

Ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření

1. Legislativní normy.

Základním zákonem, který upravuje všechny činnosti spojené s využíváním ionizujícího záření je tzv. **Atomový zákon¹ 263/2016 Sb.** Zákon definuje základní pojmy a vymezuje vztahy mezi jednotlivými subjekty. Veškerou činností související s povolováním práce se zdroji ionizujícího záření (ZIZ), kontrolou dodržování zásad pro práci a ověřováním kvalifikace pracovníků je pověřen Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB).

Vyhláška 422/2016 Sb.¹ upravuje podrobnosti způsobu a rozsahu zajištění radiační ochrany při práci se ZIZ. Obě právní normy vycházejí ze směrnice Evropské unie pro radiační ochranu² – "Directive 2013/59/Euratom". Tyto právní normy pokrývají celou oblast mírového využívání ZIZ – jadernou energetikou počínaje, přes nukleární medicínu či průmyslové ozařovny, až po aplikaci ZIZ ve vědě a výzkumu. V dalším textu jsou uvedeny jen ty části, které mají bezprostřední vztah k problematice práce s **otevřenými** radionuklidovými zřídly v rozsahu běžném na vědeckých pracovištích zabývajících se vědami o živé přírodě (life sciences).

Provozní předpisy pro práci se zdroji ionizujícího záření na pracovištích I. kategorie ÚOCHB jsou interní normou pro práci s **otevřenými** radioaktivními zřídly

2. Základní pojmy.

Pro pochopení dalšího textu předkládáme definice některých základních pojmů z výše uvedených legislativních norem. Definice jsou převzaty v přesném znění, poznámky autora tohoto textu jsou vždy kurzívou na konci definice:

ionizující záření (IZ) – přenos energie v podobě částic nebo elektromagnetických vln vlnové délky nižší nebo rovnající se 100 nm, anebo s frekvencí vyšší nebo rovnající se 3×10^{15} Hz, který je schopen přímo nebo i nepřímo vytvářet ionty

záření γ ☐☐☐☐☐☐ je proud fotonů s energií desítek keV až jednotek MeV na jednu částici

záření β ☐☐☐☐☐☐☐☐ záporně nabitých elektronů s energiemi desítek keV až jednotek MeV na jeden elektron

záření α ☐☐☐☐☐☐☐☐ kladně nabitých jader atomů helia s energií jednotek MeV na částici

zdroj ionizujícího záření (ZIZ)

1. radioaktivní látka a předmět nebo zařízení ji obsahující nebo uvolňující
2. generátor ionizujícího záření (rentgen, urychlovač částic apod.)

radioaktivní látka – jakákoliv látka, která obsahuje radionuklid nebo je jím kontaminovaná v míře, která z hlediska možného ozáření vyžaduje regulaci podle Atomového zákona.

aktivita radionuklidového zdroje – veličina charakterizující množství daného radionuklidu. *Rychlost rozpadu jader radioaktivního isotopu je fyzikální konstantou a vyjadřuje se nejčastěji jako poločas rozpadu tj. čas během něhož se rozpadne jedna polovina jader z výchozího množství daného radionuklidu. Aktivita A je počet radioaktivních rozpadů za*

sekundu a jednotkou **1 Bq** (bequerel) = 1 rozpad za vteřinu. Starší jednotkou, ale stále používanou především pro vyšší aktivity, je **1 Ci** (curie) = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq = 37 GBq.

radionuklidový zdroj (RZ) – zdroj ionizujícího záření obsahující radioaktivní látku, u nějž součet podílů aktivit radionuklidů a zprošťovacích úrovní aktivit pro tyto radionuklidy je větší než 1 a současně součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a zprošťovacích úrovní hmotnostních aktivit pro tyto radionuklidy je větší než 1

uzavřený radionuklidový zářič – radionuklidový zářič, jehož úprava, například zapouzdřením nebo ochranným překryvem, zabezpečuje zkouškami ověřenou těsnost a vylučuje tak, za předvídatelných podmínek použití a opotřebování, únik radionuklidů ze zářiče

(každý takovýto zářič musí být doprovázen Osvědčením uzavřeného radionuklidového zářiče, ve kterém jsou kromě druhu a množství v něm obsažených radionuklidů uvedena i data o stupni jeho odolnosti, a to včetně výsledků zkoušek v autorizované zkušebně)

otevřený radionuklidový zářič – radionuklidový zářič, který není uzavřeným radionuklidovým zářičem *(jako s otevřeným RZ je nutno nakládat i se zapouzdřeným RZ, pokud není doprovázen Osvědčením uzavřeného radionuklidového zářiče)*

radiační ochrana – systém technických a organizačních opatření k omezení ozáření fyzických osob a k ochraně životního prostředí

pracoviště s otevřenými zářiči – pracoviště, kde je nakládáno s otevřenými radionuklidovými zářiči

radiační pracovník – každá fyzická osoba vystavená profesnímu ozáření *(jedná se o vymezení vůči všem ostatním jednotlivcům z obyvatelstva; radiační pracovníci kategorie "A" jsou ti, kteří by mohli obdržet efektivní dávku vyšší než 6 mSv/rok, ostatní radiační pracovníci jsou pracovníky kategorie "B")*

pracovní místo – část pracoviště jednoznačně charakterizovaná svými ochrannými vlastnostmi (izolačními, ventilačními a stínicími), vymezená prostorově nebo technologicky (pracovní stůl, aplikační nebo vyšetřovací box, digestoř, hermetizovaná podtlaková skříň apod.), kde mohou být prováděny samostatné práce se zdroji ionizujícího záření; v jedné místnosti může být více pracovních míst, pokud každé tvoří z hlediska organizace práce samostatný celek

radioaktivní kontaminace – znečištění jakéhokoliv materiálu či jeho povrchu, prostředí nebo osoby radioaktivní látkou; pokud jde o lidské tělo, zahrnuje jak zevní kontaminaci kůže, tak vnitřní kontaminaci bez ohledu na cestu příjmu

radioaktivní odpad – látky, předměty nebo zařízení obsahující radionuklidy nebo radionuklidy kontaminované, pro něž se nepředpokládá další využití a které nesplňují podmínky stanovené zákonem pro uvolnění mimo pracoviště

výpusť – kapalná nebo plynná látka vypouštěná do životního prostředí, která obsahuje radionuklidy v zákonem povolené koncentraci

expoziční situace – všechny v úvahu připadající okolnosti vedoucí k vystavení fyzické osoby nebo životního prostředí ionizujícímu záření

1. plánovaná expoziční situace, která je spojena se záměrným využíváním zdroje ionizujícího záření

2. nehodová expoziční situace

radiační mimořádná událost I. stupně – událost, která vede nebo může vést k překročení limitů ozáření zaměstnanců nebo nepřipustnému uvolnění radioaktivních látek do prostoru pracoviště; k jejímu řešení dostačují síly a prostředky pracovní směny. Vyhlášení mimořádné události I. stupně se ohlašuje neprodleně na SÚJB

*(v laboratořích I. kategorie na UOCHB prakticky nemůže k takovéto situaci dojít vzhledem ke zpracovávaným množstvím radioaktivity. Pojmy **radiační nehoda** a **radiační havárie** jsou vyhrazeny pro události jež mohou nastat pouze v zařízeních jako jsou jaderné elektrárny)*

zevní ozáření – ozáření osoby ionizujícím zářením ze zdrojů ionizujícího záření, které se nachází mimo ni

vnitřní ozáření – ozáření osoby ionizujícím zářením z radionuklidů vyskytujících se v těle této osoby, zpravidla jako důsledek příjmu radionuklidů požitím nebo vdechnutím

konverzní faktor příjmu – koeficient udávající efektivní dávku E připadající na jednotkový příjem radionuklidu; konvenční hodnoty konverzních faktorů příjmu požitím h_{ing} popř. vdechnutím h_{inh} , vypočítané na základě standardních modelů, jsou uvedeny v tabulkách přílohy č. 3 vyhlášky 422/2016 Sb.

(Převáděno do češtiny: vynásobením známého množství aktivity nuklidu, kterým se vnitřně kontaminoval pracovník a příslušného konverzního faktoru příjmu vypočítáme efektivní dávku, kterou pracovník obdrží; v konverzním faktoru příjmu jsou zahrnuty korekce na druh a energii záření vydávaného daným radionuklidem, na jeho biologický poločas a na citlivost jednotlivých tkání. Podrobnosti o veličinách a jednotkách používaných v dozimetrii a o biologických účincích ionizujícího záření jsou v cit. 3)

3. Interakce ionizujícího záření s hmotou

Ionizující záření při průchodu hmotou vytváří páry kladně nabitých atomů či molekul a záporně nabitých elektronů – výchozí energie ionizujícího záření se tak postupně spotřebovává na tuto excitaci. Energie takto absorbovaná v jednotce hmoty se nazývá dávka (**D**) ionizujícího záření a její základní jednotkou je **1 Gy (grey) = 1 J/kg**. **Dávkový příkon** pak charakterizuje narůstání dávky v čase v daném prostředí a je důležitou veličinou pro výpočty týkající se radiační ochrany.

Vlastnosti ionizujícího záření v daném prostředí charakterizuje lineární přenos energie **L**:

$$L = \frac{dE}{dx}$$

Vyjadřuje se v jednotkách J/m, keV/m anebo eV/μm. Vysoká hodnota **L** znamená, že k předání energie částic popř. fotonů gama dojde na krátké dráze. Pro příklad jsou uvedeny hodnoty **L** pro různé druhy ionizujícího záření v pevné hmotě :

RTG fotony s energií 200 keV $L = 1,7 \text{ eV}/\mu\text{m}$

částice β^- s energií 100 eV $L = 20 \text{ eV}/\mu\text{m}$

částice α s energií 5 MeV $L = 40 \text{ eV}/\mu\text{m}$

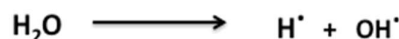
Biologické účinky částic se stejnou energií ale charakterizované různými L jsou různé. Je to dáno tím, že při vysokých hodnotách L je radiační poškození soustředěné do malého objemu tkáně a s tím se živý organismus vyrovnává hůře. Je-li stejná energie absorbovaná ve větším objemu tkáně, živý organismus má větší šanci se s tímto poškozením vyrovnat. Aby bylo možné charakterizovat biologické účinky dávky záření, zavádí se **dávkový ekvivalent $H = Q \cdot D$** kde Q je jakostní faktor, který je funkcí L a obecně roste se zvyšujícím se L . Jednotkou H je **1 Sv** (sievert). Koeficienty Q pro různé druhy ionizujícího záření jsou uvedeny níže:

γ (fotonové záření)	1
β (elektrony)	1
neutrony	5 - 20 (podle energie)
protony	5
α částice, těžká jádra	20

Neutrony jsou částice bez elektrického náboje a proto nemohou ionizovat hmotu přímo. Na druhou stranu právě proto, že jsou nenabitě mohou být absorbovány atomovými jádry. Dojde k jaderné reakci a výsledkem je většinou nestabilní radioaktivní atom, energetické elektrony, protony a α částice. Proto se proud neutronů z hlediska radiační ochrany považuje za ionizující záření.

4. Biologické účinky ionizujícího záření

Přímá ionizace a štěpení biomolekul vede ke ztrátě jejich biochemické funkce. Tyto procesy jsou ale vzhledem ke koncentraci biomolekul méně významné než radiolýza vody, která tvoří v průměru 70% hmotnosti biologického materiálu. Radiolýza vody je složitý proces. Jedním z nejdůležitějších dějů z hlediska biologických účinků je vznik OH radikálů:



Tím vzniká v biologickém materiálu oxidační prostředí (OH \cdot radikály jsou účinnou složkou tzv. Fentonova činidla používaného k oxidaci cukrů) a biomolekuly jsou poškozovány oxidačními reakcemi které opět vedou ke ztrátě jejich biochemické funkčnosti.

Na úrovni buněk jsou pak nejzávažnější změny cytogenetické informace – poškození DNA. Většina těchto změn je letální – buňka ztrácí schopnost se dělit a tím se snižuje schopnost tkání se obnovovat. Proto také rychle rostoucí nebo se obměňující tkáně a orgány (sliznice, žlázy s vnitřní sekrecí, kostní dřeň) jsou citlivější na radiační poškození než například svaly a kosti. Při malém rozsahu radiačního poškození si buňka zachová životaschopnost a výsledkem je zmutovaná buňka. Pro popis různé citlivosti tkání na radiační poškození se zavádí tkáňový dávkový ekvivalent $H_T = w_T \cdot H$. Efektivní dávka E v sievertch, která je rozhodující pro posuzování radiační zátěže organismu, se potom vypočítá na základě vztahu:

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

Tkáňové radiační váhové faktory w_T jsou uvedeny v Tabulce 1. Čím nižší je hodnota w_T pro danou tkáň tím nižší je citlivost této tkáně na radiační poškození. Součet váhových faktorů pro celé tělo je potom roven jedné.

Dospěli jsme tak k efektivní dávce E kterou budeme dále používat pro diskusi vztahu mezi obdrženou dávkou a pozorovatelným účinkem ionizujícího záření. Účinky ionizujícího záření na organismus dělíme na **deterministické** a **stochastické**.

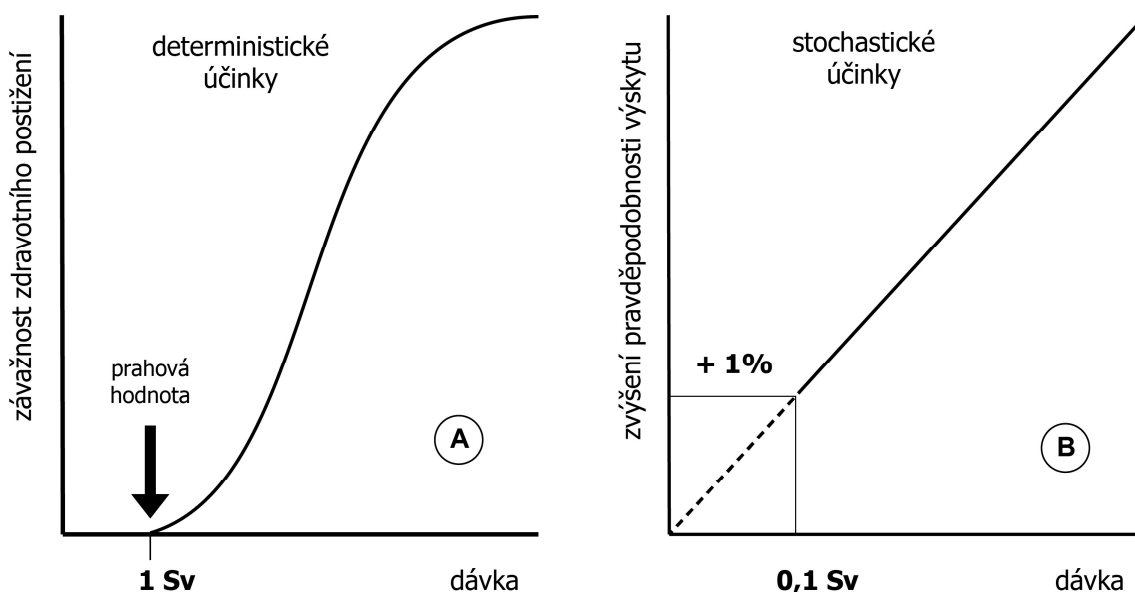
Aby se projevily **deterministické** účinky musí efektivní dávka **E** překročit určitou prahovou hodnotu. Pro člověka je touto prahovou hodnotu **E = 1 Sv** (Obr. 1, graf A). Nad touto prahovou hodnotou je závažnost účinků přímo úměrná dávce. Deterministické účinky se v první fázi projevují jako radiační zánět kůže (stejně jako když se člověk spálí na slunci), při větších dávkách jako **akutní nemoc z ozáření** jejímiž symptomy jsou nevolnost, průjem a poškození centrálního nervového systému. Letální dávkou pro člověka je efektivní dávka 10 Sv, smrt nastává během několika týdnů.

Tabulka 1. Tkáňové radiační váhové faktory pro člověka

Tkáň	w_T	$\sum w_T$
kostní dřeň, tlusté střevo, plíce, žaludek, mléčná žláza, ostatní orgány(*)	0.12	0.72
gonády	0.08	0.08
močový měchýř, hltan, játra, štítná žláza	0.04	0.16
povrch kostí, mozek, slinná žláza, kůže	0.01	0.04
Celkem		1.00

(*) nadledvinky, dýchací cesty, žlučník, srdce, ledviny, lymfatické uzliny, svaly, ústní sliznice, dvanácterník, prostata, tenké střevo, slezina, brzlík, děloha

Stochastické účinky jsou důsledkem změn cytogenetického materiálu buněk. Tyto účinky se projevují se zpožděním 10 i více let po obdržení dávky. Pravděpodobnost výskytu poškození je úměrná obdržené dávce. Naopak na rozdíl od deterministických účinků je závažnost onemocnění, pokud se projeví, na dávce nezávislá. Mohou to být nenádorová pozdní poškození – typické je vysychání a praskání kůže na rukou u rentgenologů v první polovině minulého století. Nádorová onemocnění a rakovinové bujení jsou dalším z projevů stochastických účinků. Klinicky sice nelze odlišit rakovinové onemocnění vzniklé jako následek ozáření a rakovinové onemocnění vzniklé z jiných příčin, ale je možné vyhodnotit zvýšení pravděpodobnosti výskytu nádorových onemocnění u lidí kteří obdrželi nízké dávky ionizujícího záření v porovnání s populací která byla vystavena pouze přírodnímu pozadí. O jak malé zvýšení pravděpodobnosti se jedná v oblasti nízkých dávek je vidět na níže uvedeném grafu B v Obr. 1. Při obdržené dávce 0,1 Sv (pětinásobek povolené roční dávky pro radiační pracovníky) stoupne pravděpodobnost výskytu nádorových onemocnění o 1%.



Obr. 1. Závislost deterministických a stochastických účinků na efektivní dávce.

Část přímky v grafu B vyznačená čárkovaně nebyla dosud jednoznačně prokázána. Pokračování přímkové závislosti i pro dávky pod 0,1 Sv je přijímáno jednoznačně pouze z hlediska radiační bezpečnosti. Podle jedné vědecké hypotézy mají i stochastické účinky prahovou hodnotu – tou je právě efektivní dávka 0,1 Sv.

5. Vymezení Sledovaných a Kontrolovaných pásem

Označení prostor ve kterých se pracuje se zdroji ionizujícího je základním organizačním opatřením v radiační ochraně.

Sledované pásmo se na pracovištích se ZIZ vymezuje všude tam, kde by za běžného provozu nebo za předvídatelných odchylek od běžného provozu mohlo dojít k ozáření většímu, než je obecný limit pro obyvatelstvo (1 mSv/rok). Přístup do sledovaného pásma sice není regulován, ale pracovat v něm mohou pouze radiační pracovníci "B". Všechny laboratoře I. kategorie jsou automaticky sledovanými pásmy a musí být označeny výstražnou tabulkou:



Kontrolované pásmo se vymezuje tam, kde:

- průměrný příkon dávkového ekvivalentu na pracovním místě může být za kalendářní rok vyšší než 2,5 $\mu\text{Sv/h}$
- součin objemových aktivit a konverzních faktorů h_{inh} je v průměru za rok vyšší než 2,5 $\mu\text{Sv/m}^3$
- povrchová kontaminace na pracovním místě může být vyšší než 400 Bq/100 cm^2

Právo vstupu do kontrolovaného pásma bez evidence mají radiační pracovníci "A" i "B", pracovat v něm mohou ale pouze radiační pracovníci "A". Vstup ostatních osob se eviduje v Knize návštěv a je možný pouze v doprovodu radiačního pracovníka. Vstup do kontrolovaného pásma musí být označen výstražnou tabulkou:



Na ÚOCHB je Kontrolované pásmo vymezeno pouze v syntetických laboratořích Laboratoře radioisotopů.

6. Vlastnosti nejčastěji používaných radionuklidů.

Z hlediska ochrany před ionizujícím zářením jsou důležitými charakteristikami jednotlivých radionuklidů tyto: typ radioaktivního rozpadu, poločas přeměny, energie emitovaného záření a jeho doběh* ve vzduchu a ve vodě. V Tabulce č. 1 jsou uvedeny radionuklidy nejčastěji používané ve vědách o živé přírodě.

Tabulka 2. Nejpoužívanější radionuklidy.

Radionuklid	Typ rozpadu	Poločas	E _{max} [MeV]	Doběh	
				vzduch	voda (~pokožka)
³ H	beta	12,7 let	0,019	0,6 cm	0,006 mm
¹⁴ C	beta	5730 let	0,156	25 cm	0,3 mm
³⁵ S	beta	87 dní	0,167	26 cm	0,3 mm
³³ P	beta	25 dní	0,249	50 cm	0,6 mm
³² P	beta	14 dní	1,709	7,9 m	0,8 cm
¹²⁵ I	gama	60 dní	0,027-0,032	50 cm	0,6 mm
⁵¹ Cr	gama	27,7 dní	0,005-0,323	odstínění 3,2 mm olova	
⁵⁶ Fe	gama	2,7 let	0,0059		

7. Detektory ionizujícího záření.

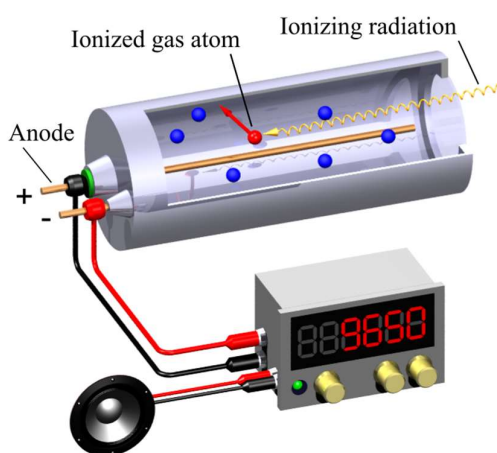
Člověk stejně tak jako ostatní savci svými smysly ionizující záření nevnímá. Musíme se proto spolehnout na přístroje, kterými zprostředkovaně může přítomnost ionizujícího záření detekovat. Všechny detektory jsou založeny na měření ionizace prostředí, kterým toto záření prochází. Jako vůbec první byla pozorována schopnost ionizujícího záření způsobovat zčernání fotografických desek. Brzy následoval objev právě ionizace prostředí a schopnost ionizujícího záření vybíjet napětí na elektrometrech. Tento princip – vybíjení počátečního náboje elektrometru se používá při velmi přesných základních měřeních a v některých typech osobních dosimetrů dodnes.

Geiger-Müllerova trubice je nejpoužívanějším detektorem ionizujícího záření (Obr.2). V trubici je tlak plynů kolem 0,1 bar, napětí na elektrodách je v řádu několika set voltů a vstupní okénko v případě že chceme detekovat měkké β je z velmi tenké slídy (1,5 mg/cm²; okénko je většinou chráněno mřížkou, nesmíme se ho ničím dotknout aby neprasklo). Ionty primárně vytvořené průletem částice (nebo fotonem) záření jsou urychlovány vloženým napětím směrem k elektrodám a vyvolávají tak sekundární lavinovou ionizaci. Výsledkem je proudový puls měřitelný jako napěťový puls na odporu vloženém v okruhu. Napěťový puls není úměrný energii částic a v oblasti pracovního Geigerova napětí mezi elektrodami je stejný pro částice s různou energií. Složení plynu v trubici je takové, aby proudový puls zase rychle ustal – zhasl

* Během průchodu hmotou β částice postupně předává svou počáteční energii ve formě ionizační energie atomům a molekulám, největší část energie předá na konci dráhy. **Doběh** je délka dráhy β částice s počáteční energií E_{max}. Energie γ fotonů klesá exponenciálně podél dráhy. Schopnost materiálu absorbovat γ záření dané energie je vyjádřeno jako polotloušťka, t.j. tloušťka materiálu v které se absorbuje polovina počáteční energie.

– a detektor byl připraven na novou částici. I tak je proudový puls dlouhý až 100 mikrosekund a proto je maximální měřitelný počet pulsů G-M detektorem 1 000 pulsů/sekundu (displej detektoru na Obr. 2 ukazuje v nejčastěji používaných jednotkách cpm (counts per minute), což je v přepočtu 161 pulsů/sekundu).

Velkoplošné G-M trubice – tenké vstupní okénko o ploše cca 100 cm² – jsou drahé a mechanicky choulostivé. Proto v současné době získaly převahu velkoplošné monitory s plastickým scintilačním detektorem (Obr. 3). Kaskáda přenosu energie z primárně vzniklých iontů na scintilátor vyvolá vznik světelného pulsu který je fokusován na fotonásobič. Intenzita světelného pulsu je v tomto případě úměrná energii ionizující částice a světelný puls a jeho detekce fotonásobičem má délku trvání v nanosekundách. Scintilační detektor je proto schopen spolehlivě detekovat až 1 milion cpm. I když vlastní scintilátor je mechanicky odolný, fotonásobiče obecně nemají rády velké otřesy.



Obr. 2. Detektor ionizujícího záření s Geiger-Müllerovou trubicí.



Obr. 3. Velkoplošný monitor kontaminace se scintilačním detektorem.

Výše uvedenými detektory může kontrolovat kontaminaci pracovních míst a pracoviště všemi radionuklidy s výjimkou jediného – radionuklidu ³H. Záření β tritia je tak slabé, že ho zastaví i to nejtenčí vstupní okénko nebo folie (i vstupní okénko scintilačního detektoru musí být kryto folií neprostupnou pro světlo, které by rušilo). V minulosti byly zkoušeny monitory kontaminace tritiem na bázi otevřených proporcionalních detektorů kontinuálně proplachovaných měřicím plynem (směs argonu a methanu 9:1). Kromě velké spotřeby drahého měřicího plynu docházelo často i k tomu, že díky vysokému kladnému potenciálu na

anodě byl z měřeného povrchu vtažen do detektoru tritiem kontaminovaný prach a detektor potom bylo nutné odmořit. Protože se nakonec strávilo více času odmořováním než měřením, bylo použití bezokénkových proporciónálních detektorů pro monitorování kontaminace tritiem opuštěno a jedinou používanou metodou je vzorkování pomocí stěrů a proměňování těchto stěrů na spektrometru scintilace v kapalinách. Při měření scintilace v kapalných scintilátorech se měřený vzorek promíchá v lahvičce se scintilačním koktejlem a lahvička se vloží před fotonásobiče. Tím, že vzorek je intimně smíchán se scintilátorem, je možné měřit i velmi slabé β záření radionuklidu ^3H . Měření jednoho vzorku trvá cca 10 minut a proto spektrometry pro scintilaci v kapalinách jsou vybaveny automatickými podavači s kapacitou až několika set vzorků. Výhodou měření scintilace v kapalinách je i to, že intenzita světelného záblesku je úměrná energii ionizujícího záření a podle energetického spektra záření lze určit v případě potřeby totožnost neznámého radionuklidu.

8. Ochrana před ozářením.

Cílem je snížit efektivní dávku obdrženou pracovníkem na co nejnižší hodnoty s vynaložením přiměřeného úsilí a přiměřených prostředků. V literatuře se často označuje jako princip ALARA (z anglického As Low As Reasonably Achievable).

Limit efektivní dávky E pro radiačního pracovníka je 20 mSv za kalendářní rok.

Ekvivalentní dávka H pro ruce od prstů až po předloktí a pro nohy od chodidel až po kotníky nesmí překročit 500 mSv za jeden kalendářní rok.

Odvozené roční limity pro příjem vybraných radionuklidů, které vedou k dávkovému úvazku 20 mSv z vnitřního ozáření, jsou následující:

^3H	470 Mbq (12,7 mCi)	^{32}P	8,3 Mbq (0,23 mCi)
^{14}C	34 Mbq (0,9 mCi)	^{33}P	83 Mbq (2,24 mCi)
^{35}S	26 Mbq (0,7 mCi)	^{125}I	1,33 Mbq (0,04 mCi)

Ochrana před zevním ozářením.

- **ochrana vzdáleností** – dávkový příkon klesá se čtvercem vzdálenosti od zdroje ionizujícího záření. Při práci používáme pomůcky které zvětšují vzdálenost mezi zdrojem a naším tělem. Radionuklidové zdroje ukládáme stranou frekventovaných míst v laboratoři.
- **ochrana stíněním** – z hodnot doby β -částic (viz Tabulka 1.) vyplývá, že β záření tritia, uhlíku ^{14}C , síry ^{35}S a fosforu ^{33}P je zcela zastaveno zrohovatělou povrchovou vrstvou kůže (epidermis)*, která je vůči radiačnímu poškození až stonásobně odolnější než ostatní tělesné orgány. Energetické β záření radionuklidu ^{32}P proniká až do hloubky 8 mm pod povrch kůže a proto by při delším působení mohlo dojít k poškození spodní vrstvy kůže (dermis) a orgánů uložených těsně pod ní. Proto si při práci s radionuklidem ^{32}P chráníme hlavu a trup stabilními štíty z 10 mm plexiskla. α částice zastaví už list silnějšího papíru. K odstínění γ záření jsou neúčinnější materiály s vysokou specifickou hmotností, např. olovo anebo ochuzený uran.
- **omezení expozice na nezbytné minimum** – plánování práce a pečlivá příprava umožňují zkrátit čas potřebný k provedení práce s otevřeným zářičem a tím i snížit celkovou dávku.

* Průměrná tloušťka epidermu je 0,5 mm, na rukou a na nohou dosahuje 1 mm.

Ochrana před **vnitřním** ozářením.

- při práci s otevřenými zdroji ionizujícího záření je zakázáno jíst, pít a kouřit
- pro práci s otevřenými zdroji ionizujícího záření jsou předepsány osobní ochranné pomůcky
 - laboratorní plášť
 - latexové ("chirurgické") nebo PVC rukavice
 - při práci za sníženého nebo zvýšeného tlaku ochranné brýle
- na jednom pracovním místě je povoleno zpracovávat pouze takové množství aktivity, které odpovídá jeho izolačním vlastnostem
- monitorování pracoviště
- regulace přístupu a práce na pracovišti

9. Pracoviště s otevřenými měkkými β -zářiči a jejich kategorizace.

Jak bylo výše uvedeno v kapitole 8. u ochrany stíněním, riziko zevního ozářením měkkými β -zářiči je velmi malé. Těžiště ochrany pracovníků proto spočívá v zabránění vniknutí těchto radionuklidů do organismu vdechnutím, požitím nebo otevřenou ranou. Práce s měkkými β -zářiči se tak téměř neliší od práce s jedy či infekčním materiálem.

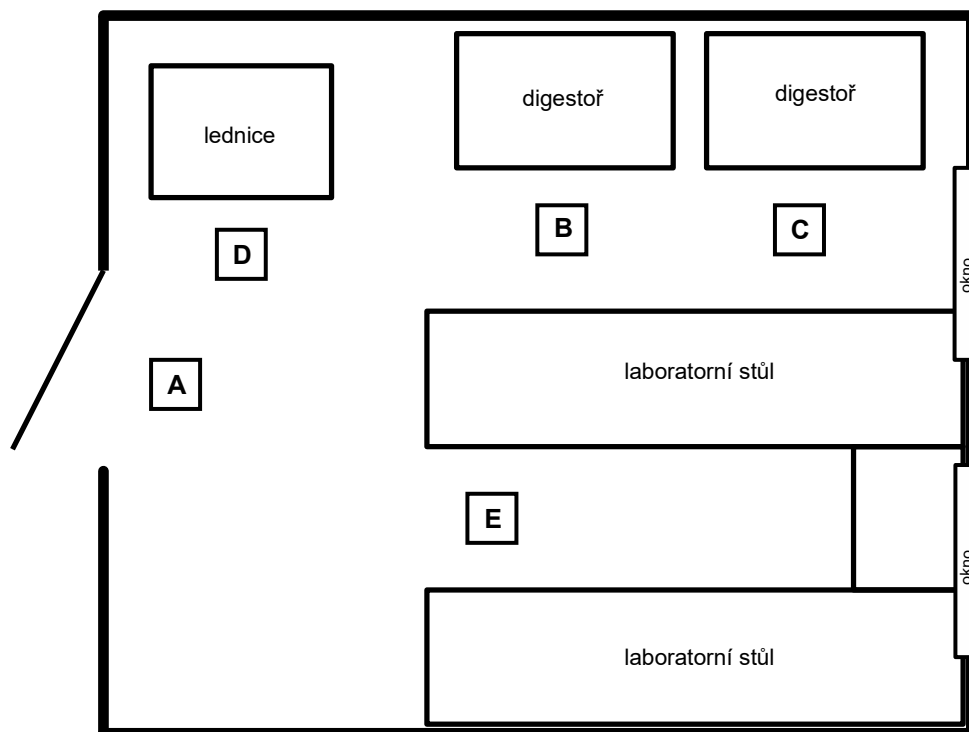
Rozsah ochranných opatření je přímo úměrný množství zpracovávané aktivity. Podle toho jsou definována pracoviště I. kategorie (nejmenší ochrana) až IV. kategorie (nejvyšší ochrana). Hlavním ochranným prvkem (tedy izolačním zařízením, řečeno jazykem vyhlášky), který zajišťuje izolaci pracovníků od radiotoxických materiálů v laboratořích I. a II. kategorie je radiochemická digestoř (všechny digestoře na ÚOCHB vyhovují požadavkům na radiochemickou digestoř). V současnosti se syntéza sloučenin značených měkkými β -zářiči a aplikace těchto sloučenin na ÚOCHB provádí v takovém měřítku, že pro tyto práce není zapotřebí laboratoře ani III. ani IV. kategorie. Jejich vybavením se zde proto nebudeme zabývat.

Aplikace radioaktivně značených sloučenin se na ÚOCHB provádí v laboratořích I. kategorie. Důležitou veličinou jsou **maximální přípustné aktivity** zpracovávané na jednom pracovním místě. Výpočet maximální zpracovávané aktivity se odvíjí od maximální přípustné efektivní dávky ionizujícího záření, kterou může pracovník obdržet v případě ztráty kontroly nad zdrojem ionizujícího záření, aniž by došlo k ohrožení jeho zdraví. Maximální přípustné efektivní dávky se většinou stanovují jako 1/10 z experimentálně zjištěných bezpečných hodnot. Vzhledem k rozdílné radiotoxicitě radionuklidů se hodnoty **maximálních přípustných aktivit** značně liší pro různé radionuklidy (charakterizované ve výpočtu konverzním faktorem příjmu h_{inh}) a pro různá izolační a ventilační zařízení (charakterizovaná koeficientem účinnosti ve srovnání s radiochemickou digestoří). Maximální přípustné aktivity zpracovávané na jednom pracovním místě v laboratoři I. kategorie jsou pro nejčastěji používané radioisotopy uvedeny v Příloze 1. Provozních předpisů.

Monitorování pracoviště je důležitou součástí systému ochrany před ionizujícím zářením. Monitorováním se sleduje radioaktivní kontaminace pracoviště mimo pracovní místa. Vzrůst kontaminace mimo vlastní pracovní místa – digestoře - signalizuje jejich nedostatečnou funkci anebo nevhodný pracovní postup. Včasným odhalením závady lze zabránit vyššímu vnitřnímu ozářením pracovníků. Na podlaze laboratoře se vymeží kontrolní plochy (viz Obr. 3) velikosti 10x10 cm (nakreslí se speciálním vodovzdorným lakovým značkovačem). Pravidelně jednou týdně se kontrolní plochy proměřují velkoplošným monitorem radioaktivity. V případě, že se v laboratoři pracuje s látkami značenými radionuklidem 3H , je třeba kontrolní plochy kontrolovat pomocí stěrů - kontrolní plocha se setře vlhkým tamponem, ten se vloží do scintilační lahvičky, zalije scintilačním koktejlem a aktivita 3H se

změří na spektrometru kapalné scintilace. Výsledky pravidelných měření se zapisují do **Monitorovacího deníku**. Podrobně je monitorování sledovaných pásem popsáno v Provozních předpisech (odst. 18 až 22). V uvedených odstavcích jsou rovněž popsány postupy při zjištění překročení jednotlivých **Referenčních úrovní** kontaminace.

Obr. 3 Kontrolní plochy pro monitorování pracoviště.



10. Uvolňovací úrovně pro měkké β -zářiče a radioaktivní odpady (RAO).

Ne každý slabě radioaktivně kontaminovaný materiál se musí likvidovat jako RAO. O tom, zda je nutné odpad vzniklý při práci s radionuklidy likvidovat jako RAO, nebo zda je možné jej likvidovat jako „normální odpad“ (za respektování pravidel třídění komunálního odpadu a odpadních chemikálií) rozhodují tzv. **uvolňovací úrovně**. Pro nejběžnější radionuklidy v závislosti na jejich fyzikálním skupenství jsou uvedeny v Tabulce 3.

(Uvolňovací úrovně pro vypouštění odpadních vod do veřejné kanalizace a pro plynné výpustě (odtahy digestořů) se vypočítají jako podíl vyhláškou stanoveného dávkového limitu (10^{-2} Sv/m³ pro odpadní vody a 10^{-7} Sv/m³ pro plynné výpustě) a maximálního h_{inh} (pro odpadní vody) nebo h_{inh} (pro plynné výpustě) daného radionuklidu)

Pro omezené množství kontaminovaného pevného odpadu dané hmotností do 1 000 kg jsou přípustné koncentrace aktivity vyšší, zároveň je daná maximální celková aktivita, kterou je možné tímto způsobem zlikvidovat. Tyto vyšší uvolňovací úrovně jsou v Tabulce 4.

Tabulka 3. Uvolňovací úrovně pro měkké β -zářiče bez ohledu na celkové množství uvolňované aktivity.

Radionuklid	Uvolňovací úroveň						
	pro vynášení z kontrolovaného pásma			pro vypouštění			
	hmotnostní aktivita ^{a)}		plošná aktivita ^{b)}	odpadní vody		plynné výpustě	
	[kBq/kg]	[microCi/kg]	[Bq/100 cm ²]	[MBq/m ³]	[mCi/m ³]	[Bq/m ³]	[nCi/m ³]
³ H	100	2.7	40	240	6.49	2439	66
¹⁴ C	1	0.03	40	17	0.47	172	5
³⁵ S	100	3	40	13	0.35	143	4
³³ P	1000	27	40	42	1.13	-	-
³² P	1000	27	40	4	0.11	-	-
¹²⁵ I	100	2.7	40	0.7	0.02	7	0.2

a) hmotnostní aktivita materiálů, pevných látek a předmětů
b) povrchová kontaminace materiálů a předmětů

Tabulka 4. Uvolňovací úrovně pro omezené množství pevné látky kontaminované měkkými β -zářiči

Radionuklid	hmotnostní aktivita		maximální celková aktivita	
	[MBq/kg]	[mCi/kg]	MBq	mCi
³ H	1 000	27.03	1000.0	27.027
¹⁴ C	10	0.27	10.0	0.270
³⁵ S	100	2.70	100.0	2.703
³³ P	100	2.70	100.0	2.703
³² P	1	0.03	0.1	0.003
¹²⁵ I	1	0.03	1.0	0.027

Radioaktivní odpady (RAO) se třídí podle několika kritérií. Cena za konečné zpracování radioaktivních odpadů je vysoká a jejich důsledným tříděním lze dosáhnout značných úspor.

Podle fyzikálního skupenství se RAO třídí na:

- **kapalné**
- **pevné**

a podle aktivity na:

- **přechodné** – po delším skladování (maximálně 5 let) vykazují aktivitu nižší než je uvolňovací úroveň pro daný radionuklid a druh odpadu; při výpočtu doby potřebné k dosažení uvolňovací úrovně aktivity používáme jednoduchý vztah – po uplynutí 10ti poločasů se aktivita sníží na jednu tisícinu výchozí hodnoty.

- **nízko a středně aktivní**
 - **krátkodobé** – všechny radionuklidy v nich obsažené mají poločas rozpadu kratší než 30 let
 - **dlouhodobé** – s poločasem rozpadu delším než 30let
- **vysokoaktivní** – radioaktivní odpady, u kterých musí být při jejich skladování a ukládání zohledněno uvolňování tepla z rozpadu radionuklidů v nich obsažených; je to odpad z přepracování jaderného paliva a tento typ odpadu na ÚOCHB nevzniká

Podrobně je nakládání s RAO popsáno v Provozních předpisech.

Literatura

1. Atomový zákon a související předpisy: www.sujb.cz
2. <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/CELEX-32013L0059-EN-TXT.pdf>
3. Ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření (sborník učebních textů), Dům techniky Ostrava s.r.o., Ostrava 2003. ISBN 80-02-01529-0