



ÚOCHB ^{AV}
^{ČR}
IOCB PRAGUE

Ústav organické chemie a biochemie
Akademie věd České republiky, v. v. i.
Institute of Organic Chemistry and Biochemistry
of the Czech Academy of Sciences

Radiační ochrana

Ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření na ÚOCHB

vnitřní předpis pro radiační pracovníky ÚOCHB

DO	- Dohlížející osoba
ORZ	- Otevřený radionuklidový zdroj ionizujícího záření
PDRO	- Osoba s přímým dohledem nad radiační ochranou
PP	- Provozní předpisy
PZRO	- Program zabezpečení radiační ochrany
RP	- Radiační pracovník
RO	- Radiační ochrana
RZ	- Radionuklidový zdroj
RAO	- Radioaktivní odpady
SRZS	- Syntéza radioaktivně značených sloučenin
ZIZ	- Zdroj 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 zářiči 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. a II. kategorie ÚOCHB jsou *interní normou* pro práci s **otevřenými** radioaktivními zářiči (ORZ).

2. Základní pojmy

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 alfa** kladně nabitých jader atomů helia s energií jednotek MeV na částici
- **záření beta** záporně nabitých elektronů s energiemi desítek keV až jednotek MeV na jeden elektron
- **záření gama** je proud fotonů s energií desítek keV až jednotek MeV na jednu částici
- **zdroj ionizujícího záření (ZIZ)**
 - radioaktivní látka a předmět nebo zařízení ji obsahující nebo uvolňující
 - 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. Jednotkou používanou pro vyšší aktivity je 1 Ci (curie) = $3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ = 37 GBq .*

radionuklidový zdroj (RZ) – zdroj ionizujícího záření obsahující radioaktivní látku, u něž součet podílů aktivit radionuklidů a zprošťovacích úrovní (viz Provozní předpisy) 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 (ORZ) – “radionuklidový zářič, který **není** uzavřeným radionuklidovým zářičem“. Je doprovázen Osvědčením otevřeného radionuklidového zářiče.

Na ÚOCHB jsou všechny ZIZ klasifikované jako ORZ.

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 (RP) – 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 ZIZ; v jedné místnosti může být více pracovních míst, pokud každé tvoří z hlediska organizace práce samostatný celek

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

- plánovaná expoziční situace, která je spojena se záměrným využíváním zdroje ionizujícího záření
- nehodová expoziční situace vyplývající ze „ztráty kontroly na ZIZ“

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)

zevní ozáření – ozáření osoby ionizujícím zářením ze ZIZ, 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

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

V laboratořích I. kategorie (zřízené Sledované pásmo) na ÚOCHB nemůže vzhledem ke zpracovávaným množstvím radioaktivity k takovéto situaci dojít.

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.

(tedy vynásobením známého množství aktivity nuklidu, kterým se vnitřně kontaminoval RP 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)

radioaktivní odpad (RAO) – 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

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

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/m. 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	$L = 40 \text{ eV}/\mu\text{m}$

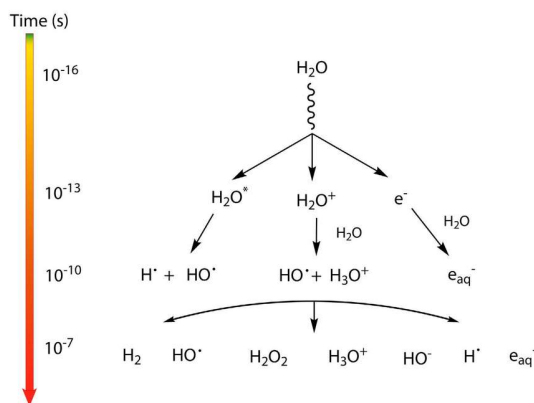
Biologické účinky částic se stejnou energií, ale charakterizované různými L , jsou různé. Je to dáno tím, že při vysokých hodnotách L je radiační poškození soustředěné do malého objemu tkáně a s tím se živý organismus vyrovnává hůře. Je-li stejná energie absorbovaná ve větším objemu tkáně, živý organismus 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 daleko méně významné než radiolýza vody, která tvoří v průměru 70% hmotnosti biologického materiálu. Radiolýza vody je složitý proces. Z hlediska biologických účinků je jedním z nejdůležitějších dějů vznik OH^\cdot radikálů:



Převzato ze Scientific reports DOI:10.1038/srep24234

Tím vzniká v biologickém materiálu oxidační prostředí (OH^\cdot radikály jsou například 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 dřev) 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 sieverttech, která je rozhodující pro posuzování radiační zátěže organismu, se potom vypočítá na základě vztahu:

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.

Tabulka 1. Tkáňové radiační váhové faktory

Tkáňové váhové faktory	
Orgán/tkáň	Tkáňový váhový faktor w_T
Kostní dřev (červená)	0,12
Tlusté střevo	0,12
Plíce	0,12
Žaludek	0,12
Mléčná žláza	0,12
Ostatní tkáně (*)	0,12
Gonády	0,08
Močový měchýř	0,04
Jícen	0,04
Játra	0,04
Štítná žláza	0,04
Povrch kostí	0,01
Mozek	0,01
Slinné žlázy	0,01
Kůže	0,01

Vysvětlivky:

(*) Hodnota w_T pro ostatní tkáně (0,12) se vztahuje k aritmetickému průměru středních dávek ve 13 orgánech a tkáních obojího pohlaví uvedených níže. Ostatní tkáně: nadledviny, extratorakální oblast, žlučník, srdce, ledviny, lymfatické uzliny, svalstvo, sliznice dutiny ústní, slinivka, prostata (v případě mužů), tenké střevo, slezina, brzlík, děloha/děložní hrdlo (v případě žen).

Převzato z Přílohy č. 2 k vyhlášce č. 422/2016 Sb.

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

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**.

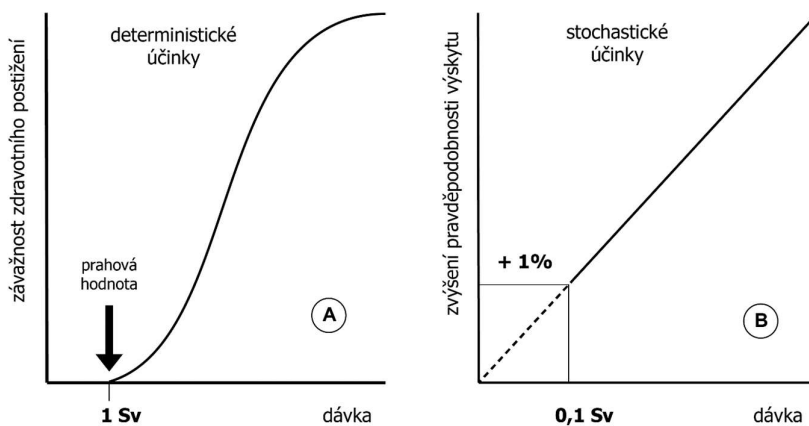
Deterministické účinky IZ:

System radiacni ochrany na ÚOCHB je nastaven tak, aby při jeho dodržování, vůbec nemohlo k deterministickým účinkům dojít.

Aby se projevily **deterministické (akutní)** účinky, musí efektivní dávka **E** překročit určitou prahovou hodnotu. Pro člověka je touto prahovou hodnotou **E = 500 mSv** (Obr. 1, graf A). Nad touto prahovou hodnotou je závažnost účinků přímo úměrná dávce. Deterministické účinky se v první fázi projevují jako radiacní zánět kůže (stejně jako když se člověk spálí na slunci) nebo oční katarakt, 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 5-10 Sv, smrt nastává během několika týdnů.

Stochastické (nahodilé) 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 100 mSv (pětinásobek limtu roční dávky pro radiacní pracovníky) stoupne pravděpodobnost výskytu nádorových onemocnění o 1%.**

Lineárnost stochastických účinků dávky pod 100mSv (vyznačená čárkovaně) nebyla jednoznačně potvrzena, stochastické účinky jsou nicméně považovány spíše za bezprahové. Z hlediska radiacní ochrany se snažíme minimalizovat expoziční situaci RP a minimalizovat tak obdrženou efektivní dávku.

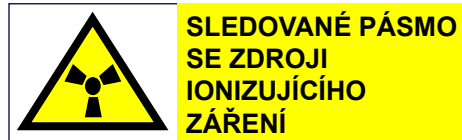


Obrázek 1. Závislost deterministických a stochastických účinků na efektivní dávce.

5. Vymezení Sledovaných a Kontrolovaných pásem

Označení prostor, ve kterých se pracuje se ZIZ 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) nebo 1/10 limitu pro kůži, končetiny a pro oční čočku. Přístup do sledovaného pásma sice není regulován, ale pracovat se ZIZ v něm mohou pouze radiační pracovníci "B" a "A". Všechny laboratoře I. kategorie jsou automaticky *sledovanými pásmy* a musí být označeny výstražnou tabulkou s údaji o charakteru zdroje a rizika s ním spojeného (*nebezpečí vnitřní kontaminace a vnějšího ozáření* apod.):



Povrchová kontaminace pracovních míst, zařízení nebo stavebních částí SP musí být v době kdy se se ZIZ nenakládá, nižší než hodnoty 0.4 Bq/cm². (§ 49 odst. 3 d) vyhl. č. 422/2016 Sb. a Příloha č. 18).

Pokud to tak není, musí být provedena účinná dekontaminace.

Kontrolované pásmo se vymezuje tam, kde:

- nelze vyloučit, že povrchová kontaminace na pracovním místě může být vyšší než 4 Bq/1 cm²
- pokud by efektivní dávka mohla být vyšší než 6mSv ročně, 3/10 limitu pro kůži a končetiny, 15mSv pro oční čočku
- průměrný příkon dávkového ekvivalentu na pracovním místě může být za kalendářní rok vyšší než 2,5 uSv/h
- součin objemových aktivit a konverzních faktorů h_{inh} je v průměru za rok vyšší než 2,5 uSv/m³

Právo vstupu do kontrolovaného pásma bez evidence mají radiační pracovníci "A" i "B", pravidelně pracovat se ZIZ v něm mohou ale pouze radiační pracovníci "A". Vstup ostatních osob se eviduje v Knize návštěv a je možný pouze v doprovodu radiačního pracovníka. Fyzická osoba může v KP provádět nezbytnou a nahodilou činnost po dobu nezbytně nutnou a pod dohledem radiačního pracovníka kategorie A určeného provozovatelem KP.

Vstup do kontrolovaného pásma musí být označen výstražnou tabulkou se znakem radiačního nebezpečí a údaji o charakteru zdroje a rizika s ním spojeného (*nebezpečí vnitřní kontaminace a vnějšího ozáření* apod.):



Na ÚOCHB je Kontrolované pásmo vymezeno pouze v syntetických laboratořích Syntézy radioaktivně značených sloučenin (SRZS) – A.3.81. a A.3.78.

Povrchová kontaminace pracovních míst, zařízení nebo stavebních částí SP musí být v době kdy se se ZIZ nenakládá, nižší než hodnoty 4 Bq/cm². (§ 47 odst. b) vyhl. č. 422/2016 Sb. a Příloha č. 18).

Pokud to tak není, musí být provedena účinná dekontaminace.

6. Vlastnosti nejčastěji používaných radionuklidů

Z hlediska ochrany před ionizujícím zářením jsou důležitými charakteristikami jednotlivých radionuklidů typ radioaktivního rozpadu, poločas jeho přeměny, energie emitovaného záření a jeho doběh¹ ve vzduchu a ve vodě. V Tabulce č. 2 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		

¹ Během průchodu hmotou β částice postupně předává svou počáteční energii ve formě ionizační energie atomům a molekulám. Největší část energie předá β částice 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.

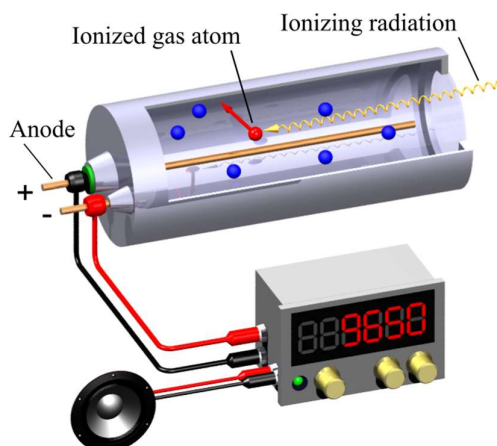
7. Detektory ionizujícího záření

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 vybijet 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 ve vloženém 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 – 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 přiveden 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 otřesy.



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



Obrázek 3. Velkoplošný monitor kontaminace se scintilačním detektorem CoMo 170.

Výše uvedenými detektory můžeme kontrolovat kontaminaci pracoviště a osob 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 proporcionálních detektorů kontinuálně proplachovaných měřícím plynem (směs argonu a methanu 9:1). Kromě velké spotřeby drahého měřícího 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 proporcionálních 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 smíchán se scintilátorem, je možné měřit i velmi slabé β záření radionuklidu ^3H . Měření jednoho vzorku trvá několik 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 totožnost neznámého radionuklidu.

Technika kapalně scintilační detekce obecně představuje ultra-citlivou analytickou metodu s mezí detekce radionuklidu (např. navázaného na organické molekule pro účely její kvantifikace v komplexních vzorcích) v řádu technicky až 1 Bq/l.

8. Ochrana před ozářením

Cílem je snížit efektivní dávku obdrženu 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 radiačního pracovníka (např. pro ruce od prstů až po předloktí a pro nohy od chodidel až po kotníky, oční rohovku, atd.) nesmí překročit **150 mSv** za jeden kalendářní rok.

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

³ H	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 (kleště, pinzety apod.). Radionuklidové zdroje ukládáme stranou frekventovaných míst v laboratoři.
- **ochrana stíněním** – z hodnot doběhu β-částic (Tabulka 2) vyplývá, že β záření tritia, uhlíku ¹⁴C, síry ³⁵S a fosforu ³³P je zcela zastaveno zrohovatělou povrchovou vrstvou kůže (epidermis)², která je vůči radiačnímu poškození až stonásobně odolnější než ostatní tělesné orgány. Energetické β záření radionuklidu ³²P 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 ³²P 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.

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, nitrilové nebo PVC rukavice
 - ochranné brýle
- na jednom pracovním místě je povoleno zpracovávat pouze takové množství aktivity, které odpovídá jeho izolačním vlastnostem (podrobně Tabulka 1-12 PZRO)
- monitorování pracoviště a pracovníka po ukončení práce se ZIZ

² Průměrná tloušťka epidermu je 0,5 mm, na rukou a na nohou dosahuje 1 mm.

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

Jak bylo výše uvedeno v kapitole 8. u ochrany stíněním, riziko zevního ozáření 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.

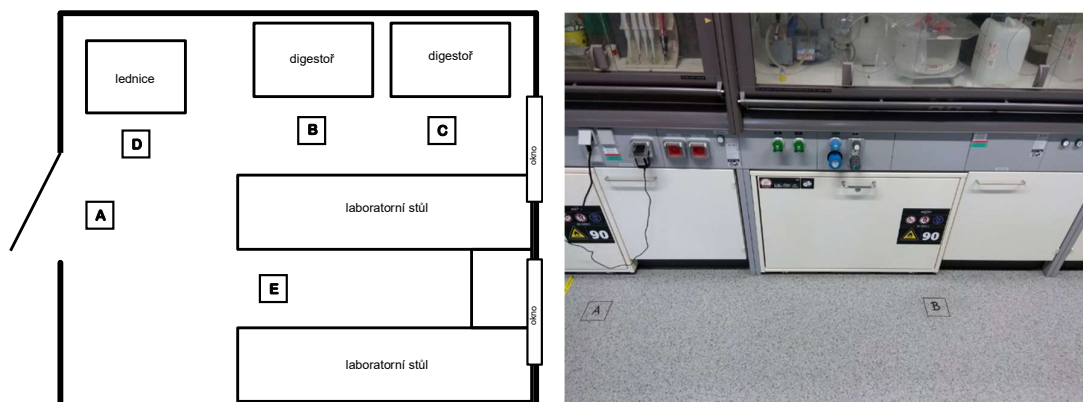
Rozsah ochranných opatření je přímo úměrný množství zpracovávané aktivity. Podle toho jsou definována pracoviště I. kategorie (nejmenší ochrana) až IV. kategorie (nejvyšší ochrana). Hlavním ochranným prvkem (tedy izolačním zařízením, řečeno jazykem vyhlášky), který zajišťuje izolaci pracovníků od radiotoxických 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 Tabulce 1-6 PZRO.

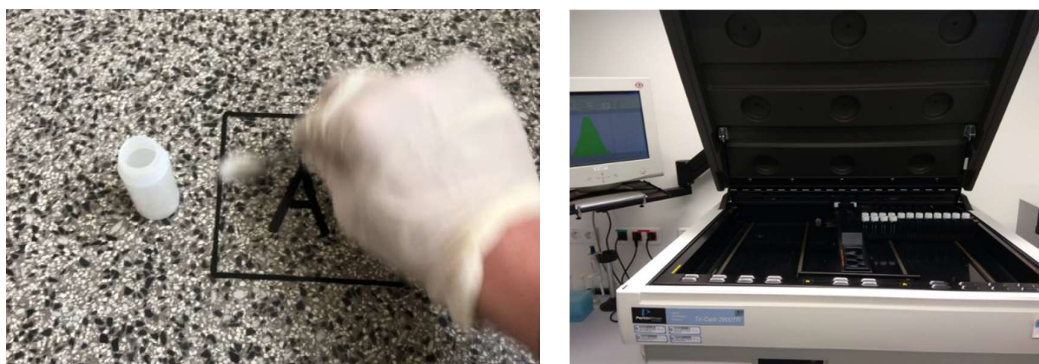
10. Monitorování pracoviště

je klíčovou 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 ozáření pracovníků. Na podlaže laboratoře se vymezí kontrolní plochy (viz Obr. 4) velikosti 10×10 cm (nakreslí se speciálním vodovzdorným lakovým značkovačem). Z hlediska radiační ochrany je klíčové provést proměření kontrolních ploch ihned po skončení práce se ZIZ. Předchází se tím dalšímu šíření kontaminace, vnitřní kontaminaci kolegů nebo nekvalifikovaného personálu (úklid, servis, atd.). Kontrolní plochy proměřují pouhým přiložením velkoplošného monitoru radioaktivity (Obr. 3). V případě, že se v laboratoři pracuje s látkami značenými radionuklidem ^3H , je třeba kontrolní plochy kontrolovat pomocí stěrů – kontrolní plocha se setře navlhčenou vatou, ta se vloží do scintilační lahvičky, zalije scintilačním koktejlem a aktivita ^3H se změří na spektrometru kapalné scintilace (Obr. 5). Výsledky pravidelných měření se zapisují do **Monitorovacího deníku**. Podrobně je monitorování sledovaných pásem popsáno v Provozních předpisech (odst. 5), kde jsou rovněž popsány postupy při zjištění překročení jednotlivých **Referenčních úrovní** kontaminace.

Obrázek 4. Kontrolní plochy pro monitorování pracoviště I. a II. kategorie



Obrázek 5. Kontrola kontaminace kontrolních ploch pomocí stěrů s následným měřením LSC technikou



11. Uvolňovací úrovně pro používané radionuklidy vs. 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 digestoři) 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_{ing} (pro odpadní vody) nebo h_{inh} (pro plynné výpustě) daného radionuklidu)

Tabulka 3. Zprošťovací a uvolňovací úrovně pro nejčastěji používané radionuklidy a typy odpadů:

radionuklid	aktivita pevných látek		vypouštění odpadních vod do kanalizace ³⁾	
	hmotnostní ¹⁾	plošná ²⁾	[MBq/m ³]	h_{ing} [Sv/Bq]
	[kBq/kg]	[Bq/100 cm ²]		
³ H (tritiová voda)	1 000 000	40	555.6	1.8E-11
³ H (org. vázané)			238.1	4.2E-11
¹⁴ C	10 000	40	17.2	5.8E-10
³² P	1000	40	4.2	2.4E-09
³³ P	100 000	40	41.7	2.4E-10
³⁵ S (organická)	100 000	40	13.0	7.7E-10
³⁵ S (anorganická)			76.9	1.3E-10
¹²⁵ I	1000	40	0.7	1.5E-08
U _{přir}	1	40	0.0	5.0E-07

1) Materiály, předměty nebo pevné látky. V případě kombinace více radionuklidů nesmí součet podílů průměrných hmotnostních aktivit jednotlivých radionuklidů a jejich uvolňovacích úrovní hmotnostní aktivity přesáhnout hodnotu 1. Zprošťovací a uvolňovací úrovně (Příloha č. 7 k vyhlášce 422/2016 Sb.).

2) Aktivita nesmí přesáhnout 0,4 Bq/cm² kdekoliv na ploše 300 cm² povrchu uvolňovaného předmětu.

3) V tabulce jsou vypočteny maximální přípustné objemové aktivity pro odpadní vodu tvořenou pouze jedním radionuklidem. Součet součinů průměrných objemových aktivit jednotlivých vypouštěných radionuklidů a jejich maximálních konverzních faktorů h_{ing} pro příjem požitím dospělým jednotlivcem z obyvatelstva (Příloha č. 3 k vyhlášce č. 422/2016 Sb.) nesmí být větší než 10 mSv/m³ (§ 104/c, vyhlášky 422/2016 Sb.).

12. Radioaktivní odpady (RAO) se třídí podle několika kritérií. Cena za konečné zpracování radioaktivních odpadů může být vysoká a jejich důsledným tříděním se dosahuje 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

V Praze dne 9.8.2022

Zpracoval:

Ing. Aleš Marek, Ph.D.
dohlízející osoba

Schválil:

Prof. RNDr. Jan Konvalinka, CSc.
ředitel