť zo štatistických prehľadov, a to osobitne pre jednotlivé vekové kategórie g .

Príjem rádionuklidov dýchaním $I_{j,inh}$ sa vypočíta takto:

$$I_{j,inh} = a_{v,j} \cdot B \quad [Bq] \quad (2.30)$$

$a_{v,j}$ je priemerná ročná merná aktivita j -tého rádionuklidu vo vzduchu $[Bq \cdot m^{-3}]$,

B je množstvo vdychovaného vzduchu v jednom roku $[m^3 \cdot rok^{-1}]$.

Hodnoty množstva vdychovaného vzduchu pre jednotlivé skupiny osôb sú stanovené v legislatíve (NV 345/2006 Z.z.) a uvedené v tabuľke 2.1.

Tabuľka 2.1 Hodnoty množstva vdychovaného vzduchu pre jednotlivé skupiny osôb

Skupina osôb	Vek v rokoch	B ($m^3 \cdot rok^{-1}$)
Pracovníci so zdrojmi ionizujúceho žiarenia	nad 18	2000
Ostatní obyvatelia	0 – 1	1000
	1 – 2	2000
	2 – 7	4000
	7 – 12	6000
	12 – 17	8000
	nad 17	8500

Úväzok efektívnej dávky sa potom vypočíta z príjmu pomocou konverzných faktorov nasledovne:

$$E_{ing} = \sum_j h(g)_{j,ing} \cdot I_{j,ing} \quad \text{resp.} \quad E_{inh} = \sum_j h(g)_{j,inh} \cdot I_{j,inh} \quad (2.31)$$

$h(g)_{j,ing}$ je konverzný faktor na výpočet úväzku efektívnej dávky z príjmu rádionuklidu j (Sv/Bq) potravinou pre rôzne vekové skupiny g , (tiež koeficient dávkového úväzku, v angličtine dose factor)

$h(g)_{j,inh}$ je konverzný faktor na výpočet úväzku efektívnej dávky z príjmu rádionuklidu j (Sv/Bq) dýchaním pre rôzne vekové skupiny g.

Hodnoty konverzných faktorov pre jednotlivé rádionuklidy sú uvedené v legislatíve (NV 345/2006 Z.z.) a niektoré vybrané hodnoty v tabuľke 2.2.

Tabuľka 2.2 Konverzné faktory h_{inh} a h_{ing} na prepočet príjmu rádionuklidov vdýchnutím (inhaláciou) aerosólov a požitím (ingesciou) na úväzok efektívnej dávky

Prvok	Polčas rozpadu	Inhalácia				Ingescia	
		typ	f1	$h_{inh} [Sv/Bq]$		f1	$h_{ing} [Sv/Bq]$
				$d_{ama} = 1 \mu m$	$d_{ama} = 5 \mu m$		
K-40	$1,28 \cdot 10^9$ r	F	1	$2,1 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$	1	$6,2 \cdot 10^{-9}$
Sr-90	29,1 r	F	0,3	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$	0,3	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Cs-137	30,0 r	F	1	$4,8 \cdot 10^{-9}$	$6,7 \cdot 10^{-9}$	1	$1,3 \cdot 10^{-8}$
U-238	$4,47 \cdot 10^9$ r	F	0,02	$4,9 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$	0,02	$4,4 \cdot 10^{-8}$
		M	0,02	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	0,002	$7,6 \cdot 10^{-9}$
		S	0,002	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-6}$		

Absorpcia v pľúcach je vyjadrená typom F, M alebo S charakterizujúcim v modelových výpočtoch rýchlosť, ktorou látka prechádza z pľúc do telesných tekutín (F – rýchlo, M – stredne, S – pomaly), a koeficientom f1 charakterizujúcim frakciu, ktorá prechádza v tráviacom ústrojenstve do telesných tekutín.

2.8 Kolektívna efektívna dávka

Keďže vzťah medzi poškodením (ujmou) a rozložením dávkového ekvivalentu v ožiarenej populácii nie je jednoduchý, bolo navrhnuté použiť veličinu, ktorá sa nazýva **kolektívna efektívna dávka S**, definovaná v populácii výrazom:

$$S = \sum_i \bar{E}_i P_i \quad (2.32)$$

kde E_i je stredná efektívna dávka pre jednotlivca z populačnej podskupiny i, ktorej zodpovedá počet členov P_i . Kolektívna efektívna dávka S sa používa na účely kvantifikácie ožiarovania skupín obyvateľstva; je to súčet efektívnych dávok všetkých jednotlivcov v určitej skupine, udáva sa v man Sv.

Podobne je definovaná kolektívna ekvivalentná dávka a kolektívny dávkový ekvivalent. U všetkých týchto veličín musí byť špecifikovaný časový údaj ožiarovania a charakteristika danej skupiny populácie, bez ktorých by bol neúplný.

Histogramové rozdelenie efektívnych dávok v skupine ožiarených osôb sa v určitých prípadoch môže zameniť spojitým rozdelením efektívnej dávky. Potom kolektívnu efektívnu dávku vyjadruje vzťah:

$$S_k = \int_0^{\infty} E \times \frac{dN}{dE} dE \quad (2.33)$$

kde $(dN/dE)dE$ vyjadruje počet jednotlivcov, ktorí obdržali efektívnu dávku v rozsahu (E, E + dE).

3. Biologické hľadiská radiačnej ochrany

3.1 Základné biofyzikálne procesy

V dôsledku ožiarovania biologického tkaniva (nakoniec aj ľubovoľnej látky) dochádza k pohlcovaniu energie a nastáva **ionizácia** a **excitácia** atómov a molekúl ožarovanej látky. Prvotné poškodenie sa prejaví v najväčšej miere na základných stavebných látkach živej hmoty, ktorými sú voda, bielkoviny, nukleové kyseliny, enzýmy a i.

Biologické účinky ionizujúceho žiarenia sa prejavujú:

- 1.) v prvotných fyzikálnochemických procesoch vznikajúcich v molekulách buniek a v ich okolí prostredí,
- 2.) sekundárnymi poruchami činnosti celého organizmu ako následok prvotných procesov.

Keďže podstatnú časť (viac ako 75%) ľudského tela (aj všetkých cicavcov) tvorí voda, prvotné procesy sú v značnej miere určované absorpciou žiarenia vodou nachádzajúcou sa v bunkách. V dôsledku ionizácie molekula vody disociuje, pričom vznikajú agresívne radikály a silné oxidanty $\text{OH}^\cdot$, H_2O_2 , $\text{HO}_2^\cdot$, H^+ a pod. Tieto ďalej chemicky reagujú s biologickými látkami, napr. bielkovinami a spôsobujú vznik voľných bioradikálov, ktoré môžu migrovať a spôsobovať škody v tkanive. Dôsledkom následných biochemických procesov je vznik ďalších toxínov, narušenie činnosti biologických tkanív, zabrzdenie alebo zastavenie rastu tkanív, zmeny alebo zastavenie biochemických procesov, čo v konečnom dôsledku môže viesť k zlyhaniu životných funkcií jednotlivých orgánov až skolabovaniu celého organizmu.

Najnovšie výskumy naznačujú, že odozva bunky na ožiarenie nie je jednoznačná a záleží aká bunková štruktúra je zasiahnutá. Bola zaznamenaná zvýšená radiosenzitivita bunkového jadra. Rozhodujúcou štruktúrou pre radiobiologické účinky v bunke je **chromozómová DNA**, ktorej poškodenie má kritický význam pre ďalší osud bunky vrátane indukcie nádorov vyvolaných génovými a chromosómovými mutáciami. Poškodenie DNA je výsledkom pôsobenia priamo žiarenia - ak je DNA v dráhe častice, sekundárnych elektrónov a reaktívnych radikálov. Niekedy sa vytvárajú zložité zhluky chemicky poškodenej DNA (complex clusters) z jednovláknových a dvojitých zlomov (SSB a DSB – single and double strand breaks) a poškodení glukózo-fosfátovej bázy DNA. Tvorba komplexných zhlukov závisí na lineárnom prenose energie žiarenia (LET). Pre žiarenie s vysokým LET podiel komplexných zhlukov na poškodení DNA dosahuje 90%. Pre nízke LET je to 60%. Tento parameter je dôležitý z pohľadu opravných – reparačných mechanizmov.

Chyby pri reparačných procesoch komplexných dvojitých zlomov DNA sa prejavujú zvýšením počtu *chromozómových aberácií, génových mutácií a úmrtí* ožiarených buniek.

Zmeny génovej informácie – mutácie chromozómovej DNA. Pod mutáciou rozumieme zmenu genetickej informácie zakódovanej vo forme pozadia purínových a pyrimidínových zásad v DNA. Vo všeobecnosti môžu zmeny chromozómov (mutácie) nastať prirodzenou cestou bez zásahu človeka (spontánne mutácie), alebo vplyvom vonkajšieho pôsobenia – teplom, niektorými chemikáliami, či ionizujúcim žiarením. Bunky však majú schopnosť porušené chromozómové vlákna „zahojiť“ alebo opraviť. Tak napr. zlomené konce chromozómov sa môžu spojiť do pôvodného stavu a v novom pokolení buniek nedôjde k zmenám. K opätovnému spojeniu zlomených

koncov však môže dôjsť aj tak, že jeden zlomený koniec sa spojí s koncom iného vlákna, alebo dôjde k strate niektorého segmentu. Tiež môže dôjsť k opätovnému spojeniu koncov s vynechaním tohto segmentu, alebo môže dôjsť len k „zahojeniu“ zlomených koncov bez ich opakovaného spojenia. Mutácie geneticky rozhodujúcich častí alebo komplex takýchto mutácií na najdôležitejších miestach chromozómu má potom za následok vznik jedinca s odlišnými vlastnosťami (mutant), alebo môže mať pri poškodení väčšieho rozsahu za následok zastavenie syntézy DNA a zánik jedinca.

Génové mutácie sa delia na **dominantné** (prejavujú sa hneď v prvom pokolení) a **recesívne** (nemusia sa prejaviť vôbec, alebo sa prejavujú v ďalších pokoleniach, alebo vtedy keď obaja rodičia majú rovnaké genetické mutácie).

Najväčšiu radiačnú citlivosť na žiarenie prejavujú bunky tých orgánov, ktoré sa trvale obnovujú, ako napr. kostná dreň, slezina, gonády a pod. Bunečné zmeny, prípadne zánik buniek vyvolávajú také poruchy orgánov, ktoré zanechávajú na organizme trvalé stopy, ale môžu spôsobiť aj smrť.

Celkové biologické reakcie po ožiarení sú súhrnom fyzikálnych, chemických a biologických procesov ako aj procesov **zotavovacích** (reparačných, nápravných), ktoré smerujú k úprave vzniknutých poškodení do pôvodného stavu.

Väčšina nepriaznivých zdravotných účinkov ožiarenia môže byť zaradená do dvoch kategórií:

1. deterministické účinky (nepriaznivé tkanivové reakcie) hlavne v dôsledku úmrtia resp. poškodenia buniek po vysokých dávkach
2. stochastické účinky, t.j. rakovina a dedičné účinky, ku ktorým patrí buď rozvoj rakoviny u ožiarených jedincov v dôsledku mutácií somatických buniek, alebo dedičné choroby u potomstva v dôsledku mutácií reprodukčných buniek.

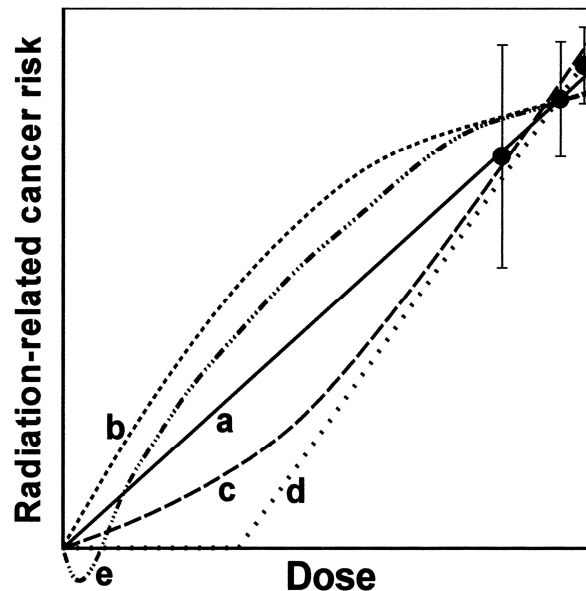
Riziko nerakovinových ochorení v dôsledku nízkych dávok ožiarenia nie je možné konkrétne vyhodnotiť a zaradiť, pretože je štatisticky nepreukázateľné. Objavujú sa však analýzy, ktoré takéto hypotézy obsahujú. V Odporúčaniach ICRP 103 sa spomína štúdia úmrtnosti osôb ožiarených pri atómovom bombardovaní v Japonsku, kde sa nazývajú choroby srdcové, mozgová mŕtvica, choroby zažívacieho traktu a dýchacích ciest. Nie je známy bunkový resp. tkanivový mechanizmus, ktorý by spôsoboval taký široký súbor ochorení, aj keď by sa mohlo jednať o nejaký „subklinický zápal“. Závislosť dávka – odozva v tomto prípade je zlúčiteľná tak s bezprahovou lineárnou závislosťou ako aj s prahom okolo 0,5 Gy.

V súvislosti so závislosťou dávka – odozva boli v minulosti vyslovené rôzne teórie. Presadila sa konzervatívna predstava o **bezprahovej lineárnej závislosti (LNT linear-non-threshold)**, z ktorej vyplýva, že akákoľvek nízka dávka má nenulovú pravdepodobnosť škodlivých následkov. Z tejto teórie vychádza jeden zo základných princípov radiačnej ochrany: *Každý, kto vykonáva činnosť vedúcu k ožiareniu, je povinný zabezpečiť, aby počet ožiarených osôb, úroveň a pravdepodobnosť ich ožiarenia boli trvalo udržiavané tak nízko, ako je možné racionálne dosiahnuť pri zvážení ekonomických a spoločenských hľadísk (ALARA – As Low As Reasonably Achievable).*

Bezprahový model nie je všeobecne prijímaný ako biologická skutočnosť, skôr je považovaný za opatrný názor pre radiačnú ochranu s cieľom vyvarovať sa

zbytočného rizika z ožiarenia, pretože sa skutočne nevie, aké veľké riziko je spojené s ožiareními veľmi malými dávkami.

Mnohé štúdie upozorňujú na nadhodnotenie reálnej situácie pri použití tejto hypotézy. Relevantné dokazovanie v oblasti nízkych dávok je však sťažené tým, že je veľmi ťažko štatisticky preukázať akúkoľvek závislosť. Preto sa pristúpilo k praxi, že LNT model je vedecky prijateľnou základnou zložkou radiačnej ochrany (ALARA), avšak pre účely plánovania zdravotných opatrení nie je vhodné počítať hypotetický počet prípadov rakoviny alebo dedičných chorôb vo veľkých skupinách ľudí ožiarených nízkymi dávkami vo veľmi dlhom časovom období.



Obr. 3.1 Závislosť dávka - riziko rakoviny v oblasti malých dávok:

- a - lineárna bezprahová závislosť
- b - zmenšujúci sa sklon krivky
- c - rastúci sklon krivky
- d - lineárna závislosť s prahovou úrovňou
- e - hormetická závislosť predpokladá úroveň dávok, ktoré pôsobia priaznivo na organizmus a zmenšujú riziko rakoviny.

Poškodenie na úrovni buniek

Bunka zasiahnutá určitou dávkou žiarenia je schopná sa v krátkom čase zotaviť a odstrániť škody, ktoré v nej žiarenie spôsobilo. Hovoríme o reverzibilných (vratných) zmenách. Niekedy sú však tieto zmeny trvalé. Bunka už nie je schopná zotaviť sa z nich, a tak hynie. Ide o zmeny ireverzibilné (nevratné).

Citlivosť bunky na žiarenie najviac ovplyvňuje mitotická aktivita buniek. Určité druhy poškodenia počas ožarovania bunku neusmrť, ale prejavujú sa až pri jej delení. Niektoré poškodenia buniek sa môžu odstrániť, lenže úprava musí prebehnúť pred začatím delenia bunky.

Následky po ožiarení buniek môžeme zhrnúť nasledovne:

1. Bunky zostanú **nepoškodené**.
2. Bunky s **oneskoreným delením**: tieto bunky sa určitú dobu zotavujú a potom pokračujú v pôvodnom správnom delení.
3. Bunky s **chybným delením**: tieto bunky sa začnú po zotavení deliť, ale odlišne od svojich predchodcov. Niektoré z nich sa vyvíjajú ako obrovské bunky a ich výskyt je jedným z charakteristických nálezov po ožiarení.
4. Agonálne bunky sú **poškodené nenávratne**: tieto bunky sa buď nedokážu deliť a tak zahynú (apoptóza) alebo sú schopné niekoľkých delení ale napokon aj tak odumrú. Apoptická smrť buniek znižuje výskyt prežívajúcich buniek nesúcich mutácie. Z tohto pohľadu sa pokladá za alternatívu nápravného procesu.
5. **Mŕtve bunky**. V dôsledku ožiarenia odumrú.

Poškodenie na úrovni tkanív a orgánov

Ľudský organizmus si môžeme predstaviť ako súbor samoobnoviteľných bunkových populácií. Reparačné mechanizmy existujú nielen na úrovni buniek ale aj na úrovni bunkových populácií - orgánov. Sú iniciované extracelulárnymi regulátormi (rastové faktory). Zdravý ľudský organizmus rozpozná a zlikviduje denne cca. 40 zmenených (zmutovaných, rakovinových) buniek. Niektoré orgány sú schopné po poškodení začať mitózu aj keď sa normálne neobnovujú (pečeň, ľadviny). Vzťahy a charakteristika účinkov ožiarenia je schematicky znázornená v tabuľke 3.1.

Tab. 3.1 Charakteristiky účinkov ionizujúceho žiarenia na ľudský organizmus

Účinky ionizujúceho žiarenia			
Okamžité	Oneskorené		
Somatické			Genetické
akútna choroba z ožiarenia	nenádorové oneskorené poškodenia:	zhubné nádory	genetické poruchy u potomstva
akútne lokálne zmeny	chronický zápal kože		
poškodenie plodnosti	zákal očnej šošovky		
poškodenie vývoja plodu			
Deterministické, nestochastické, prahové		Stochastické, bezprahové	

Účinky žiarenia na človeka delíme na:

- a) somatické (prejavujú sa u ožiareného jedinca)
- b) genetické (prejavujú sa u ďalších generácií).

Oba tieto efekty vznikajú ako následok mutácií a iných poškodení bunkových štruktúr, či už v somatických nepohlavných bunkách, alebo v pohlavných bunkách vaječníkov a semenníkov.

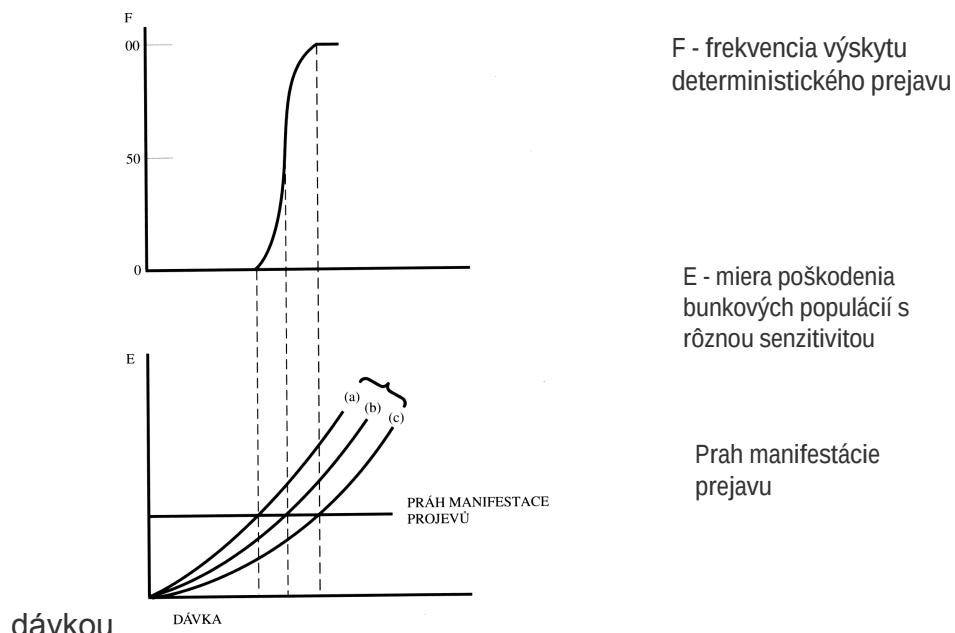
Účinky, ktoré sa prejavujú po dlhom čase po jednorázovom zásahu, či chronickom, sa nazývajú vzdialenými alebo **oneskorenými**.

3.2 Deterministické následky (tkanivové reakcie)

Vyvolanie deterministických účinkov je všeobecne charakterizované prahovou dávkou. Po presiahnutí prahovej dávky závažnosť poškodenia, vrátane narušenej zotavovacej schopnosti u tkaniva stúpa so stúpajúcou dávkou.

Deterministické prejavy ožiarenia - sú také, keď pri dosiahnutí určitej dávky efekt zákonite nastane. Účinky sú prejavom bunkových strát v dôležitých bunkových populáciách a týkajú sa poškodenia veľkého množstva buniek (polycystický účinok).

Prejavujú sa teda na úrovni tkanív a sú dôsledkom ožiarenia tkaniva vysokou



dávkou.

Obr. 3.2 Demonštrácia vzťahu medzi deterministickými a stochastickými prejavmi ožiarenia.

Deterministické účinky sa makroskopicky navonok prejavujú zistiteľným tzv. **klinickým príznakom**. Na bunkovej úrovni však tieto deterministické prejavy majú **stochastické zákonitosti**.

Malé bunkové straty organizmus toleruje a funkčnosť nie je poškodená. Po prekročení kritickej hodnoty - prahu, prejaví sa deterministický účinok ako je to znázornené na obrázku 3.2.

Stochastické prejavy ožiarenia - sú štatisticky preukázateľné zvýšenia počtu ochorení na rakovinu alebo dedičných porúch v dôsledku ožiarenia. Jedná sa o oneskorené efekty, ktoré vyvolávajú aj nízke úrovne ožiarenia, pričom so stúpajúcou dávkou stúpa aj pravdepodobnosť výskytu chorôb. Patogenetickým impulzom stochastického prejavu môže byť mutácia jednej bunky (monocystický účinok).

K deterministickým účinkom zaradujeme okamžité somatické účinky (pozri Tab. 3.1), kde patria akútne ochorenia, vyvolané žiarením a skoré smrteľné prípady, ktoré nastávajú v čase od niekoľkých dní po niekoľko mesiacov po ožiarení. Literatúra pre úmrť uvádza hodnoty dávok veličinou letálna dávka LD_{50} , čo znamená dávku, po ktorej nastane 50% úmrť ožiarených osôb (niekde sa uvádza aj $LD_{50/60}$ čo znamená dávku, po ktorej nastane 50% úmrť ožiarených osôb do 60 dní po ožiarení). Pre normálneho zdravého človeka je $LD_{50/60}$ okolo 4 Sv (udáva sa rozpätie od 3÷5 Sv). Odhady pre iné úrovne sú nasledovné: $LD_{10} = 1 \div 2$ Sv, $LD_{90} = 5 \div 7$ Sv. Rozptyl resp. posunutie týchto hodnôt silne závisí od poskytnutej lekárskej starostlivosti.

Účinky žiarenia na človeka boli pozorované už pri jednorazových dávkach 0,25 Sv. Z pokusov na zvieratách bolo získaných viac údajov pri veľkých dávkach a dávkových príkonoch. V lekárskej praxi sa pri likvidácii rakovinových nádorov používajú presne lokalizované dávky desiatok Sv, ktoré majú za cieľ zničiť - usmrtiť zhubné tkanivo.

Veľké jednorazové efektívne dávky (viac ako 1 Sv) spôsobujú tzv. **chorobu z ožiarenia**. Počas ožiarenia postihnutý jedinec prakticky necíti nič, pokiaľ dávka nepresiahne letálnu. Prvými príznakmi ožiarenia vysokou dávkou je zvracanie a šok.

Po niekoľkých dňoch sa pozoruje úbytok krviniek, krvácanie a epilácia (sú to obvyklé reakcie aj pri rádioterapii rakoviny). Je znížená imunita organizmu. Výsledkom sú infekčné choroby, čo býva hlavnou príčinou úmrtia. Pri letálnej dávke začnú postupne zlyhávať rádiosenzitívne orgány (krvotvorné, zažívacie orgány, nervový systém) a do niekoľkých dní sa dostaví smrť.

Pri znížení dávkového príkonu a zvýšení doby ožiarenia sa hodnoty letálnej dávky zvyšujú. Tak napríklad pri príkone dávky 0,2 Sv za hodinu LD_{50/60} sa zvýši o 50% a keď sa ožiarenie rozťahne na mesiac LD_{50/60} sa zdvojnásobí.

V tabuľke 3.2 sú uvedené odhady prahových hodnôt absorbovanej dávky pre 1% výskyt poškodenia zdravia ľudských orgánov a tkanív po celotelovom ožiarení podľa dokumentu ICRP 103.

Tabuľka 3.2 Odhady prahových hodnôt absorbovanej dávky

Účinok	Orgán/tkanivo	Doba rozvoja účinku	Absorbovaná dávka (Gy)
Ochorenie:			
	1% incidencia		
Prechodná sterilita	semenníky	3÷9 týždňov	~0,1
Trvalá sterilita	semenníky	3 týždne	~6
Trvalá sterilita	vaječníky	<1 týžden	~3
Útlm krvotvorby	kostná dreň	3÷7 dní	~0,5
Ščervenanie pokožky	koža veľká plocha	1÷4 týždne	<3÷6
Kožné popáleniny	koža veľká plocha	2÷3 týždne	5÷10
Prechodná epilácia	koža	1÷3 týždne	~4
Zákal očnej šošovky	oko	niekoľko rokov	~1,5
Úmrtie			
Syndróm kostnej drene			
- bez lekárskej terapie	kostná dreň	30÷60 dní	~1
- s dobrou lekárskou terapiou	kostná dreň	30÷60 dní	2÷3
Gastrointestinálny syndróm			
- bez lekárskej terapie	tenké črevo	6÷9 dní	~6
- s dobrou lekárskou terapiou	tenké črevo	6÷9 dní	>6
Pneumonitis (neinfekčný zápal)	pľúca	1÷7 mesiacov	6

Na základe údajov sa u ľudí, ktorí boli ožiarení pri atómovom bombardovaní v Hirošime zistilo, že na indukciu nádorov je potrebná minimálne celková dávka 1 Gy. Pri takejto dávke sa v priebehu niekoľkých rokov u skupiny ožiarených osôb prejaví zvýšený výskyt rakovinových ochorení. Najčastejšie sa po ožiarení vyskytuje rakovina štítnej žľazy, rakovina mliečnej žľazy, leukémia, rakovina pľúc a iné. Výskyt niektorých typov po havárii v Černobyle je uvedený na obr. 3.3 a 3.4. Na obrázkoch sa prejavuje latencia výskytu rakoviny niekoľko rokov.

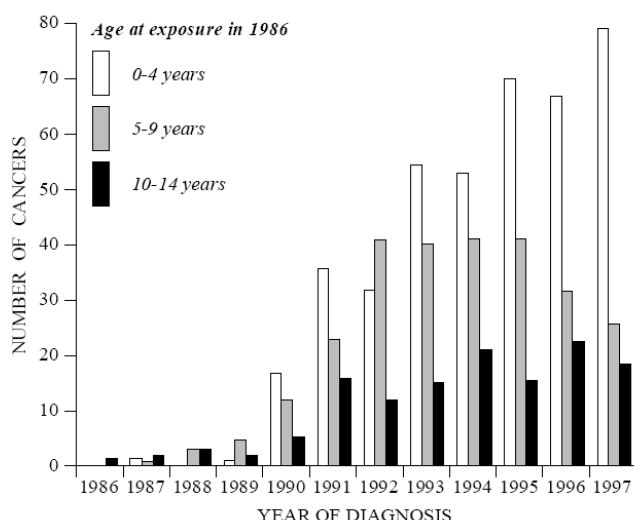
Výskyt leukémie a iných typov rakovín medzi likvidátormi a obyvateľmi kontaminovaných území (kontaminácia prvkom ¹³⁷Cs je viac ako 185 kBq.m⁻²) v rokoch 1993-94 je uvedený v tabuľke 3.3. Tabuľka zahŕňa všetky diagnostikované prípady, pričom súvislosť s ožiarením nemusí byť preukázaná.

Rakovina štítnej žľazy a rakovina mliečnej žľazy sú v podstate liečiteľné a nemusia mať smrteľné následky. Inak je to u leukémie. V prípade obyvateľov Hirišimy leukémia kulminovala za sedem rokov po atómovom bombardovaní a klesla na nulu v sedemdesiatych rokoch. Pravdepodobnosť úmrtia na leukémiu v skupine ľudí ožiarených dávkou 1 Sv predstavovala 1:500, v prípade rakoviny pľúc bola

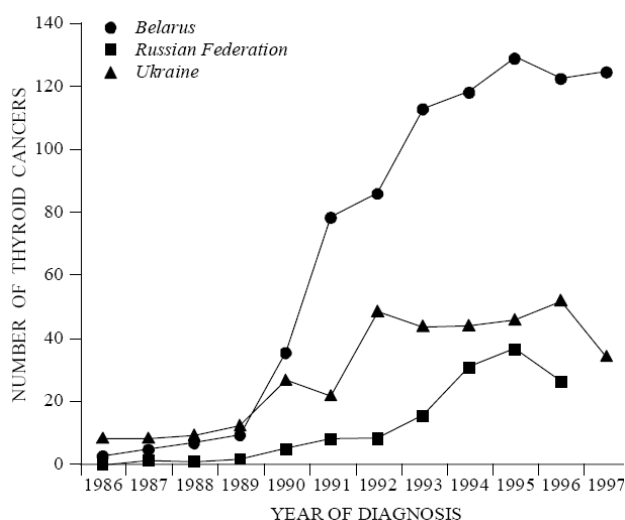
pravdepodobnosť 1:200. Iné typy rakoviny sa vyskytovali s nižšou pravdepodobnosťou: úmrť na rakovinu žalúdka, pečene, hrubého čreva predstavovala pravdepodobnosť 1:1000; rakovina hltana, močového mechúra, lymfatických tkanív, tenkého čreva cca. 1:2000.

Tabuľka 3.3 Výskyt leukémie a iných typov rakovín medzi likvidátormi a obyvateľmi kontaminovaných území po Černobyle v rokoch 1993-94.

Krajina	Leukémia	Iné rakoviny
Likvidátori (skupina ľudí)		
Bielorusko (63 000 ľudí)	9	102
Rusko (148 000 ľudí)	9	449
Ukrajina (170 000 ľudí)	28	399
Obyvatelia kontaminovaných území		
Bielorusko (239 505 ľudí)	281	9682
Rusko (233 606 ľudí)	340	17260
Ukrajina (106 700 ľudí)	592	22063



Obr. 3.3 Výskyt rakoviny štítnej žľazy v Bielorusku po Černobyle



Obr. 3.4 Celkové počty výskytu rakoviny štítnej žľazy u detí do 14 rokov v dôsledku černobyľskej havárie.

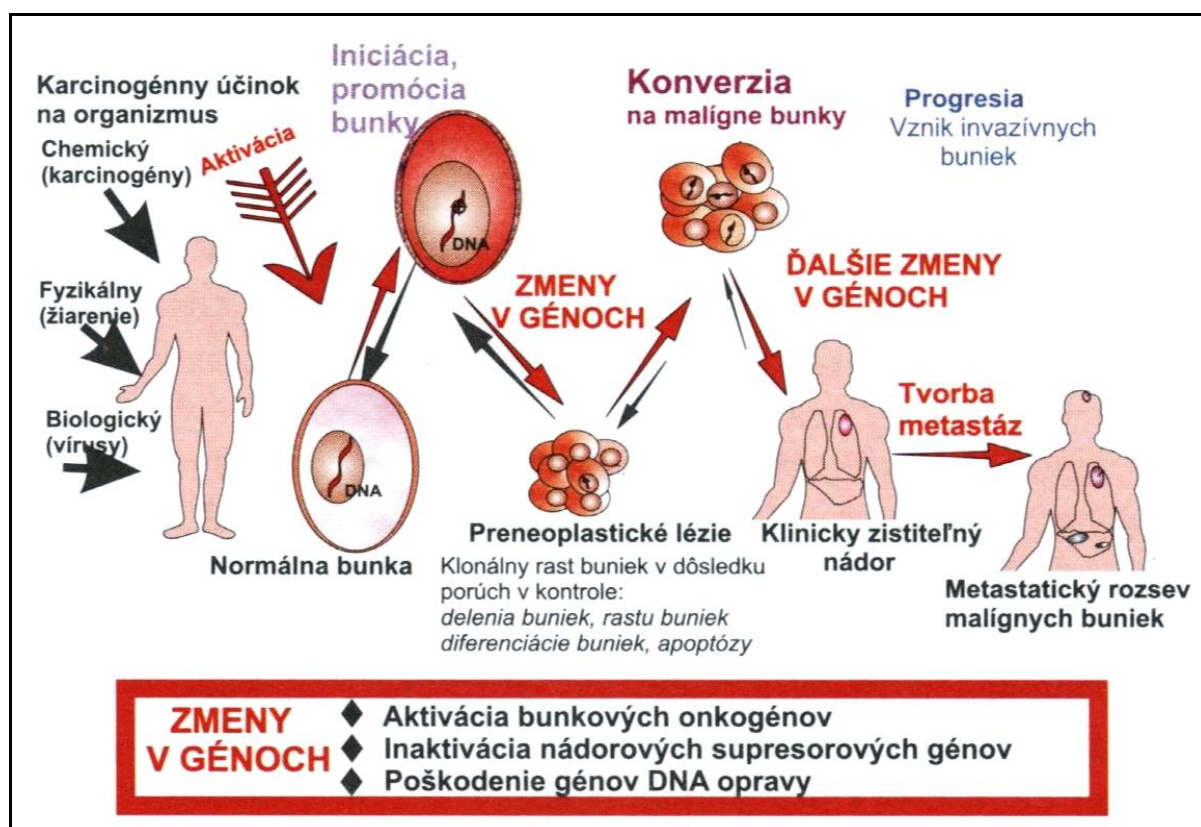
3.3 Stochastické následky. Riziko rakoviny a dedičných účinkov

Epidemiologické a experimentálne štúdie prinášajú dostatok informácií prinášajúcich dôkazy o riziku rakoviny následkom ožiarenia hoci aj s veľkou neistotou pri dávkach 100 mSv a nižších. V prípade genetických účinkov žiadny priamy dôkaz takého rizika pre človeka neexistuje, avšak závery experimentálnych štúdií (na zvieratách) svedčia pre zahrnutie takého rizika pre budúce generácie do systému ochrany.

Na vznik a rozvoj rakoviny po ožiarení má kritický význam proces odozvy ožiarených buniek na poškodenie DNA a jej opravu. Úspešnosť reparačných procesov závisí na miere poškodenia a tá závisí na type žiarenia a intenzite ožiarenia. Následky sa odzrkadlia na hodnotení relatívnej biologickej účinnosti (RBE

relative biological effectiveness), radiačných váhových faktoroch veľkosti dávky a dávkového príkonu.

Obrázok 3.5 znázorňuje zjednodušený proces vzniku nádorového ochorenia. Spúšťacím mechanizmom vzniku rakoviny je akumulácia mutácií v génoch kontrolujúcich a regulujúcich rast bunky. Mutačné zmeny môžu byť vyvolané pôsobením chemických, fyzikálnych alebo biologických faktorov v bunkách živého organizmu (pozri Tab. 3.4). Aby sa bunka stala vysoko malígnou, schopnou tvoriť sekundárne zhubné nádory, musí získať ďalšie vlastnosti opäť v dôsledku ďalších mutácií viacerých génov. Všeobecne sa predpokladá, a experimentálne dôkazy tomu nasvedčujú, že na to, aby z normálnej bunky vznikla nádorová, je potrebná mutácia najmenej troch génov a proces vzniku zhubného nádoru tak prechádza niekoľkými fázami.



Obr. 3.5 Vznik nádorového ochorenia.

Radiačná tumorogénéza - rozvoj rakoviny po ožiarení - je komplexný mnohostupňový proces, ktorý môže byť rozčlenený na niekoľko fáz:

- iniciačná fáza nádoru - preneoplastický stav, kedy sa bunkové procesy začínajú meniť a bunka sa správa inak v dôsledku génových a chromozómových mutácií. Ak sa v bunke mutáciou vytvorí tzv. onkogén, bunky získavajú nové vlastnosti. Ak sa mutáciou poškodí gén-supresor, bunky strácajú schopnosť kontrolovať niektoré funkcie, napr. rozmnožovanie a tým zabrániť nádoru v rozvoji. Ak sa poškodí gén opravy bunka stratí schopnosť opravy poškodenia DNA.
- podpora rastu nádoru – tumor promotion – vznik preneoplastického klonu z iniciovaných buniek a zvyšovanie rastu resp. strata kontroly starnutia. Táto schopnosť sa môže nadobudnúť mutáciou alebo inými mechanizmami sa potlačí činnosť kľúčových génov kontrolujúcich tieto procesy.

- malígny zvrät – zmena preneoplastického stavu na rakovinový. Rozvoj nádoru je nielen výsledkom klonálnych mutácií ale aj interakciou s okolitými bunkami v tkanive alebo v orgáne. Pre rozvoj nádoru je potrebné aby nádorové bunky neboli tkanivom odvrhnuté a aby bolo zabezpečené dostatočné krvné zásobovanie.
- progresia nádoru – bunky získajú vlastnosti, ktoré dovoľujú rýchle zväčšovanie tumoru a nadobudnutie invazívnych charakteristík. Nádor sa začína rozširovať do iných orgánov a vytvárať metastázy.

Experimentálne zvieracie modely potvrdili mnohostupňovitú radiačnú tumorigenézu u základných typov rakoviny: leukémia, nádory kože, kostí, mozgu, pľúc, prsníkov a gastrointestinálneho traktu. Vplyv žiarenia je podstatný pri počiatočných štádiách iniciácie tumorigenézy. V ďalších fázach žiarenie môže prispievať k rozvoju nádorov avšak tam je u buniek už vysoká genetická nestabilita a môžu sa vo väčšej miere objaviť spontánne mutácie, čím vznikajú klony nádorových buniek so zmenenými vlastnosťami.

Tabuľka 3.4 Najdôležitejšie rizikové faktory vzniku rakoviny

Faktor	Podiel	Rozsah
Fajčenie (aktívne + pasívne)	30	25 ÷ 40
Alkohol	3	2 ÷ 44
Výživa	35	10 ÷ 70
Škodliviny pracovného prostredia	4	2 ÷ 8
Sex a hygiena	7	1 ÷ 13
Genetická predispozícia	10	?
Znečistenie prostredia	2	1 ÷ 5
Vírusy, infekcie	10	1 ÷ ?
Lieky a medicína	1	0,5 ÷ 3
Slnečné a ionizujúce žiarenie	3	2 ÷ 4
Konzervačné a iné látky v potravinách	10	1 ÷ ?

Dedičné účinky vznikajú ako výsledok ožiarovania gonád dávkami, ktoré pre daný organizmus nie sú nebezpečné. Môžu sa však prejaviť v ďalších generáciách ako dôsledok chybného odovzdávania informácie chromozómov od jednej generácie k druhej.

Ožiarenie, podobne ako iné pôsobenie (napr. chemické), môže spôsobiť škodlivé zmeny (mutácie) v génoch, v chromozómovej štruktúre, alebo môže zmeniť normálny počet chromozómov. (V jadre ľudskej bunky je 23 párov chromozómov, ktoré obsahujú tisíce génov - nosičov informácií.)

Gény sú gigantické molekuly, z ktorých každá obsahuje asi 10^6 atómov. Podľa súčasných predstáv sú gény materiálnymi nosičmi dedičných znakov, určujú všetky črty a vlastnosti človeka. Vývoj človeka teda určuje okolie prostredie a genotyp.

Gény sú mimoriadne stabilné, nemenia sa a prenášajú sa z pokolenia na pokolenia. Občas nastávajú v nich molekulové zmeny, vzniká pozmenený typ, a táto zmena sa prenáša do ďalšieho pokolenia (prirodzené mutácie).

Pre **dedičné účinky** ožiarovania bol v ICRP 103 prijatý odhad rizika genetických ochorení pre prvé dve generácie $0,2 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ pre celú populáciu a pre dospelých pracovníkov na $0,1 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$. Tieto hodnoty revidujú odhady rizika uvedené v ICRP 60 a zásadne ich znižujú, ako je uvedené i v tabuľke 3.5.

Z hodnoty celkového rizika na úrovni $5 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ potom vychádzajú medzinárodné normy radiačnej bezpečnosti. Inými slovami limitnej hodnote ožiarenia obyvateľstva 1 mSv za rok zodpovedá pravdepodobnosť stochastických efektov $5 \cdot 10^{-5}$.

Tabuľka 3.5 Nominálne koeficienty rizika pre stochastické účinky ($\cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$) po ožiarení malým dávkovým príkonom

Ožiarená populácia	Rakovina		Dedičné účinky		Celkom	
	ICRP 103	ICRP 60	ICRP 103	ICRP 60	ICRP 103	ICRP 60
Celá populácia	5,5	6,0	0,2	1,3	5,7	7,3
Dospelí	4,1	4,8	0,1	0,8	4,2	5,6

3.4 Následky ožiarenia zárodku a plodu

Ľudský plod je počas vnútromaternicového vývoja (in-utero) najviac vnímavý na radiáciu v období orgánogenézy (8÷15 týždňov po počatí). Usudzuje sa, že na navodenie malformácií existuje dávkový prah 100 mSv a pod touto hodnotou sa riziká neočakávajú. Niektoré štúdie potvrdili existenciu prahu pre mentálnu retardáciu potomkov na 300 mSv, ďalšie údaje sa týkajú straty inteligencie na úrovni 25 bodov IQ na 1 Sv. Pre dávky na úrovni 10 mSv sa preto neočakávajú žiadne následky a vplyv na vývoj plodu je bezvýznamný, aj keď sa pre pokles IQ od veľkosti ožiarenia nedá vylúčiť bezprahový priebeh (očakávaná hodnota bude -0,25 bodu).

4. Zdroje žiarenia v jadrovej elektrárni

4.1 Jadrový reaktor ako zdroj žiarenia

Jadrový reaktor je zariadenie, v ktorom prebieha riadená reťazová reakcia delenia jadier, pričom kinetická energia štiepných produktov sa premieňa na teplo. Toto teplo unáša chladiace médium.

V podmienkach normálnej činnosti reaktora sú obsluhujúci pracovníci vystavení **vonkajšiemu** ožiareniu, a to žiarením β , žiarením γ a neutrónmi, pričom dominantnú úlohu má žiarenie γ , a ožiareniu **vnútornému** v dôsledku vdychovania rádioaktívnych aerosólov (najmä počas údržby a opráv).

V jadrovej elektrárni vznikajú rádioaktívne látky dvomi spôsobmi: je to **štiepenie jadrového paliva a aktivácia neutrónmi** (konštrukčných materiálov, paliva, prímiesí v chladiči, v moderátore, v palive a pod.). Prehľad najvýznamnejších aktivačných produktov je v tabuľke 4.1 a najvýznamnejších štiepných produktov v tabuľke 4.2.

Rádionuklidy, ktoré môžu významným spôsobom vplývať na biosféru, nazývame **biologicky významnými**. Spomedzi nich budeme venovať pozornosť iba tým, ktorých účinok je podstatný pri normálnom prevádzkovom režime práce jadrovej elektrárne. Pri tomto režime má dôležitú úlohu časové oneskorenie rádionuklidov pred ich vypustením do atmosféry, následkom čoho sa biologicky významné stačia rozpadnúť skôr ako sa do atmosféry dostanú. V havarijných situáciách je toto oneskorenie menšie, alebo nie je nijaké.

Neutrónové žiarenie v reaktore pozostáva z okamžitých a oneskorených neutrónov. Okamžité neutróny, ktoré sa uvoľňujú prakticky spolu so štiepnymi produktmi (asi po 10^{-12} s po delení), tvoria viac ako 99% všetkých neutrónov delenia. Oneskorené neutróny, ktorých je menej ako 1% neutrónov delenia, sú emitované po určitom čase po delení (po minúte aj neskôr). Majú menšiu energiu (v priemere 0,5 MeV) a pri navrhovaní ochrany pred neutrónovým žiarením sa do úvahy neberú. Okamžité neutróny majú strednú energiu 5 MeV (maximum ich energetického spektra je pri 0,8 MeV), ich počet s energiou exponenciálne klesá až do energií 15 - 18 MeV.

Žiarenie γ aktívnej zóny reaktora sa skladá z okamžitých fotónov γ , vznikajúcich pri delení ^{235}U , ďalej z fotónov γ , emitovaných štiepnymi fragmentmi a produktmi ich rozpadu, a taktiež fotónmi γ , ktoré vznikajú zachytením tepelných neutrónov jadrovým palivom, chladičom a konštrukčnými materiálmi reaktora. Okrem toho v aktívnej zóne môžu vznikať fotóny γ pri nepružnom rozptyle rýchlych neutrónov, pri brzdení častíc β a pri vzniku rádioaktívnych izotopov pri absorpcii neutrónov jadrovým palivom. Tieto fotóny však v jadrovej elektrárni nemajú podstatnú úlohu.

Ak sa v aktívnej zóne nachádzajú látky, v ktorých môžu nastať reakcie typu (γ, n) , (napr. ťažká voda, berýlium), môžu vznikať tzv. fotoneutróny.

Väčšina okamžitých fotónov γ má energiu v rozpätí od 0,25 do 0,75 MeV. Ich úhrnná energia na jeden akt delenia je okolo 5 MeV.

Oneskorené fotóny γ , vyžarované fragmentmi delenia, pri výpočte ochrany ťažko brať do úvahy, pretože rozpadové produkty obsahujú veľké množstvo rádioaktívnych izotopov rozličnej aktivity, ktorá závisí od doby, počas ktorej reaktor pracuje, aj od doby jeho odstavenia.

Celková energia fragmentov v súvislosti so žiarením γ je 6 MeV na rozpad. Pre žiarenie β je to asi 5 MeV.

Záchytné žiarenie γ , ktoré vzniká v dôsledku záchytu neutrónu jadrom, má energiu do 10 MeV (závisí od väzbovej energie neutrónu s jadrom).

Energia uvoľnená pri štiepení:

Štiepnymi fragmentami	162 MeV
Okamžitými neutrónmi	5 MeV
Okamžitými fotónmi γ	5 MeV
Oneskorenými fotónmi γ - fragmentov	6 MeV
Časticami β - fragmentov	5 MeV
Záchytným žiarením γ	10 MeV
Spolu sa uvoľní 193 MeV, čo sa často zaokrúhľuje na 200 MeV.	

Okrem hlavného zdroja žiarenia, aktívnej zóny reaktora, veľkú úlohu má žiarenie zo zdrojov, ktoré sa nachádzajú mimo aktívnej zóny. Patria k nim najmä zdroje žiarenia γ , ktoré vznikajú pri záchyte neutrónov konštrukčným materiálom. Pri záchyte neutrónu jadrom sa vytvárajú rádioaktívne nuklidy, ktoré sú potom zdrojom ionizujúceho žiarenia. Záchytné žiarenie γ vzniká z troch skupín jadier.

Do prvej skupiny patria jadrá ^9Be , ^{27}Al , ^{55}Mn , a ^{60}Ni , ktoré pri prechode do základného stavu vyžarujú fotóny s najväčšou energiou (6 - 8 MeV). Druhú skupinu tvoria jadrá ^{24}Mg , ^{14}N , ^{51}V , ^{53}Cr , ^{113}Cd a i., emitujúce fotóny kaskádovite so širokým spektrom energií. Tretia skupina emituje slabé žiarenie γ , alebo ich neemituje vôbec. Patria sem jadrá ^6Li , ^{10}B , a i.

Intenzita indukovanej aktivity A_i konštrukčného materiálu reaktora závisí od neutrónového toku, účinného prierezu absorbujúceho prostredia, polčasu premeny, energie a počtu fotónov γ , emitovaných rádioizotopmi. Môžeme ju vyjadriť vzťahom:

$$A_i = \left[1 - e^{-\lambda t}\right] \cdot n \int_{E_1}^E j(E) s(E) dE \quad (4.1)$$

kde λ je konštanta premeny

n - počet jadier absorbátora v jednotke hmotnosti,

$\sigma(E)$ - účinný prierez aktivácie daného nuklidu neutrónmi s energiou E ,

$\phi(E)dE$ - hustota toku neutrónov s energiou v intervale $(E, E+dE)$.

4.2 Zdroje žiarenia vznikajúce aktiváciou

Aktivačné produkty vznikajú pri aktivácii konštrukčných materiálov (produkty korózie), prímiesí v chladiwe, moderátore a samotného paliva.

Aktiváciou paliva vzniká rad transuránových prvkov, ako Np, Pu, Am, Cm. Prítomnosť uvedených prvkov v jadrovopalivovom cykle komplikuje problém bezpečnej likvidácie rádioaktívnych odpadov.

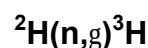
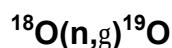
Trícium vzniká v dôsledku aktivácie z deutéria, lítia a bóru. Deutérium sa nachádza vo vode (0,015%), lítium a bór ako prísada v chladiwe vo forme hydroxidu (na chemickú úpravu) a kyseliny boritej (absorbátor).

Zdrojom ^{14}C v jadrovom reaktore je reakcia $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ (dusík je prímесou paliva a chladiacej vody), $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ a $^{13}\text{C}(n,\gamma)^{14}\text{C}$.

Množstvo vzniknutého ^{14}C v reaktoroch typu VVER sa odhaduje na 740 MBq až 1,1 GBq na $\text{MW}_{\text{el}} \cdot \text{rok}$.

Najväčšiu indukovanú aktivitu vykazujú izotopy ^{24}Na , ^{28}Al , ^{51}Cr , ^{51}V , ^{56}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co a i.

Indukovanú aktivitu chladiwa delíme na vlastnú aktivitu a aktivitu prímесí. Pre vodu sú charakteristické nasledovné aktivačné reakcie:

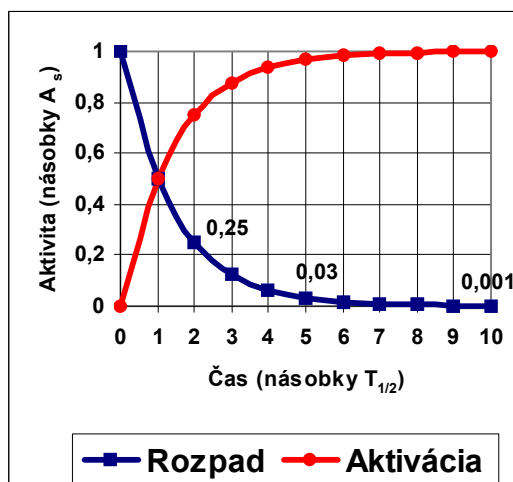


Výťažok posledných dvoch reakcií je veľmi malý preto ich pri výpočtoch radiačnej ochrany netreba uvažovať.

Reakcia $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ nastáva účinkom rýchlych neutrónov. Vzniká rádioaktívny izotop ^{16}N , $T_{1/2}=7,4 \text{ s}$, $E_{\gamma} = 6,13 \text{ MeV}$ a $7,1 \text{ MeV}$.

Reakcia $^{17}\text{O}(n,p)^{17}\text{N}$ taktiež nastáva účinkom rýchlych neutrónov. Vzniká β - aktívny ^{17}N , $T_{1/2}=4,1 \text{ s}$, $E_{\beta} = 3,7 \text{ MeV}$. Pri reakcii vyletujú aj neutróny s energiou 1 MeV.

Prírodný kyslík obsahuje 99,8% izotopu ^{16}O a 0,039% izotopu ^{17}O .



Obr. 4.1 Časový priebeh aktivácie a rozpadu rádioaktívnych látok

Aktivita prímесí chladiwa je doplnkovým zdrojom žiarenia. Medzi prímесy patria predovšetkým minerálne soli, najmä soli Na, primiešané plyny (Ar a i.), produkty korózie (oxidy Fe, Co, Ni, Cr a i.) a látky vznikajúce pri preplachovaní chladiaceho obvodu. Okrem toho do chladiaceho média sa môžu dostať aj štiepne fragmenty (Kr, Xe, I a i.).

Ako sme už spomenuli, v primárnom okruhu sa nachádzajú aj iné rádioaktívne látky. Sú to najmä zaktivované prímесi a produkty korózie. Vzniká aj umelá aktivita vzduchu, ktorý sa tam nachádza. Počas činnosti reaktora VVER aktivitu primárneho okruhu spôsobujú najmä izotopy ^{16}N (žiarenie γ) a ^{17}N (neutrónové žiarenie). Po odstavení reaktora hlavnú úlohu majú γ - žiariče produktov korózie (^{60}Co , ^{59}Fe a i.). Aktivita fragmentov vo vode reaktora typu VVER závisí od stupňa hermetickosti palivových článkov a dosahuje hladinu aktivity ^{16}N (približne 4 GBq/l) pri nehermetickosti 1%, čo spôsobujú najmä plyny (Xe).

Tab. 4.1 Prehľad najvýznamnejších aktivačných produktov

Indukovaná aktivita v materiáloch JE		
Chladivo + moderátor - voda		
Vlastná aktivita	$^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ $T_{1/2}=7,4 \text{ s}$ emituje γ $^{17}\text{O}(n, p)^{17}\text{N}$ $T_{1/2}=4,1 \text{ s}$ emituje β a n $^{18}\text{O}(n, \gamma)^{19}\text{O}$ $^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$ $T_{1/2}=12,3 \text{ r}$	99,8% 0,039%
Aktivita prímiesí	minerálne soli ^{24}Na , $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$, $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$ rozpustené plyny ^{41}Ar , $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ produkty korózie ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{56}Mn , ^{51}Cr ... štiepne produkty Kr, Xe, I	
Konštrukčné materiály		
$^{59}\text{Fe}(T_{1/2}=45 \text{ d})$, $^{60}\text{Co}(T_{1/2}=5,3 \text{ r})$, $^{54}\text{Mn}(T_{1/2}=312 \text{ d})$, $^{51}\text{Cr}(T_{1/2}=28 \text{ d})$, $^{58}\text{Co}(T_{1/2}=71 \text{ d})$ $^{65}\text{Zn}(T_{1/2}=244 \text{ d})$, $^{95}\text{Nb}(T_{1/2}=35 \text{ d})$, $^{95}\text{Zr}(T_{1/2}=64 \text{ d})$, $^{110}\text{Ag}(T_{1/2}=250 \text{ d})$, $^{14}\text{C}(T_{1/2}=5730 \text{ r})$		
Palivo		
Transuránové prvky	$^{237,239}\text{Np}$, $^{238-242}\text{Pu}$, $^{241, 243}\text{Am}$, $^{242, 244}\text{Cm}$	

4.3 Zdroje žiarenia vznikajúce pri štiepení

Všimnime si podrobnejšie zdroje žiarenia v jadrovom reaktore a spôsoby ich vzniku.

Štiepenie je náhodný proces, vzniká pri ňom mnoho rozličných fragmentov. Väčšina štiepných produktov (aj ich dcérskych produktov) sú rádioaktívne (najmä β - a γ - aktívne). Ich polčasy premeny sú rozličné (od zlomkov sekundy po desiatky rokov a viac).

Všetky štiepne produkty vznikajú v tabletkách jadrového paliva a prakticky ostávajú tam, keďže ich dolet je v tomto prostredí niekoľko mikrometrov, čo je oveľa menej, ako sú rozmery tabletiiek. Malá časť štiepných produktov sa dostáva difúziou do priestoru medzi tabletkami a obálkou palivového prútika. Cez hermetickú obálku môžu preniknúť do chladiva iba difúziou. Tento prenik je zanedbateľný, s výnimkou trícia, ktorý sa chemicky spája so zirkóniom (materiálom obálky). Prenik trícia cez takýto palivový článok nepredstavuje viac ako 1%. Cez obálku palivového prútika vyrobeného z nehrdzavejúcej ocele je prenik ^3H až 80%.

Ako sme už spomenuli, v praxi môžu mať niektoré palivové články v aktívnej zóne určité defekty, ktoré vznikajú v priebehu činnosti jadrovej elektrárne. Sú to mikrodefekty, cez ktoré difundujú plyné štiepne produkty, alebo väčšie trhliny, čím môže vznikáť priamy kontakt vody s palivom, v dôsledku čoho sa do vody môže dostať určité množstvo neprchavých produktov štiepenia alebo dokonca aj paliva.

V závislosti od fyzikálnochemických vlastností a podľa osobitostí správania v technologickom systéme jadrovej elektrárne delíme štiepne produkty do týchto skupín:

1. vzácne plyny (Kr a Xe),
2. prchavé látky (I a Cs),
3. trícium (T),
4. neprchavé látky (La, Sr, Rb a i.).

Do každej skupiny (okrem tretej) patrí veľké množstvo rádionuklidov.

Tabuľka. 4.2 Prehľad najvýznamnejších štiepných produktov

Biologicky najvýznamnejšie štiepne produkty					
Vzácne plyny	⁸⁵ Kr	$T_{1/2}=10,8 \text{ r}$	¹³³ Xe	$T_{1/2}=5,3 \text{ d}$	
	⁸⁷ Kr	$T_{1/2}=1,3 \text{ h}$	¹³⁵ Xe	$T_{1/2}=9,2 \text{ h}$	
	⁸⁸ Kr	$T_{1/2}=2,8 \text{ h}$			
Prchavé látky	¹²⁹ I	$T_{1/2}=1,6 \cdot 10^7 \text{ r}$	¹³⁵ I	$T_{1/2}=6,7 \text{ h}$	
	¹³¹ I	$T_{1/2}=8 \text{ d}$	¹³⁴ Cs	$T_{1/2}=2,1 \text{ r}$	
	¹³³ I	$T_{1/2}=21 \text{ h}$	¹³⁷ Cs	$T_{1/2}=30 \text{ r}$	
Trícium	³ H	$T_{1/2}=12,3 \text{ r}$			
Neprchavé látky	¹⁴⁰ La	$T_{1/2}=40,2 \text{ h}$	⁹¹ Y	$T_{1/2}=58 \text{ d}$	
	⁸⁹ Sr	$T_{1/2}=50 \text{ d}$	⁹⁵ Nb	$T_{1/2}=35 \text{ d}$	
	⁹⁰ Sr	$T_{1/2}=28,5 \text{ r}$	¹⁰³ Ru	$T_{1/2}=40 \text{ d}$	
	¹⁴⁰ Ba	$T_{1/2}=12,8 \text{ d}$	¹⁰⁶ Ru	$T_{1/2}=1 \text{ r}$	

V tabuľke 4.3 nájdeme hodnoty rádioaktivity (GBq) zmesi produktov delenia ²³⁵U v závislosti od dĺžky kampane reaktora a doby jeho odstavenia pre tepelný výkon 1 kW (krátkožijúce izotopy s $T_{1/2} < 2$ dni nie sú vzaté do úvahy).

Ak berieme do úvahy, že tepelný výkon sériovej jadrovej elektrárne s reaktorom typu VVER - 440 je $1,4 \cdot 10^6 \text{ kW}$, z tabuľky zistíme, že na konci kampane (360 dní) sa v aktívnej zóne nahromadí aktivita $38,122 \cdot 10^{18} \text{ Bq}$.

Tabuľka 4.3 Rádioaktivita produktov delenia ²³⁵U (GBq/kW)

Odstavenie (dni)	Kampaň (dni)						
	60	120	150	200	360	720	¥
0	$20,08 \cdot 10^3$	$23,35 \cdot 10^3$	$24,32 \cdot 10^3$	$25,4 \cdot 10^3$	$27,23 \cdot 10^3$	$28,87 \cdot 10^3$	$39,7 \cdot 10^3$
30	$5,54 \cdot 10^3$	$7,82 \cdot 10^3$	$8,56 \cdot 10^3$	$9,43 \cdot 10^3$	$10,95 \cdot 10^3$	$12,36 \cdot 10^3$	$22,52 \cdot 10^3$
60	$3,28 \cdot 10^3$	$5,05 \cdot 10^3$	$5,55 \cdot 10^3$	$6,26 \cdot 10^3$	$7,51 \cdot 10^3$	$8,79 \cdot 10^3$	$18,97 \cdot 10^3$
120	$1,73 \cdot 10^3$	$2,73 \cdot 10^3$	$2,88 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^3$	$3,59 \cdot 10^3$	$5,88 \cdot 10^3$	$15,66 \cdot 10^3$
180	$1,06 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$1,96 \cdot 10^3$	$2,31 \cdot 10^3$	$3,05 \cdot 10^3$	$3,97 \cdot 10^3$	$13,96 \cdot 10^3$
360	365,19	644,54	770,34	957,93	$1,42 \cdot 10^3$	$2,06 \cdot 10^3$	$11,78 \cdot 10^3$
720	145,04	263,07	325,23	409,22	648,98	$1,02 \cdot 10^3$	$10,37 \cdot 10^3$

V tabuľke 4.4 sú uvedené všetky spôsoby vzniku ³H a vypočítané množstvo vzniknutého trícia v energetickom reaktore typu VVER.

Tabuľka 4.4. Spôsoby vzniku trícia a vypočítané množstvo

Zdroj	Aktivita, $\text{Bq} \cdot (\text{MW}_{\text{el}} \cdot \text{rok})^{-1}$
Štiepenie paliva	$(6,66 - 7,4) \cdot 10^{11}$
Aktivácia $\text{D}(\text{n}, \gamma)\text{T}$	$3,7 \cdot 10^6$
Aktivácia ${}^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)\text{T}$	$7,4 \cdot 10^7$
Aktivácia ${}^{10}\text{B}(\text{n}, 2\alpha)\text{T}$	$1,85 \cdot 10^{10}$

4.4 Ožiarenie obyvateľstva v dôsledku exhalátov jadrovej elektrárne.

Exhaláty jadrovej elektrárne do životného prostredia spôsobujú jeho kontamináciu a tým vzniká možnosť ožiarenia obyvateľstva.

V súlade s platnými normami a predpismi sa účinok jadrových elektrární za normálnej prevádzky hodnotí jednak podľa maximálnej ekvivalentnej dávky H_{max} , ktorú môžu obdržať jednotlivé osoby spomedzi obyvateľstva mimo priestorov jadrovej elektrárne za rok, ako aj podľa kolektívneho dávkového ekvivalentu S obyvateľstva.

Z hľadiska podrobnej charakteristiky účinku jadrovej elektrárne na obyvateľstvo je dôležitá aj ďalšia veličina, a to $\bar{H}$ - stredná hodnota ekvivalentnej dávky v okolí jadrovej elektrárne za rok. V tabuľke 5.6 sú uvedené vypočítané hodnoty $\bar{H}$ pre oblasti v okruhu 1 až 10 km, 10 až 50 km, 50 až 100 km, 100 až 1000 km pre elektrárne typu VVER s výkonom 1 GW_{el} v jednotkách 10^{-8} Sv/rok . Ďalej je v tabuľke uvedený aj celková ročná efektívna dávka E v tých istých jednotkách.

V praxi je meranie vplyvu JE v mnohých prípadoch ťažké a niekedy nemerateľné, pretože v dôsledku bezpečnostných opatrení (zadržiavanie rádioaktívnych látok v elektrárni a znížovanie možnosti ich úletu do biosféry) sú tieto dávky malé tak v absolútnej hodnote, ako aj v porovnaní s dávkami spôsobenými pozadím. Okrem toho pozadie silne kolíše v závislosti od lokality, čo značne sťažuje meranie dávok spôsobených elektrárnou. Preto sa hodnoty H a S stanovujú výpočtom. Pri výpočte sa vychádza z nasledujúcich údajov:

1. údaje o množstve vzácnych rádioaktívnych plynov v úlete z jadrovej elektrárne (tabuľka 5.5),
2. meteorologické údaje - stredná rýchlosť vetra, koeficienty turbulentnej difúzie v rozličných vzdialenostiach od jadrovej elektrárne, výška vetracieho komína (100 m),
3. hustota osídlenia v okolí jadrovej elektrárne v okruhu 1000 km - 50 obyv./km^2 ,
4. parameter rizika úmrtia v dôsledku zhubných nádorov a genetických následkov podľa tabuľky 5.7 (podľa publikácie ICRP č. 26 - 1997 sú tieto hodnoty až štvornásobne vyššie a sú rozšírené o ďalšie orgány).

Nominálny koeficient rizika úmrtia berie do úvahy súčiniteľ mortality pri danom ochorení a zníženia kvality života a súčiniteľ obmedzenia osobnej slobody.

V tabuľke 4.7 koeficient r znamená priemernú individuálnu pravdepodobnosť úmrtia v dôsledku ožiarenia vzhľadom na dávkový ekvivalent 1 Sv .

Z tabuľky 4.7 vyplýva, že parameter rizika úmrtia pri rovnomernom ožiarení celého tela je $5,5 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ v dôsledku karcinogénnych efektov a $0,2 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ v dôsledku genetických efektov. Celkový parameter rizika je $5,7 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$.

Tabuľka 4.5 Podiel rádioaktívnych plynov v úlete z jadrovej elektrárne

Nuklid	Relatívne množstvo (%)	
	VVER	RBMK
^{41}Ar	0,2	0,3
^{85}Kr	6,0	0,7
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	5,4	6,6
^{87}Kr	1,0	13,4
^{88}Kr	2,2	18,6
^{133}Xe	72,0	35,2
^{135}Xe	13,2	25,4

Tabuľka 4.6 Hodnoty vypočítaných dávok u obyvateľstva v okolí JE

Rozsah oblasti (km)	Vnútorne ožiarenie orgánov Ekvivalentná dávka v tkanive, 10^{-8} Sv/rok							Vonkajšie ožiarenie E_{ex}	E 10^{-8} Sv/rok
	Pľúca	Zažívaci trakt	Kostra	Kostná dreň	Štítna žľaza	Gonády	E_{in}		
1 - 10	4,00	5,90	1,20	19,00	6,80	2,60	5,40	2,50	7,90
10 - 50	0,71	0,92	0,19	3,20	0,85	0,42	0,84	0,24	1,10
50 - 100	0,24	0,32	0,08	1,30	0,27	0,18	0,30	0,06	0,36
199 - 1000	0,03	0,05	0,01	0,16	0,02	0,02	0,04	$4,2 \cdot 10^{-3}$	0,044

Tabuľka 4.7 Koeficienty rizika vzniku rakoviny a dedičných ochorení pri ožiarení (ICRP 103)

Tkanivo	Nominálny koeficient rizika rakoviny $\cdot 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$	Nominálny koeficient rizika úmrtia $\cdot 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$
Pažerák	15	13,1
Žalúdok	79	67,7
Hrubé črevo	65	47,9
Pečeň	30	26,6
Pľúca	114	90,3
Kosť	7	5,1
Koža	1000	4,0
Prsník	112	79,8
Semenník	11	9,9
Močový mechúr	43	16,7
Štítna žľaza	33	12,7
Kostná dreň	42	61,5
Ostatné orgány	144	113,5
Gonády (dedičné)	20	25,4
Celkom	1715	574

V súvislosti s bezprahovou lineárnou koncepciou pri známej efektívnej dávke E bude teda individuálna pravdepodobnosť úmrtia (riziko úmrtia) R vyjadrená vzťahom

$$R = r \cdot E \quad (4.2)$$

Účinok dlhodobého chronického ožarovania pri konštantnom príkone ekvivalentnej dávky $\dot{H}$ (napr. pri ožarovaní prírodným pozadím) je vhodné opisovať nie úplnou pravdepodobnosťou smrti R , ale "príkonom" pravdepodobnosti $\dot{R}$, teda pravdepodobnosťou, alebo rizikom vzťahnutým na jednotku času:

$$\dot{R} = r \times \dot{H} \quad (4.3)$$

resp. pre efektívnu dávku

$$\dot{R} = r \times \dot{E} \quad (4.4)$$

Zo vzťahu (4.4) vyplýva, že priemerné individuálne riziko úmrtia za rok následkom ožarovania prírodným pozadím (asi $1 \cdot 10^{-3}$ Sv/rok) bude $5,7 \cdot 10^{-5}$. Pre porovnanie uvedieme, že priemerné individuálne riziko úmrtia za rok v dôsledku rakovinových ochorení bolo stanovené na hodnotu 10^{-3} .

Iným príkladom použitia vzťahu (4.4) môže byť riziko úmrtia na rakovinové ochorenie v okolí jadrovej elektrárne. Z tabuľky 4.6 zoberieme efektívnu dávku pre obyvateľstvo v najbližšom okolí JE $7,9 \cdot 10^{-8}$ Sv/rok. Tejto dávke bude zodpovedať riziko úmrtia: $\dot{R} = 5,7 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1} \cdot 7,9 \cdot 10^{-8} \text{ Sv} \cdot \text{rok}^{-1} = 4,5 \cdot 10^{-9} \cdot \text{rok}^{-1}$.

4.5 Monitorovanie ožiarenia pracovníkov. Operačné veličiny.

Jadrové elektrárne sú pracoviská s vymedzeným kontrolovaným pásmom a tu musí byť zabezpečené osobné monitorovanie v plnom rozsahu. Pred začiatkom prác sa v pracovných priestoroch urobí vyhodnotenie radiačnej situácie a odhad dávok v čase naplánovaných činností. Dávky sú sledované a vyhodnocované po ukončení každej činnosti. Organizačne sa kontrola zabezpečuje prostredníctvom R-príkazov. Pracovníci vstupujúci do kontrolovaného pásma musia byť vždy vybavení operatívnym dozimetrom. Operatívnym dozimetrom je najčastejšie elektronický dozimeter, náhradným TLD alebo aj filmový dozimeter pre prípad výpadku elektronického systému.

Monitorovanie vonkajšieho ožiarenia sa za normálnych podmienok uskutočňuje osobnými dozimetrami a na základe údajov monitorov pracovného prostredia. Osobné dozimetre sú kalibrované tak, aby veličina, ktorú namerajú čo najlepšie zodpovedala veličine, v ktorej sa limituje ožiarenie. Na tento účel môžu byť použité odvodené limity, vyjadrené v lepšie merateľných veličinách ako je efektívna dávka.

Osobné dozimetre sa bežne nosia na referenčnom mieste, ktorým je ľavá predná strana hrudníka. V osobitných prípadoch sa môže nosiť na inej časti tela, napr. v prípade vodiča, ktorý má náklad za sebou sa môže umiestniť na chrbát, pri práci s rádioaktívnym materiálom rukami môže byť vo forme prsteňa, ak sa predpokladá ožiarenie očnej šošovky môže sa umiestniť dozimeter na čapicu v blízkosti očí a pod.

Osobné dozimetre merajú veličiny: osobný dávkový ekvivalent $H_p(d)$, smerový dávkový ekvivalent $H'(d, \Omega)$ a priestorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$. Tieto sa nazývajú aj operačné alebo prevádzkové veličiny.

Osobný dávkový ekvivalent $H_p(d)$ je dávkový ekvivalent v mäkkých tkanivách v hĺbke d pod stanoveným bodom tela.

Jeho jednotkou je **sievert [Sv]**.

V osobnej dozimetrii sa používa:

$H_p(10)$ - pre odhad efektívnej dávky E

$H_p(0,07)$ - pre odhad ekvivalentnej dávky na kožu

$H_p(3)$ - pre odhad ekvivalentnej dávky v očnej šošovke

Na monitorovanie prostredia sa používajú:

Priestorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$ je dávkový ekvivalent v bode radiačného poľa, ktorý by bol vytvorený zodpovedajúcim rozšíreným a usporiadaným poľom v ICRU sfére v hĺbke d na polomere, ktorý je opačný ako smer poľa. Jeho jednotkou je sievert. Hodnota **$H^*(10)$** predstavuje dávkový ekvivalent v hĺbke 10 mm ICRU gule a slúži ako odhad ekvivalentnej dávky u osoby, vyskytujúcej sa v meranom priestore, v hĺbke 10 mm.

Pre **smerový dávkový ekvivalent $H'(d, W)$** treba špecifikovať smer Ω , teda uhol pod ktorým je meraný objekt otočený k smeru poľa ionizujúceho žiarenia.

Voľba osobného dozimetra závisí od druhu meraného žiarenia a od toho aká dozimetrická informácia sa vyžaduje. V praxi sa potom používajú:

- **dozimetre fotónov** - dávajú informáciu o hodnote $H_p(10)$ v poliach žiarenia X a gama,
- **dozimetre beta a gama žiarenia** - dávajú súčasne informáciu o hodnotách $H_p(0,07)$ i $H_p(10)$
- **komplexné dozimetre pracujúce na diskriminačnom princípe** - dávajú informáciu nielen o hodnotách $H_p(0,07)$ i $H_p(10)$ ale aj o type žiarenia, jeho efektívnej energii prípadne o orientácii osoby v poli žiarenia a pod. Používajú sa na meranie gama, beta i neutrónov.
- **dozimetre neutrónov** - dávajú informáciu o hodnote $H_p(10)$ v poliach žiarenia neutrónov. Kalibrácia neutrónových dozimetrov závisí od energetického spektra neutrónov na pracovnom mieste.
- **dozimetre extrémít** - dávajú informácie o uhlovej distribúcii radiačného poľa a o veľkosti ožiarenia (dávky) danej časti tela (napr. rúk).

V radiačných poliach, kde je dominujúcou zložkou žiarenie gama, postačuje meranie veličiny $H_p(10)$ pomocou jednoduchého osobného dozimetra. V súčasnosti sa používajú termoluminiscenčné, fotoluminiscenčné alebo ešte stále filmové dozimetre. Pri meraní polí so slabo a silno prenikavou zložkou žiarenia (beta + gama) sa používajú filmové dozimetre so zostavou absorpčných filtrov na meranie $H_p(0,07)$ i $H_p(10)$ alebo viaczložkové TLD. Na meranie neutrónov sa používajú albedo dozimetre alebo stopové dozimetre.

S vývojom miniaturizácie elektroniky a jej ekonomickou dostupnosťou sa začali presadzovať **elektronické osobné dozimetre**. Spravidla pracujú na báze GM detektorov či polovodičových kremíkových detektorov. Vhodne zvolené kremíkové diódy s vhodnou energetickou závislosťou môžu byť použité na meranie viacerých veličín: $H_p(10)$, $H_p(0,07)$ oddelene pre gama a beta žiarenie. Výhodou elektronických dozimetrov je, že sa vyhotovujú ako signálne a dajú sa použiť na meranie dávky a dávkového príkonu.

Požadovaná presnosť merania osobným dozimetrom podľa odporúčaní ICRP je pre veličiny E resp. H_T v rozpätí -33% až +50% (95% interval spoľahlivosti - 2σ).

Spôsob **monitorovanie vnútornej kontaminácie** závisí od druhu a celkovej aktivity rádionuklidov, ich fyzikálnej a chemickej formy, druhu umiestnenia, od pracovných podmienok a uskutočňovaných činností. Vnútna kontaminácia sa môže monitorovať meraním aktivity rádionuklidov v tele alebo v orgáne celotelovým počítačom (priame in vivo merania) alebo jednoduchším zariadením na meranie rádionuklidov v exkrétoch (napr. trícia v moči). Jednoduchým a rozšíreným meraním je stanovenie rádiojódu v štítnej žľaze. Ďalšou možnosťou je meranie ovzdušia v pracovnom prostredí. Aktivity získané meraním sa potom prevádzajú na úvahy efektívnej dávky alebo na úvahy ekvivalentnej dávky pomocou modelov. Na základe merania obsahu rádionuklidov v ovzduší sa stanovuje príjem rádionuklidov inhaláciou.

Vnútné ožiarenie považujeme za viac nebezpečné, pretože niektoré orgány (tzv. kritické orgány) prednostne akumulujú určité nuklidy (napr. štítna žľaza absorbuje asi 20% do organizmu vstupujúceho jódu, hoci jej hmotnosť je iba 0,05% celkovej hmotnosti ľudského tela). Prijaté rádionuklidy potom odovzdávajú svoju energiu relatívne malému objemu tela. Ďalšou príčinou nebezpečnosti vnútorného ožiarenia je skutočnosť, že tieto nuklidy sa určitý čas zdržujú v organizme, čím sa doba ožarovania predlžuje.

Ak predpokladáme, že vylučovanie rádioaktívnych látok z ľudského organizmu sa deje podľa exponenciálneho zákona, ktorý charakterizuje konštanta l_b , účinnú rýchlosť ubúdania rádioaktívneho nuklidu bude charakterizovať účinná konštanta vylučovania $l_{úč} = l_b + l$, kde l je konštanta premeny rádioaktívnej látky.

Účinný polčas vylučovania rádioaktívnej látky z ľudského organizmu potom vyjadríme vzťahom

$$T_{úč} = \frac{T_b T_{1/2}}{T_b + T_{1/2}} \quad (4.5)$$

V porovnaní s vonkajším ožiarением sú vysoko-ionizujúce častice α pri vnútornom ožiarení oveľa nebezpečnejšie.

Rádioaktívne látky vnikajú do organizmu tromi cestami: cez dýchacie ústrojenstvo (inhaláciou), cez zažívací trakt (ingesciou) a cez kožu (túto zložku uvažujeme najmä pri jej poranení). Dostávajú sa najprv do krvi, potom sú rozptýlené v celom organizme, prípadne sa usadia prednostne v kritických orgánoch. Najnebezpečnejšia je prvá cesta, pretože v priebehu pracovnej zmeny vdýchne človek asi 10 m^3 vzduchu (za 24 hodín 20 m^3), kým vody prijíma organizmus denne asi 2,2 l. Vniknutie rádionuklidov cez nepoškodenú pokožku je oveľa pomalší, ako cez zažívacie ústrojenstvo. Výnimkou je oxid trícia, niektoré zlúčeniny uránu a izotopy jódu, ktoré cez kožu prenikajú ľahko.

Účinný polčas vylučovania býva niekoľko dní (^3H , ^{14}C , ^{24}Na), avšak môže sa približovať k nekonečnu (^{90}Sr , ^{239}Pu).

Podľa toho, kde sa nuklidy usadzujú, rozoznávame tri skupiny: v kostiach sa prednostne usadzujú napr. ^{45}Ca , ^{90}Sr , ^{239}Pu a i., v pečeni ^{210}La , ^{144}Ce a v celom tele ^3H , ^{14}C , ^{137}Cs a i.

Rádionuklidy, ktoré vnikli do organizmu, spôsobujú jeho poškodenie podobne ako pri vonkajšom ožiarení. Môže nastať hypoplastická anémia, pneumoskleróza, hepatída, leukóza a nádory rôznych orgánov.

Ochrana proti žiareniu nuklidov, ktoré do organizmu vnikli, je obtiažna. V podstate možno iba čiastočne urýchliť ich vylučovanie z organizmu, prípadne zabrániť ich usadzovaniu.

Na zníženie nebezpečenstva vnútorného ožiarenia sa robia tieto opatrenia:

1.) Mechanické odstraňovanie nuklidov napr. opakovaným výplachom žalúdka, prípadne črevného traktu. V prípade izotopov ^{24}Na , ^{137}Cs a ^3H sa používa metóda izotopového riedenia.

2.) Urýchlenie vylučovania metódou zámény - pre ^{266}Ra , ^{90}Sr , ^{140}Ba sa používajú zlúčeniny bária a vápnika, pre $^{131-135}\text{I}$ sa používa jeho stabilný analóg (roztok alebo tabletky), alebo jodid draselný.

Záverom možno konštatovať nasledovné:

1.) Človek okamžite nepocíti účinok žiarenia, môže sa spoľahnúť iba na údaje dozimetrických prístrojov.

2.) Príznaky zasiahnutia organizmu sa objavujú až po určitom čase.

3.) Ak je vstup rádioaktívnych látok do organizmu systematický, alebo je organizmus vystavený systematickému účinku žiarenia (hoci malým dávkam), nastáva kumulácia dávok, čo vedie k vzniku choroby z ožiarenia.

4.6 Koncepcia zdôvodniteľného rizika pri využívaní jadrovej energie.

Jedným z možných prístupov k zhodnoteniu škodlivých účinkov žiarenia na pracovníkov v jadrovej energetike, ako aj na obyvateľstvo, je porovnanie rizika pri práci v tejto oblasti s rizikom pri vykonávaní iných povolání. Pri porovnávaní treba mať na zreteli aj prínos pri využívaní jadrovej energie, pretože jadrové elektrárne sú v súčasnosti jedinou serióznou alternatívou riešenia vznikajúceho energetického deficitu.

Porovnajme pracovné riziko pri práci s ionizujúcim žiarením s pracovným rizikom vykonávania tých povolání, ktoré môžeme považovať za úplne bezpečné. Najúčelnejšie sa javí porovnať počet smrteľných prípadov. V tabuľke 5.8 sú údaje o počte úmrtí na milión zamestnancov v rozličných zamestnaniach v USA a vo Veľkej Británii.

Podľa štatistických údajov riziko úmrtia obyvateľstva priemyselných krajín je v rozmedzí 10^{-3} až 10^{-5} za rok (doprava 10^{-3} , požiare a účinok teplární $2 \cdot 10^{-5}$, fajčenie $5 \cdot 10^{-4}$, samovraždy $3 \cdot 10^{-4}$ atď.). Ako sme spomínali, riziko rakoviny so smrteľným účinkom sa považuje 10^{-3} .

Ak sa budeme orientovať na chemický priemysel, môžeme pripustiť riziko úmrtia max. 100 prípadov na 10^6 pracovníkov zamestnaných v atómovom priemysle, t.j. riziko bude $10^{-4} \text{ rok}^{-1} \text{ man}^{-1}$. Možno predpokladať, že 90% uvedených prípadov bude spojených s neradiačnými príčinami. Radiačné riziko sa teda zníži na 10^{-5} za rok na osobu. Pre obyvateľstvo má byť toto riziko o rád nižšie, teda $10^{-6} \text{ rok}^{-1} \text{ man}^{-1}$.

Pre obyčajného občana spomínané riziko 10^{-6} nemá psychologický význam - môže o ňom vedieť, ale predpokladá, že neohrozuje práve jeho. Keďže jednotliví občania sú v každodennom živote vystavení riziku desaťnásobne väčšiemu ako v priemere ostatné obyvateľstvo, možno za prijateľné riziko považovať pre obmedzenú časť obyvateľstva hodnotu $10^{-5} \text{ rok}^{-1} \text{ man}^{-1}$, čo je porovnateľné s rizikom úmrtia v dôsledku exhalátov uhoľných elektrární.

Tabuľka 4.8 Pracovné riziko vykonávania niektorých povolání

Odvetvie, činnosť	Počet smrteľných prípadov $10^{-6} \cdot \text{rok}^{-1}$	Riziko úmrtia $\text{rok}^{-1} \cdot \text{man}^{-1}$
Odevný a obuvnícky priemysel	1 - 10	$10^{-6} - 10^{-5}$
Textilný, papierenský, polygrafický, lesný a chemický priemysel	10 - 10^2	$10^{-5} - 10^{-4}$
Metalurgický, lodiarsky, stavebný a uhoľný priemysel	$10^2 - 10^3$	$10^{-4} - 10^{-3}$
Posádky rybárskych lodí a lietadiel	$10^3 - 10^4$	$10^{-3} - 10^{-2}$

Napriek tomu pri uvažovaní rizika z ionizujúceho žiarenia by sa mali porovnávať ukazovatele, ktoré majú rovnakú podstatu, teda frekvenciu onkologických ochorení.

Ako sme už spomínali, počet ochorení na leukémiu Japoncov (ľubovoľného veku), ktorí prežili atómové bombardovanie je 50 prípadov na $S_k = 10^4 \text{ man} \cdot \text{Sv}$. Riziko pre dospelé obyvateľstvo bolo 70 prípadov na $10^4 \text{ man} \cdot \text{Sv}$. Ak zaokrúhlime túto hodnotu (smerom nahor) na 100 prípadov úmrtí na všetky druhy rakoviny (vrátane leukémie), bude to päťnásobne väčšia hodnota, ako bolo uvedené v prvých publikáciách ICRP.

Za tohto predpokladu parameter rizika z ožiarenia veľkej skupiny obyvateľstva $r = 10^{-2} \text{ man}^{-1} \cdot \text{Sv}^{-1}$. Ak vezmeme navrhnutú vyššiu hodnotu rizika $10^{-6} \text{ rok}^{-1} \text{ man}^{-1}$, dostaneme, že kolektívny dávkový ekvivalent pre obyvateľstvo by nemal prevýšiť hodnotu $10^2 \text{ man} \cdot \text{Sv} \cdot \text{rok}^{-1}$ a pre ohraničenú nevelikú skupinu $10^3 \text{ man} \cdot \text{Sv} \cdot \text{rok}^{-1}$. (Pri tomto odhade sme použili vzťahy (4.2), (4.3) a (4.4).)

Ak uvážime, že limitná ročná hodnota pre efektívnu dávku na obyvateľa je $0,25 \text{ mSv} \cdot \text{rok}^{-1}$, z hodnoty kolektívnej efektívnej dávky $S_k = 10^2 \text{ man} \cdot \text{Sv}$ vyplynie, že v tomto obvode môže bývať asi 200 000 obyvateľov. Skutočné namerané hodnoty sú však $0,02 \text{ mSv} \cdot \text{rok}^{-1}$, z čoho vyplýva, že by tam mohlo bývať $5 \cdot 10^6$ obyvateľov.

Možno povedať, že:

1. uvedené úvahy o efektívnych a ekvivalentných dávkach sú hornou hranicou reálnych dávok z exhalátov jadrových elektrární pracujúcich v normálnom režime,
2. ožiarenie obyvateľstva v dôsledku exhalátov jadrových elektrární je malé v porovnaní s hygienickými normami a v porovnaní s prírodným pozadím.

5. Detekcia a meranie ionizujúceho žiarenia

5.1 Základné procesy detekcie žiarenia

Administratívne a meracie prístrojové vybavenie jadrovej elektrárne je určené buď priamo na riadenie a optimalizáciu činnosti reaktora, alebo na zabezpečenie ochrany obsluhujúcich pracovníkov a na ochranu životného prostredia v okolí jadrovej elektrárne. Pretože hlavným procesom, pri ktorom dochádza k uvoľneniu jadrovej energie, je štiepna reťazová reakcia, ktorá je sprevádzaná vznikom ionizujúceho žiarenia, súvisí veľká časť prístrojového vybavenia s problematikou detekcie a registrácie ionizujúceho žiarenia.

Princípom detekcie každého druhu žiarenia je jeho interakcia s materiálom detektora, ktorý musí byť skonštruovaný tak, aby účinkom žiarenia v ňom vznikol dostatočný počet detekovateľných druhotných javov. Základné mechanizmy používané pri detekcii žiarenia sú uvedené v tabuľke 5.1.

Tab. 5.1. Charakteristika základných procesov pri detekcii žiarenia

Mechanizmus	Použitie	Typ zariadenia	Typ detektora
Ionizácia Iž môže priamo (a,b) alebo nepriamo (g, X, n) ionizovať prostredie detektora	Monitorovanie radiácie	1. Ionizačné komory 2. Proporcionálne p. 3. GM počítače 4. Polovodičové det.	1. plynne 2. plynne 3. plynne 4. pevná látka
Scintilácia Záblesky svetla pri deexcitácii atómov v detekčnom kryštále sú konvertované na elektrický signál vo fotonásobiči.	Monitorovanie radiácie	scintilačné detektory	kryštál alebo tekutá látka
Termoluminiscencia Elektróny sú v TLD kryštáloch zachytené v pasciach po excitácii žiarením. Vyslobodenie z pasce sa deje prostredníctvom dodania tepla za emisie fotónov svetla, ktoré sa registrujú fotonásobičom.	Osobná dozimetria	TLD dozimeter	kryštál
Chemické reakcie Žiarenie môže spôsobiť resp. urýchliť niektoré chemické reakcie. Vyhodnotenie chemických zmien môže dať informáciu o absorbovanej dávke.	Osobná dozimetria	fotografický film	fotoemulzia
Ohrev Ionizujúce žiarenie pri interakcii odovzdáva energiu absorpčnému prostrediu, ktorá za tým zohrieva. Ohrev je proporcionálny absorbovanej dávke.	Kalibrácia meracích prístrojov a štandardov	kalorimeter	tekutá alebo pevná látka
Biologické zmeny Žiarenie spôsobuje zmeny v biologickom tkanive (frekvencia chromozómových aberácií), ktoré môžu byť za určitých okolností využité na určenie dávky	Havarijné situácie	biologické tkanivo	biologické tkanivo

Pre rôzne druhy žiarenia sú typické rôzne procesy interakcie s látkou a tým aj mechanizmov ionizácie, ktorá je základným procesom využívaným v dozimetrii. Prehľad základných procesov pri detekcii žiarenia je uvedený v tabuľke 5.2. Z tabuľky je zrejmé čím sa líšia jednotlivé druhy žiarenie z pohľadu ich detekcie: na detekciu neutrónov sa využívajú jadrové procesy, na detekciu α , β a γ žiarenia procesy s atómom resp. molekulou alebo priamo s ich elektrónovým obalom.

Tab. 6.2. Prehľad základných procesov pri detekcii žiarenia

Primárne častice	Proces interakcie	Nabité priamo ionizujúce častice
a - častice	ionizácia a excitácia Coulombovskými silami	primárne častice a sekundárne elektróny
b - častice	ionizácia a excitácia Coulombovskými silami	primárne a sekundárne elektróny
	emisia brzdného žiarenia	elektróny z interakcie brzdného žiarenia
fotóny g a X	fotoelektrický jav	fotoelektróny
	Comptonov rozptyl	Comptonove elektróny
	tvorba párov e^- a e^+	vzniknuté páry e^- a e^+
	koherentný rozptyl	-
	fotojadrová reakcia	produkty reakcie
neutróny	pružný rozptyl	odrazené jadrá (ľahké)
	nepružný rozptyl	odrazené jadrá a elektróny po interakcii vzniknutých fotónov
	radiačný záchyt (n,g)	elektróny po interakcii vzniknutých fotónov
	jadrové reakcie (n,α), (n,p)...	nabité produkty reakcií
	štiepenie jadier	štiepne fragmenty

5.2 Detektory používané v jadrovej energetike

Detektory v jadrovej energetike delíme do dvoch skupín. Do prvej skupiny patria detektory, ktoré sú potrebné na riadenie a kontrolu činnosti reaktora. Druhú skupinu tvoria detektory, ktoré kontrolujú úroveň zamorenia okolitého prostredia, systému odvodu tepla, obsluhujúcich pracovníkov, materiálu a pod.

Prvá skupina detektorov kontroluje a podáva informácie predovšetkým o výkone a jeho rozložení v aktívnej zóne reaktora, informuje o stupni vyhorenia paliva a dáva signál pre havarijné zariadenia.

Druhá skupina detektorov meria aktivitu alebo dávku spojenú s kontamináciou chladiča cirkulujúceho v primárnom a sekundárnom okruhu, registruje úroveň zamorenia vzduchu v pracovných priestoroch a v okolí reaktora a meria dávky, ktorým sú obsluhujúci pracovníci vystavení.

Detektory prvej skupiny sledujú predovšetkým neutrónové žiarenie. Druhá skupina detektorov musí sledovať prakticky všetky druhy žiarenia, ktoré sa pri činnosti reaktora vyskytujú. Musia byť oveľa citlivejšie a presnejšie a musia rozlišovať druh žiarenia a jeho energiu. Na ich umiestnenie nie sú také požiadavky ako pri detektoroch prvej skupiny, ktoré sú vo väčšine prípadov vnútri aktívnej zóny.

Pre zabezpečenie kontroly obsluhujúcich pracovníkov je potrebné poznať dávku, ktorú ľudský organizmus dostal za určité obdobie (jednorazovo, za pracovnú smenu, za týždeň, mesiac a pod.). Detektory používané v osobnej dozimetrii musia byť malé, ľahké a dostatočne presné. Musia merať dávku žiarenia, ktorá môže poškodiť ľudský organizmus, teda v podstate dávku neutrónov a dávku spôsobenú žiarením γ a žiarením β . Dozimetre sa pridelujú každému pracovníkovi, ktorý môže prísť do styku s ionizujúcim žiarením, a pravidelne sa vyhodnocujú.

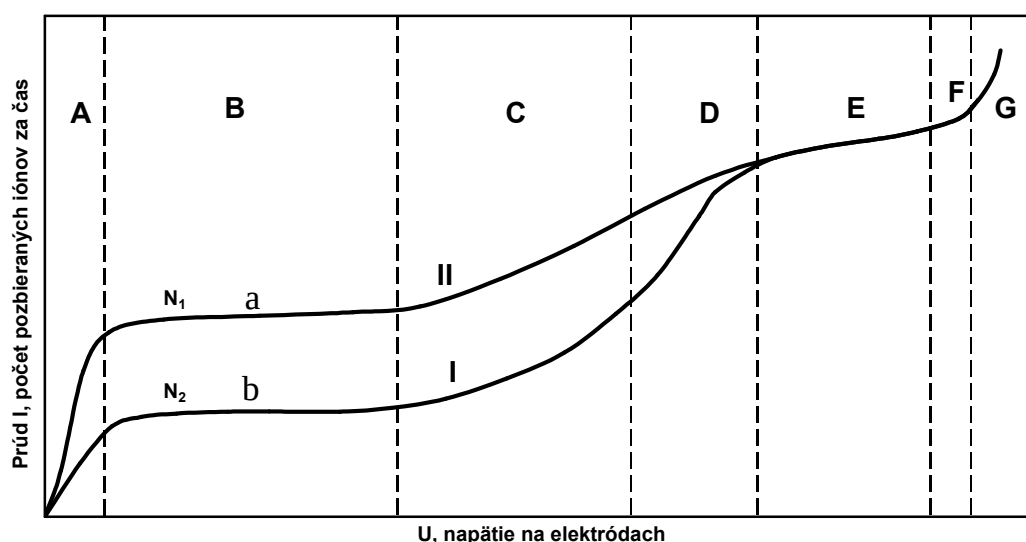
5.3 Plynové detektory

Väčšina detektorov využíva schopnosť žiarenia vytvárať kladné a záporné ióny pri prechode prostredím. Ak do uzavretého priestoru umiestnime vhodný plyn a elektródy, ku ktorým pripojíme elektrické napätie, budú sa ióny pohybovať smerom k príslušným elektródam. Vo vonkajšom obvode vznikne prúd, ktorého veľkosť bude úmerná hustote vytvoreného náboja v priestore medzi elektródami, a tým aj hustote častíc, ktoré prešli cez detektor.

Pri ožarovaní detektora žiaričom konštantnej aktivity, pričom postupne zvyšujeme potenciálny rozdiel medzi elektródami, dostaneme **voltampérovú charakteristiku** detektora, čo je závislosť prúdu vo vonkajšom obvode od pripojeného napätia (obr. 5.1).

Pri zvyšovaní napätia rastie prúd spočiatku úmerne s napätím, preto túto lineárnu oblasť nazývame oblasťou Ohmovho zákona (oblasť A). V uvedenej oblasti je rýchlosť iónov malá, a iba nepatrná časť z nich dosiahne príslušné elektródy, zvyšok rekombinuje. Do určitého napätia je prúd prechádzajúci detektorom skoro konštantný (oblasť B). V tejto oblasti je kinetická energia iónov dostatočná na to, aby nenastala rekombinácia, a pripojené napätie ich stačí všetky z priestoru detektora odčerpať. Nazývame ju oblasťou nasýteného prúdu. V tejto napäťovej oblasti pracujú ionizačné komory. Pri ďalšom zvyšovaní napätia narastá kinetická energia iónov natoľko, že na svojej dráhe k príslušnej elektróde sú schopné vytvárať ďalšie ióny, pričom počet sekundárnych iónov je úmerný pripojenému napätiu (oblasť C - nazývame ju oblasťou proporcionality). V tejto oblasti pracujú proporcionálne detektory. V oblasti D postupne signál prestáva byť úmerný počtu primárnych iónových párov vytvorených dopadom žiarenia. Táto oblasť sa nazýva oblasťou čiastočnej proporcionality a na merania sa nevyužíva. V oblasti E nárazová ionizácia prechádza v lavínovitú, to znamená, že každý ión, i sekundárny, je schopný ionizovať. Ionizácia má trvalý (lavínovitý) charakter a výboj treba v detektore umelo zastaviť. V tejto oblasti pracujú Geigerove - Müllerove detektory a nazývame ju Geigerova - Müllerova (GM) oblasť.

Voltampérová charakteristika



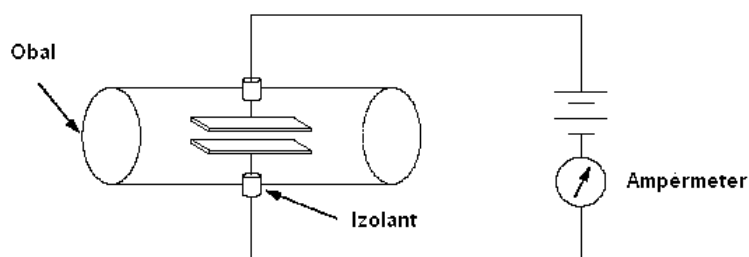
Obr. 5.1 Voltampérová charakteristika (závislosť $I = f(U)$ v plynových detektoroch)

5.3.1 Ionizačné komory.

Ionizačné komory patria medzi najstaršie detektory žiarenia. Ich konštrukcia je pomerne jednoduchá, pracujú spoľahlivo a dostatočne presne. Je to v podstate kondenzátor, medzi ktorého doskami je pripojené napätie.

Ak prechádza vnútorným objemom komory ionizujúce žiarenie, pripojené napätie priťahuje vytvorené ióny k príslušným elektródam a vonkajším obvodom komory prechádza prúd. Na odpore R vznikne úbytok napätia úmerný prvej ionizácii, ktorú častica v pracovnom objeme stratila.

Konfigurácia elektród, materiál stien a pracovný plyn sa volí v závislosti od použitia komory. Najrozšírenejšia je komora s dvoma rovnobežnými doskami. Iným typom sú komory valcové, v ktorých sú dve elektródy v tvare koaxiálnych valcov. Používajú sa aj sférické komory, v ktorých sú elektródami dve koncentrické sféry.



Obr. 5.2 Schéma ionizačnej komory

Rovnicu iónovej bilancie vo vnútornom objeme V ionizačnej komory môžeme napísať v tomto tvare:

$$\frac{dn}{dt} = N - an^2 - \frac{i}{Ve} \quad (5.1)$$

kde

N - počet vznikajúcich iónových párov v jednotke objemu plynu za jednotku času,

n - počet iónov s ľubovoľným znamienkom, ktoré sa už v tomto objeme nachádzajú,

a - koeficient rekombinácie,

e - náboj iónu,

i - ionizačný prúd.

Výraz an^2 charakterizuje počet iónov, ktoré zanikli rekombináciou, zatiaľ čo výraz i/Ve vyjadruje počet iónov pozbieraných elektródami.

V rovnovážnom stave $dn/dt = 0$, z čoho

$$i = Ve (N - an^2) \quad (5.2)$$

Ak elektrické pole nie je pripojené, $i = 0$ a teda $N = an^2$. Z toho dostaneme maximálny počet existujúcich iónových párov: $n = \sqrt{N/a}$. Ak napätie na elektródach narastá ($i > 0$), $(N - \alpha n^2) > 0$ alebo $N > an^2$, čo znamená, že počet existujúcich iónov klesá na úkor ich odberu elektródami. Keď ionizačný prúd dosiahne hodnotu nasýtenia, $i = i_{nas}$, rekombinácia bude nulová

$$i = i_{nas} = VeN \quad (5.3)$$

Nasýtený prúd prechádzajúci komorou bude závisieť iba od veľkosti objemu V a počtu vznikajúcich iónových párov N . Keďže počet vytvorených iónových párov za jednotku času je úmerný expozičnému príkonu X , výraz (5.3) môžeme napísať v tomto tvare:

$$i = Ve \frac{X}{e} \quad (5.4)$$

alebo, keďže $X = \dot{X} \cdot t$:

$$Q = Ve \frac{X}{e} \quad (5.5)$$

Expozičný príkon teda udáva ionizačný prúd, zatiaľ čo expozíciu vyjadruje pozbieraný náboj Q . Zo vzťahov (5.4) a (5.5) vidno, že meranie expozície spočíva v meraní úbytku napätia na elektródach komory. Rozličné veľkosti expozície možno určovať komorami s rozličným objemom.

Registrácia nabitých častíc ionizačnou komorou nie je problémom. Jedinou podmienkou je, aby častica do objemu vnikla, prípadne aby podstatnú časť svojej energie stratila v komore.

Vzhľadom na vysokú prenikavú schopnosť fotónov γ je potrebné ionizačnú komoru určenú na ich registráciu vhodne upraviť. Preto plynová náplň takejto komory býva pod tlakom 0,1 - 1 MPa a jej steny sú z ťažkých materiálov.

Ionizačné komory určené na registráciu neutrónov (pomalých) obsahujú prímеси, s ktorými interakciou vznikajú nabité častice. Najčastejšie sa používa bór. Nastáva reakcia:



Vzniknuté častice, častica α a jadro lítia, sú silne ionizujúce a v komore vytvoria veľké množstvo iónových párov. Najčastejšie sa používa bór v tuhej podobe, nanosený na steny komory, alebo plyná zlučenina bóru BF_3 , ktorá tvorí priamo plynovú náplň komory. V prípade tuhého bóru treba dodržať zásadu, aby hrúbka nánosu nepresahovala dosah častíc, ktoré v nej vznikajú pri reakcii bóru s neutrónmi. V tomto smere je výhodnejšia komora s plynným bórom, ale z hľadiska stability a charakteristiky ionizačnej komory nie je tento plyn najvhodnejší.

Na detekciu rýchlych neutrónov sa používajú ionizačné komory naplnené vodíkom. V tomto prípade sú ionizujúcimi časticami odrazené jadrá vodíka - protóny.

Používajú sa aj štiepne ionizačné komory, v ktorých sa nachádza štiepny materiál (${}^{235}\text{U}$ s vysokým obohatením - nad 90%). Ionizáciu pracovného plynu tu spôsobujú

štiepne fragmenty. Veľkou výhodou uvedených komôr je ich menšia citlivosť na žiarenie γ , ktoré prakticky vždy sprevádza neutrónové žiarenie a spôsobuje veľké problémy pri registrácii neutrónov.

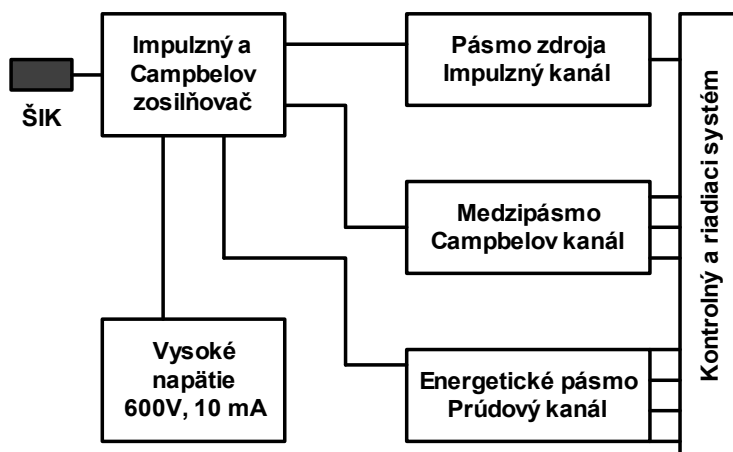
Veľkou nevýhodou ionizačných komôr je skutočnosť, že výstupné prúdy (výstupné impulzy) sú malé, a preto treba používať pomerne zložitú elektronickú aparatúru na ich zosilnenie.

Štiepne komory v spojení s modernou elektronikou, ktorá môže meniť režimy spracovania signálu, dokážu merať hustotu toku neutrónov v širokom rozsahu.

Ionizačná komora môže pracovať v rôznych režimoch v závislosti od intenzity meraného poľa neutrónov.

1. **Impulzný režim** sa používa pri nízkych početnostiach registrovaných impulzov, pričom sa využíva fakt, že počet zaregistrovaných impulzov je proporcionálny hustote toku neutrónov.
2. **Prúdový režim** sa využíva pri vyšších intenzitách meraného poľa neutrónov, kedy sa jednotlivé impulzy prekrývajú a meracím prístrojom meriame hodnotu stredného prúdu prechádzajúceho meracím obvodom. Stredný prúd je proporcionálny počtu zaregistrovaných neutrónov a teda meranej hustote toku neutrónov.
3. **Campbelov režim** zdokonaľuje prúdový režim, používa sa pri vysokých intenzitách meraného poľa neutrónov. Využíva štatistickú povahu registrovaného signálu a je založený na skutočnosti, že stredná kvadratická odchýlka meraného signálu je proporcionálna početnosti registrácie neutrónov a kvadrátu vytvoreného náboja Q^2 pri každej udalosti registrácie.

Meracia aparatúra, ktorá dokáže prepínať medzi rôznymi režimami sa používa v riadení reaktora ako širokopásmový merací kanál (wide range fission chamber).



Obr. 5.3. Širokopásmový (Campbelov) merací kanál

5.3.2 Iné plynné detektory.

Úsek B voltampérovej charakteristiky (Obr. 5.1), keď pripojené napätie nie je veľmi vysoké, nazývame oblasťou ionizačnej komory (oblasť nasýteného prúdu). V tejto oblasti amplitúda impulzov závisí iba od veľkosti začiatkovej ionizácie a jej je úmerná.

Pri ďalšom zvyšovaní napätia amplitúda impulzov narastá, pretože elektróny vzniknuté ionizáciou v urýchľujúcom elektrickom poli získavajú značnú kinetickú

energiu a môžu spôsobovať sekundárnu (nárazovú) ionizáciu. Nastáva lavínovitý výboj, ktorý však zaniká v okamihu, keď sa všetky vzniknuté ióny dostanú k príslušným elektródam. Tento výboj nazývame nesamostatným (úsek C). Tu sa uplatňuje plynové zosilnenie, ktorým sa zväčšuje pôvodný počet iónov na hodnotu $f \cdot n$ a tie dopadnú na elektródy.

Koeficient f sa nazýva koeficient plynového zosilnenia. V ionizačných komorách $f = 1$, v oblasti C, v ktorej pracujú proporcionálne detektory, býva $f = 1$ až 1000. V tejto oblasti sú amplitúdy impulzov úmerné energii, ktorú častica v objeme detektora stratila (oblasť proportionality), a f nezávisí od veľkosti začiatkovej ionizácie.

Proporcionálne detektory majú v porovnaní s ionizačnými komorami tú výhodu, že amplitúdy impulzov na ich výstupe sú oveľa väčšie, čo uľahčuje ich ďalšiu registráciu a spracovanie. Okrem toho rozlišujú častice podľa druhu, čím sa stávajú veľmi vhodným detektorom neutrónov (po príslušnej úprave) v pozadí fotónov γ . Pre ich stabilnú a spoľahlivú prácu je potrebný vysokostabilizovaný zdroj vysokého napätia.

Pri ďalšom zvyšovaní napätia na elektródach detektora (úsek III) sa dostávame do oblasti obmedzenej proportionality. Koeficient plynového zosilnenia prudko narastá a je závislý od začiatkovej ionizácie. Táto oblasť nemá v detekčnej technike praktický význam.

Úsek E voltampérovej charakteristiky (Obr. 6.1) sa nazýva Geigerovou - Müllerovou oblasťou. V tejto oblasti pracujú Geigerove - Müllerove detektory (**GM detektory**).

Vzhľadom na to, že napätie pripojené na elektródy detektora je relatívne vysoké, v značnej miere sa uplatňuje sekundárna ionizácia, čím narastá aj amplitúda výstupných impulzov. Na ich registráciu a ďalšie spracovanie nie je potrebná špeciálna aparatura. Impulzy na výstupe sú štandardné bez rozdielu na to, aká častica a s akou energiou spôsobila prvotnú ionizáciu. Jedinou podmienkou registrácie je to, aby častica (fotón γ) vytvorila aspoň jeden pár iónov.

V závislosti od plynovej náplne delíme GM detektory na samozhášacie (v ktorých výboj končí asi o 10^{-7} s z vnútorných príčin) a nesamozhášacie, v ktorých vzniknutý výboj treba vonkajším (elektronickým) obvodom zhasiť. V súčasnosti sa používajú väčšinou samozhášacie detektory.

GM detektory sú konštruované zvyčajne tak, že katódu tvorí vonkajší valec, vnútri ktorého je uložená anóda v tvare tenkej vodivej nite.

Mechanizmus výboja je takýto: Predpokladajme, že elektrón vyrazený z katódy detektora spôsobil v niektorom jeho bode prvotnú ionizáciu. Ihneď nastáva sekundárna ionizácia a novovzniknuté elektróny sa rýchle pohybujú smerom ku anóde (za čas asi 10^{-7} až 10^{-8} s k nej dorazia). Pomalé ťažké ióny sa pohybujú smerom ku katóde. Najsilnejšia ionizácia nastáva v priestore okolo anódy (tam je najväčší gradient elektrického poľa), pričom málo pohyblivé ťažké ióny ostávajú v tomto priestore prakticky bez pohybu a vytvárajú okolo anódy hustý obal, čím sa intenzita elektrického poľa znižuje.

Tie kladné ióny, ktoré dopadli na katódu, sa neutralizujú, pričom vyrážajú z nej elektróny. Vzniknuté neutrálne atómy sú v excitovanom stave a emitujú fotóny, ktoré môžu z povrchu katódy tiež vyrážať elektróny. Tie sú zárodkom ďalších lavín, a proces sa nepretržite opakuje.

Ak k jednoatómovej plynovej náplni detektora (napr. argón, neón a i.) pridáme určité množstvo mnohoatómového plynu (napr. pary liehu, etylén alebo iné organické zlúčeniny), priebeh výboja bude iný. Mnohoatómové molekuly vzhľadom na to, že ich

potenciál ionizácie je nižší ako pri pracovnom plyne, sú schopné pohlcovať fotóny emitované atómami argónu a zabraňujú aj fotoefektu na katóde. Prakticky dosiahnu katódu iba ťažké ióny; ľahké ióny sa vzhľadom na vyšší ionizačný potenciál pri zrážkach s iónmi liehu neutralizujú.

Zhášací plyn sa postupne spotrebúva, pretože pri absorpcii fotónov disociuje. Pri jednom výboji sa spotrebuje asi 10^{10} molekúl zhášadla. Ak uvažíme, že začiatočná náplň bola 10^{20} molekúl, životnosť detektora je 10^{10} impulzov.

Ako zhášací plyn sa používajú aj halogénové plyny (chlór, bróm) v kombinácii s pracovným plynom (neón, argón). Výhodou takejto náplne je nízke pracovné napätie (okolo 300 až 400 V, zatiaľ čo pri ostatných je to 700 až 1600 V), ako aj väčšia (neobmedzená) životnosť, pretože halogény sú schopné znova rekombinovať. K nevýhodám patrí väčší sklon platô (viac ako 5% na 100 V) a náročnosť na konštrukčné materiály (halogény sú agresívne).

Mŕtva doba GM detektorov je čas, za ktorý napätie na elektródach dosiahne svoju pôvodnú hodnotu po predchádzajúcom výboji. Počas nej je detektor necitlivý na žiarenie, ktoré naň dopadá. Býva to približne 10^{-4} s.

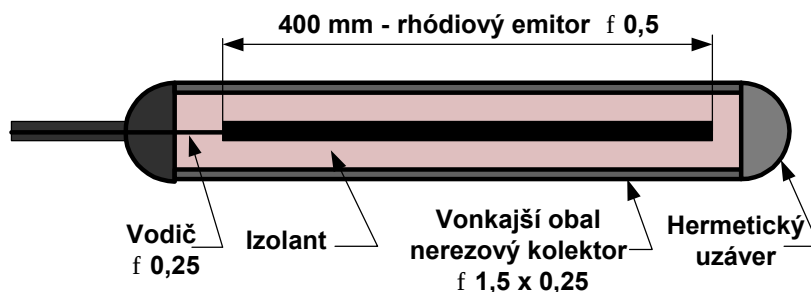
Z uvedeného vyplýva, že GM detektory iba registrujú žiarenie, nijaký iný údaj (energia, druh žiarenia) neposkytujú. V praxi sa však hodne používajú pre ich jednoduchosť. Nevyžadujú stabilizovaný napájací zdroj. Pri vhodnej konštrukcii ich možno použiť aj na registráciu α a β častíc, podmienkou je, aby častica vytvorila aspoň jeden iónový pár. V dozimetrii sa často používajú na určovanie dávkového príkonu fotónov γ .

Oblasť F a G voltampérovej charakteristiky (Obr. 6.1) zodpovedá korónovým a iskrovým detektorom. Pri zvyšovaní napätia nad GM oblasťou nastáva v plynovom detektore stály korónový výboj. Detektorom prechádza stály prúd a žiarenie s malými ionizujúcimi účinkami nevyvolá v detektore registrovateľné zmeny. Tie sú výrazné až detektorom preletí ťažká ionizujúca častica, ktorou môžu byť napr. fragmenty štiepenia. Práve pre na tieto účely sa využívajú korónové a iskrové detektory.

5.4 Samonapájacie (emisné) detektory.

Pre samonapájacie detektory sa zaužívali označenia **SPND** (Self-Powered Neutron Detector) alebo **DPZ** (Detektor Priamovo Zariada). Samonapájacie detektory využívajú schopnosť niektorých materiálov emitovať okamžité alebo s určitým oneskorením nabitú časticu po dopade nenabitej častice.

Pri dopade neutrónov alebo fotónov γ na elektródu (emitor) tohto detektora nastane interakcia (napr. (n, β) , elektrónový záchyt (n, γ) , fotoefekt, Comptonov efekt) s materiálom elektródy, pri ktorej je emitovaná častica β (elektrón), a emitor sa stáva nabitým kladne. Emitované častice môže zachytiť aj druhá elektróda (kolektor), čo môže vyvolať vo vonkajšom obvode prúd úmerný počtu neutrónov alebo fotónov γ dopadnutých na emitor. Detektory tohto typu sú v podstate dva koaxiálne valce oddelené od seba izolátorom. Izolátor musí mať veľký odpor, ktorý sa nemá meniť ani pri ožiarení (používa sa Al_2O_3 , MgO , $R_{300^\circ\text{C}} = 10^8 \Omega$), kolektor zas nesmie emitovať elektróny pri jeho bombardovaní neutrónmi.



Obr. 5.4 Schéma samonapájacieho detektora

Detektory sa vyrábajú v celej stupnici rozmerov. Priemer emitora je 0,5 - 1 mm. Materiály emitovov a ich vlastnosti sú uvedené v tabuľke 5.1. Vonkajší priemer detektora býva 1,5 - 3 mm. Kolektor sa zhotovuje z nehrdzavejúcej ocele alebo z inkonelu (Ni-60%, Cr-23%, Fe-15%).

Citlivosť detektorov je v rozmedzí $(3 \div 20) \cdot 10^{-20}$ C.cm² na neutrón. Schopné sú dostatočne spoľahlivo pracovať v rozmedzí teplôt 250 až 700 °C. V prevádzke treba brať do úvahy vypaľovanie jadier emitora.

Tab. 5.1 Vlastnosti SPND emitovov

Materiál	Účinný prierez aktivácie 10^{-24} cm ²	Oneskorená reakcia (n, β)	Okamžitá reakcia (n, γ , β)	Okamžitá reakcia (γ , β)	Reakčný čas (0-63%)	Rýchlosť vypaľovania emitora
Co ⁵⁹	37	•	♦	•	okamžite	0,094% za mes
Pt ¹⁹⁵	24	•	♦	♦	okamžite	0,03% za mes
Rh ¹⁰³	145	♦	-	-	1,1 min	0,39% za mes
V ⁵¹	4,9	♦	♦	•	5,5 min	0,012% za mes
HfO ₂	115	•	♦	•	okamžite	0,3% za mes
Ag ¹⁰⁷	64,8	♦	-	-	0,5 min	0,16% za mes

Rýchlosť vypaľovania je udávaná pre hustotu toku neutrónov 10^{17} m⁻² s⁻¹.

• primárna interakcia

• sekundárna interakcia

Uvedené vlastnosti umožňujú používať opísané detektory vnútri aktívnej zóny na mapovanie hustoty neutrónového toku a na lokálnu kontrolu palivových článkov. Sú relatívne lacné a nevyžadujú zložitú doplnkovú elektroniku. Ich veľkou nevýhodou je pomalá reakcia, spôsobená dobou emisie častice β (niekoľko sekúnd).

5.5 Polovodičové detektory.

Polovodičové detektory sú typickým predstaviteľom citlivých laboratórnych detektorov, používaných najmä na spektrometrické účely, na určovanie energie častíc a fotónov γ . V reaktorovej technike majú obmedzené použitie. Používajú sa pri spektrálnom zisťovaní prítomnosti izotopov, ktorými je zamorený vzduch, chladiivo a pod. Kremíkové diódy sa používajú v moderných osobných dozimetoch s okamžitou indikáciou obdržanej dávky.

Polovodičové detektory pracujú podobne ako ionizačné komory v impulzovom režime. Polovodičový detektor predstavuje NP - prechod v nepriepustnom smere, na ktorý je pripojené napätie. Vlastnú citlivú vrstvu tvorí ochudobnená vrstva, ktorá sa zväčšuje s inverzným napätím. Prechodom ionizujúceho žiarenia sa v tejto vrstve vytvárajú páry elektrón - diera (analogicky ako iónové páry), ktoré sú odsávané

elektrickým poľom. Náboj, pozbieraný na elektródach, je úmerný energii, ktorú častica (žiarenie) stratila v ochudobnenej vrstve. Vynikajúce spektrometrické vlastnosti polovodičových detektorov súvisia s nízkou energiou potrebnou pre vznik jedného páru elektrón - diera.

V súčasnosti rozoznávame detektory s povrchovou bariérou (napr. SSB Silicon Surface Barrier), detektory driftované lítiom (napr. SiLi, GeLi), pasivované s iónmi implantovaným kontaktom (PIPS - Passivated Implanted Planar Silicon), germániové HPGe (High Purity Germanium). Rôzne vyhotovenia a úpravy polovodičových detektorov ich predurčujú na detekciu rôznych typov žiarenia.

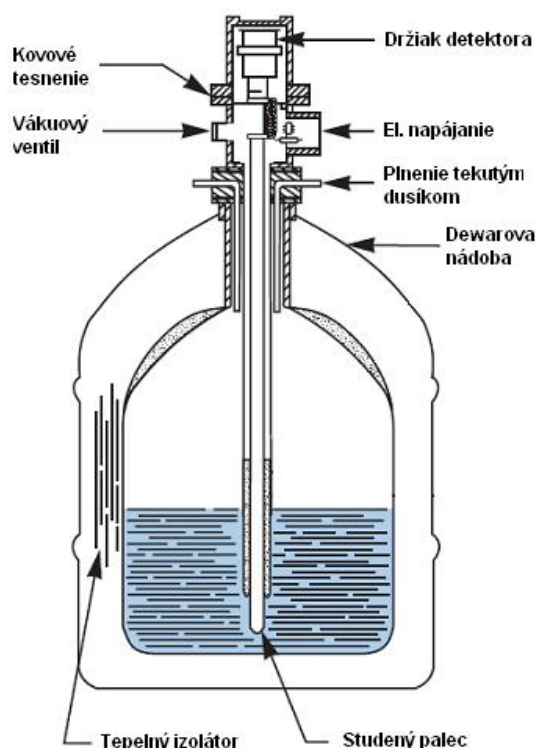
PIPS detektory postupne vytláčajú staršie SSB detektory a pasivované kremíkové detektory s difúznym kontaktom DJ.



Obr. 5.5 Rôzne vyhotovenia PIPS detektorov

Detektory driftované lítiom Si(Li), Ge(Li) majú podstatne hrubšiu ochudobnenú vrstvu a používajú sa v spektrometrii RTG žiarenia (Si(Li)) a fotónov γ (Ge(Li)).

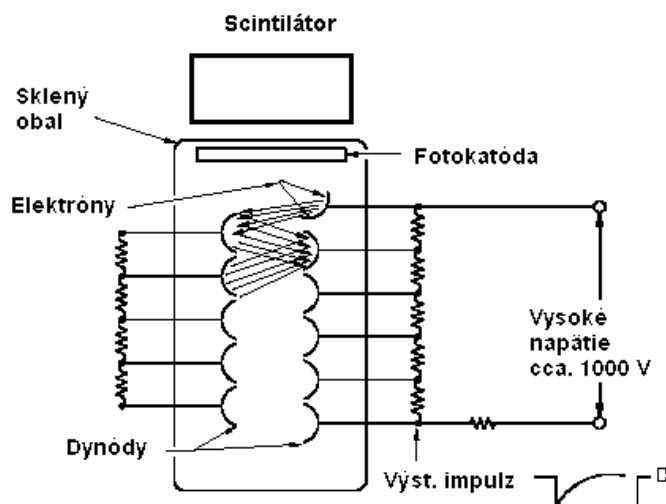
Nevýhodou polovodičových detektorov je ich malá detekčná účinnosť, chýlostivosť na pracovné podmienky. Germániové detektory potrebujú na zníženie šumu nízku prevádzkovú teplotu a driftované detektory musia byť neustále skladované pri nízkej teplote aby sa citlivá vrstva nezničila (najmä detektor typu Ge(Li) sa prevádzkuje a skladuje pri teplote tekutého dusíka 77 K).



Obr. 5.6 Polovodičový detektor s kryostatom

5.6 Scintilačné detektory.

Scintilačné detektory sa uplatňujú v reaktorovej technike podobne ako polovodičové predovšetkým na kontrolu úrovne zamorenia.



Obr. 5.7 Schéma scintilačného detektora

Scintilačné detektory pracujú na základe emisie svetla (svetelných zábleskov) niektorými látkami, ktorými prešla nabitá častica (fotón γ). Tieto látky sa nazývajú **scintilátormi**. Pri prechode žiarenia cez scintilátor sa jeho atómy a molekuly dostávajú do vzбудeného stavu, z ktorého sa za krátky čas (10^{-6} až 10^{-10} s) vracajú do pôvodného stavu. Pritom sa vyžiarí energia vo forme svetelného záblesku. Fotóny viditeľného elektromagnetického žiarenia dopadajú na katódu fotonásobiča a vyrážajú odtiaľ fotoelektróny. Ich počet sa prechodom cez systém dynód **fotonásobiča** znásobí, pretože medzi nimi je pripojené postupne narastajúce napätie. Takto vzniknuté elektróny pozbiera na konci fotonásobiča anóda a na výstupe sa objaví elektrický impulz s amplitúdou úmernou energii, ktorú častica (fotón γ) v scintilátore stratila. Schematicky je scintilačný detektor znázornený na obr. 5.7.

Tab. 5.2 Základné charakteristiky niektorých anorganických scintilátorov

Material	Nal:TI	CsI:TI	CaF ₂ :Eu	BaF ₂	BGO	YAG:Ce	YAP:Ce	GSO:Ce
Physical Properties								
Chemical Formula	Nal:TI	CsI:TI	CaF ₂ :Eu	BaF ₂	Bi ₄ (GeO ₄)	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	YAlO ₃	Gd ₂ SiO ₅
Density g/cm ³	3.67	4.51	3.18	4.89	7.13	4.57	5.37	6.71
Hardness-Moh	2	2	4	3	5	8.5	8.6	5.7
Hydroscopic	Yes	Slightly	No	No	No	No	No	-
Crystal Structure	Cubic	Cubic	Cubic	Cubic	Cubic	Cubic	Rhomb.	Mono.
Therm. Exp. - PPM	47.5	50	19.5	18.4	7.0	8-9	4-11	4-12
Melting Pt – C°	651	621	1360	1280	1050	1970	1875	
Luminescence Properties								
Integrated Light Output (%Nal:TI)	100	45	50	20/2	15-20	15	40	20-25
Wave Length of Max. Emissions (nm)	415	550	435	325/220	480	550	370	440
Decay Constant n/s	230	900	940	630/0.6	300	70	25	30-60
Afterglow (% at 6 ms)	0.5-5	<2	<0.3	-	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Radiation Length cm	2.9	1.86	3.05	2.03	1.1	3.5	2.7	1.38
Photon yield @ 300K - 10 ³ pH/MeV	38	52	23	10	2-3	8	10	8-10

Vhodným výberom scintilátora možno detekovať ľubovoľný druh žiarenia. Anorganické scintilátory typu NaJ(Tl), CsJ(Na) sú vhodné na detekciu žiarenia γ , organické scintilátory (antracén, stilbén a i.) na detekciu neutrónov.

Scintilačné detektory patria medzi proporcionálne detektory. Používajú sa nielen ako detektory, ale aj ako spektrometer. Nedosahujú však spektrometrické vlastnosti polovodičových detektorov. V porovnaní s GM detektormi sú oveľa presnejšie, ale aj zložitejšie.

5.7 Detektory na meranie dávok

Detektory na meranie dávok nazývame **dozimetre**. Slúžia na určenie dávky jednotlivých pracovníkov so zdrojmi ionizujúceho žiarenia. Registrujú integrálnu dávku na základe fyzikálnochemických zmien, ku ktorým v nich dochádza v dôsledku ožiarenia. Nosia sa na referenčnom mieste tela (osobné dozimetre), alebo sú umiestnené na sledovanom objekte.

5.7.1 Filmové dozimetre.

Filmové dozimetre patria k najstarším typom integrálnych dozimetrov žiarenia X, γ aj β a tepelných neutrónov, špeciálne jadrové emulzie detekujú i neutróny rýchle. Ich činnosť je založená na schopnosti ionizujúceho žiarenia spôsobiť sčernanie citlivej fotografickej vrstvy (vytvorenej suspenziou zŕn halogenidov striebra AgBr v želatíne). Latentný obraz, ktorý sa vytvoril ožiarení filmom ionizujúcim žiarením, možno zviditeľniť chemickou cestou (vyvolaním filmu). Stupeň sčernania citlivej vrstvy je úmerný dávke žiarenia, ktoré na ňu dopadne a vyhodnocuje sa densitometrom. Ak vylúčime nežiadúce sprievodné javy (starnutie filmu, jeho citlivosť na teplotu, vlhkosť, agresívne chemické látky a pod.), možno stupňu sčernania prisúdiť určitú presne definovanú dávku.

Energetické rozlíšenie uvedených dozimetrov sa dosahuje použitím filtrov z rozličných materiálov. Taká je aj metodika používaná v praxi sl. dozimetrickej služby. Film je rozdelený na sedem polí: prázdne pole, polia s filtermi 0,05 mm, 0,5 mm a 1,5 mm Cu, 0,5 mm Pb a pole pokryté 50 mg.cm⁻² a 300 mg.cm⁻² plastickou látkou. Súčasne s expozíciami žiarenia X a γ v energetickom rozsahu 10 keV až 3 MeV možno stanoviť aj dávky žiarenia β . Spracovanie výsledkov možno úplne automatizovať využitím počítačovej techniky.



Obr. 5.8 Sčernenie filmu po ožiarení

Za predpokladu správnej expozície (spredu) je citlivosť filmových dozimetrov na fotóny γ ($E_\gamma > 0,1$ MeV) 0,10 mGy až 0,15 Gy pre rutinnú dozimetriu a 0,05 Gy až 10 Gy pre dozimetriu havarijnú. Citlivosť na žiarenie β ($E_\beta > 0,7$ MeV) je 0,10 mGy až 0,15 Gy pre rutinnú dozimetriu a 0,05 až 10 Gy pre havarijnú dozimetriu. Nepresnosti (chyby) v údajoch filmových dozimetrov súvisia najmä s týmito faktormi: energetická závislosť filmu, smerová závislosť veľkosti sčernania od dávky, nepresnosť pri ciachovaní, nehomogenita emulzie a chyby merania optickej hustoty. Vo

všeobecnosti v rozsahu dávok 0,2 mGy až 100 mGy možno však dosiahnuť nepresnosť menšiu ako $\pm 25\%$.

Pomocou jadrových emulzií možno počítaním dráh odrazených jadier vodíka vyhodnocovať fluenciu rýchlych neutrónov. Ak obsahuje emulzia zlúčeniny bóru, možno detekovať súčasne rýchle neutróny aj neutróny pomalé. O fluencii pomalých neutrónov usudzujeme podľa dráh jadier He a Li, ktoré sú kratšie a výraznejšie.

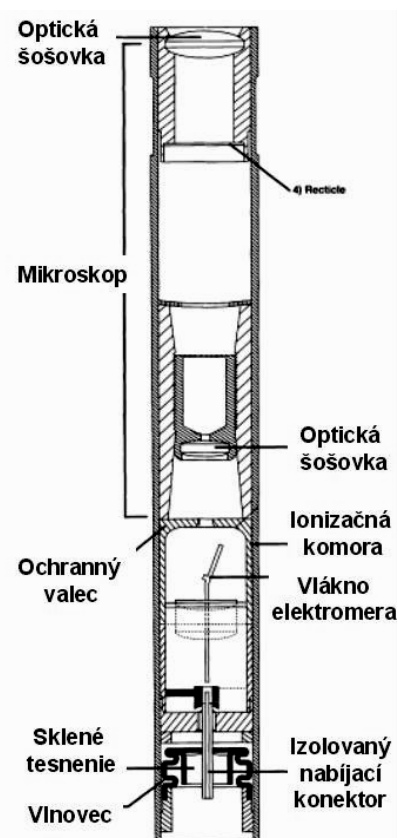
Výhodou filmových dozimetrov je trvalá hodnota záznamu o dávke, vysoká citlivosť, t.j., že dávku možno odčítavať mimo kontaminovanej plochy (mimo poľa žiarenia), možnosť približného určenia druhu a energie žiarenia, nízka cena a pod. Medzi nevýhody patrí vysoký fading, smerová závislosť, nemožnosť pokryť celý dávkový rozsah jedným filmom, citlivosť na vonkajšie vplyvy (vlhkosť, teplota), zdĺhavé vyhodnocovanie, malá presnosť pri extrémne nízkych a extrémne vysokých dávkach, relatívne veľké rozmery a pod. Zdá sa, že nevýhody prevažujú nad výhodami, preto sa viac orientujeme na iné pevnolátkové detektory.

5.7.2 Tužkové dozimetre.

Tužkové dozimetre sú malé ionizačné komôrky obsahu 1 až 5 cm³, zvyčajne naplnené plynom (vzduchom), kde dochádza k priamej a nepriamej ionizácii. Napätím asi 200 V sa privedie do komôrky náboj úmerný jej kapacite, ktorý sa ožarovaním komôrky vybíja. Úbytok náboja sa meria buď odčítacím zariadením, alebo vstavaným elektrometrom.

Dozimetre sú citlivé na žiarenie γ aj β , väčšinou sa však používajú na detekciu žiarenia X a γ . Merací rozsah je určený objemom komôrky a konštrukciou elektrometra. Ich citlivosť je v rozsahu 10^{-7} C.kg⁻¹ až 10^{-1} C.kg⁻¹. Chyba merania je pomerne malá. Možno ich použiť aj na meranie neutrónových dávok. V takom prípade musia byť steny komôrok vyrobené z materiálov s vysokým obsahom vodíka a náplň komôrky musí obsahovať mnoho jadier vodíka.

Hlavnou výhodou uvedených dozimetrov je možnosť rýchleho a priebežného vyhodnocovania, možnosť mnohonásobného použitia a jednoduchosť.



Obr. 5.9 Tužkový dozimeter - rez

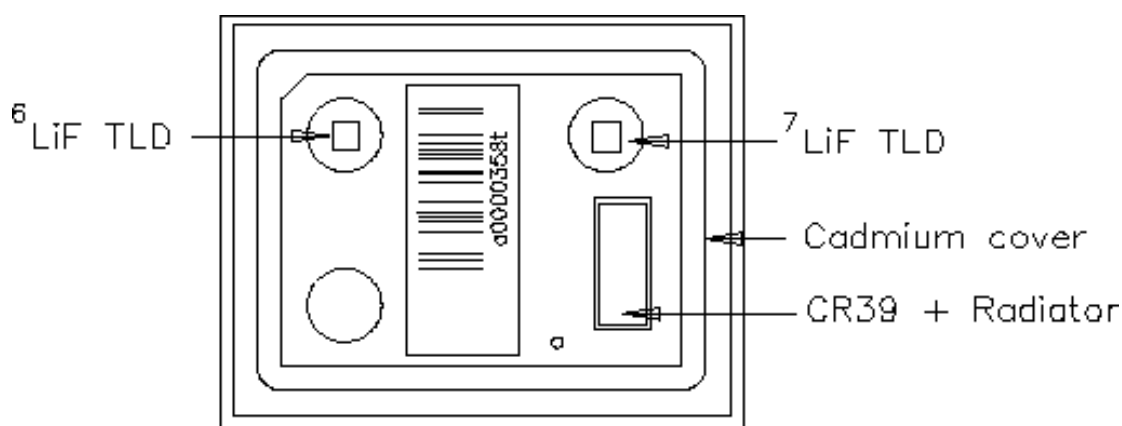
5.7.3 Termoluminiscenčné (TLD) a fotoluminiscenčné (FLD, RPLD) dozimetre.

Široké využitie v osobnej dozimetrii majú termoluminiscenčné detektory (TLD). Ich hlavné výhody sú:

- termoluminiscenčné materiály sú v podstate ekvivalentné tkanivu;
- vysoká citlivosť a reprodukovateľnosť výsledkov;
- komerčná dostupnosť, malé rozmery detektora a možnosť ručného i automatického vyhodnocovania;

- vhodnosť na havarijnú dozimetriu a dozimetriu ožiarenia pokožky;
- lineárna závislosť merania dávky.

Základom dozimetrov TLD aj FLD je kryštál (LiF , CaF_2 , CaSO_4 , fosfátové sklá s prímiesou striebra a i.), ktorého atómy sa účinkom žiarenia excitujú. Táto excitačná energia sa prejaví vyrazením orbitálnych elektrónov z ich rovnovážneho stavu. Vplyvom prímies, nečistôt a porúch v kryštálovej mriežke vznikajú v atónoch kryštálu zachytené centrá (pasce), v ktorých sú tieto elektróny dlhodobo zachytené. Ostávajú tam dovtedy, kým sa im nedodá dodatočná energia. Túto energiu možno dodať vo forme tepla (TLD) alebo UV svetla (FLD). Po dodaní energie preskočia elektróny z pascí do iných energetických úrovní, z ktorých sa vracajú do rovnovážneho stavu vyžarovaním svetelných kvánt. Množstvo emitovaných fotónov je úmerné dávke žiarenia.



Obr. 5.10 Usporiadanie TLD dozimetra na meranie zmiešaných g-n polí s kadmiovou kompenzáciou tepelných neutrónov a b žiarenia a detekciou rýchlych neutrónov stopovou metódou v polykarbonáte CR39.

Detektory TLD sa vyhodnocujú na zariadení, v ktorom je dozimeter zahriaty reprodukovateľným spôsobom, a emitované fotóny sú detekované fotosenzitívnym prvkom (najčastejšie fotonásobičom). Dozimetre sú citlivé na fotóny γ aj na nabité častice. Citlivosť na neutrónové žiarenie je zvyčajne nízka a závisí od zloženia termoluminiscenčnej látky. Pri použití vhodného materiálu sa používajú na meranie dávok od neutrónov.

Tabuľka 5.3 TLD materiály

Charakteristiky niektorých termoluminiscenčných materiálov					
Typ TLD	Z_{ef}	Hlavný pík (°C)	Emisné maximum (nm)	Relatívna citlivosť	Fading (pri 25 °C)
$\text{LiF}:\text{Ti},\text{Mg}$	8,3	200	400	1	5%/rok
$\text{LiF}:\text{Na},\text{Mg}$	8,3	200	400	1	5%/rok
$\text{LiF}:\text{Mg},\text{Cu},\text{P}$	8,3	210	400	25	5%/rok
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$	7,3	220	605	0,2	4%/mesiac
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$	7,3	205	368	2	10%/2mesiace
$\text{Mg}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Dy}$	8,4	190	490	10	4%/mesiac
BeO	7,1	190	200-400	0,2	8%/2mesiace
$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$	14,5	220	480-570	30	1%/2mesiace
$\text{CaSO}_4:\text{Tm}$	14,5	220	452	30	1-2%/2mesiace
$\text{CaF}_2:\text{Mn}$	16,3	260	500	5	16%/2týždne
CaF_2 (prír.)	16,3	260	380	23	veľmi malý
$\text{CaF}_2:\text{Dy}$	16,3	215	480-570	15	8%/2mesiace

Citlivosť termoluminiscenčných materiálov na neutróny závisí od zloženia detektora, jeho obalu a od energie neutrónov. Mnohé majú vysokú citlivosť pre tepelné neutróny

ale veľmi nízku pre rýchle. Využitím vhodnej technológie, ktoré sú v súčasnosti rozpracované, je možné zvýšiť citlivosť TLD detektorov pre rýchle neutróny. V praxi je to napríklad realizované v albedo-dozimetroch, využívajúcich na moderáciu rýchlych neutrónov ľudské telo. Albedo-dozimetre sa často vyrábajú použitím TLD napr. ${}^6\text{LiF}$, v plastikovom obale s obsahom bóru, ktorý umožňuje oddeliť priame neutróny od odrazených. Kvôli citlivosti TLD k fotónom sa dávka neutrónov vyhodnocuje podľa rozdielu merania detektorov ${}^6\text{LiF}$ a ${}^7\text{LiF}$. Albedo-dozimetre majú vysokú a prakticky konštantnú citlivosť na neutróny v rozsahu do 10 keV.

Merací rozsah TLD pri fotónovom žiarení závisí tak isto od použitého druhu termoluminiscenčného materiálu a býva v medziach $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ C.kg}^{-1}$ až do 1 C.kg^{-1} .

Presnosť merania závisí nielen od druhu termoluminiscenčného materiálu, ale aj od kvality vyhodnocovacieho zariadenia, ktoré je zvyčajne nákladné. Celková chyba merania býva okolo 5 až 10%.

Medzi výhody dozimetrov TLD patria malé rozmery a malá hmotnosť, nízke náklady a široký merací rozsah. K nevýhodám patrí zložitosť vyhodnocovacej aparatury, znižovanie záznamu s časom (fading) a možnosť zničenia záznamu o dávke pri vyhodnocovaní.

Vyhodnocovanie dozimetrov FLD je podobné ako pri dozimetroch TLD s tým rozdielom, že namiesto tepelnej energie sa dodáva energia svetelná. Impulz ultrafialového svetla dopadá cez filter na fotoluminiscenčnú látku a svetlo emitované touto látkou dopadá na fotocitlivý prvok. Vyhodnocovanie je technicky náročné vzhľadom na potrebu reprodukovať osvit pri možných odrazoch. Celkové množstvo emitovaného svetla je úmerné dávke žiarenia.

Uvedený druh dozimetra je vhodný predovšetkým na meranie žiarenia X a γ . Citlivosť na neutróny je nízka. Dolná hranica meracieho rozsahu je okolo $10^{-7} \text{ C.kg}^{-1}$, horná $5 \cdot 10^{-1} \text{ C.kg}^{-1}$. Chyba môže byť menšia ako $\pm 5\%$.

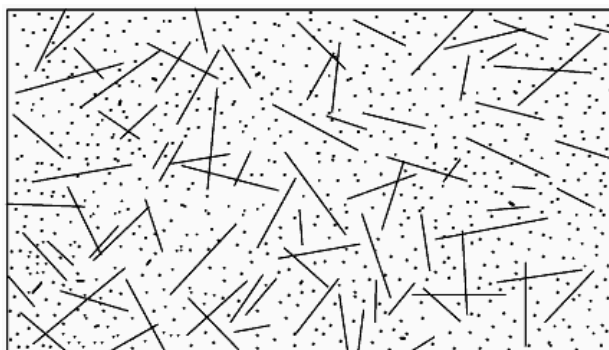
Prednosťami detektorov FLD sú predovšetkým zachovanie záznamu pri vyhodnocovaní, dobrá mechanická odolnosť a odolnosť na klimatické zmeny, malé rozmery, malá hmotnosť a nízka cena. Ich nevýhodou je náročnosť na vyhodnocovacie zariadenie (najmä pri nízkych dávkach) a závislosť vyhodnocovania od čistoty a hladkosti povrchu skiel.

5.7.4 Stopové detektory

Zistilo sa, že povrch niektorých látok (napr. LiF) sa pri ožarovaní nabitými časticami porušuje. Vzniknuté drobné defekty sú viditeľné v elektrónovom mikroskope, ale leptaním vhodnými činidlami ich možno zväčšiť natoľko, že sa stanú pozorovateľnými obyčajným optickým mikroskopom. Stopy po nabitých časticách možno zviditeľniť na rozličných dielektrických materiáloch, ako sú slúda, prírodné a umelé organické sklá a organické polyméry. Stopy sú stále a ich fading je nepatrný. Ako leptadlo sa používajú zvyčajne kyseliny, napr. fluorovodíková, alebo hydroxidy alkalických kovov (NaOH, KOH). Vyleptané detektory sa potom vyhodnocujú mikroskopom, alebo sa fotografujú, prípadne sa zobrazia na obrazovke.

Stopové detektory sú citlivé najmä na nabité častice, ale majú minimálnu citlivosť na žiarenie β a γ . Používajú sa preto najmä v dozimetrii častíc α (napr. pri meraní radónu a jeho dcérskych produktov v uránových baniach ale aj v obytných domoch).

Veľká možnosť aplikácie stopových detektorov je v neutrónovej dozimetrii. Neutróny samotné ako neionizujúce častice nevytvárajú stopu v detektore priamo, leptateľné stopy vznikajú pozdĺž dráh nabitých častíc uvoľnených pri interakcii neutrónov. Sú to najmä štiepne fragmenty, častice α alebo odrazené jadrá pri pružnom a nepružnom rozptyle neutrónov. Najmä štiepne produkty sú obzvlášť výhodné, pretože majú veľkú hmotnosť aj energiu, latentná stopa, ktorú zanechajú, je mohutná a možno ju ľahko zviditeľniť. K vlastnej detekčnej fólii sa zvyčajne prikladá ďalšia fólia zo štiepneho materiálu, ktorá slúži ako radiátor štiepných fragmentov (napr. ^{232}Th , ^{238}U , ^{237}Np pre detekciu rýchlych neutrónov a ^{235}U a ^{239}Pu pre tepelné neutróny a neutróny stredných energií).



V porovnaní s jadrovými emulziami majú stopové detektory tieto prednosti:

1. na žiarenie β , γ a X približne až do 10^4 Gy nie sú citlivé,
2. majú oveľa menší fading ako jadrové emulzie,
3. leptanie a vyhodnocovanie je jednoduchšie,
4. ich citlivosť je asi $10 \mu\text{Gy}$,
5. použitím rozličných radiátorov možno robiť energetickú analýzu neutrónového spektra.

Stopové detektory sa používajú aj u nás, radiátorom je obohatený urán a tórium s prímiesou 0,5% prírodného uránu v hrúbkach 20 a 50 μm .

5.7.5 Aktivačné detektory

Jadrové reakcie s neutrónmi v mnohých prípadoch vedú k vzniku umelých rádionuklidov. Žiarenie emitované týmito nuklidmi umožňuje stanoviť ich aktivitu, a tým aj hustotu neutrónového toku, ktorý ju spôsobil.

Indukovaná aktivita A_i závisí od hustoty neutrónového toku ϕ , doby ožarovania t , polčasu premeny $T_{1/2}$ daného rádionuklidu, účinného prierezu aktivácie σ_a a počtu jadier n v hmotnostnej jednotke detektora.

Po ožarovaní detektora dostatočne dlhý čas ($t \gg T_{1/2}$) indukovaná aktivita dosiahne nasýtený stav. Môžeme ju vyjadriť vzťahom

$$A_{\text{inas}} = j \cdot s_a \cdot n \quad [\text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.7)$$

Pri krátkom čase ožarovania bude indukovaná aktivita menšia ako A_{inas} :

$$A_i = A_{inas} (1 - e^{-t}) = p \frac{j \cdot s_a \cdot N_A \cdot M}{A} (1 - e^{-t}) \quad (5.8)$$

kde p - je obsah rádionuklidu v prvku na 1 kg,
 N_A - Avogadrova konštanta,
 M - hmotnosť rádionuklidu,
 A - atómová hmotnosť.

Po skončení ožarovania bude aktivita detektora exponenciálne klesať:

$$A_i = A_{inas} \cdot e^{-\lambda t} \quad (5.9)$$

Na aktivačné detektory sú kladené tieto požiadavky:

1. musia mať známu závislosť účinného prierezu aktivácie od energie neutrónov,
2. polčas premeny vznikajúceho rádionuklidu musí byť dostatočný na to, aby umožňoval meranie aktivity dostatočne dlhú dobu po ožiarení,
3. materiál musí byť čistý, aby nevznikali chyby vplyvom aktivácie nečistôt.

Existuje celá stupnica materiálov vhodných na použitie ako aktivačný detektor. Mnohé z nich možno použiť aj ako havarijné dozimetre. V tab. 6.2 sú uvedené vlastnosti niektorých aktivačných detektorov tepelných neutrónov.

Pri použití materiálov, ktoré majú prahovú energiu pre aktiváciu môžeme reprodukovať energetické spektrum neutrónov v mieste merania. Vybrané prahové aktivačné detektory sú uvedené v tabuľke 6.3.

Tab. 6.2 Aktivačné detektory tepelných neutrónov

Prvok	$T_{1/2}$	Prvok	$T_{1/2}$
^{55}Mn	2,58 h	^{107}Ag	2,3 min
^{59}Co	10,4 min	^{115}In	54,1 min
^{63}Cu	12,87 h	^{164}Dy	1,3 min
^{65}Cu	5,14 min	^{197}Au	2,695 d

Tab. 6.3 Vybrané prahové aktivačné detektory

Prvok	$T_{1/2}$	Prah (MeV)
$^{19}\text{F}(n,2n)$	109,7 min	11,6
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	15,0 h	4,9
$^{27}\text{Al}(n,p)$	9,46 min	3,8
$^{64}\text{Zn}(n,p)$	12,7 h	2,0
$^{115}\text{In}(n,n')$	4,5 h	0,5
$^7\text{Li}(n,\alpha)$	12,3 r	3,8
$^{24}\text{Mg}(n,p)$	15,0 h	6,0

5.7.6 Havarijné dozimetre

V praxi niekedy nemožno vylúčiť náhodné ožiarenie pracovníkov veľkými (havarijnými) dávkami neutrónov a fotónov γ . Na zaregistrovanie takýchto dávok

slúžia havarijné dozimetre. Havarijné dozimetre môžu mať napr. takéto zloženie: izotop ^{237}Np , obalený filtrom ^{10}B , na registráciu rýchlych neutrónov a neutrónov stredných energií, a vrstva ^{235}U na registráciu tepelných neutrónov. V puzdre z plastu je ešte stopový detektor (silikátové sklo). Dávku určíme počítaním stôp s presnosťou 15%. Maximálna zaregistrovaná dávka takýmto typom detektora je 50 až 100 Gy.

U nás boli uskutočnené pokusy využiť aktiváciu prvkov obsiahnutých v ľudskom tele. Jednou z možností je meranie aktivity ^{24}Na , ktorý vznikol v dôsledku reakcie $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$. Výsledky však ovplyvňuje závislosť indukovanej aktivity od faktorov, ako je energetické spektrum neutrónov, rozdiely v obsahu dusíka v organizme a pod. Inou metódou je aktivácia síry vo vlasoch a nechtoch. Reakciou $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ vzniká čistý β - žiarič, ktorého aktivitu meriame obvyčajnými prístrojmi. Je to presnejšia metóda ako využitie Na, ale časovo je náročnejšia.

Použitá literatúra

1. Šeda a kol.: Dozimetrie ionizujúceho záření, SNTL - Alfa 1983,
2. Klener a kol.: Principy a praxe radiační ochrany, SÚJB, Praha 2000, ISBN 80-238-3703-6
3. Zákon NR SR č. 355/2007 Z.z. o ochrane, podpore a rozvoji verejného zdravia
4. NV SR 345/2006 Z.z. o základných bezpečnostných požiadavkách na ochranu zdravia pracovníkov a obyvateľov pred ionizujúcim žiarením.
5. Glenn F. Knoll: Radiation detection and measurement, Wiley, New York, ISBN 0-471-81504-7
6. ICRP 103 - Doporučenia Medzinárodnej komisie radiačnej ochrany, Publikácia 103 z roku 2007, Český preklad so súhlasom ICRP vydal: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, Praha 2009. Dostupné na internete: http://www.sujb.cz/docs/ICRP103_dokument.pdf
7. STN ISO 31-9:1992 Veličiny a jednotky. 9. časť: Atómová a jadrová fyzika
8. STN ISO 31-10:1992 Veličiny a jednotky. 10. časť: Jadrové reakcie a ionizujúce žiarenie