

2. RADIOAKTIVNÍ MATERIÁLY

Petr Skřehot, Martin Trávníček

2.1 Radionuklidy

2.1.1 Radioaktivní rozpad

Radioaktivita neboli radioaktivní rozpad je samovolná přeměna jader nestabilních nuklidů na jiná jádra, při níž vzniká radioaktivní záření, což je ionizující záření vznikající při radioaktivním rozpadu. Změní-li se počet protonů v jádře, dojde ke změně prvku na prvek jiný. Radioaktivita se běžně rozděluje na radioaktivitu přirozenou a umělou. Přirozená radioaktivita je důsledkem samovolného rozpadu atomového jádra. Přirozeně radioaktivních je mnoho látek v přírodě, včetně tkání živých organismů. Ze studia jaderných interakcí, chování hmoty a vývoje Vesmíru se předpokládá, že veškerá hmota podléhá rozpadu. Poločas rozpadu prvků, které považujeme za stabilní, je však mnohonásobně větší, než samotné dosavadní stáří Vesmíru (cca 13,7 miliard let), takže je lze za stabilní považovat. Jako nejdéle žijící se považuje jádro nejjednoduššího prvku – vodíku, tj. proton. Poločas jeho rozpadu je odhadován na 10^{32} let. Naproti tomu neutrony, které se na stavbě atomových jader také podílejí, se ve volném stavu (mimo atomové jádro) rozpadají s poločasem 10,3 minuty.

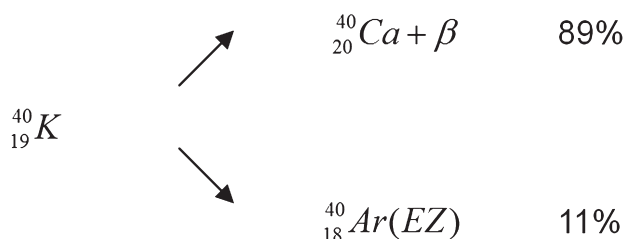
Umělou radioaktivitu získají prvky transmutací, vlivem řetězové reakce nebo působením urychlených částic. Umělá radioaktivita je tedy podmíněna přeměnou jádra, která je způsobena vnějším vlivem, např. při ostřelování částicemi se jádra mohou dále samovolně rozpadat. Takováto jádra v přírodě běžně neexistují, ale byla vytvořena uměle. Zákonitosti rozpadu těchto uměle vytvořených jader jsou shodné se zákony popisujícími rozpad přirozeně radioaktivních jader. Poněvadž však ke vzniku těchto jader byl nutný vnější umělý zásah, hovoříme o umělé radioaktivitě.

Podle původu rozdělujeme radionuklidy na primární (primordiální) a sekundární. První skupinu tvoří ty, které se zachovaly na Zemi ještě z doby jejího vzniku. Je zřejmé, že některé stabilní nuklidy jsou v převážné míře nebo alespoň částečně produkty přeměny primárních nestabilních nuklidů. Sekundární radionuklidy jsou nestabilní nuklidy s relativně krátkým poločasem přeměny, nepřesahujícím hodnotu 10^7 až 10^8 let. Tyto nuklidy i v současné době vznikají v přírodě buď jako produkty přeměny primárních radionuklidů, anebo produkty jaderných reakcí (Majer, 1981).

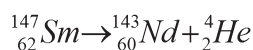
2.1.2 Přírozené radionuklidy netvořící řady

Řada lehkých prvků vykazuje radioaktivitu, a to převážně typu β . Jejich aktivita je velmi malá a emitované záření má malou energii v souvislosti s neobyčejně dlouhým poločasem rozpadu těchto nuklidů. Z hlediska kinetického je důležité zdůraznit, že produkty rozpadu těchto jader jsou stabilními přírodními nuklidy, které již nepodléhají dalším transmutacím, na rozdíl od štěpných produktů primárních radionuklidů těžkých jader.

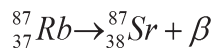
Typickým zástupcem přírozeného radionuklidu netvořícího řady, jež je součástí radiačního pozadí a popílků, je draslík $^{40}_{19}\text{K}$ zastoupený z 0,0119 % v přírodní směsi tří izotopů draslíku. Je zářičem β a podléhá elektronovému záchytu. S poločasem $1,29 \cdot 10^9$ roků podléhá duální transmutaci podle schématu.



Čistým zářičem je izotop samaria ^{147}Sm , s relativním výskytem 14,97 % v přírodní směsi a poločasem rozpadu $6,7 \cdot 10^{11}$ roků, který se přeměňuje podle schématu



Příkladem čistého zářiče β je ^{87}Rb (27,85% zastoupení), který se s poločasem rozpadu $6,16 \cdot 10^{10}$ roků přeměňuje podle schématu



2.1.3 Přírozené radionuklidy tvořící řady

Jádra atomů přírodních radioaktivních prvků podléhají samovolnému procesu (mononukleární reakci), při níž se za emise záření přeměňují v atomová jádra jiných elementů. Tyto přeměny nejsou v oblasti těžkých radioaktivních prvků, k nimž patří i jádro uranu a thoria ^{232}Th , izolované, ale tvoří genetickou řadu, kdy vzniklý

radionuklid se podobným pochodem přeměňuje v následné reakci na nuklid další.

Většina přeměn v přirozených radioaktivních řadách probíhá jen jediným směrem, jádro vyzáří buď částici α nebo β . U některých členů se však setkáváme s novým jevem, totiž transmutace nastává obojím způsobem, je duální, a řada se rozvětjuje. Poměr četnosti obou druhů přeměn je u různých nuklidů různý. Jen výjimkou je procentový podíl emise α i β téhož řádu. Většinou je posunut zcela ve prospěch jednoho druhu transmutace, kdežto druhý způsob přeměny je mizivý.

Přirozené rozpadové řady

Sledováním vzájemné souvislosti těchto nestálých nuklidů bylo možno pro těžké radioaktivní prvky jednoznačně nalézt čtyři řady (rodiny, rodokmeny), v nichž s výjimkou prvního a posledního člena vždy každý následující vzniká radioaktivní přeměnou α nebo β z nuklidu předcházeného (mateřského). Každá řada má tedy svůj počáteční nuklid mateřský a konečný stabilní nuklid.

Protože poločasy přeměny všech vznikajících sekundárních radionuklidů jsou mnohem kratší než poločasy výchozích radionuklidů, ustavuje se v každé řadě jako celku v přírodních podmínkách mezi jednotlivými členy trvalá radioaktivní rovnováha, při které je v thoriové přeměnové řadě celková aktivita sekundárních radionuklidů 9krát vyšší než aktivita ^{232}Th , v aktiniové přeměnové řadě 10krát větší než aktivita ^{235}U a v uranové přeměnové řadě 13krát vyšší než aktivita ^{238}U .

Rozeznáváme přirozenou řadu uranovou, thoriovou a aktiniovou. Umělá rozpadová řada zvaná neptuniová začíná ^{241}Pu a na rozdíl od přirozených řad končí ^{209}Bi .

Emanace

V každé ze čtyř řad radioaktivních nuklidů se vyskytuje prvek s protonovým číslem 86 – radon. Jeho izotopy ^{222}Rn (řada uranová), ^{220}Rn (řada thoriová) a ^{219}Rn (řada aktiniová) jsou krátkodobé a zaujímají v rozpadových řadách zvláštní postavení. Jako prvek plynné povahy uniká totiž z materiálů, obsahujících jeho mateřské látky ^{226}Ra , ^{224}Ra ^{223}Ra do okolní atmosféry (emanují) a produkty jeho další přeměny se ukládají (deponují) na předmětech v okolí. Jsou silně radioaktivní, i když jejich absolutní množství je tak nepatrné, že deposit je neviditelný. Dceřiné produkty emanace podle jejich vzniku nazýváme aktivní deposit (sraženina, usazenina, sedlina, nálet). Dalším rozpadem aktivní sraženiny ^{219}Rn vzniká ^{215}Po s poločasem rozpadu 3,96 sekundy až konečný stabilní produkt ^{207}Pb . Naproti tomu z izotopu

^{222}Rn v řadě uranové vznikají další nuklidy dlouhého života, z nichž nejdelší ^{210}Pb má poločas rozpadu 22,3 roku. Lze tak zjistit radioaktivitu i poté, co se ^{218}Po a ^{214}Bi rozpadly. Rozeznáváme tak v řadě uranové depozit krátkodobý a dlouhodobý (Majer, 1981).

2.2 Základní informace o vybraných radionuklidech a o jejich praktickém využití

2.2.1 Uran

Uran, prvek s atomovým číslem 92 (relativní atomová hmotnost 238,029), se v přírodě nachází v podobě tří izotopů, z nichž všechny jsou přirozeně radioaktivní. Jejich poločasy a rozpadu relativní zastoupení jsou: ^{238}U ($T_{1/2} = 4,468 \cdot 10^9$ roků, 99,276 %), ^{235}U ($T_{1/2} = 7,038 \cdot 10^8$ roků, 0,7196 %) a ^{234}U ($T_{1/2} = 2,45 \cdot 10^5$ roků, 0,0057 %). Jde vesměs o zářiče α . Jadernými reakcemi byla připravena řada dalších izotopů.

Oba přírodní izotopy uranu ^{238}U a ^{235}U jsou výchozími mateřskými nuklidy dvou ze čtyř zmíněných radioaktivních řad, a to uranové řady $4n+2$ a aktiniové řady $4n+3$, mezi nimiž existují značné podobnosti. V každé řadě se ve smyslu Soddyho-Fajansových posunových pravidel mění pořadové číslo nuklidu Z a tím i jeho postavení periodické tabulce prvků.

Uran ^{238}U je mateřským nuklidem uranové řady. Jejím konečným produktem je stabilní izotop olova ^{206}Pb . Tato řada generuje i třetí izotop uranu ^{234}U , a to spontánní přeměnou β jádra ^{234}Pa . Uran ^{235}U je mateřským nuklidem aktiniové řady. Jejím konečným produktem je stabilní izotop olova ^{207}Pb .

Praktické využití

Uranové rudy se ve velkém množství vyskytují v Kanadě, Austrálii, USA, Nigeru, Nigérii, Kongu, Demokratickém Kongu (Zair), Namibii, Gabunu, Rusku, Uzbekistánu, Kazachstánu. V minulosti byla významná těžba v Československu, zde zejména v Jáchymově (do 2. poloviny 20. století zdaleka nejvýznamnější zdroj) a v Evropě v Sasku a v anglickém Cornwallu. Uran je obsažen mimo jiné rovněž v uhlí, což je důvod, proč tepelné elektrárny do prostředí celkově uvolňují mnohem více radioaktivity než elektrárny jaderné. Dnes se po tzv. obohacení uranu (zvýšení koncentrace izotopu ^{235}U) používá jako palivo v jaderných reaktorech nebo jako náplň jaderných zbraní. Pro využití uranu jako jaderného paliva je nutné zvýšit koncentraci izotopu ^{235}U z 0,72 % většinou na 2 až 4 %. Pro použití v jaderné bombě je koncentraci třeba zvýšit na hodnotu okolo 50 % (Majer, 1981).

Jako jaderné palivo se dá v tzv. těžkovodních reaktorech využít rovněž ^{238}U , je to však mnohem náročnější, proto se tato možnost zatím v praxi příliš nevyužívá. Nadkriticky štěpitelný je rovněž ^{234}U . Z izotopu ^{238}U se v rychlých množivých reaktorech dá vyrábět plutonium, jež taky může sloužit jako jaderné palivo nebo náplň jaderných bomb, tento postup se však zatím příliš nepoužívá kvůli vysokým investičním nákladům a vyšší technologické náročnosti (Greenwood a Earnshaw, 1993).

Odpadem po obohacování uranu je tzv. ochuzený uran. Ochuzený uran je pro svou vysokou hustotu využíván všude tam, kde je žádoucí vysoká hmotnost (vyvážení, nutnost dosáhnout vysoké kinetické energie při malém objemu). Je potřebná např. pro výrobu protipancéřových projektilů. Působí zde sice především vysoká kinetická energie střely, účinek však zesiluje i to, že po průniku projektilu za pancíř se tlakem a třením rozžhavené částice uranu vznítí, což zvyšuje ničivý účinek uvnitř obrněného prostoru. K dosažení tohoto efektu se střela musí pohybovat rychlostí zvuku. Vedlejším negativním produktem může v takových případech být radioaktivní zamoření. Určení míry jeho škodlivosti však není dosud dořešeno. Velkou roli přitom hraje nejen nízká radioaktivita ochuzeného uranu, ale jeho velké rozptýlení v prostředí a možnost vnitřní kontaminace živých organismů (potravou, pitím nebo vdechnutím). Tyto střely byly použity spojenci v Iráku v roce 1992, v Kosovu v roce 1999 a pravděpodobně rovněž v Afghánistánu v roce 2001.

Ve starším, ale ještě používaném Boingu-747 je ochuzený uran používán jako vyrovnávací závaží na zádi trupu letounu. Uvádí se, že bylo vyrobeno kolem 600 exemplářů tohoto modelu obsahujícího ochuzený uran, přičemž jednotlivé exempláře obsahují 400 až 600 kg ochuzeného uranu (jiný pramen uvádí dokonce 400 až 1500 kg). Podobným způsobem je využíván rovněž v amerických vrtulnicích DC-10. Jako zátěž je využíván rovněž v plachetnicích, rotorech gyroskopů, ropných vrtných soupravách. V některých amerických tancích je používán jako součást pancíře. Ochuzený uran může být použit rovněž jako stínění před radioaktivitou.

Ve sloučenině v podobě dvojurananu sodného ($\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) a dvojurananu draselného ($\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) dosud slouží pod názvem uranová žluť k barvení skla, glazur a porcelánu (barví na žluto až žlutozeleně, přičemž fluoreskuje).

Ve fotografii se sloučenin (solí) uranu (např. $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ – dusičnan uranylu) používá k zesilování negativů, do tónovacích lázní, zesilovač světlotisku. Kvůli chemické toxicitě se dusičnan uranylu používá pro experimentální vyvolání patologického stavu ledvin u pokusných zvířat. Octany uranylu $\text{UO}_2(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaUO}_2(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)$ a dvojuranan amonný $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ mají význam v analytické chemii. Uran obsahující svůj karbid je vhodným katalyzátorem pro syntézu amoniaku Haberovým způsobem.

2.2.2 Thorium

Thorium, prvek s atomovým číslem 90 (relativní atomová hmotnost 232,038), se v přírodě vyskytuje v podobě šesti izotopů, z nichž všechny jsou přirozeně radioaktivní. Hlavním izotopem vyskytujícím se v přírodě je ^{232}Th , který je zářičem α s poločasem rozpadu $T_{1/2} = 1,39 \cdot 10^{10}$ roků. Izotopy ^{227}Th ($T_{1/2} = 18,72$ dne), ^{228}Th ($T_{1/2} = 1,91$ roku), ^{230}Th ($T_{1/2} = 8,0 \cdot 10^4$ roků), ^{231}Th ($T_{1/2} = 25,52$ hodin) a ^{234}Th ($T_{1/2} = 24,10$ dní) jsou členy přirozených radioaktivních řad. Mnoho dalších izotopů thoria bylo připraveno uměle, přičemž celkem známe 18 izotopů thoria (Greenwood a Earnshaw, 1993).

Thorium ^{232}Th je mateřským nuklidem thoriové řady, jejímž konečným nuklidem je stabilní izotop ^{208}Pb . Jedním členem thoriové řady je i radioaktivní izotop ^{228}Th .

Praktické využití

Asi nejznámějším nejaderným použitím thoria je výroba punčošek pro plynové lampy. Vyrábí se napuštěním bavlněné tkaniny roztokem dusičnanu thoričitého s malým přídavkem céru pro zvýšení svítivosti. Dále se používá například na výrobu Mg-Th slitin, které se uplatňují v kosmické technice díky jejich nízké hmotnosti, vysoké tvrdosti a vynikající odolnosti proti vysokým teplotám. Dusičnan thoričitý se využívá na výrobu thoriovaných wolframových elektrod pro svařování nerezových ocelí a niklových slitin. Thoriovaný wolfram nachází též uplatnění při výrobě elektrod (katod) a emisních vláken speciálních nízkonapěťových výbojek, elektronek a obloukových lamp. Thoriové katody jsou použitelné i při nižším žhavicím napětí a vykazují vyšší životnost než klasické wolframové. Oxid thoričitý ThO_2 (má nejvyšší známý bod tání ze všech binárních oxidů, 3300 °C) se využívá pro výrobu vysokoteplotní žáruvzdorné keramiky, licích forem a tavicích kelímků (např. pro tavení osmia, rhodia či platiny).

V jaderné energetice je thorium mnohými považováno za surovinu budoucnosti. S jeho širším uplatněním se počítá v příštích padesáti letech. Samotné ^{232}Th přímo štěpitelné není, ale využívá se jeho konverze na štěpitelný ^{233}U :



Izotop ^{233}U má větší účinný průřez a vyšší výtěžek štěpné (n,f) reakce než ^{235}U a ^{239}Pu , jež jsou používány v současnosti. Thorium produkuje odpad s nižší

aktivitou než uran nebo plutonium a je proto považováno za ekologicky šetrnější. S thoriem pracují různé druhy množinových reaktorů rozdílných konstrukcí, např. reaktor typu HTGR (high-temperature gas-cooled reactor) nebo MSRE (molten salt converted reactor experiment).

2.2.3 Plutonium

V současnosti je u plutonia známo celkem 18 izotopů. Nejdůležitějším izotopem je ^{239}Pu , dlouhodobý zářič ($T_{1/2} = 24360$ let), který je ve velkém množství produkován v reaktorech, které jsou k tomuto účelu zvlášť konstruovány. Elementární plutonium je bílý lesklý kov. Teplota tání plutonia činí $640\text{ }^{\circ}\text{C}$. Existuje v šesti alotropických modifikacích, přičemž modifikace má nejnižší elektrickou vodivost ze všech kovových prvků.

Ačkoli je plutonium produkováno ve velkých množstvích, nepatří, díky hrozbě zneužití, mezi příliš rozšířené materiály. Praktického využití se plutonium dočkalo především ve vojenství, kde je využíváno od poloviny 40. let 20. století pro účely konstrukce jaderné bomby. Dá se jej využít také jako palivo do některých typů jaderných reaktorů. Jiné praktické využití nemá.

Plutonium stejně jako všechny ostatní transuranové prvky vykazuje značnou toxicitu (blíže viz kapitola 2.3.2).

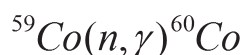
2.2.4 Radon

Radon se řadí do skupiny vzácných plynů jako jejich nejtěžší homolog. Jako všechny jednoatomové plyny je chemicky inertní. S některými sloučeninami přesto tvoří klatráty, dobře se rozpouští v CS_2 , uhlovodících a jiných organických rozpouštědlech. V kapalném stavu světélkuje. ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3,824$ dní) je členem přeměnové řady uranové, ^{219}Rn ($T_{1/2} = 3,96$ sekund) je členem řady aktiniové a ^{220}Rn ($T_{1/2} = 55$ sekund) thoriové. Všechny tři izotopy jsou radioaktivní a díky skutečnosti, že se rozpadají na příslušné izotopy polonia, představují riziko kontaminace prostředí radioaktivním aerosolem. Takto vzniklé polonium, které je pevným prvkem, se deponuje na nejrůznějších površích, včetně částic prachu, které jej mohou dále šířit. Praktické využití nemá.

2.2.5 Kobalt – 60

Ačkoli přírodní kobalt nepatří mezi radioaktivní prvky, uměle připravený izotop ^{60}Co je jedním z nejčastěji využívaných radionuklidů vůbec. Pro své radioaktivní

vlastnosti (β , resp. γ zářič) nalezl široké uplatnění zejména v defektoskopii, kde je využíván pro vyhledávání vnitřních skrytých vad materiálů, v medicíně pro léčení nádorů, pro potřeby sterilizace prostředí, chirurgických nástrojů, rukavic či obvazů, a také některých potravin – např. koření. Připravuje se ozářením stabilního izotopu kobaltu ^{59}Co energetickými neutrony (např. v jaderném reaktoru). Tuto reakci lze vyjádřit následovně:



Jelikož má ^{60}Co výše uvedené rozmanité využití, je poměrně široce rozšířen v nejrůznějších provozech, a to ať už v metalurgickém či strojírenském průmyslu, v průmyslu zabírajícím se výrobou chirurgického náčiní a dalšího zdravotnického materiálu, či v samotném zdravotnictví. Díky tomu může následkem havárie na zařízení, kde je takto využíván k mírovým účelům, dojít k jeho úniku a následné kontaminaci prostředí, což se ostatně již i stalo. Kromě toho může být také díky své relativní dostupnosti zneužit pro teroristické účely, což představuje v současnosti vážnou hrozbu potenciálního ohrožení.

2.2.6 Produkty štěpení jaderného paliva

Ve vyhořelém jaderném palivu, které původně obsahovalo de facto pouze izotopy uranu (^{235}U a ^{238}U) a kyslík, můžeme nalézt téměř všechny prvky periodické soustavy. Některé z nich jsou však zastoupeny výrazně více než jiné. Příčinou této skutečnosti je samotná podstata průběhu jaderného štěpení ^{235}U , kde je preferován vznik dvou přibližně stejně hmotných jader, přičemž maximální zastoupení mají nuklidy s atomovými čísly okolo 90 a 140. Mezi hlavními produkty štěpení proto můžeme nalézt ^{90}Sr a ^{137}Cs .

Využití vyhořelého jaderného paliva je soustředěno pouze na jeho přepracování ve speciálních závodech, kde dochází k separaci jednotlivých dále využitelných prvků (Pu, ^{235}U a další). Dostupnost jak vyhořelého paliva, tak i produktů po jeho přepracování je téměř nulová, neboť pohyb těchto materiálů podléhá mimořádně přísné kontrole. Ačkoli se nedá apriori vyloučit jeho získání v některých zvlášť rizikových státech, které podporují terorismus, je potřeba uvést, že manipulace s vyhořelým palivem patří mezi vůbec nejobtížnější operace s radioaktivním materiálem, neboť vyhořelé palivo je extrémně radioaktivní a má dlouhodobě vysokou teplotu.

2.3 Biologické účinky radioaktivních látek a ionizujícího záření

Účinky radioaktivních látek na zdraví lze rozdělit na účinky toxické vyplývající z reaktivity a chemických vlastností dané látky a na účinky ionizujícího záření, které vzniká v důsledku rozpadu jader jednotlivých radionuklidů. V tomto směru můžeme rozlišovat účinky zevního ozáření a účinky způsobené vnitřním ozářením organismu.

2.3.1 Kontaminace radioaktivní látkou

Při manipulaci s otevřenými radioaktivními látkami může dojít k jejich úniku a následné kontaminaci (zamoření) předmětů, pracovního prostředí a osob těmito radioaktivními látkami. Ke kontaminaci může docházet také při haváriích nebo cíleně provedených teroristických útocích. V zásadě se může jednat o kontaminaci povrchovou nebo vnitřní.

Povrchová kontaminace

V pracovním prostředí dochází nejčastěji k povrchové kontaminaci pracovních ploch, pomůcek, oděvů nebo osob. Povrchová kontaminace může vést k vyšším dávkám záření především na kontaminované oblasti kůže, v některých případech však může vyústit i ve vnitřní kontaminaci. Podobná situace může nastat při haváriích nebo útocích jadernými či radiologickými zbraněmi, kdy dochází ke spadu radioaktivního materiálu. (Např. po pozemním výbuchu jaderné bomby dojde v okolí epicentra k rozmetání a spadu přibližně 50 % radioaktivního materiálu tvořícího jadernou náložku. Zbylé množství je vyneseno konvekci do atmosféry a je součástí atomového hříbu, který se postupně rozptyluje v atmosféře. Spad těchto částic proto nastává v delším časovém horizontu, a to v podobě mokré depozice).

K průběžné kontrole povrchové kontaminace během práce a po jejím skončení se používají především radiometry s velkoplošnými sondami, které by se měly nacházet na všech exponovaných pracovištích a v hygienických smyčkách. Citlivou metodou kontroly kontaminace je i metoda stěrů, kdy štětičkou z vaty namočenou ve vhodném rozpouštědle (lihobenzin) je setřena případná kontaminace (spad) z definované plochy exponovaného místa a pak je sebraný vzorek ve zkumavce přeměřen studnovým scintilačním detektorem (Ullmann, on line).

Vnitřní kontaminace

Při manipulaci s vyššími aktivitami otevřených zářičů může dojít k nežádoucímu průniku radioaktivních látek dovnitř do organismu a dochází k vnitřní kontaminaci a následnému vnitřnímu ozáření. Speciálním případem vnitřní kontaminace

je záměrná aplikace radioaktivní látky – radioindikátoru, radiofarmaka – do organismu za účelem diagnostiky nebo terapie v nukleární medicíně. Po proniknutí do organismu radioaktivní látka vstoupí do metabolismu a může se distribuovat v jednotlivých tkáních a orgánech v závislosti na svém chemickém složení – část se může hromadit v tzv. cílových orgánech, zbytek se distribuuje krevním oběhem do celého těla. Většina radioaktivních látek je posléze metabolizována a po určité době odchází (většinou močí, v menší míře stolicí, někdy i potem) ven z organismu (Ullmann, on line). Část radionuklidů však může zůstat trvale vázána např. v kostech, těžké kovy pak v játrech či ledvinách.

Radioaktivní kontaminace se do organismu může dostat v zásadě čtyřmi způsoby:

- **Ingesce** – nejčastější příčinou vnitřní kontaminace, zvláště při laboratorní práci, je požití (ingesce) radioaktivní látky přes kontaminované ruce či jiné předměty, které přicházejí do styku s ústy.
- **Inhalace** – radioaktivní plyny, páry či aerosoly mohou proniknout při vdechování (inhalaci) do plic, a odtud případně stěnami alveol do krve a dále do organismu.
- **Dermálně** – při kontaminaci povrchu těla jsou některé látky schopné difundovat a proniknout do organismu i přes neporušenou kůži (např. plutonium či fosfor), popř. otevřeným poraněním na kůži.
- **Cílená aplikace** – nastává při aplikaci radiofarmak pro účely radiodiagnostiky nebo radioterapie.

2.3.2 Toxické a radiotoxické účinky

Toxické účinky radioaktivních látek nelze charakterizovat v obecné rovině, protože jsou specifické dané sloučenině a nesouvisí tedy s přítomností radionuklidů v dané látce či materiálu. V tomto směru je pro hodnocení (chemické) toxicity vždy klíčové množství látky vstupující do organismu (tj. dávka) a jím vyvolaný specifický účinek. Z toxikologického hlediska jsou nejvýznamnější aktionoidy, zejména pak thorium, uran a některé transuranové prvky.

Pro posouzení dlouhodobých účinků vnitřní kontaminace radioaktivní látkou – **radiotoxicity** – se zavádí tzv. **úvazek dávky**, což je absorbovaná dávka ionizujícího záření, kterou způsobí v určitém orgánu nebo tkáni daná radioaktivní látka za dobu 50 let od jejího příjmu do organismu. Radiotoxicita je závislá nejen na fyzikálních parametrech radionuklidu (poločas rozpadu, druh a energie záření), ale i na chemických vlastnostech kontaminantu, které určují jeho metabolismus, distribuci do jednotlivých orgánů a způsob vylučování. Proto jsou

jednotlivé radionuklidy charakterizovány svým biologickým poločasem rozpadu T_{biol} . Je zřejmé, že metabolická přeměna se bude lišit v závislosti na tkáni, kde bude probíhat, a zpravidla se uvažuje ve tkáních, kde probíhá i depozice daného radionuklidu. Z poločasu fyzikálního a biologického se potom počítá tzv. efektivní poločas $T_{1/2}(ef)$ podle rovnice 2-1.

$$T_{1/2}(ef) = \frac{T_{1/2}T_{biol}}{T_{1/2} + T_{biol}} \quad (\text{rovnice 2-1})$$

V hodnocení celkového rizika se pak radiotoxicita kombinuje s potenciálním rizikem zevního ozáření z dalších radioaktivních nuklidů. Podle celkového rizika se radionuklidy rozdělují do čtyř tříd, přičemž nejnebezpečnější jsou nuklidy první třídy (vyhláška č. 307/2002 Sb. v platném znění). Přehled jednotlivých poločasů společně s místem přednostní depozice v lidském organismu pro vybrané radionuklidy a zařazení do příslušné třídy radiotoxicity udává tabulka 18.

Tabulka 18: Hodnoty efektivních poločasů některých významných radionuklidů.

Radionuklid	$T_{1/2}$	T_{biol}		$T_{1/2}(ef)$	Třída radiotoxicity
^3H	12,33 r	celé tělo	19 d	19 d	4
^{14}C	573 r	tuk kosti	35 d 180 d	35 d 180 d	3
^{32}P	14,3 d	kosti	4,3 r	14 d	3
^{60}Co	5,27 r	játra	8,4 d	8,4 d	1
^{90}Sr	28,5 r	kosti	$4 \cdot 10^3$ d	2903 d	2
^{131}I	8,06 d	štítná žláza	120 d	7,5 d	2
^{137}Cs	30,1 a	sval	17 d	17 d	1
^{140}Ba	12,8 d	kost	200 d	12 d	1
$^{144}\text{Ce} +$ ^{144}Pr	284 d 17,27 m	kost	500 d	180 d 254 d	2
^{222}Rn	3,824 d	–	–	–	–
^{232}Th	$1,405 \cdot 10^{10}$ r	–	–	–	1
^{235}U	$7,1 \cdot 10^{10}$ r	–	–	–	1
^{238}U	$4,468 \cdot 10^9$ r	–	–	–	1
^{239}Pu	$2,44 \cdot 10^4$ r	–	–	–	1

Poznámka: d – den, m – měsíc, r – rok

Toxicita aktinoidů

Do skupiny aktinoidů patří celkem 14 chemických prvků s protonovým číslem 90 až 103, přičemž prvky s protonovým číslem vyšším jak 92 jsou nazývány transurany. Jsou to kovové prvky s velkým množstvím izotopů, z nichž mnohé jsou silně radioaktivní. Zatímco první tři členové této skupiny (thorium, protaktinium a uran) jsou přirozeně zastoupeni i v přírodě, zbývající aktinoidy – transurany, musí být

ve větším množství připravovány uměle v jaderných reaktorech či urychlovačích (Muck, 2006).

Kromě chemické toxicity je v případě aktinoidů nutno uvažovat také toxicitu radiační (radiotoxicitu). Míra radiotoxicity i chemické toxicity přitom není dána žádnými obecnými trendy. Zatímco u některých prvků převládá toxicita chemická (např. uran), jiné jsou nebezpečné zejména díky produkci radioaktivního záření (např. plutonium, americium) (U.S. Department of health and human services, 1999, 2004 a 2007). Radiotoxicita je v takovém případě dána rychlostí radioaktivní přeměny, typem uvolněného záření a jeho energií. Aktinoidy produkující zejména málo pronikavé alfa záření představují nebezpečí především tehdy, pokud se dostanou přímo do organismu. Naopak izotopy aktinoidů produkující pronikavější beta či gama záření o vysokých energiích mohou organismus poškodit, aniž by s ním přišly do přímého kontaktu (Hála, 1998). Zanedbat nelze ani dceřiné produkty vznikající radioaktivním rozpadem aktinoidů. Mohou totiž vykazovat větší radiotoxicitu a chemickou toxicitu než samotný mateřský prvek.

Lidský organismus může být aktinoidy kontaminován přes dýchací cesty, trávicí trakt nebo drobná poranění v kůži. Při vdechnutí je určující zejména velikost částic. Částice větších rozměrů jsou zachyceny již v nose či dutině ústní, odkud se mohou dostat až do žaludku. Menší částice putují do plic, kde mohou setrvat po řadu dní či týdnů, v extrémních případech dokonce i po několik desítek let. Doba, po kterou zůstávají různé aktinoidy přítomny v organismu, je značně odlišná. Například plutonium se z organismu vylučuje jen velice pozvolna (uvádí se doba 30 až 50 let) a jen v nepatrném množství (U.S. Department of health and human services, 2007). Určující jsou zejména chemické vlastnosti sloučeniny, do které je daný aktinoid vázán. Ve vodě nerozpustné sloučeniny poškozují hlavně plíce, příčinou jsou však spíše přidružené chemické reakce a abraze větších částic (U.S. Department of health and human services, 1999). Pokud je látka rozpustná ve vodě, mohou aktinoidy přejít i do krve. Valná část aktinoidů je organismem zpravidla vyloučena přirozenou cestou. Zbytek se však může usadit v kostech, štítné žláze, ledvinách, játrech či dalších vnitřních orgánech.

Aktinoidy lze z chemického hlediska zahrnout mezi těžké kovy, které jsou známé svou chemickou toxicitou (jako například rtuť, kadmium či olovo). Podobně jako těžké kovy se i aktinoidy mohou kumulovat uvnitř měkkých tkání. Díky přidružené radiotoxicitě je zpravidla velmi obtížné stanovit, jaká onemocnění má na svědomí pouze toxicita chemická. Z tohoto pohledu je zřejmé, že větší dávky aktinoidů vedou zejména k poškození ledvin a jater. Testy prováděné na zvířatech ukázaly, že většina aktinoidů je riziková především díky produkci radioaktivního záření. Například chemická toxicita thoria či americia je pravděpodobně minimální a je jednoznačně překonána radiotoxicitou (U.S. Department of health and human services, 1990 a 2004). Ačkoli existuje velké množství informací o vlastnostech

transuranů, mnoho se toho o jejich chemické toxicitě neví. Patrně nejvíce informací v tomto směru máme o uranu. Jeho akutní toxicita se projevuje ovlivněním glycidového metabolismu, poškozením ledvin, jater a některých životně důležitých center. Chronické otravy způsobují poškození plic, krevetvorby, nervů, vnitřních orgánů a sníženou plodnost. Je karcinogenní a teratogenní. Mezi jeho nejedovatější sloučeniny patří dusičnan uranylu $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$, méně jedovaté jsou pak fluorid, resp. chlorid uraničitý – UF_4 , resp. UCl_4 (Tichý, 1998). Naproti tomu thorium je doposud málo toxikologicky prozkoumáno, což je patrně dáno jeho (doposud) relativně malým praktickým využitím.

Obecně lze tedy říci, že je chemická toxicita aktinoidů podobná toxicitě ostatních těžkých kovů, které se rovněž mohou kumulovat v organismu a jejichž účinkem dochází k oslabení imunity, poruchám nervové soustavy a kardiovaskulárního systému či k poškození vnitřních orgánů.

2.3.3 Účinky záření

Účinky ionizujícího záření na organismus se dělí podle mnoha hledisek a jednotlivá rozdělení se překrývají. Rozlišujeme např. účinky přímé a nepřímé, somatické a genetické, časně a pozdní (opožděné), prahové (nestochastické) a bezprahové (stochastické).

Účinky záření závisí na druhu a energii záření, na dávce a dávkovém příkonu a vlastnostech ozářené tkáně nebo orgánů. Působení záření na živou hmotu se nejprve řídí obecnými zákony platnými i pro látky neživé. Dochází k ionizaci a excitaci, přičemž je absorbována energie. Na tento fyzikální proces pak navazuje řada dalších dějů (fyzikálních, chemických, biologických apod.) podmíněných složitou organizací živé hmoty. Pozorovatelné účinky ionizujícího záření mají svůj počátek vždy v dějích, které vyvolává ionizující záření v buňkách. Poškození buněk závisí především na jejich schopnostech se dále dělit. Vliv ionizujícího záření na buňku je tím výraznější, čím má buňka větší schopnost k dělení.

Mechanismy působení záření

Základními stavebními jednotkami všech živých tkání jsou buňky. Pro pochopení biologických účinků ionizujícího záření jsou proto rozhodující mechanismy působení záření na buněčné a subcelulární úrovni, a to v návaznosti na chemické a biochemické účinky ionizujícího záření na molekulární úrovni. Při ozáření buňky příslušnou dávkou záření může dojít v zásadě ke dvěma význačným typům poškození:

- smrti buňky,
- změnám genetické informace buňky (mutaci) a
- radiačnímu poškození (aniž by došlo k výše uvedeným následkům).

Snaha o vysvětlení účinků ionizujícího záření na živou tkáň vedla k vyslovení dvou základních teorií (či spíše představ) – starší zásahová a novější radikálová teorie. Zásahová teorie „přímého účinku“, podle níž poškození důležité části buňky, především jejího jádra, nastává při přímém zásahu kvantem záření, při němž dochází k lokální absorpci energie, ionizaci a následné chemické změně zasažené struktury. Nyní však víme, že tento mechanismus má pouze druhořadý význam, neboť pravděpodobnost takových „přímých zásahů“ je poměrně nízká, takže citlivost živé tkáně k záření by byla podstatně menší, než se pozoruje. K vysvětlení skutečně pozorované radiosenzitivity živé hmoty je proto třeba obrátit se k druhému mechanismu, kterým je radikálová teorie „nepřímého účinku“. Ta vychází z toho, že každý organismus je složen především z vody (tvoří téměř 80 %), v níž jsou rozptýleny biologicky aktivní látky. Interakce záření s živou tkání bude proto probíhat především na molekulách vody. Vlivem ionizace bude docházet k radiolýze vody, přičemž vznikají i velmi reaktivní volné radikály $H\cdot$, $OH\cdot$ a produkty schopné oxidace (H_2O_2 , HO_2), jak již bylo uvedeno výše. Ty napadají organické molekuly biologicky důležitých látek a chemicky je pozměňují či destrukují. Výsledkem může být řada změn, které takto nepřímo ovlivňují metabolické děje. I v případě, že k primární interakci záření dojde ve vodě mimo buňku, mohou vzniklé zplodiny vniknout do buňky a tam vykonat svůj škodlivý účinek.

Radikálová teorie byla později dále zdokonalena a upřesněna na základě poznatků molekulární biologie. Mikrodozimetrickým rozbořením distribuce dávky záření a sledováním chromozomálních aberací se zjistilo, že radiační poškození buňky závisí na hustotě ionizace v kritickém místě. Ukázalo se, že k poškození buňky je zapotřebí dosažení určité kritické hodnoty lokální hustoty energie v daném místě a čase. K poškození buňky dochází při kombinaci dvou primárních dějů odehrávajících se na dvojvláknech nukleové kyseliny DNA, tvořící jádro buňky, přičemž poškození je pravděpodobnostně závislé na počtu vzniklých zlomů a na působení reparačních procesů. Záření beta a gama vytvářejí při svém průchodu kritickým místem pouze po jednom primárním narušení (zlomu), takže k definitivnímu vzniku poškození je třeba průchodu dvou jednotlivých částic daným místem rychle po sobě – počet těchto poškození pak závisí převážně na druhé mocnině dávky. Částice záření alfa, které má výrazné ionizující účinky, jsou naproti tomu schopny při jediném průchodu kritickým místem vyvolat dvě a více primárních poruch, což stačí ke vzniku reálného poškození, takže počet poškození, tj. radiační účinek, je zde přímo úměrný dávce záření; poškození zde vzniká snadněji, tyto druhy záření mají vyšší biologickou účinnost. Specifické účinky má neutronové záření (nejčastěji

emitované při jaderném výbuchu), které sice díky absenci elektrického náboje nezpůsobuje ionizaci, nicméně snadno proniká do jader některých prvků a ty mění v jádra radioaktivní (neutronová aktivace).

Při značně vysokých dávkách záření (stovky Gy)¹⁷ dochází vlivem výše zmíněných mechanismů k destrukci a denaturaci důležitých složek buněčného obsahu, což může vést k bezprostřednímu usmrcení buňky i v klidovém období, tzv. interfázi (intervalu mezi dvěma buněčnými děleními). Daleko častějším typem zániku buňky však je tzv. mitotická smrt buňky, k níž dochází v průběhu buněčného dělení – mitózy. Zde se poškození neprojeví okamžitě, ale až tím, že buňka není schopna se dále dělit. Mitotická smrt buňky nastává i při menších dávkách (jednotky Gy), které nestačí na vyvolání přímé smrti buňky v interfázi. Ukazuje se tedy, že buňky, které se rychle dělí, mají vyšší radiosenzitivitu.

Při menších dávkách záření nedochází bezprostředně k usmrcení buňky ani k zástavě buněčného dělení, avšak vzniklé radikály mohou vyvolat chemické změny v DNA a tím i v chromozomech nesoucích zakódované genetické informace. Tyto změny – mutace – se pak při dělení mohou přenášet na další buněčné generace. Podle svého rozsahu se mutace rozdělují na bodové neboli genové a chromozomové (chromozomové aberace či změny počtu chromozomů). Z hlediska reprodukčního se mutace dělí na somatické, které se projevují jen u konkrétního ozářeného jedince v ozářené tkáni (kde mohou vést k pozdnímu somatickému poškození a vzniku zhoubných nádorů), a na gametické mutace u zárodečných buněk, které se mohou přenášet na další generace v potomstvu ozářených osob.

Ozáření buněk vede tedy k řadě škodlivých změn, z nichž sice značná část může být reparačními mechanismy organismu napravena, avšak některé změny (např. v kódu DNA) mohou být trvalé nebo se mohou reprodukovat. Na účinky ionizujícího záření jsou citlivé zejména tkáně s intenzivním dělením buněk, jako jsou např. krvetvorné nebo nádorové, vyvíjející se plod (zvláště v počátečních stádiích vývoje) (Konečný, 2007a).

Ionizace a vznik volných radikálů v těle

Primárním působením ionizujícího záření na látku je excitace a ionizace atomů, která může vést k chemickým účinkům a v případě živé tkáně k biochemickým změnám. Při ozáření látek obsahujících vodu dochází vlivem ionizace k radiolýze vody, přičemž vznikají i velmi reaktivní volné radikály $H\bullet$ a $OH\bullet$. Volné radikály jsou takové atomy a molekuly, které mají na posledním orbitě elektronového obalu jeden nebo více nespárovaných elektronů. Takový atom či molekula je pak

¹⁷ Dávka je zde uvažována z hlediska množství energie ionizujícího záření absorbované v organismu – proto jsou uváděny jednotky Gy.

značně nestabilní a reaktivní. Snaží se dostat do rovnovážného stavu tím, že získá z okolních molekul jiný elektron „do páru“. Při této reakci se molekula, která elektron ztratila, může stát novým radikálem. Kromě volných radikálů podobné vlastnosti vysoké reaktivity vykazují i některé jiné látky, jejichž molekuly nemají nepárové elektrony. Je to např. peroxid vodíku H_2O_2 , kyselina chlorná, nebo atomární kyslík. I tyto látky vznikají při ozáření a podílejí se na biologických (Ullmann, on line).

Volné radikály vstupují v biologickém prostředí do mnoha reakcí. Je to např. lipoperoxidace tuků (za vzniku aldehydů), oxidace proteinů, glykace proteinů s glukózou, změny v řetězcích RNA a DNA, které mohou vést k mutacím. Během milionů let evoluce se organismy částečně „naučily“ využívat volné radikály i ke svému prospěchu. Příkladem jsou bílé krvinky obsahující prekurzory a enzymy, které jsou schopné generovat volné radikály; ty se pak účastní likvidace bakterií ve fagocytech. Z hlediska biologických účinků záření se zde však budeme zabývat především takovými reakcemi volných radikálů, které vedou k poškození buněk.

Hodnocení účinků záření

Biologické účinky záření jsou přímo úměrné dávce záření, která představuje celkovou energii, kterou záření předalo látce. Ta je vyjádřena veličinou, která se nazývá dávka záření D a definuje se jako poměr střední energie dE ionizujícího záření, která se absorbovala objemovým elementem látky o hmotnosti dm :

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (\text{rovnice 2-2})$$

Jednotkou radiační dávky je gray (Gy), který odpovídá 1 J.kg^{-1} .

Lidské tělo může být ozářeno různým druhem záření a na různé úrovni organismu. Jelikož biologická účinnost různých druhů záření se může značně lišit (v závislosti právě na hustotě ionizace), byl pro účely radiobiologie a radiační ochrany pro každý druh záření zaveden tzv. radiační váhový faktor w_R (nazývaný též „relativní biologická účinnost“). Ten udává, kolikrát je daný druh záření biologicky účinnější než záření X (rentgenové) nebo gama (za základ se bere rentgenové záření o energii 200 keV). Hodnota jakostního faktoru w_R závisí na druhu a energii záření. Pro záření X, gama a beta je jakostní faktor $w_R = 1$, pro neutrony nabývá w_R hodnot

od 5 do 20¹⁸, pro protony $w_R = 10$, pro záření alfa, těžká jádra a štěpné fragmenty je $w_R = 20$. Výsledný účinek záření na živou tkáň se pak vyjadřuje pomocí tzv. ekvivalentní dávky¹⁹ H_T , která je součinem radiačního váhového faktoru pro dané záření (index R) a střední dávky absorbované v orgánu nebo tkáni (index T) (D_{TR}) (viz rovnice 2-3).

$$H_T = w_R \cdot D_{TR} \text{ (rovnice 2-3)}$$

Jednotkou dávkového ekvivalentu je 1 Sievert (Sv).

S ohledem na výše uvedené jsou biologické účinky beta a gama záření stejné, zatímco biologické účinky záření alfa jsou dvacetkrát větší než záření beta nebo gama. Dávka 1 mGy vyvolá v případě beta a gama záření ekvivalentní dávku 1 mSv, v případě alfa záření 20 mSv (Švec, 2005). Jelikož tedy dávka 1 Sv jakéhokoli záření má stejné biologické účinky jako dávka 1 Gy rentgenového nebo gama záření (pro které je jakostní faktor stanoven 1), pak kupříkladu v případě výbuchu jaderné zbraně, kde nejhorší následky způsobuje celotělové ozáření gama zářením, odpovídá ekvivalentní dávka H_T dávce D .

Ovšem v těle člověka jsou různé tkáně a orgány nejen různě citlivé vůči působení jednotlivých druhů záření, ale především jejich radiační poškození vede k různě závažným zdravotním následkům pro celý organismus. Pro každý orgán a tkáň byly proto na základě statistických analýz zavedeny vlastní koeficienty rizika vzniku poškození zářením – váhové faktory w_T . Pro co nejobektivnější posouzení celkového účinku záření pak slouží „korigovaná“ dávková veličina, která již zohledňuje i rozdílnou biologickou účinnost jednotlivých druhů záření. Touto veličinou je **efektivní dávka** (E). Ta představuje váženou střední hodnotu ekvivalentních dávek H_T v tkáních a orgánech lidského těla a stanoví se ze vztahu:

18 Hodnoty w_R pro neutrony různých energií:

Energie neutronů	w_R
do 10 keV	5
10 keV až 100 keV	10
100 keV až 2 MeV	20
2 MeV až 20 MeV	10
nad 20 MeV	5

19 Ekvivalentní dávka je někdy nesprávně zaměňována s „dávkovým ekvivalentem“. Ačkoli není žádný fyzikální rozdíl mezi těmito veličinami, podstatou dávkového ekvivalentu je, že udává dávku vztahenou k bodovému ozáření dané tkáně nebo orgánu, zatímco ekvivalentní dávka udává dávku vztahenou k ozáření celé uvažované tkáně nebo orgánu.

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (\text{rovnice 2-4})$$

Jednotkou efektivní dávky je Sievert (Sv).

Tkáňový váhový faktor w_T vyjadřuje rozdílnou radiosenzitivitu jednotlivých orgánů a tkání z hlediska pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků (zhoubných nádorů a genetických změn). Má následující hodnoty: 0,20 pro gonády, 0,12 pro střevo, plíce, červenou kostní dřeň a žaludek, 0,05 pro močový měchýř, prs, játra, jícen, štítnou žlázu a ostatní orgány, 0,01 pro povrchy kostí a kůže. Vyšší hodnota w_T znamená vyšší radiosenzitivitu z hlediska stochastických účinků. Součet všech váhových faktorů příslušných jednotlivým orgánům a tkáním v těle člověka je roven hodnotě 1. Jinými slovy, tkáňové váhové faktory vyjadřují relativní podíl jednotlivých orgánů a tkání na celkovém riziku stochastických poškození zdraví při celotělovém ozáření.

Individuální efektivní dávky E , které obdrží jednatel za rok od různých zdrojů záření, jsou uvedeny v Tabulce 19.

Tabulka 19: Individuální ekvivalentní dávky pro jednotlivé zdroje záření.

Zdroje ionizujícího (radioaktivního) záření	Efektivní dávka E (mSv.rok ⁻¹)
Přírodní zdroje	
Kosmické záření	0,28 – 0,39
Záření zemské kůry	0,28 – 0,46
Vnitřní radiace (vdechnuté a požitá radioizotopy)	0,23 – 0,3
Radon a jeho dceřiné produkty	1,3
Celkové přirozené pozadí u nás	2,4
Celkové přirozené pozadí ve výšce 3000 m n. m.	1,7
Přirozené pozadí v indickém státě Kerala	až 26
Přirozené pozadí v některých pobřežních státech Brazílie	až 430
Umělé zdroje	
Radon uvolňovaný ze stavebních materiálů	1 – 3
Lékařské aplikace	0,6 – 0,9
Barevná televize	0,001
Radioaktivní spad z pokusných jaderných výbuchů	0,04 (údaj z roku 1980) 0,01 (údaj z roku 2000)
Jaderné elektrárny – pro obyvatelstvo	0,001 – 0,003
Jaderné elektrárny – pro personál JE	0,01
Jeden přelet Atlantského oceánu	0,025
Popílek z uhelných elektráren	0,02 – 0,11

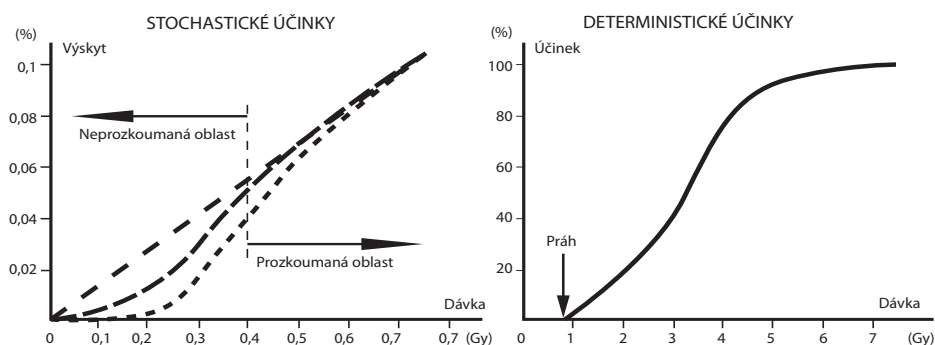
Zásadní výhodou zavedení efektivní dávky je, že umožňuje vyjádřit – při nerovnoměrném ozáření – radiační zátěž celého organismu jediným číslem, tj. převést tak účinky ozáření jakékoli tkáně, orgánu nebo části těla na srovnatelné účinky, které by vzniklo následkem rovnoměrného ozáření celého těla. To umožňuje porovnávat radiační zátěže osob z nejrůznějších zdrojů, nejčastěji z radioizotopových a rentgenových vyšetření, či z různých druhů radiofarmak v nukleární medicíně.

Radiosenzitivita a působení ionizujícího záření na organismus

Lidský organismus je funkční celek jednotlivých tkání a orgánů, které mají různou citlivost k ozáření, tzv. radiosenzitivitu. Při stejné absorbované dávce se v různých tkáních projeví různé biologické účinky. Obecně platí, že zvláště vysokou radiosenzitivitu vykazují tkáně, v nichž probíhá rychlé buněčné dělení. Z hlediska destrukce tkáně ionizujícím zářením jsou nejcitlivější lymfoidní orgány, aktivní kostní dřeň, pohlavní orgány a střevo a z hlediska cytogenetického efektu pak kostní dřeň, žaludek a plíce (Švec, 2005). Biologické účinky rozdělujeme na:

- Časné (projeví se v krátkém čase po ozáření většími jednorázovými dávkami) a pozdní (projeví se po delším časovém odstupu).
- Somatické (týkají se ozářeného jedince) a genetické (týkají se potomstva ozářeného jedince).
- Nestochastické (prahové, deterministické) a stochastické (neprahové).

Z pohledu vztahu dávky záření a následků je nutné vzít v úvahu, že k poškození nebo zániku buněk a následné ztrátě funkce tkání a orgánů nejčastěji dochází až po překročení určité dávky záření (prahu) v příslušných tkáních a orgánech. S růstem dávky dochází k nárůstu ztráty buněk. Dojde-li postupně k usmrcení určitého kritického počtu buněk, dojde k pozorovatelnému zhoršování funkce orgánů či tkání, v extrémním případě až k smrti organismu. V takovém případě hovoříme o **deterministických účincích**. Z hlediska těchto účinků tedy existují podprahové dávky, které nemají žádný viditelný nežádoucí účinek, tj. orgány a tkáně jsou schopny dál plnit plnohodnotně své funkce a postupně poškozené buňky i nahradit. Ochranu proti deterministickým účinkům je proto možno zajistit zamezením dosahování prahových dávek pro jednotlivé tkáně a orgány. Z tohoto důvodu byly také stanoveny závazné limity pro tkáňové a celotělové dávky (Vyhláška č. 307/2002 Sb. v platném znění). Druhým typem významných biologických změn v důsledku ozáření jsou **stochastické účinky**, které jsou důsledkem změn v ozářených buňkách (viz obrázek 28). V ozářené buňce dochází ke změnám na biochemické úrovni, takže se po velkém časovém odstupu (není-li organismem odhalena a zlikvidována) může postupným množením vyvinout až v nádor. Organismus má obranné a reparační schopnosti, nicméně nejsou známy žádné nízké dávky, pod nimiž by ke vzniku nádoru nemohlo dojít. Z hlediska jednotlivce roste s dávkou záření pravděpodobnost vzniku nádoru, nikoliv intenzita nebo stupeň účinku. Nemůžeme tedy vznik těchto poškození po ozáření zcela vyloučit; můžeme pouze omezit pravděpodobnost jejich vzniku na míru pokládanou za přijatelnou pro jednotlivce a společnost (Konečný, 2007b).



Obrázek 28: Vztah dávky a účinku pro stochastické, resp. deterministické účinky ionizujícího záření.

Poškození stochastická vznikají s určitou pravděpodobností v závislosti na kumulované dávce. Pravděpodobnost účinku je funkcí této dávky, jak ukazuje tabulka 20.

Tabulka 20: Pravděpodobnost poškození při ozáření celého těla.

Kumulovaná dávka (Gy)	Pravděpodobný účinek
0 – 0,25	Žádné poškození ani klinické změny
0,25 – 0,5	Žádné vážné poškození, možné krevní změny
0,5 – 1	Značné krevní změny bez nebezpečí invalidity
1 – 2	Značné obecné poškození, možná invalidita
2 – 4	Invalidita, možnost úmrtí
4 – 6	cca 60 % smrtelná
6 a více	100 % smrtelná

Následky poškození lidského organismu se projevují řadou příznaků, a to v závislosti na dávce ozáření, jak dokumentuje tabulka 21.

Buňky lidského těla mají jistou schopnost opravit poškození vzniklé ozářením pomocí **reparačních mechanismů** (blíže viz kapitola 2.3.4). Tyto mechanismy se však mohou projevit většinou jen tehdy, není-li přísun energie do buněk příliš rychlý. Proto celkový účinek záření závisí také na dávkovém příkonu²⁰. Prakticky to znamená, že při určité dávce je poškození organismu menší, je-li tkáň nebo organismus touto dávkou ozářen nikoliv najednou, ale je-li dávka buď rozprostřena kontinuálně na delší dobu, nebo rozdělena na několik menších dávek s časovými

²⁰ Přírůstek dávky za časový interval (Gy.s⁻¹).

prodlevami mezi nimi (frakcionace dávky). V časových prodlevách při frakcionaci, resp. během ozařování při menším dávkovém příkonu, se pak reparační procesy mohou uplatnit (Švec, 2005).

Radiační hormeze a adaptivní odezva

Někteří odborníci se domnívají, že přiměřené množství poruch vyvolaných malou dávkou záření může v organismu iniciovat a stimulovat reparační mechanismy na úrovni chromozomů, které opraví nejen tyto radiační poruchy, ale „přiberou“ i řadu dalších defektů vzniklých při metabolismu, které by jinak mohly zůstat neopraveny. Tato radiační hormeze, či adaptivní odezva na ozáření buněk a organismů, je jakási obdoba imunizace v organismu.

Podle těchto názorů (dosud však též spolehlivě neprokázaných) by tedy malé dávky záření mohly být pro organismus dokonce prospěšné. Nízká dávka záření spustí signál vydávaný poškozenými DNA a následný reparační proces opraví veškeré nalezené chyby (a odstraní ty nukleotidy, jež opravit nelze). Je-li množství poškození způsobených zářením menší než je kapacita reparačního systému, opraví se i další chyby. Po ozáření malou dávkou je v DNA méně chyb než před ním – dochází k pozitivnímu účinku. Při vyšší dávce, kdy rozsah radiačního poškození překročí reparační kapacitu, je již účinek ozáření negativní.

Při radiační adaptivní odezvě se může uplatňovat několik mechanismů:

- Časový – zpomalení buněčného cyklu, takže do začátku další mitózy se některá poškození stačí opravit.
- Chemický – neutralizace a tím detoxikace reaktivních radikálů.
- Biochemický – aktivace enzymů podílejících se na reparaci.
- Imunitní – stimulace obranných mechanismů na úrovni celého organismu, které by mohly napomoci eliminaci buněk změněných nejen vlivem radiace.

Určitá malá „přípravná či preventivní“ dávka záření může tak chránit buňky proti poškozením vyvolaným následnou mnohem vyšší dávkou. Malá dávka aktivuje v buňce enzymy určené k opravě genetické informace, díky čemuž se buňka snáze vypořádá s případnými následky silnějšího ozáření. Co se týče vlivu záření na složité mnohobuněčné organismy, vyskytuje se i názor, že malá dávka záření

nebo některých toxinů zbavuje organismus buněk, které mají oslabené reparační mechanismy a u kterých by v budoucnu hrozilo, že propadnou zhoubnému bujení (Ullmann, on line).

Akutní radiační syndrom

Akutní radiační syndrom, známý také jako otrava radiací nebo nemoc z ozáření, je forma poškození orgánových tkání způsobená nadměrným vystavením se ionizujícímu záření. Termín je obecně používán pro označení akutních problémů způsobených vysokou dávkou radiace po krátkou dobu. Mnoho ze symptomů otravy radiací nastane, když radiace poškodí dělení buněk (Wikipedie, on line).

Podle umístění zdroje záření rozdělujeme radiační poškození organismu po zevním nebo po vnitřním ozáření. Nejzávažnější je jednorázové celotělové ozáření, které nastává například při výbuchu jaderné zbraně. Po jednorázovém nebo opakovaném zevním ozáření celého těla nebo jeho větší části ionizujícím zářením se rozvíjí v závislosti na dávce akutní nemoc z ozáření (viz tabulka 21).

Tabulka 21: Následky ozáření organismu na základě obdržené efektivní dávky (Ullmann, on line).

Efektivní dávka (Sv)	Následky/příznaky	Pravděpodobnost úmrtí
0,05 – 0,2	Žádné příznaky. Úroveň je potenciálně nebezpečná pro pozdější vznik rakoviny a změny v genetickém kódu.	Úmrtí se nepředpokládá
0,2 – 0,5	Žádné znatelné symptomy. Počet červených krvinek se dočasně snižuje.	Úmrtí se nepředpokládá
0,5 – 1	Mírná nemoc z ozáření s bolestmi hlavy a zvýšeným rizikem infekce z důvodu narušení imunitních buněk. Dočasná sterilita u mužů je možná	Úmrtí se nepředpokládá
1 – 2	Typickými příznaky jsou mírná až střední nevolnost s příležitostným zvracením začínajícím 3 až 6 hodin po ozáření a končícím do jednoho dne. Dále následuje 10denní až 14denní latentní fáze, po které se objeví lehké symptomy jako vyčerpání. Imunitní systém je utlumený, nemoci se léčí pomaleji a je zvýšené riziko infekce. Dočasná mužská neplodnost je obvyklá. U těhotných žen nastane spontánní potrat nebo narození mrtvého plodu.	10 % po 30 dnech
2 – 3	Nevolnost je obvyklá, s 50 % rizikem zvracení. Příznaky nastupují od 1 do 6 hodin po ozáření a končí po jednom až dvou dnech. Poté nastává latentní fáze, při které vypadají všechny vlasy a chlupy po těle, objeví se únava a celkově nezdavý vzhled. Při takovýchto úrovních ozáření prudce klesne počet leukocytů (bílých krvinek), což výrazně zvyšuje nebezpečí infekcí. Existuje možnost permanentní ženské sterility. Rekonvalescence trvá několik měsíců.	35 % úmrtnost po 30 dnech
3 – 4	Symptomy jsou podobné jako u dávky 2 – 3 Sv, navíc s nekontrolovatelným krvácením z úst, zpod kůže a z ledvin.	50 % úmrtnost po 30 dnech

Efektivní dávka (Sv)		Následky/příznaky	Pravděpodobnost úmrtí
4 – 6		Příznaky začínají půl hodiny až 2 hodiny po ozáření a končí do dvou dnů. Po 7 až 14 dnech latentní fáze, nastávají stejné příznaky jako po 3 – 4 Sv. Při této úrovni je obvyklá ženská sterilita. Pokud jsou v kostní dřeni zachovány ostrůvky funkčních kmenových buněk krvetvorby, může jejich dělením docházet k postupné regeneraci po 6 až 8 týdnech. Než se ale nemocný uzdraví, trvá několik měsíců až rok. Pokud je expozice radiací delší, zasažený umírá na infekce a vnitřní krvácení.	60 % úmrtnost po 30 dnech
Akutní nemoc z ozáření	6 – 10	Přežití závisí na intenzivní lékařské péči. Kostní dřev je skoro kompletně zničená, je nezbytná její transplantace. Gastrické a střevní tkáně jsou vážně poškozené. Zde dochází k závažným poruchám hospodaření organismu s tekutinami a minerály. Příznaky začínají 15 až 30 minut po ozáření a končí do dvou dnů. Nemocný pociťuje nevolnost, zvrací, má vodnaté nebo krvavé průjmy, dostavuje se paralytický ileus. Časté jsou vnitřní krvácení, rozvoj infekcí a v těle postiženého nastává naprostý rozvrat funkce orgánů a vnitřního prostředí. Nejkritičtější průběh je období ve 2. a 3. týdnu po ozáření. Rekonvalescence trvá několik let a osoba se pravděpodobně nikdy plně nezotaví, Pokud není léčba nasazena, umírá postižený po 5 až 10 dnech.	Téměř 100 % úmrtnost po 14 dnech
	10 – 50	Expozice takovéto úrovně vede ke spontánním symptomům po 5 až 30 minutách. Po silné vyčerpanosti a okamžité nevolnosti způsobené přímou aktivací chemických receptorů v mozku po ozáření nastává perioda několika dní relativní pohody, nazývaná latentní fáze. Poté buněčná smrt v gastrické a střevní tkáni, způsobující masivní průjem, střevní krvácení a ztrátu vody, vede k vodo-elektrolytické imbalance. Smrt nastane s deliriem a kómatem způsobeným selháním oběhu. Úmrtí je, prakticky nevyhnutelné; jedinou léčbou je podávání léků utišujících bolest.	100 % úmrtnost po 7 dnech
	50 – 80	V rádech minut nebo sekund nastupuje nervová forma akutní nemoci z ozáření spojená se zánikem většího množství nervových buněk, následnými poruchami orientace a koordinace, postupně nemocný upadá do bezvědomí a během několika hodin umírá.	100 % úmrtnost v rádech hodin
	> 80	Totální zničení buněk organismu, denaturace bílkovin a okamžitá smrt.	100 % úmrtnost v několika vteřinách

Dojde-li pouze k lokálnímu ozáření povrchu těla, hovoříme o akutní radiační dermatitidě. Dávkami nad 3 Sv dochází k dermatitidě 1. stupně – k erytému (zrudnutí) kůže a ztrátě ochlupení, při dávkách nad 10 Sv pak dermatitida 2. stupně spojená s puchýři a vředy na kůži, dále k nekróze (dermatitis 3. stupně). Radiační dermatitidy jsou doprovázeny degenerativními změnami kůže a obtížně se hojí (Ullmann, on line).

Při dlouhodobém zevním ozáření malými dávkami vzniká chronická forma nemoci z ozáření. Vzniká pozvolně a nenápadně a jejími následky jsou únava, neuropsychotické potíže, celkové chátrání organismu a postupně může vést až k poškození kostní dřevě.

2.3.4 Reparační procesy v organismu

Při ozáření živé tkáně nedochází pouze k jednosměrným a nevratným změnám vedoucím k poškození buněčných struktur a jejich funkcí. V biologickém stádiu radiačního účinku probíhají též procesy protichůdné – procesy reparace a regenerace, které vedou k obnově schopnosti buněčného dělení a funkce tkání a orgánů. Probíhají v podstatě dva druhy reparačních procesů na dvou různých úrovních:

- Na úrovni postižené buňky – vlivem chromozomových reparačních mechanismů může buňka během několika hodin od ozáření obnovit svou schopnost dělení.
- Na úrovni postižené tkáně – reparace se uskutečňuje náhradou zničených buněk pomocí dělení přežívajících buněk, které si zachovaly normální schopnost dělení. Tento reparační proces trvá dny až týdny. V některých případech je zničená tkáň nahrazena funkčním pojivem (Konečný, 2007a).

Účinky ozáření tkáně člověka mohou za určitých podmínek měnit některé látky. Mohou je zvyšovat (radiosenzibilizátory) nebo snižovat (radioprotektiva). Radiosenzibilizátory (např. aktinomycin D, halogenované pyrimidiny, alkylující činidla, aj.) zesilují reakce normálních tkání a také regresi nádorů po ozáření. V případě ozáření rentgenovým nebo gama zářením se uplatňuje také tzv. **kyslíkový efekt**, při němž významnou roli sehrává množství kyslíku přítomného v tkáni. Bylo totiž zjištěno, že dávka potřebná k vyvolání stejného biologického účinku je 2 až 3krát větší v tkáni, která je špatně zásobena kyslíkem, než v tkáni, kde je ho dostatek. Přítomnost kyslíku totiž zvyšuje vznik radikálů a brání reparativním pochodům v buňce. Proto taky nádorové buňky, které jsou vzdálené od kapilár a jsou tedy kyslíkem zásobeny nedostatečně, jsou méně citlivé na ionizující záření. Opačně působící látky, tj. radioprotektiva, které snižují účinky ionizujícího záření, a tedy napomáhají léčbě ozářených jedinců, jsou spíše výjimkou. Bohužel však radioprotektiva, která člověk dobře snáší (některé bílkoviny, hormony a vitamíny), jsou jen nepatrně účinná, zatímco potenciálně účinná (např. látky obsahující síru jako cystein, aktivní aminoskupinu jako serotonin, histamin nebo tryptamin, a enzymatické inhibitory jako kyanidy, nitrily, azidy, fenony, aj.) jsou pro člověka toxická. Jejich nevýhodou také je, že účinky záření snižují jen při podání bezprostředně před ozářením, takže pro jejich použití po případném radiačním incidentu je využít nelze (Kotalová a kol., 2005). Dá se tedy říci, že jedinou účinnou ochranou před následky ozáření stále zůstává minimalizace expozice za pomoci dostatečného stínění (Švec, 2005).

2.4 Radiační ochrana a posouzení přijatelnosti expozice

Obecně lidé vykonávají nějakou činnost, pokud jim přináší větší výhody a přínos, než jaké jsou náklady a s nimi spojené nevýhody. Jde tedy o dostatečný čistý přínos. Výhody a nevýhody při tom nemusí mít nevyhnutně materiální podobu. Aplikujeme-li tento přístup na oblast radiační ochrany, budeme usilovat o to, aby všechny dávky byly tak nízké, jak je rozumně dosažitelné při uvážení ekonomických a sociálních hledisek. Hovoříme o optimalizaci ochrany před zářením (Konečný, 2007b).

2.4.1 Principy radiační ochrany

Každá dávka je spojená s určitým rizikem, jež nezávisí na dávkách obdržných dříve nebo později (pokud zůstáváme pod prahem deterministických účinků). Dávky lze u jednotlivce sčítat a takto kumulovaná dávka je mírou rizika či újmy pro jednotlivce. Dávky lze sčítat i přes ozářené jedince a kolektivní efektivní dávka může sloužit jako míra společenské zdravotní újmy. Takové přístupy jsou výsledkem ozřejnění existence stochastických účinků a znalostí koeficientů rizika ozáření jednotlivých tkání. Toto právě umožnilo zavedení veličiny efektivní dávky jako míry celkové újmy, a to i při nehomogenním ozáření více orgánů a tkání, jež je typické pro většinu ozáření (Konečný, 2007b). Z obecného hlediska se při zajišťování cílů radiační ochrany používají tři základní principy:

- princip optimalizace,
- princip odůvodněnosti a
- princip limitování.

Princip optimalizace

Při činnostech doprovázených ionizačním ozářením je nutno dodržovat takovou úroveň radiační ochrany, aby riziko škodlivých účinků bylo optimálně nízké, nakolik je lze rozumně dosáhnout z hlediska technických a ekonomických hledisek. Tento princip optimalizace radiačního ozáření se označuje zkratkou **ALARA** (As Low As Reasonably Achievable), dosažení tak nízkých dávek, jaké jsou přiměřené objektivním možnostem a potřebám. Princip optimalizace je velmi důležitou a rozumnou „střední cestou“ mezi podceňováním rizika na jedné straně a na druhé straně hysterickými požadavky (plynoucími často z účelově podněcované radiofobie) na zajištění absolutní ochrany a nulových dávek, ať to stojí cokoli, bez ohledu na možnou kontraproduktivnost i z hlediska proklamovaných cílů²¹ (Ullmann, on line).

²¹ Tento maximalistický přístup se někdy uvádí pod zkratkou ALAPA (As Low As

Princip odůvodnění

Při činnosti vedoucí k ozáření ionizujícím zářením je nutno zajistit, aby toto ozáření bylo odůvodněno přínosem, který vyvažuje (či lépe převažuje) rizika, která při této radiační činnosti vznikají. Objektívni posuzování odůvodnění radiačního ozáření může být značně složité a diskutabilní. Vstupuje zde do hry mnoho faktorů přínosů, ztrát a nákladů (souvisí i s následujícím aspektem optimalizace), z nichž některé ani nelze kvantitativně vyčíslit. Přesto se někdy podobné vyčíslování provádí (pomocí vzorce, v němž se od pozitivního výsledku radiační činnosti odpočítávají ztráty plynoucí z radiačního rizika, náklady na radiační ochranu a příp. další položky) (Ullmann, on line).

Relativně společensky nejakceptovatelnější je expozice ionizujícímu záření využívaného pro zdravotní účely. Tato oblast je totiž bedlivě sledována, a to jak regulátory, tak veřejností. Radiační ochrana pacientů vychází ze základního etického požadavku, aby riziko radiačního poškození při diagnostických nebo terapeutických výkonech bylo vyváženo (nebo lépe pokud možno převáženo) očekávaným zdravotním přínosem pro pacienta. Tento základní požadavek při medicínské aplikaci ionizujícího záření se v radiační ochraně nazývá princip odůvodnění lékařského ozáření.

Z hlediska principu odůvodnění je při diagnostice v nukleární medicíně potřeba aplikovat takové nezbytně nutné množství radioaktivní látky (požadované kvality a čistoty), které zaručuje dostatečnou diagnostickou informaci při co nejnižší radiační zátěži pacienta. Pro optimalizaci množství aplikované radioaktivity různých radiofarmak u jednotlivých vyšetřovacích metod byly vypracovány tabulky směrných hodnot, nazývaných též diagnostické referenční úrovně, které umožňují i přepočet aplikované aktivity pro jednotlivé pacienty, většinou podle hmotnosti pacienta (i nestandardní – např. děti, osoby s nadváhou apod.). Průměrná radiační zátěž pro nejčastější metody RTG diagnostiky a radioizotopové diagnostiky v nukleární medicíně je uvedena v tabulce 22 (vychází se z materiálů IAEA). Jedná se o přibližné průměrné hodnoty za předpokladu, že jsou dodrženy směrné hodnoty energie, intenzity a doby expozice u RTG diagnostiky a směrné hodnoty aplikované aktivity u metod nukleární medicíny (zde se u všech uvedených metod jedná o radiofarmaka značená ^{99m}Tc) (Ullmann, on line).

Aktivita každé radioaktivní látky aplikované pacientovi (zvláště pak terapeutické aplikace) musí být změřena na správně kalibrovaném a metrologicky ověřovaném měřiči aktivity. Hodnota aplikované aktivity musí být zapsána v dokumentaci

Possible Achievable) – dosažení co nejnižších dávek, jak je to jen možné. Vedle radiační ochrany se můžeme s tímto přístupem setkat i v řadě jiných oblastí medicíny a techniky, někdy i ve znění „As Low As Practically Achievable“, „As Low As Practically Applicable“, nebo také jako „As Low As Reasonable Practicable“ – tj. ALARP, používaný v managementu rizik.

o diagnostice či terapii. U těhotných žen se provádí radiodiagnostické úkony spojené s ozářením jen v nezbytně nutných případech, přičemž se volí co nejšetrnější metody, aby nedošlo k poškození plodu (Ullmann, on line).

Tabulka 22: Přibližná radiační zátěž pro nejčastější metody rentgenové a radioizotopové diagnostiky (Ullmann, on line).

Použití	Efektivní dávka (mSv)
Rentgenová diagnostika	
Snímek plic	0,05
Páteř	1,8
Břicho	3 – 8
Urografie	2,1
Mamografie	0,5
Angiografie	3 – 9
CT hlava	1,1
CT tělo	9,2
Radioizotopová diagnostika	
Statická scintigrafie ledvin	1,5
Dynamická scintigrafie ledvin	2,2
Dynamická cholescintigrafie	2,3
Scintigrafie skeletu	3,4
Perfúzní scintigrafie plic	1,2
Scintigrafie štítné žlázy	2,2
Scintigrafie perfuze myokardu	7,5

Princip limitování

Při činnostech s ionizujícím zářením je třeba omezovat ozáření osob tak, aby celková radiační dávka za určitá období (většinou 1 rok a 5 let) nepřesahovala stanovené limity (blíže viz kapitola 2.4.2).

2.4.2 Dávkové limity

Dávkové limity představují nejvyšší přípustné dávky, které mohou radiační pracovníci i jednotlivci z obyvatelstva obdržet. Jsou to závazné kvantitativní ukazatelé, jejichž překročení není z hlediska radiační ochrany přípustné. Dávkové limity rozdělujeme na:

- obecné limity (limity pro obyvatelstvo) a
- limity pro pracovníky se zářením.

Limity pro radiační pracovníky jsou samozřejmě vyšší než limity obecné. Limity ozáření se nevztahují na:

- Ozáření z přírodních zdrojů, kromě ozáření z těch přírodních zdrojů, které jsou vědomě a záměrně využívány (např. těžba uranové rudy).
- Lékařské ozáření, zde jsou stanoveny tzv. diagnostické referenční úrovně, které nemají charakter limitů.
- Havarijní ozáření zasahujících fyzických osob, toto ozáření nesmí překročit desetinásobek limitů pro radiační pracovníky, pokud nejde o případ záchrany lidských životů nebo zabránění rozvoje mimořádné situace s možnými společenskými a hospodářskými důsledky (Švec, 2005).

V následující tabulce 23 jsou uvedeny konkrétní hodnoty limitů.

Tabulka 23: Povolené dávkové limity pro obyvatelstvo i pro pracovníky se zářením (vyhláška č. 307/2002 Sb. v platném znění).

Obecné limity (pro obyvatelstvo)	
<i>Efektivní dávka</i>	
za kalendářní rok	1 mSv
za dobu pěti po sobě jdoucích kalendářních roků	5 mSv
<i>Ekvivalentní dávka</i>	
v oční čočce za kalendářní rok	15 mSv
v 1 cm ² kůže za kalendářní rok	50 mSv
Limity pro pracovníky se zářením	
<i>Efektivní dávka</i>	
za kalendářní rok	50 mSv
za dobu pěti po sobě jdoucích kalendářních roků	100 mSv
<i>Ekvivalentní dávka</i>	
v oční čočce za kalendářní rok	150 mSv
v 1 cm ² kůže za kalendářní rok	500 mSv

Poznámka: Efektivní dávka zahrnuje jak vnější, tak vnitřní ozáření. Efektivní dávka se týká celotělového ozáření, ekvivalentní dávka pak orgánů, kterými záření do těla vstupuje (kůže, oční čočka).

2.4.3 Základní způsoby ochrany před zářením

Úkolem radiační ochrany je snížení absorbované dávky ionizujícího záření v organismu na co nejnižší míru a tím podstatné omezení rizika nežádoucích deterministických či stochastických účinků záření. Obdržená dávka záření je určena několika základními faktory: aktivitou zářiče, druhem a energií emitovaného záření, s nímž pracujeme, dobou expozice a geometrickými podmínkami (vzdálenost, stínění). Jsou tedy tři základní způsoby ochrany před vnějším ionizujícím zářením (+ čtvrtý způsob při práci s otevřenými zářiči):

Doba expozice

Absorbovaná dávka záření je přímo úměrná době expozice, po kterou se nacházíme v poli záření. Zkrácením doby pobytu v exponovaném místě můžeme tedy úměrně snížit obdrženou dávku záření. Takže se zbytečně dlouho nezdržujeme v prostoru s ionizujícím zářením a práce s radioaktivními látkami je třeba promyšleně připravit a provádět je pokud možno rychle.

Vzdálenost od zdroje záření

Dávkový příkon a dávka jsou nepřímo úměrné druhé mocnině vzdálenosti od zdroje záření (přesně platí pro bodový zdroj). Je proto třeba se zdržovat co nejdále od zdrojů záření (tedy i od pacientů s aplikovanou aktivitou), při práci se zářiči je užitečné držet je co nejdále od těla a případně používat vhodné manipulátory, pinzety apod. (Ullmann, on line).

Stínění

Velmi efektivní ochranou je odstínění záření vhodným absorbujícím materiálem. Interakce záření s látkovým prostředím vede k absorpci určitého množství záření (někdy i veškerého záření) a tím k zeslabení toku záření. Postavíme-li tedy záření do cesty vhodný stínicí materiál, můžeme dosáhnout podstatného snížení intenzity záření, někdy dokonce úplného odstínění záření. Pro jednotlivé druhy záření se stínění provádí následujícími způsoby (Ullmann, on line):

- Stínění záření gama a X (RTG) – nejvhodnějšími stínicími materiály jsou látky s velkou hustotou – především olovo, ze stavebních materiálů pak beton s příp. příměsí barytu apod. Používají se olověné (ojediněle i wolframové) kontejnery pro přepravu a skladování zářičů, zástěny z olověného plechu, tvarované olověné cihly atd. Pro účinné odstínění záření gama o energii cca 100 keV stačí vrstva olova tloušťky 2 milimetry. Čím vyšší je energie fotonů záření gama, tím silnější vrstvu stínění je nutno použít. Pokud je

potřeba zachovat optickou viditelnost, používá se olovnaté sklo s vysokým obsahem oxidu olovnatého v tavenině.

- Stínění záření beta – stačí lehké materiály (jako je plexisklo) tloušťky cca 5 až 10 milimetrů, nejlépe v kombinaci s následnou tenkou vrstvou olova k odstínění brzděného elektromagnetického záření vzniklého zabrzděním elektronů v lehkém stínícím materiálu. Olovo samotné není pro záření beta vhodným stínícím materiálem, neboť v něm vzniká tvrdé a intenzivní brzděné záření, k jehož odstínění by bylo nutno použít zbytečně silnou vrstvu olova.
- Stínění záření alfa – vzhledem k malé pronikavosti jader hélia (části záření alfa) lze toto záření odstínit velmi snadno. Stačí tenká vrstva (milimetrová) lehkého materiálu, např. plastu či papíru. Často není proti záření alfa potřeba stínit vůbec, protože i ve vzduchu je dolet částic jen několik centimetrů, při vyšších energiích maximálně desítky centimetrů. Pokud je zářič smíšený, tj. emituje alfa i gama záření (což je velmi častý případ), je nutno odstínit především gama záření, čímž automaticky dokonale odstíníme i záření alfa.
- Stínění neutronového záření – je obecně složitějším problémem než stínění proti záření beta či gama. Jedná-li se o rychlé neutrony, je třeba je nejprve zpomalit, aby mohly být účinně pohlceny vhodným absorbátorem. Neutrony se nejúčinněji zpomalují průchodem látkami bohatými na vodík, kde ztrácejí energii při pružném rozptylu na jádrech vodíku (protonech). K asi desetinásobnému zmenšení počtu rychlých neutronů je zapotřebí vrstva cca 20 centimetrů parafinu či plastu. Pro absorpci takto zpomalených neutronů se pak využívá jejich záchyt vhodnými jádry atomů. Nejúčinnější absorbce probíhá v kadmii, bóru, či indiu. Absorbce neutronů v jádrech kadmia nebo boru je doprovázena emisí záření gama (jedná se o reakce radiačního záchytu neutronu), které je potřeba rovněž odstínit, a to těžkým materiálem – olovem. Stínění proti neutronům tedy obecně musí sestávat ze tří vrstev: vrstva lehkého materiálu bohatého na vodík (např. polyethylen), vrstva kadmia nebo bóru, a nakonec vrstva olova²².

Zabránění kontaminace

Pracujeme-li s otevřenými radionuklidy (ve formě roztoků, prášků, aerosolů či plynů), přistupuje k riziku vnějšího ozáření dále nebezpečí kontaminace radioaktivními

²² Při stínění neutronů je třeba pamatovat i na to, že při záchytu neutronů v některých jádrech dochází ke vzniku radionuklidů, kdy se z původně neaktivních materiálů mohou stát zářiče beta nebo gama. Tyto radionuklidy pak vnitřně kontaminují stínění a konstrukční materiály. Například pokud je neutronům o vysokých energiích vystavena ocel legovaná kobaltem ⁵⁹Co, vzniká záchytem neutronů známý radionuklid ⁶⁰Co s poločasem rozpadu přes 5 let emitující tvrdé gama záření.

látkami – může dojít jednak k povrchové kontaminaci těla, jednak k vnitřní kontaminaci. K vnitřní kontaminaci může docházet zažívacím ústrojím, dýchacím ústrojím nebo průnikem přes pokožku. Pro zabránění kontaminace je tedy nutno dodržovat pravidla pro nakládání s otevřenými radionuklidy, v kontrolovaném pásmu nejíst, používat ochranné rukavice, s těkavými radioaktivními látkami pracovat v digestoři atd. (Ullmann, on line).

2.5 Pracoviště se zářením

2.5.1 Kategorizace pracovišť se zářením

Všechna pracoviště, kde se pracuje s radionuklidovými zářiči, nazýváme **pracoviště se zářením**. Pracoviště, kde se vykonávají radiační činnosti, se kromě pracovišť, kde se používají výhradně nevýznamné nebo typově schválené drobné zdroje ionizujícího záření, kategorizují vzestupně podle ohrožení zdraví a životního prostředí ionizujícím zářením na pracoviště I., II., III. a IV. kategorie na základě:

- Klasifikace zdrojů ionizujícího záření, o nichž se předpokládá, že se s nimi bude na pracovišti nakládat.
- Očekávaného běžného provozu pracoviště a související míry možného ozáření pracovníků a obyvatelstva.
- Zaměření radiační činnosti a náročnosti na zajištění radiační ochrany a jakosti při této činnosti.
- Vybavení a zajištění pracoviště pro bezpečnou práci se zdroji ionizujícího záření, zejména ochrannými pomůckami, izolačními a stínicími zařízeními, provedením ventilace a kanalizace.
- Možnosti radioaktivní kontaminace pracoviště nebo jeho okolí radionuklidy.
- Možnosti vzniku radioaktivních odpadů a náročnosti jejich zneškodnění.
- Potenciálního ohrožení plynoucího z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu.
- Rizika vzniku radiační nehody nebo havárie, závažnosti následků takové události a možnosti zásahů.

Pracovištěm I. kategorie je:

- Pracoviště s drobnými typově neschválenými zdroji ionizujícího záření.
- Pracoviště s veterinárním, zubním nebo kabinovým rentgenovým zařízením.
- Pracoviště s technickým rentgenovým zařízením, na němž charakter radiační činnosti nevyžaduje vymezení kontrolovaného pásma.
- Pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje příslušné minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 Atomového zákona a zařazení do této kategorie potvrdil Státní úřad pro jadernou bezpečnost **v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření.**

Pracovištěm II. kategorie je:

- Pracoviště s jednoduchým zdrojem ionizujícího záření, které není pracovištěm I. kategorie.
- Pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje příslušné minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 Atomového zákona a zařazení do této kategorie potvrdil Státní úřad pro jadernou bezpečnost v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření.

Pracovištěm III. kategorie je:

- Pracoviště se zařízením obsahujícím uzavřený radionuklidový zářič určené k radioterapii, včetně brachyterapie, klasifikovaným jako významný zdroj.
- Uznáný sklad.
- Pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje příslušné minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 Atomového zákona a zařazení do této kategorie potvrdil Státní úřad pro jadernou bezpečnost v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření.
- Pracoviště se stacionárním průmyslovým ozařovačem určeným k ozařování potravin a surovin, předmětů běžného užívání nebo jiných materiálů.

- Pracoviště pro těžbu a zpracování uranové rudy zahrnující těžbu, úpravu, nakládání s koncentrátem, provoz dekontaminačních stanic, shromažďování produktů hornické činnosti na odvalech a v kalových polích.

Pracovištěm IV. kategorie je:

- Jaderné zařízení ve smyslu § 2 písm. h) bodu 1 Atomového zákona.
- Úložiště radioaktivních odpadů ve smyslu § 2 písm. u) zákona.
- Pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, které s ohledem na vysoké aktivity zpracovávají současně na jednom pracovním místě, na typický způsob provozu pracoviště a související míru možného ozáření a potenciální riziko plynoucí z předvídatelných odchylek od běžného provozu, z nehod nebo havárií nelze zařadit do nižší kategorie.
- Sklad vyhořelého nebo ozářeného jaderného paliva.

Na každém z výše uvedených pracovišť musí být podle § 18 Atomového zákona zajištěn **soustavný dohled nad radiační ochranou**, a to v rozsahu odpovídajícím zdrojům ionizujícího záření, s nimiž se na tomto pracovišti nakládá. Zabezpečení pracoviště se odvíjí také od způsobu nakládání s radionuklidovými zářiči, související míře možného ozáření, včetně ozáření plynoucího z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu a s uvážením rizika vzniku radiační nehody nebo havárie. Soustavný dohled nad radiační ochranou se zajišťuje osobami s přímou odpovědností za zajištění radiační ochrany a dohlížejícími osobami.

2.5.2 Sledované a kontrolované pásmo

Všude tam, kde se očekává, že efektivní dávka by mohla být vyšší než 1 mSv ročně nebo ekvivalentní dávka by mohla být vyšší než jedna desetina limitu ozáření pro oční čočku, kůži a končetiny stanoveného v § 20 odst. 1 písm. c) až e) Atomového zákona, se vymezuje **sledované pásmo**. Sledované pásmo se zpravidla vymezuje na všech pracovištích I. až IV. kategorie. Sledované pásmo se nevymezuje, pokud by jeho rozsah nepřesáhl vymezení kontrolovaného pásma. Sledované pásmo se vymezuje jako ucelená a jednoznačně určená část pracoviště, zpravidla stavebně oddělená. Na vchodech nebo ohraničení se sledované pásmo označuje upozorněním „Sledované pásmo se zdroji ionizujícího záření“ (viz obrázek 29), případně i znakem radiačního nebezpečí a údaji o charakteru zdrojů a rizik s nimi spojených.



Obrázek 29: Výstražná tabulka vymezující vstup do sledovaného pásma.

Kontrolované pásmo

Kontrolované pásmo se vymezuje všude tam, kde by efektivní dávka mohla být vyšší než 6 mSv ročně nebo kde by ekvivalentní dávka mohla být vyšší než tři desetiny limitu ozáření pro oční čočku, kůži a končetiny stanoveného v § 20 odst. 1 písm. c) až e) Atomového zákona. Stejně jako sledované pásmo se i kontrolované pásmo vymezuje jako ucelená a jednoznačně určená část pracoviště, zpravidla stavebně oddělená a s takovým zajištěním, aby do ní nemohly vstoupit nepovolané osoby. Na vchodech nebo ohraničení se kontrolované pásmo označuje znakem radiačního nebezpečí a upozorněním „Kontrolované pásmo se zdroji ionizujícího záření, vstup nepovolaným osobám zakázán“, případně i údaji o charakteru zdrojů a rizik s nimi spojených.

Osoba, která provozuje pracoviště, kde je vymezeno sledované pásmo (tzv. provozovatel sledovaného pásma) a držitel povolení, který provozuje pracoviště, kde je vymezeno kontrolované pásmo (tzv. provozovatel kontrolovaného pásma), musí prokazatelně předem informovat **radiační pracovníky**, kteří mají pracovat v těchto pásmech, a osoby používající v těchto pásmech zdroje ionizujícího záření po dobu jejich specializované přípravy na výkon povolání:

- O charakteru a rozsahu možného ohrožení zdraví, o rizicích spojených s jejich prací a o případné zdravotní újmě s tím spojené.
- O obecných postupech radiační ochrany a opatřeních, která musí být přijata, zejména o těch, která odpovídají provozním a pracovním podmínkám vztahujícím se jak k dané činnosti obecně, tak i k jednotlivým pracovištím a pracím, na které mohou být přiděleni.
- O důležitosti plnit požadavky ochrany zdraví i technické a administrativní požadavky k zajištění radiační ochrany.

- V případě žen také o významu včasného oznámení těhotenství z důvodu rizik ozáření pro nenarozené dítě a radioaktivní kontaminace kojence v případě vnitřní kontaminace radionuklidy.

2.5.3 Postup při řešení radiační nehody

V případě, že dojde k radiační nehodě, je nutné ihned učinit opatření vedoucí k mezení následků na životy a zdraví zasažených osob a zamezení šíření radionuklidů do prostředí. Dojde-li při radiační nehodě ke kontaminaci osob, je nutné provést jejich dekontaminaci. **Dekontaminace** je postup, při němž se odstraňují nežádoucí látky z povrchu těla osob, výzbroje, jiného materiálu, objektů a terénu. Dekontaminace se dělí na okamžitou, částečnou a úplnou (Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti, 2007). Z hlediska použitých dekontaminačních látek a dekontaminačních postupů se dělí na:

- dezaktivaci – odstraňování radionuklidů z kontaminovaných povrchů,
- dezinfekci – zneškodňování nebo odstraňování patogenních mikroorganismů a
- odmořování/detoxikaci – chemický rozklad toxických chemických látek nebo jejich mechanické odstraňování z kontaminovaných povrchů.

Dekontaminace ve vnitřním (pracovním) prostředí

Při kontaminaci pracovního prostředí je příslušný pracovník (obvykle ten, který je kontaminován) povinen zamezit šíření kontaminace, označit viditelně kontaminovanou plochu, nahlásit tuto událost vedoucímu nebo dohlížející osobě a pod jeho vedením spolupracovat při dekontaminaci. Při dekontaminaci je třeba nejprve filtračním papírem nebo buničinou odsát co největší část aktivní tekutiny a dále kontaminovanou plochu omývat a otírat vhodným čisticím či dekontaminačním prostředkem. Vzniklé odpady je nutno ukládat do igelitových pytlů a kontaminované předměty odmořit nebo je uložit v igelitových pytlích k vyzáření. Kontaminovanou vodu je nutno vylévat do odpadu napojeného na vymírací jímky. Účinnost dekontaminace se průběžně kontroluje přeměřováním radiometrem. Nepodaří-li se zcela odstranit radioaktivní látku, je třeba dané místo označit a přikrýt ochranným papírem či fólií; o dalším postupu a opětném obnovení provozu pak rozhodne vedoucí či dohlížející osoba. Při kontaminaci osob musí pracovník svléci kontaminované části oděvu nebo ochranných pomůcek,

prověřit kontaminaci povrchu těla a podle potřeby provést očistu omýváním nebo osprchováním. Dále je nutno prověřit, zda nedošlo k vnitřní kontaminaci pracovníka. Při podezření na vnitřní kontaminaci a překročení nejvyšší přípustné dávky záření je třeba učinit potřebná zdravotnická opatření ve spolupráci se Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB) a s orgány ochrany veřejného zdraví (hygienická stanice), včetně dočasného vyřazení pracovníka z prostředí s ionizujícím zářením (Ullmann, online).

Dekontaminace ve venkovním prostředí

Jiná situace nastává v případě havárie nebo cíleného vojenského či teroristického útoku, při které může dojít ke kontaminaci venkovního prostředí, objektů, terénu ale i osob, a to i ve velkém měřítku. V takovém případě je nutné, aby dekontaminaci prováděly specializované složky civilní obrany (tj. Armáda ČR a Hasičský záchranný sbor), které pro tento účel disponují jak potřebným materiálně-technickým vybavením a vycvičeným personálem, tak i ověřenými dekontaminačními postupy. Z hlediska dekontaminačního postupu se dezaktivace (odstraňování radioaktivních látek z kontaminovaných povrchů) skládá z hrubé očisty, vlastní dekontaminace dekontaminační směsí a zpravidla i následného oplachu nekontaminovanou vodou.

K dezaktivaci se používají dezaktivací směsi, což jsou látky a směsi, které umožňují docílit snížení aktivity dezaktivovaného povrchu tak, že koeficient dezaktivace k_d je větší než 10 při dodržení stanovených norem spotřeby²³. Dezaktivace musí být zajištěna při zaprášení předmětů (objektů) shmotnostní koncentrací spadu do 100 g.m^{-2} při velikosti prachových částic do $50 \text{ }\mu\text{m}$ a předmětů znečištěných mastnotami s hustotou znečištění do 20 g.m^{-2} . Zároveň platí požadavek, že střední smrtelná dávka LD_{50} dezaktivací směsí při perkutánní intoxikaci (pro potkany) musí být větší než $0,5 \text{ g.kg}^{-1}$. Ačkoliv musí být splněn požadavek na chemickou bezpečnost dezaktivací směsí, přesto se při manipulaci s nimi musí používat ochranné prostředky dýchacích orgánů a povrchu těla. Dezaktivací směsi, skladované v původních obalech, musí zachovat své vlastnosti (účinnost) po dobu nejméně 10 let. V odůvodněných případech může být doba použitelnosti zkrácena po dohodě mezi dodavatelem a uživatelem, ne však méně než na 5 let. Doba použitelnosti dezaktivací směsí připravených v polních podmínkách musí být nejméně 10 dní (Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti, 2007).

Po provedené dekontaminaci (dezaktivaci) je nutné provést následné stanovení zbytkové kontaminace zamořeného povrchu. Přípustnou zbytkovou kontaminací,

23 Koeficient dekontaminovatelnosti k_d udává, kolikrát se podařilo snížit hodnotu původní kontaminace dekontaminačním zásahem; čím vyšší je jeho hodnota, tím je testovaný proces účinnější.

kteřou již není nutné dále dekontaminovat (popř. separovat dekontaminovaný předmět), je taková kontaminace povrchu, která nezpůsobí při kontaktu s organismem zdravých dospělých osob příznaky narušení funkcí organismu působením radioaktivních látek. Hodnota přípustné zbytkové kontaminace se vyjadřuje plošnou aktivitou povrchu v Bq.m⁻² (viz tabulka 24). Hodnota přípustné zbytkové kontaminace se měří ve vzdálenosti 1 až 1,5 cm nad kontaminovaným povrchem (Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti, 2007).

Tabulka 24: Přípustné hodnoty zbytkové kontaminace po expozici radionuklidů.

Druh kontaminovaného povrchu Přípustná zbytková kontaminace	(MBq.m⁻²)
Povrch lidského těla	8,35
Oděv, výstroj, obuv a prostředky	33,4
Vnější povrchy materiálů a budov	83,5
Vnitřní povrchy materiálů a budov	16,7
Povrchy obalů s potravinami	1,67
Lékařské a zdravotnické předměty	33,4
Průchody v kontaminovaných prostorech, komunikace	367,4

Literatura ke kapitole

Akutní radiační syndrom. In *Wikipedia* [online], stránka naposledy editována 4. 6. 2009 [cit. 2009-05-23]. Dostupný z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Akutn%C3%AD_radia%C4%8Dn%C3%AD_syndrom>.

BERNATÍK, A. Prevence závažných havárií I

Dekontaminační látky a směsi. Český obranný standard (ČOS 681001), Praha: Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti. [online]. Dostupný z WWW:
<<http://www.oos.army.cz/cos/cos/681001.pdf>>.

GREENWOOD, N. N.; EARNSHAW, A. 1993. *Chemie prvků: svazek 2*. Praha: Informatorium, 1993.

HÁLA, Jiří. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. 1. vyd. Brno: Konvoj, 1998. 311 s. ISBN 80-85615-56-8.

KONEČNÝ, J. 2007a. *Radiační ochrana I* [online]. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2007 [cit. 2009-05-26]. Dostupný z WWW: <http://www.zsf.jcu.cz/struktura/katedry/radio/informace-pro-studenty/ucebni_texty/ochrana-obyvatelstva-se-zamerenim-na-cbrne-aplikovana-radiobiologie-a-toxikologie-krizova-radiobiologie-a-toxikologie/radiacni-ochrana-i.doc>.

KONEČNÝ, J. 2007b. *Radiační ochrana II* [online]. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2007 [cit. 2009-05-26]. Dostupný z WWW: <http://www.zsf.jcu.cz/struktura/katedry/radio/informace-pro-studenty/ucebni_texty/ochrana-obyvatelstva-se-zamerenim-na-cbrne-aplikovana-radiobiologie-a-toxikologie-krizova-radiobiologie-a-toxikologie/radiacni-ochrana-ii.doc/>.

KŘIVOHLÁVEK, J., 2008. Radioekologie: učební texty a poznámky. [interní materiál]. Brno: Masarykova univerzita.

KOTALOVÁ, D. ...[et al.]. 2005. *Slovníček základních fyzikálních, technických, radiobiologických, radiohygienických, farmakologických, počítačových a statistických pojmů pro opakování ke zkoušce z nukleární medicíny: verze 1.4-17.10.2005* [online]. Praha: Univerzita Karlova, 1. lékařská fakulta, Ústav nukleární medicíny, 2005 [cit. 2009-04-23]. Dostupný z WWW: <<http://unm.lf1.cuni.cz/vyuka/slov10.pdf>>.

MAJER, V. 1981. *Základy jaderné chemie*. 2. vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury.

MUCK, A. *Základy strukturní anorganické chemie*. 1. vyd. Praha: Academia, 2006. 508 s. ISBN 80-200-1326-1.

Vyhláška SÚJB č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně: tabulka č. 2 přílohy č. 2. *Sbírka zákonů ČR*, 2002, částka 113.

ŠVEC, J. 2005. *Radioaktivita a ionizující záření*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2005.

ULLMANN, V. *Biologické účinky ionizujícího záření a radiační ochrana* [online] [cit. 2009-03-06]. Dostupný z WWW: <<http://astronuklfyzika.cz/RadiacniOchrana.htm>>.

Toxicological profile for americium [online]. U.S. Department of health and human services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2004. Dostupný z WWW: <<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp156.pdf>>.

Toxicological profile for plutonium [online]. U.S. Department of health and human services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2007. Dostupný z WWW: <<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp143.pdf>>.

Toxicological profile for uranium [online]. U.S. Department of health and human services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1999. Dostupný z WWW: <<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp150.pdf>>.

Toxicological profile for thorium [online]. Agency for Toxic Substances and Disease Registry U.S. Public Health Service, In collaboration with: U.S. Environmental Protection Agency, 1990. Dostupný z WWW: <<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp147.pdf>>.

Vyhláška č. 232/2004 Sb., o kterou se provádějí některá ustanovení zákona o chemických látkách a chemických přípravcích a o změně některých zákonů, týkající se klasifikace, balení a označování nebezpečných chemických látek a chemických přípravků. *Sbírka zákonů ČR*, 2004, částka 76.

Zákon č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (Atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů ve znění zákona č. 13/2002 Sb. *Sbírka zákonů ČR*, 1997, částka 5.