

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Zdravotně sociální fakulta

**Vnější a vnitřní kontaminace radioaktivními látkami
(výukový program)**

Bakalářská práce

Autor: Lenka Kučerová

Vedoucí práce: Mgr. Renata Havránková, Ph.D.

3. května 2010

ABSTRAKT

External and internal contamination by radioactive substances (tutorial)

The text concerns the creation of a complete education programme focussing on internal and external contamination by radioactive substances. The education programme is composed of several chapters explaining the given problem to the student. The first part of the text explains certain basic facts concerning ionizing radiation, radioactivity, and the quantities characterizing these phenomena. Further, the text explains the effects of ionizing radiation on the human body. The third section describes all sources and routes of contamination by radioactive substances, and historically important radiation events. Further, attention is paid to individual radionuclides and their behaviour in the body. The chapters entitled 'internal and external contamination' deal with the issue and nature of these types of contamination, protection from the individual types of contamination, and subsequent measures in case they take place.

The result is an education programme in the Moodle e-learning environment, which will serve as an education tool for students of the study field of Radiological Assistant and Protection of the Inhabitants at the College of Health and Social Studies of the University of South Bohemia. Simultaneously, it will ensure their better orientation in this subject, namely and especially through better availability of the prepared education material.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vnější a vnitřní kontaminace radioaktivními látkami vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě/v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zdravotně sociální fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích, 3. května 2010

.....

Lenka Kučerová

Poděkování

Touto cestou bych chtěla poděkovat Mgr. Renatě Havránkové, Ph.D., za její odborné vedení, pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování mé bakalářské práce.

Lenka Kučerová

OBSAH:

ÚVOD	6
1 SOUČASNÝ STAV	7
1.1 Základní pojmy v oblasti ionizujícího záření a radioaktivity	7
1.1.1 Úvod do problematiky	7
1.1.2 Zdroje záření	8
1.1.3 Radioaktivita.....	8
1.1.4 Druhy ionizujícího záření	9
1.1.5 Veličiny a jednotky charakterizující radioaktivní prvky a látky.....	12
1.2 Účinky ionizujícího záření na lidský organismus	14
1.2.1 Stochastické účinky	15
1.2.2. Deterministické účinky	15
1.3 Zdroje kontaminace	19
1.3.1 Jaderná energetická zařízení (jaderné reaktory)	19
1.3.2 Jaderné zbraně.....	21
1.3.3 Kontaminace v medicíně	25
1.3.4. Ostatní možné zdroje kontaminace	27
1.4 Události s rizikem kontaminace	29
1.4.1 Mimořádná událost	29
1.4.2 Limity ozáření.....	30
1.4.3 Nejvýznamnější radiační nehody.....	31
1.5 Radionuklidy významné z hlediska kontaminace	34
1.6 Vnější kontaminace	39
1.6.1 Charakter poškození při vnější kontaminaci.....	39
1.6.2 Ochrana před vnější kontaminací	41
1.6.3 První pomoc a léčebná péče o zevně kontaminované.....	43
1.7 Vnitřní kontaminace	48
1.7.1 Biokinetika radioaktivních látek	49
1.7.2 Cesty vstupu radioaktivních látek do organismu.....	50
1.7.3 Ochrana před vnitřní kontaminací	54
1.7.4 Léčebná péče o vnitřně kontaminované.....	55
1.8 Radioprotekce	59
2 CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY	60
3 METODIKA	60
4 VÝSLEDKY	61
5 DISKUSE	62
6 ZÁVĚR	63
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	64
8 KLÍČOVÁ SLOVA	66

ÚVOD

Důvodem, proč jsem si vybrala zpracování tématu vnější a vnitřní kontaminace radioaktivními látkami jako výukového programu, je přetrvávající nedostatek kvalitních didaktických pomůcek využívajících moderní výukovou techniku. Tento nedostatek je nahrazován přednášením z knižního materiálu a odkazy na související literaturu. Přitom ale současným trendem vysokoškolské výuky je stále se zvyšující využití moderních výukových metod při studiu.

Zaměření práce na vnější a vnitřní kontaminaci radioaktivními látkami mě zaujalo z důvodu stále širšího využití radioaktivních látek ve všech oborech lidské činnosti. Radioaktivní látky nalezneme v medicíně, ve výzkumu, v průmyslu či energetice. Proto se nutně počítat i s případy, kdy dojde k jejich nekontrolovatelnému šíření a kontaminaci osob. Ke kontaminaci může dojít jak v souvislosti s mírovým využitím radioaktivních látek, kde především prudký poválečný rozvoj jaderné energetiky sebou nesl i první oběti havárií v mírových podmínkách, tak i při výbuchu jaderné či radiologické zbraně při teroristickém útoku.

Ve své práci jsem shrnula důležité poznatky týkající se kontaminace radioaktivními látkami, které budou sloužit jako ucelený zdroj informací pro studenty.

1 SOUČASNÝ STAV

1.1 Základní pojmy v oblasti ionizujícího záření a radioaktivity

1.1.1 Úvod do problematiky

Jako radioaktivní látky označujeme látky, které obsahují nestabilní izotopy prvků. Jádra těchto prvků se nazývají radionuklidy a přeměňují se v jádra jiných izotopů, přičemž emitují ionizující záření. Přitom se toto jádro s nadbytkem energie může měnit v jiné nebo alespoň ztratí část své energie. Při jaderné přeměně se pak mění struktura jádra, izotop jednoho prvku se mění na izotop prvku jiného. Schopnost nestabilních atomových jader vysílat ionizující záření nazýváme radioaktivita.

Ionizující záření je charakterizováno schopností způsobit při průchodu prostředím jeho ionizaci, tj. vytvořit z původně elektricky neutrálních atomů kladné a záporné ionty. Za normálního stavu se elektrony nacházejí na svých energetických hladinách. Ionizace je proces, kdy je elektronu dodána taková nadbytečná energie, že se dostane do vyšší energetické hladiny. Přebytečná energie je vyzářena v podobě elektromagnetického vlnění (4).

Ionizující záření má duální povahu. Jedná se o proudy rychle letících elementárních částic a o elektromagnetické vlnění. Mezi elektromagnetické vlny schopné ionizovat hmotu patří RTG a gama záření, přičemž jednotlivé elektromagnetické vlny jsou označovány jako fotony. energii elektromagnetického vlnění určuje vlnová délka, která čím je kratší, tím je energie tohoto záření větší. Korpuskulární záření je zprostředkováno neutrony, alfa a beta částicemi a fragmenty rozštěpených jader. Rychlost pohybu elementárních částic určuje energii a pronikavost daného druhu ionizujícího záření.

Pojmem kontaminace radioaktivními látkami, rozumíme přítomnost radioaktivních látek na povrchu nebo uvnitř organismu, z čehož je odvozen pojem vnitřní a vnější kontaminace. Tyto látky svými radioaktivními vlastnostmi ohrožují zdraví člověka. Proto k zabránění či zmírnění účinků těchto látek byl zaveden proces vedoucí k odstanění kontaminantu, tzv. dekontaminace. Závažnost kontaminace radioaktivními látkami závisí na chemické formě, velikosti částic, aktivitě a druhu radionuklidů a emitovaného záření (4, 8).

1.1.2 Zdroje záření

Zdrojem ionizujícího záření je podle atomového zákona látka, přístroj nebo zařízení, které může vysílat ionizující záření nebo uvolňovat radioaktivní látky. Radionuklidový zářič jako zdroj záření může být otevřený nebo uzavřený. Uzavřený zářič je podle vyhlášky SÚJB takový 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. Tyto zářiče bývají konstruovány jako dutá, ocelová, hermeticky uzavřená válcová tělesa různých rozměrů, obsahující některý radionuklid. Používají se v lékařství v radioterapii jako zdroj ionizačního záření, v defektoskopii nebo metrologii (15).

Otevřený zářič je takový zářič, který není ve smyslu vyhlášky uzavřeným zářičem. Tyto zářiče se používají ve formě roztoků, suspenzí, aerosolů či plynů například v nukleární medicíně (12).

1.1.3 Radioaktivita

Přírozená radioaktivita

Lehká jádra se skládají z přibližně stejného počtu protonů a neutronů, v těžších jádrech se podíl neutronů stále zvyšuje. Ne všechny kombinace počtu protonů a neutronů tvoří stabilní jádra. Přebytku neutronů je zapotřebí k vytvoření přitažlivé síly, protože kladně nabití protony se navzájem elektrostaticky odpuzují a toto odpuzování je v jádrech s více než deseti protony již velmi silné. Izotop bizmutu ^{209}Bi je nejtěžší stabilní nuklid a tvoří hranici schopnosti neutronů udržet jádro stabilní. Všechna těžší jádra jsou nestabilní a samovolně se rozpadají na jádra lehčí, která jsou stabilní (2).

Umělá radioaktivita

Nestabilita atomového jádra je vyvolána uměle, zpravidla jadernou reakcí. Umělá radioaktivita se řídí stejnými zákonitostmi jako přírozená radioaktivita (2).

Umělé radionuklidy se v současné době připravují průmyslově ostřelováním atomových jader nabitými částicemi z urychlovačů nebo neutrony z jaderných reaktorů. Využití radionuklidů v praxi je dáno tím, že radionuklidů bylo získáno již několik tisíc.

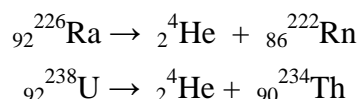
Umělé radionuklidy vznikají rovněž jako štěpné produkty v energetických jaderných reaktorech nebo při pokusných jaderných explozích. Ostřelováním jader neutrony a těžkými ionty byly získány též radionuklidy s protonovým číslem větším než 92, tzv. transurany. K nejdůležitějším z nich patří silně toxické plutonium s poločasem rozpadu 24 000 let.

1.1.4 Druhy ionizujícího záření

Záření alfa – α - jedná se o proud rychle letících alfa částic. Alfa částice jsou prostá, heliová jádra složená ze dvou protonů a dvou neutronů. Mají tedy kladný elektrický náboj. Po vyzáření alfa částice se protonové číslo původního prvku sníží o dvě a nukleonové číslo o čtyři. Prvek se posune o dvě místa vlevo v periodické soustavě

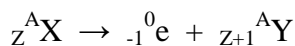


Jako příklady α rozpadu lze uvést

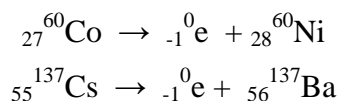


Pronikavost záření je charakterizována jeho doletem, který činí ve vzduchu několik centimetrů a ve tkáni několik mikrometrů, což je způsobeno rychlou ztrátou energie při ionizaci. Díky velké energii obsažené v heliovém jádře je ze všech druhů záření nejtoxičtější. Pro člověka je nebezpečné jen pokud se dostane přímo do organismu. Energie emitovaných alfa částic je tím větší, čím rychleji se radionuklid rozpadá. Mezi alfa zářiče patří např. ${}^{226}\text{Ra}$, ${}^{239}\text{Pu}$ a ${}^{241}\text{Am}$ (2, 8).

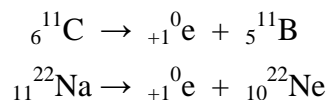
Záření beta- β^- – je tvořeno rychlými elektrony nebo pozitrony. Rozlišujeme dva typy beta rozpadu. Při **β^- rozpadu** emituje jádro elektron. Předchází mu přeměna neutronu na proton, elektron a antineutrino. Prvek se posune o jedno místo vpravo v periodické soustavě



Jako příklady β^- rozpadu lze uvést



V případě β^+ rozpadu emituje jádro pozitron, který vzniká přeměnou protonu v jádře na neutron, pozitron a neutrino. Prvek se posune o jedno místo vlevo v periodické soustavě. Jako příklad β^+ rozpadu lze uvést



V porovnání se zářením alfa jsou částice beta mnohem lehčí a menší, mají značný rozsah energií a pohybují se mnohem rychleji. Je také stokrát pronikavější než záření alfa, má však menší ionizační účinky. Dolet záření beta činí ve vzduchu několik metrů, ve vodě a ve tkáni několik desítek milimetrů, v těžších materiálech potom několik desetin milimetrů. Částice beta ztrácejí svoji energii při průchodu prostředím v ionizacích atomů a dále v důsledku brzděného záření. Brzděné záření vzniká v prostředí obsahujícím prvky s vysokým atomovým číslem, proto ke stínění použijeme plexisklo nebo jiný umělohmotný materiál (2).

Záření gama - γ – je elektromagnetické záření s velmi krátkou vlnovou délkou ($10^{-11} - 10^{-13}$ m). Vzniká při jaderných reakcích nebo radioaktivním rozpadu přechodem jádra z vyššího do nižšího energetického stavu, přičemž se jádro zbavuje své excitační energie. Toto záření je obvykle doprovázeno alfa nebo beta zářením (2).

Jedná se o nejpronikavější součást jaderného záření. Ve vzduchu a ve tkáních má dosah několik metrů, proto je nutné ho oslabit silnou vrstvou materiálu tvořeného jádry těžkých prvků (např. olovo). Gama záření řadíme do skupiny nepřímo ionizující záření, protože při průchodu prostředím uvolní fotony elektricky nabitě částice, které tím získají energii dostatečnou k tomu, aby byly schopné prostředí ionizovat a excitovat. Gama záření interaguje s absorpční hmotou pomocí fotoefektu, Comptonova rozptylu a tvorbou páru elektron-pozitron (2, 4).

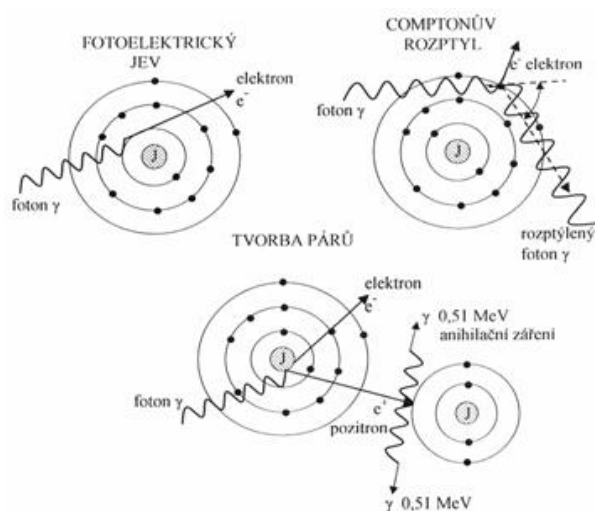
Při fotoefektu předá foton záření gama veškerou svoji energii elektronu na některé z vnitřních slupek atomu. Tento elektron je z atomu uvolněn a jeho místo je zaplněno elektronem z vyšší slupky. Přebytek energie je vyzářen v podobě fotonu charakteristického rentgenového záření (obr 1).

Při Comptonově rozptylu dochází k interakci fotonů gama s elektrony na vnějších slupkách atomů. Foton gama předá část své energie volnému elektronu, který je vyzářen

s nižší energií v odlišném směru (obr 1).

Má-li foton gama větší energii než 1,02 MeV, může být zcela pohlcen v elektrickém poli atomového jádra, přičemž vzniká dvojice elektron-pozitron (obr 1) (4).

Obr. 1 Interakce záření gama s prostředím (4)



Neutronové záření - neutrony jsou elementární částice bez elektrického náboje a jsou základním stavebním kamenem atomových jader. Vznikají spontánním štěpením atomů a při jaderných reakcích v reaktorech jaderných elektráren.

Při nárazu do atomových jader se mohou neutrony zachytit, jsou absorbovány, přičemž dochází k nestabilitě jádra, která způsobí jeho další radioaktivní rozpad. Jádro je ve vzbuzeném stavu, který vyzáří excitační energii ve formě fotonu. Nově vzniklý nuklid je velmi často radioaktivní. Tento děj nazýváme záchyt neutronu.

Dále se mohou neutrony odrazit v různých úhlech, kdy po odrazu emituje jádro nadbytečnou energii ve formě gama záření.

Poslední možností je rozštěpení atomového jádra. Praktické využitelnosti bylo dosaženo štěpením velmi těžkých jader (^{235}U a ^{239}Pu). Při štěpení těchto jader jsou uvolňovány další 2-3 neutrony, které aktivně rozštěpí okolní atomy (2)

Ke stínění neutronového záření použijeme více složek materiálů. Pro zpomalení neutronů slouží lehké materiály jako voda nebo parafin a pro jejich záchyt potom např. bór nebo kadmium. Někdy je nutná i třetí složka k odstínění gama záření, které při

záchytu neutronů vzniká (2).

Nejčastěji používané radionuklidové zdroje neutronů typu (α, n) jsou $^{241}\text{Am} + \text{Be}$, $^{239}\text{Pu} + \text{Be}$, $^{226}\text{Ra} + \text{Be}$ a $^{210}\text{Po} + \text{Be}$, které využívají jaderné reakce $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$.

1.1.5 Veličiny a jednotky charakterizující radioaktivní prvky a látky

Radionuklidy můžeme vedle chemických značek a údajů o chemických vlastnostech popisovat i údaji o radioaktivních vlastnostech každého radionuklidu. Pomocí měření jednotlivých veličin ionizujícího záření můžeme zjistit, o jaký druh radionuklidu se jedná a jak je tento zdroj záření silný. Skrze výpočty je možno stanovit dobu, po kterou se může člověk v blízkosti zdroje zdržovat a jakou dávku obdržel. V případě kontaminovaného území umožňují tato měření rozhodnout, zda je aktivita přítomných radionuklidů pro člověka bezpečná, jak je ohroženo jeho zdraví, a zda se musí realizovat následná opatření (4, 8).

Nukleonové číslo ^AX udává počet stavebních částic, tedy protonů a neutronů v jádře. Dalšími vlastnostmi popisujícími radionuklid je **typ emitovaného záření**, **množství** v gramech nebo molech (8).

Aktivita A charakterizuje u radionuklidových zdrojů množství radioaktivní látky. Je to tedy fyzikální veličina udávající počet radioaktivních přeměn za sekundu. Jednotkou aktivity je bequerel [Bq]. Jeden bequerel je aktivita, při které dochází k jedné jaderné přeměně za jednu sekundu (8). Aktivita A radionuklidu klesá exponenciálně s časem t podle vztahu

$$A = A_0 \exp(-\lambda t)$$

kde A_0 je aktivita radionuklidu v čase $t = 0$ a λ přeměnová konstanta (4).

Fyzikální poločas rozpadu (přeměny) $T_{1/2}$ je doba, za kterou se přemění polovina z jakéhokoliv celkového počtu atomárních jader daného radionuklidu. Tato doba může být od zlomků sekund, po desítky miliard let. Poločas rozpadu je spolu s energií emitovaného záření jednou z charakteristických veličin pro jednotlivé radionuklidy.

Dále existuje ještě tzv. **biologický poločas**, což je doba, za kterou se sníží množství radionuklidu v orgánu či tkáni na polovinu. Doba, za kterou klesne aktivita in vivo

podaného radionuklidu na polovinu v důsledku biologické eliminace a radioaktivní přeměny, se nazývá **efektivní poločas**. Je tedy tvořen fyzikálním a biologickým poločasem.

Absorbovaná dávka D je charakterizována jako energie jednoho Joulu absorbovaná v jednotce hmotnosti (1 kg) ozařované látky v určitém místě. Jednotkou je Gray [Gy]. Jeden Gray odpovídá J.kg^{-1} . Je dána poměrem

$$D = DE / Dm$$

kde DE je střední energie ionizujícího záření absorbovaná objemovým elementem látky a Dm je hmotnost tohoto objemového elementu (4).

Pokud chceme vyjádřit přírůstek dávky za jednotku času, použijeme veličinu **dávkový příkon D'**. Jednotkou je Gy.s^{-1} . V praxi se pro vyjádření dávkového příkonu přirozeného pozadí používají jednotky v řádech 0,1 – 0,3 $\mu\text{Gy/h}$, v radioterapii Gy/min.

Dávkový ekvivalent je jednotka používaná v radiační ochraně, která se týká biologických účinků různých druhů ionizujícího záření. Dávkový ekvivalent H je součin absorbované dávky v uvažovaném bodě tkáně a jakostního součinitele Q vyjadřujícího rozdílnou biologickou účinnost různých druhů záření (8)

$$H = Q \cdot D$$

Jednotkou je sievert (Sv). V praxi jsou používané spíše dílčí jednotky μSv a mSv . Dávkový ekvivalent vyjadřuje, že některé druhy záření mají při stejné dávce záření rozdílný účinek na člověka.

Efektivní dávka H_E je veličina, která určuje míru postižení organismu stochastickými účinky. Jednotkou je sievert. Je úměrná ekvivalentní dávce s koeficientem úměrnosti lišícím se pro různé orgány. Je vyjádřena vztahem

$$H_E = \sum w_T \cdot H_T$$

kde H_T je ekvivalentní dávka v dané tkáni T, w_T je tkáňový váhový faktor. Efektivní dávka, o velikosti 1 Sv, indukuje shodný počet stochastických účinků v populaci jako jednorázové, celotělové a homogenní ozáření absorbovanou dávkou 1 Gy gama zářením. Veličina efektivní dávky zohledňuje typ záření, homogenitu záření a riziko vzniku stochastických účinků (8).

Dále se určuje ještě tzv. **kolektivní efektivní a ekvivalentní dávka**, která udává součet efektivních, popř. ekvivalentních dávek všech jednotlivců v určité skupině, a úvazek efektivní a ekvivalentní dávky jako časovou změnu jejich příkonů. Společnou jednotkou je sievert (8).

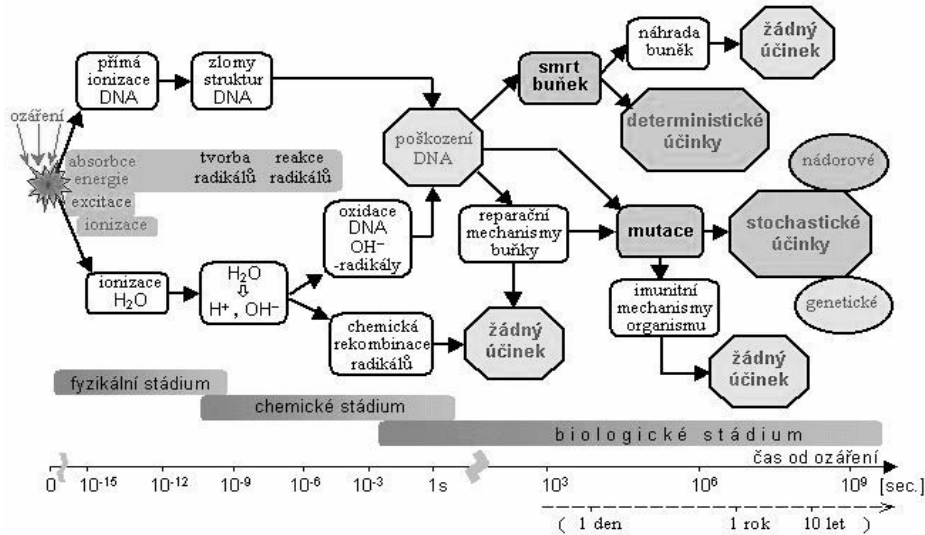
1.2 Účinky ionizujícího záření na lidský organismus

Ionizující záření má na lidský organismus převážně negativní vliv. Jeho účinky představují široké spektrum různých poruch a chorobných změn projevujících se v průběhu dnů, týdnů nebo v průběhu roků či desetiletí. Pokud dávka záření není velká, s naprostou většinou poškození biologicky aktivních látek se organismus úspěšně vyrovná svými reparačními mechanismy sám. I při malých dávkách je tu ale určitá pravděpodobnost, že se některá poškození opravit nepodaří.

Máme-li charakterizovat citlivost buněk k záření, platí základní radiobiologický zákon, že citlivější na ozáření jsou tkáně s velkým počtem rychle se dělících, málo zralých buněk (kostní dřeň, varlata, vaječníky a střevo). Naopak odolnějšími na ozáření jsou tkáně s málo se dělícími nebo nedělícími se zralými buňkami (10).

Základní klasifikace účinků záření je založena na pravděpodobnosti, s jakou se po ozáření projeví poškození. Z hlediska vztahu dávky a účinku je třeba rozlišovat dva základní typy účinků. Prvním typem jsou účinky deterministické, kdy při dosažení určité dávky ionizujícího záření zákonitě nastává určitý efekt. Oproti tomu u stochastických účinků se stoupající dávkou stoupá pravděpodobnost poškození (10).

Obr. 2 Schématické znázornění význačných procesů a jejich časové posloupnosti při účincích ionizujícího záření na živou tkáň (10)



1.2.1 Stochastické účinky

Stochastickými účinky rozumíme ty, které jsou vyvolány změnami v genetické informaci buněk a nejsou závislé na velikosti obdržené dávky. Mohou se projevit po jednorázovém ozáření dávkou, která je podprahová nebo při chronickém ozařování určité tkáně nebo celého těla malými dávkami. Téměř veškerá DNA se nachází v buněčném jádře, a proto chemické změny, vyvolané ionizujícím zářením (radiolýza a následně hydroxylových a vodíkových radikálů s DNA) vyvolávají mutace, které nezpůsobí žádné klinicky pozorovatelné poškození, ale mohou pravděpodobně způsobit poškození s výskytem dlouhou dobu po ozáření. Ke stochastickým účinkům patří vznik nádorových onemocnění, leukémie a genetické poškození další generace (4, 10).

1.2.2. Deterministické účinky

Deterministické účinky jsou takové, které se projeví po ozáření celého těla nebo určité tkáně nejčastěji jednorázově, takovou ekvivalentní dávkou záření, která způsobí smrt části ozářené buněčné populace. Jejich závažnost vzrůstá s dávkou od určitého

dávkového prahu a mají charakteristický klinický obraz (tab. 1). Za prahovou hodnotu se pokládá dávka, která vyvolá příslušné poškození u 1-5 % ozářených osob. Menší ekvivalentní dávky, než je prahová hodnota, daný typ poškození nezpůsobují. Do této skupiny patří např. akutní nemoc u ozáření, nebo radiační lokální poškození kůže (viz. kap. 1.6.1), zákal oční čočky, poškození plodu a poruchy plodnosti (5).

Tab. 1 Prahové dávky vybraných orgánů a orgánových soustav (5)

Tkáň (orgán)	Dávka (Gy)	Druh poškození
varle	0,2	aspermie přechodná
kostní dřeň	0,7	útlum krvetvorby
oko	2	katarakta
kůže	3	dermatitida
střevo	8	enteritida
plíce	8	pneumonitida, fibróza
CNS	80	poruchy funkcí

Akutní nemoc z ozáření (ANO)

Akutní nemoc z ozáření je charakterizována jako odpověď organismu na jednorázové ozáření dávkami ionizujícího záření vyššími než 0,7 Gy. Klinické projevy jsou závislé na geometrii, dávce a příkonu ozáření, na věku, pohlaví, zdravotním stavu i dalších biologických faktorech charakterizujících ozářený objekt. Při vnější a vnitřní kontaminaci radioaktivními látkami může být postižený poškozen ionizujícím zářením jednak celotělově, jednorázovým, zpravidla nerovnoměrným zevním ozářením. Dávka je dána množstvím radionuklidů a typem kontaminace, poločasem a skladbou příslušných radionuklidů a kvalitou dekontaminace. Dále mohou vznikat sdružená a kombinovaná radiační poškození, tj. zevní ozáření v kombinaci s vnitřní a vnější kontaminací radionuklidy. Klinický a laboratorní obraz je ovlivněn výsledným působením všech uvedených možností ozáření (4, 8).

Klinická forma je dána radiosenzitivitou buněčných populací jednotlivých orgánů.

Diagnostika a tíže akutní nemoci z ozáření se stanovuje podle pěti základních ukazatelů.

- dozimetrický údaj se získá vyhodnocením osobních dozimetrů,
- radiační anamnéza zahrnuje druh záření, místo a použité ochranné pomůcky,
- prodromální (počáteční) příznaky slouží k hrubému odhadu absorbované dávky,
- laboratorní testy - měření počtu lymfocytů, kdy k maximálnímu poklesu počtu lymfocytů v periferní krvi dochází 3. den po ozáření a cytogenetické vyšetření sledující chromozomální změny lymfocytů
- posledním ukazatelem je rozvoj a tíže radiační dermatitidy (4, 8).

ANO zahrnuje tři základní formy, jejichž výskyt je závislý na absorbované dávce záření. Jsou to formy: dřeňová, gastrointestinální a neurovaskulární. U těchto tří syndromů rozpoznáváme čtyři časové fáze.

Fáze prodromální – jedná se o bezprostřední reakci organismu na ozáření. Nejčastější projevy jsou nauzea, zvracení, nechutenství a při vyšších dávkách bolesti hlavy a průjemy. Se zvyšující se dávkou záření jsou obtíže intenzivnější a mají delší dobu trvání. U dávek nad 6 Gy nastupují příznaky bezprostředně po ozáření a mají výrazný průběh.

Fáze latentní – v této fázi dochází přechodně k úplnému nebo částečnému ústupu subjektivních obtíží v závislosti na dávce. Se vzrůstající dávkou se doba latence zkracuje.

Fáze manifestní – zde se onemocnění plně rozvíjí s projevy komplexního poškození. Postižený trpí třesavkou, zvýšenou únavou, krvácením z dásní a nosu, epilaci, vředy na ústní sliznici, průjemem i krvavým, horečkou a je náchylný ke vzniku mikrobiálních a virových onemocnění. Klinický obraz se odvíjí od charakteru poškození konkrétních orgánů. Tato fáze trvá 4 – 6 týdnů, přičemž těžká a velmi těžká forma není léčitelná a končí smrtí.

Fáze rekonvalescence – pokud postižený přežil, dochází k úplnému nebo částečnému uzdravení organismu. Úplné uzdravení závisí na individuální citlivosti k záření (4, 8).

Tab. 2 Časový a dávkový profil forem ANO (8)

Forma ANO	Prahová dávka	Prodromální fáze	Latentní fáze	Manifestní fáze
Dřeňová forma	1 Gy	30 min. - 48 hod.	2. den – 3.týd.	2. den – 4. týd.
Gastrointestinální	8Gy	10 min. - 48 hod.	3. - 5. den	5. - 8. den
Neurovaskulární	30 Gy	od 5 min.	chybí - 2.den	2. - 4. den

Formy akutní nemoci z ozáření:**Dřeňová forma**

Již po dávce 0,7 Gy se u pacientů po 24 hodinách od expozice objevuje na dávce závislý útlum krvetvorby, který může vést v důsledku malé až nulové produkce krevních buněk k pancytopenii (pokles počtu všech typů krevních buněk v obvodové krvi pod dolní hranici normálních hodnot). Ke vzniku atrofie a pancytopenie dochází při dávce 1 – 8 Gy. Kmenové buňky, které jsou v hematopoetických tkáních klíčové, jsou k záření tím citlivější, čím jsou méně diferencované.

Klinický obraz se plně rozvíjí 3. - 6. týden po ozáření. Systémové efekty zahrnují imunologickou dysfunkci, vzestup infekčních komplikací, krvácení s anemií a jsou doprovázeny špatným hojením ran (4).

Gastrointestinální forma

V současnosti je gastrointestinální forma ve všech případech smrtelná a neexistuje proti ní žádná terapie. Epiteliální buňky střev mají vyšší radiorezistenci, a proto ke vzniku této formy je třeba vyšších dávek záření než u dřeňové formy. Jedná se o jednorázové dávky nad 8 Gy. K manifestaci klinických příznaků dochází dříve než u dřeňové formy ANO. Při dávkách 10 – 100 Gy ozáření je střevní forma dominantním příznakem ANO. Dochází k poklesu počtu enterocytů, snížení tloušťky sliznice střeva, poškození sítě kapilár v submukóze a tím k narušení resorbční a bariérové střevní funkce, které způsobí poruchu vstřebávání a nekontrolovatelné ztráty vody a elektrolitů. Po latentní fázi trvající několik dnů až týden nastupuje těžká ztráta tekutin, krvácení do GIT, průjem a mnohdy s bakteriální invazí. Výsledkem je celkové poškození organismu (4).

Neurovaskulární forma

K této formě dochází po expozicích velmi vysokými dávkami na 80 Gy. Jejím následkem je vždy smrt, která nastává při dávce do 100 Gy během několika dnů, 500 Gy během dvou hodin a při dávce vyšší než 1000 Gy je smrt okamžitá. Této formy bylo zaznamenáno na světě pouze několik případů. Vzniknout může při vojenských operacích, nehodách na jaderných zařízeních a při zpracování jaderného odpadu. Klinicky se projevuje poškození mozkové tkáně křečemi, třesem, psychickou alterací a těžkou poruchou vědomí (4, 8).

1.3 Zdroje kontaminace

Ke kontaminaci může dojít prakticky všude tam, kde se používá radioaktivních látek, zejména otevřených zářičů. Radioaktivní látky mají velké využití v průmyslu, zdravotnictví, energetice a jinde. Proto je potřeba počítat s případy, že může dojít k jejich nekontrolovatelnému šíření.

Mezi mechanismy šíření patří vznik radioaktivního mraku při havárii na jaderném zařízení a následné vypadávání radioaktivních látek, rozlití nebo rozsypání radioaktivních látek při manipulaci s nimi, výbuch jaderné nebo radiologické zbraně, únik radioaktivních látek z přepravních kontejnerů při dopravní nehodě.

Fyzikálně chemické formy kontaminantu jsou různorodé, ve všech skupenstvích. Jejich aktivita může být rozdílná v rozsahu mnoha řádů. To vše bude záviset na podmínkách a čase uplynulého od vzniku a na charakteru prostředí v němž vznikly.

1.3.1 Jaderná energetická zařízení (jaderné reaktory)

Při jejich provozu vzniká jednak směs štěpných produktů, obsahující také původní nezreagované jaderné palivo a nově vznikající štěpný materiál a jednak radioaktivní korozní produkty, zejména v primárním okruhu. Nejzávažnější situace z hlediska rozsahu a stupně kontaminace může vzniknout při průmyslovém zpracování vyhořelého paliva.

Mezinárodní agentura pro atomovou energii zavedla škálu hodnocení událostí v zařízeních používajících jaderné technologie. Tato stupnice se skládá z osmi bodů a

slouží k usnadnění komunikace mezi jaderným společenstvím, médií a veřejností (5).

- Stupeň 0: jedná se o nejběžnější provozní poruchy bez významu pro bezpečnost, zvládnutelné silami daného zařízení. Např. špatně utažený ventil potrubí.
- Stupeň 1: odchylka od normálního provozu, nepředstavující riziko. Např. když pracovník provede nedostatečnou dekontaminaci a je následně odhalen dohlížejícím pracovníkem.
- Stupeň 2: porucha zařízení, neovlivňující činnost zařízení, ale vyžadující změnu v bezpečnostních pravidlech a opatřeních. Např. prasklé potrubí.
- Stupeň 3: vážná porucha spojená s ozářením obsluhy zařízení nad limitní hodnoty spojená s menším únikem radionuklidů do okolního prostředí o velikosti zlomku limitních hodnot.
- Stupeň 4: Havárie s účinky v jaderném zařízení, kdy je částečně zasažena aktivní zóna, ozářena obsluha zařízení a civilní obyvatelé v okolních obcích na hranici limitních hodnot. Např. bombový útok na uložistiště radioaktivního odpadu.
- Stupeň 5: havárie s účinky na okolí, kdy je nutno částečně evakuovat okolí elektrárny. Např: útok na dočasné uložistiště spojený s menším únikem radionuklidů do místního vodního toku.
- Stupeň 6: závažná havárie provázená značným únikem radioaktivních látek do okolí zařízení a vyžadující použití havarijních plánů k ochraně obyvatel žijících v okolí. Jedná se o nekontrolovatelný únik radionuklidů do životního prostředí, kdy je nutné obyvatele evakuovat a dekontaminovat.
- Stupeň 7: takovou událostí je velká havárie, při níž dochází ke kontaminaci velkého území unikajícími radioaktivními látkami a dlouhodobému ohrožení životního prostředí (5).

Při nehodě nebo havárii jaderného zařízení patří vedle zevního ozáření mezi hlavní expoziční cesty požití potravy kontaminované radioaktivními látkami a kontaminace povrchu těla a oděvu.

1.3.2 Jaderné zbraně

Zvláštním zdrojem kontaminace, co do rozsahu, je výbuch jaderné zbraně. Mezi jaderné zbraně v užším slova smyslu patří štěpné zbraně, termonukleární zbraně a neutronové zbraně, která představuje kombinaci štěpné a vodíkové zbraně. Další skupinu tvoří izotopické zbraně.

- **Štěpné zbraně** obsahují ^{235}U nebo ^{239}Pu . Jedná se o klasickou “atomovou” pumu. Principem je štěpná reakce těžkých atomových jader, která je provázená velkým množstvím energie. Charakteristický je hřibový mrak (obr. 3). Tyto zbraně jsou inventářem všech jaderných mocností (5).

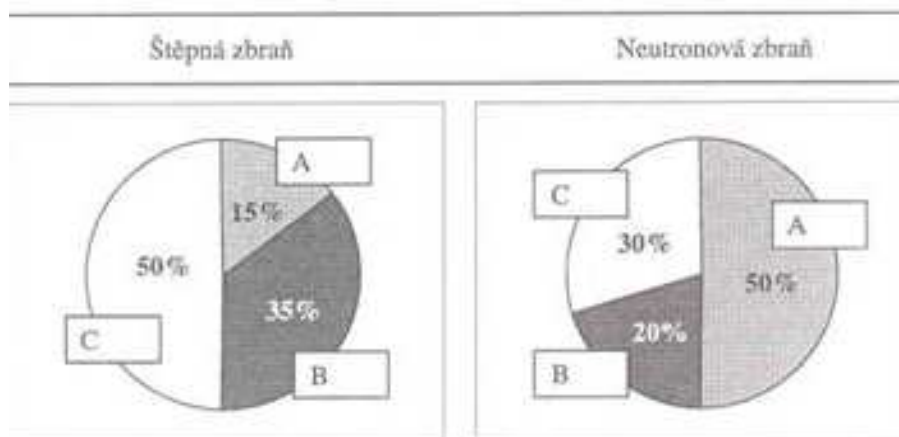
Obr. 3 Hřibovitý mrak po svržení atomové bomby na Nagasaki (13)



- **Termojaderné zbraně** tzv. „vodíková bomba“, nebo také syntetické či fúzní uvolňují energii opačným procesem než je štěpení. Jediným prvkem, který byl použit je vodík. Po výbuchu, který dodá potřebnou energii, se spouští jaderná syntéza, kdy dochází ke vzniku těžších jader z lehčích. Existují celkem čtyři typy syntetických reakcí mezi izotopy vodíku deuteriem a tritiem. Uvolněná energie je desetkrát větší než u štěpné zbraně (5).
- **Neutronové zbraně** jsou kombinací předchozích dvou typů zbraní. Složeny jsou z malé štěpné nálože a fúzní zbraně, kde je jako roznětka používána štěpná nálož.

Obr. 4 Podíl energie uvolněné při výbuchu štěpné a neutronové zbraně (8)

A – počáteční záření, B – tepelné záření, C – tlaková vlna



- **Třífázová jaderná nálož** uvolňuje energii ve třech fázích. První je štěpení v roznětce, druhá je termojaderná reakce a třetí následné štěpení. Způsobuje mnohonásobně vyšší radioaktivní kontaminaci ve srovnání s ostatními. V důsledku interakce neutronů s uranem vzniká navíc plutonia (5).
- **Izotopické zbraně** tzv. „špinavá bomba“. Jedná se o jakékoliv zařízení způsobující kontaminaci prostředí radioaktivní látkou bez použití jaderné detonace. Zbraň je tvořena klasickou trhavinou a radionuklidem. Mohutnost výbuchu je určena množstvím výbušniny. Použitý radionuklid je po chemické formě nejvýhodnější v kapalném nebo sypkém skupenství, protože po výbuchu je radionuklid rozptýlen na malé částičky, které organismus lépe naváže, nejvíce trávícím a dýchacím traktem. Jedná se o radionuklidy transuranové řady, které nejvíce poškozují organismus: ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I . Rizikovými místy pro útok špinavou bombou jsou nádraží, státní úřady, hypermarkety nebo se kontaminují potraviny a nádrže s pitnou vodou (8).

Účinky jaderných zbraní

V epicentru dochází k uvolnění tepelné energie, seismická vlna, elektromagnetický impuls, rychlostí zvuku se šíří tlaková vlna a vzniká počáteční záření (5).

- Tlaková vlna představuje 40 – 60 % celkové uvolněné energie při výbuchu. Tlaková vlna se šíří rychlostí zvuku. Obrovským tlak má účinek na lidské zdraví ve formě

prasknutí ušních bubínků nebo mnohočetného pneumothoraxu. Nejprve dochází k prudkému pohybu vzduchu od epicentra vlivem tepelné roztažitosti vzduchu v místě výbuchu. Tento jev označujeme jako primární tlakovou vlnu. Následuje ochlazení vzduchu a jeho smršťování zpět k epicentru, které tvoří sekundární tlakovou vlnu.

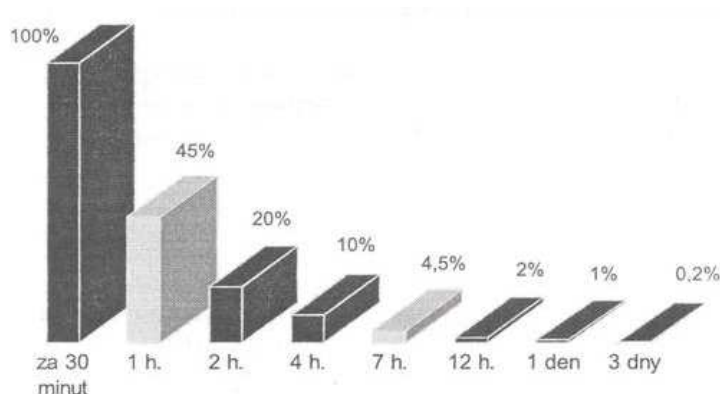
- Obrovská tepelná energie, která po výbuchu vznikne, tvoří 30 – 50 % celkové uvolněné energie. Teplota v epicentru je 6000 K, která způsobí sublimaci osob na místě a těžké popáleniny ve větší vzdálenosti (8).
- U pozemních, podzemních, nízkých vzdušných a podhladinových výbuchů se v půdě šíří seizmické vlny, které mohou ničit podzemní a zapaštěné objekty do vzdálenosti 1 kilometr. Dále může dojít k vyhození zeminy, která je vysoce radioaktivní (5).
- Elektromagnetický impuls způsobuje poškození všech elektrických zařízení.
- Ionizující záření, nazývané pronikavá radiace, představuje 5% celkové uvolněné energie. Sestává se ze záření gama a neutronového toku. Tento radiální impuls je závislý na typu a ráži jaderné náplně a trvá řádově mikrosekundu (5).

Radioaktivní stopa

Při vzdušném jaderném výbuchu nastává pouze nepatrné zamoření terénu v místě výbuchu. Při pozemním výbuchu se do radioaktivního mraku zvedne velké množství zeminy, která se stává také radioaktivní a postupně spadá na terén jako radioaktivní spad. Vypadáváním částic z mraku se tvoří radioaktivní stopa, též nazývaná prostor radioaktivního zamoření. Radioaktivní částice v radioaktivní stopě jsou tvořeny směsí štěpných produktů, sublimovanými předměty, zeminou a částmi nerozštěpené nálože(5).

Nejvyšší úroveň radiace (dávková intenzita) v radioaktivní stopě je na ose stopy - se vzrůstající vzdáleností od centra výbuchu a od osy stopy se snižuje. Dávkové příkony ve stopě se řídí tzv. sedmičkovým pravidlem, kdy úroveň dávkového příkonu klesne desetinásobně za sedminásobný čas po výbuchu (obr. 5). Pomocí sedmičkového pravidla můžeme simulovat dávkové příkony v radioaktivní stopě konkrétního výbuchu.

Obr. 5 Sedmičkové pravidlo (8)



Při činnosti v prostorech zamořených radioaktivními látkami může dojít k různému stupni zamoření osob, techniky a materiálu všeho druhu. Podle místa, kde k zamoření ze spadu dojde, dělíme jej na lokální a globální (8).

- K lokálnímu spadu dochází v blízkosti epicentra a týká se větších částic velikosti 20 – 40 mm. Menší vypadávají hned u epicentra, větší sedimentují do 24 hodin.
- Naproti tomu globální spad obsahuje jemné částice (20 mm a menší), které u epicentra nevypadávají protože rychle stoupají do atmosféry a jsou unášeny větrem. V závislosti na počasí vypadávají několik dnů až měsíců ve velkých vzdálenostech od epicentra (8).

Z biologického hlediska je důležité chemické složení radionuklidů obsažených v radioaktivním mraku. Jsou to radionuklidy, které jsou velmi dobře vstřebatelné (Cs, I), středně dobře vstřebatelné (Sr, Ba) a ty, které jsou nevstřebatelné nebo málo vstřebatelné (transurany, lanthanoidy) (8).

Pro znalost aktuální radiační situace, tedy pro odhad momentálních dávkových příkonů a celkových absorbovaných dávek se používá rozdělení radioaktivní stopy do zón podle NATO a Armády České republiky (tab. 3). Tyto zóny jsou důležité pro určení zdravotních rizik spojených s pobytem ve stopě. Např. hodinový pobyt v zóně D způsobí 50% úmrtnost vojsk (8).

Tab. 3 Rozdělení radioaktivní stopy do zón dle NATO (Z I a II) a AČR (A-D) (4)

Zóna	Celková dávka D_c	Příkon hodinu po výbuchu R(1h)
A	0,4–4 Gy	50 mGy
B	4–12 Gy	0,5 Gy/h
C	12–40 Gy	1,5 Gy/h
D	>40 Gy	5 Gy/h
NATO – Z I	<1,5 Gy (za 4 h)	
NATO – Z II	<0,5 Gy (za 24 h)	

Celkově shrnuto, nejzávažnější zdravotní újmu v důsledku radioaktivní kontaminace po pozemních jaderných výbuších, bude způsobovat zevní ozáření osob a dále též jejich povrchová kontaminace. Teprve v dalším pořadí půjde o následky způsobované inhalací radioaktivních látek a teprve poté o důsledky z příjmu kontaminované stravy. Závažnost příjmu radionuklidů stravou se však bude relativně zvyšovat s dobou uplynulou od pozemních jaderných výbuchů.

1.3.3 Kontaminace v medicíně

Dalším ze zdrojů kontaminace je použití radionuklidů v medicíně k diagnostice a léčbě. Oborem, využívajícím otevřených zářičů zaváděných do těla nemocného, je nukleární medicína. Pracovníci ostatních lékařských oborů využívajících zdroje ionizujícího záření jsou ohroženi především externím ozářením, naproti tomu pracovníci nukleární medicíny jsou vystaveni jak externímu záření, tak i ozáření z vnitřních zdrojů, jež pochází z vnitřní kontaminace.

Pracoviště nukleární medicíny

Prostory pracoviště, na kterých se manipuluje s radioaktivními látkami a je třeba na nich dodržovat režim ochrany jsou označovány jako kontrolované pásmo. Stavba, uspořádání a vybavení pracoviště, musí být provedeny tak, aby byla zajištěna dostatečná ochrana pracovníků, ostatních osob, životního prostředí a v případě havárie musí být umožněna co nejrychlejší a nejúčinnější dekontaminace osob i pracoviště (10).

Pracoviště nukleární medicíny se řadí mezi pracoviště s otevřenými zářiči. Tato

pracoviště se navíc řadí do kategorií podle zpracovávané aktivity. Pracoviště I. kategorie pracují s nízkými aktivitami radionuklidů, II. kategorie pracují se středními aktivitami radionuklidů a vyžadují opatření jako jsou ochranné pomůcky či digestoře. Pracoviště III. kategorie pracují s vysokými aktivitami otevřených radionuklidů a mají vysoké nároky na stavebně-technické uspořádání. V kontrolovaném pásmu by zde měly být 3 typy místností: pro náročné práce s vysokými aktivitami, pro běžné laboratorní práce a měřicí místnosti. Kromě toho speciální místnosti či prostory pro skladování radionuklidů a radioaktivních odpadů. Podlahy a stěny laboratoří musí být hladké a omyvatelné, podlahy dále vyspádované a opatřené odpadem. Mělo by být též zajištěno intenzivní větrání s filtrací. Kapalné radioaktivní odpady se vedou do vymíracích nádrží. Pracoviště musí být vybaveno vhodným stíněním, manipulátory, digestořemi a přístroji pro ochrannou dozimetrii. Kontrolované pásmo je zde odděleno od ostatních prostor hygienickými smyčkami s měřícím přístrojem a umývárnu (10).

Radioaktivní odpad je takový odpad vzniklý při používání zdrojů záření, který obsahuje radioaktivní látky. Tento odpad může být pevný, kapalný nebo plynný. Pevný setříděný odpad je podle aktivit a poločasů uložen ve vymírací místnosti, kde je skladován tak dlouho, až jeho aktivita přirozeným rozpadem poklesne pod stanovenou úroveň. Kapalné radioaktivní odpady, především ^{131}I , jsou vedeny do vymíracích jímek (10).

Kontaminace pracovníků

Při manipulaci s otevřenými radioaktivními látkami může dojít k jejich úniku a následné kontaminaci předmětů, pracovního prostředí a osob těmito radioaktivními látkami.

Nejčastěji dochází k povrchové kontaminaci pracovních ploch, pomůcek nebo osob. 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) setřeme příp. kontaminaci z definované plochy exponovaného

místa a pak ji ve zkumavce přeměříme studnovým scintilačním detektorem.

U pracovníků s vyššími aktivitami otevřených zářičů je dále nutno přešetřit, zda nedošlo k vnitřní kontaminaci. Provádí se to měřením záření gama pomocí citlivého scintilačního detektoru nad kritickými orgány. U ^{131}I je to štítná žláza, takže na pracovištích provádějících terapii štítné žlázy tímto radionuklidem je třeba periodicky měřit aktivitu štítné žlázy u všech pracovníků podílejících se na těchto terapiích (obr. 6) (10).

Obr. 6 Měření aktivity radioaktivního jódu ve štítné žláze scintilačním detektorem (9)



Kontaminace pacientů

Základním etickým požadavkem, platným pro radiační ochranu v nukleární medicíně, je vyvážení či převýšení rizika radiačního poškození při diagnostických nebo terapeutických výkonech, očekávaným zdravotním přínosem pro pacienta. Proto je v nukleární medicíně třeba aplikovat takové nezbytně nutné množství radioaktivní látky, které zaručuje dostatečnou diagnostickou informaci při co nejnižší radiační zátěži pacienta. Aktivita každé radioaktivní látky aplikované pacientovi musí být změřena na správně kalibrovaném a metrologicky ověřovaném měřiči aktivity, aby nedošlo k aplikaci velmi vysoké aktivity, která by mohla pacienta poškodit. Hodnota aplikované aktivity musí být zapsána v dokumentaci o diagnostice či terapii (10).

1.3.4. Ostatní možné zdroje kontaminace

Doly a závody zabývající se těžbou a úpravou radioaktivních surovin mohou způsobit kontaminaci vody přirozeně radioaktivními prvky. Množství odpadních vod a obsah kontaminujících prvků jsou závislé na typu těžby a metodě zpracování

radioaktivních surovin. Především se jedná o těžbu uranové rudy a její další zpracování.

Dále můžeme zmínit provozní zařízení zaměřená na přípravu radiofarmak a radionuklidů vůbec, jako jsou např. cyklotrony, urychlovače a jaderné reaktory. K méně významným, přesto nezanedbatelným zdrojům kontaminace náleží výzkumné ústavy zabývající se výrobou a využitím radionuklidů. Ke kontaminaci může dojít jak při jejich výrobě, tak i dopravě.

V průmyslu nachází radionuklidy též široké uplatnění. Zde může dojít k situaci, že je dán do železného šrotu přístroj nebo zařízení, jehož součástí je radionuklidový zářič. Tento zářič je většinou uzavřen v původním kovovém pouzdře. Při nálezu jakéhokoliv podezřelého předmětu je třeba vyvarovat se dělení, protože při porušení pouzdra radionuklidového zářiče může tento kontaminovat životní prostředí i samotné osoby s ním manipulujícími.

Ke kontrole svárů a namáhaných výrobků ve strojírenství slouží tzv. defektoskopie, pracující na podobném principu jako rentgenové přístroje, využívají ovšem zdroje gama záření. Např. ^{192}Ir , ^{60}Co nebo ^{75}Se .

Dále v prádelnách, tkalcovnách, gumárnách a papírnách jako eliminátory elektrostatického náboje při navíjení cívek nebo rolí.

Ve výrobních halách a výškových budovách jsou radioaktivní zářiče obsaženy v čidlech hlásičů požáru.

Indikátory poloh a hladin a radioizotopová spínací relé představují jedno z nejčastějších použití zdrojů ionizujícího záření, především ^{60}Co a ^{137}Cs . Jsou založeny na odstínění záření gama přepravovanou nebo skladovanou látkou. Používají se nejčastěji v dolech a elektrárnách s pásovými přepravníky, v místech s uskladněním sypkých hmot a v potrubích k signalizaci přítomnosti přepravované látky.

Radioizotopový termoelektrický generátor je dlouhodobý a spolehlivý zdroj stejnosměrného elektrického proudu, využívající k získání tepelné energie rozpadu radioaktivních prvků. Např. izotop ^{238}Pu . Jsou využívány pro automatické monitorovací stanice v odlehlých oblastech, ale především v kosmických aplikacích (13).

1.4 Události s rizikem kontaminace

Ke kontaminaci prostředí může docházet jak při normálních podmínkách provozu zařízení a používání zářičů, tak při vzniku radiačních havárií. Legislativa v oblasti radiační hygieny nastolila takový systém kontroly zdrojů záření, že pravděpodobnost úniku radionuklidů do přírodního prostředí je minimalizována takřka na nulu. Na druhé straně, pokud se bude lidská činnost zabývat radioaktivními látkami, riziko uvolnění radionuklidů stále existuje. Pro tyto případy je součástí systému radiační ochrany je i připravenost na radiační nehody a mimořádné události. Jedná se o soubor opatření zahrnující zpracování havarijních plánů, zajištění infrastruktury a materiálového vybavení pro jejich uskutečnění v případě potřeby a kvalifikační průpravu všech osob, které by se na opatřeních v případě nehody mohly podílet (5).

1.4.1 Mimořádná událost

Atomový zákon ji definuje jako událost důležitou z hlediska jaderné bezpečnosti nebo radiační ochrany, která vede nebo může vést k nepřipustnému uvolnění radioaktivních látek nebo ionizujícího záření, případně ke vzniku radiační nehody nebo radiační havárie. Tyto mimořádné události jsou podle závažnosti členěny do tří základních stupňů: mimořádná události 1. - 2. stupně jsou radiační nehody, 3. stupeň je radiační havárie (12).

- **Radiační nehoda** - atomový zákon definuje jako radiační nehodu událost, která má za následek nepřipustné uvolnění radioaktivních látek nebo ionizujícího záření nebo nepřipustné ozáření osob. V prvním stupni má lokální charakter a k jejímu řešení dostačují síly obsluhy. Druhý stupeň má větší rozsah, nevyžaduje zavádění opatření na ochranu obyvatelstva a životního prostředí. V praxi radiační ochrany se nejčastěji setkáváme s nehodami na pracovištích, které postihují jednotlivce obsluhující zdroje způsobující vysoké příkony ekvivalentní dávky nebo při porušení těsnosti ochranných bariér vysoké objemové aktivity v ovzduší s následnými vysokými inhalačními příjmy radioaktivních látek. Postižení pracovníci mohou být ohroženi akutním lokálním nebo celotělovým poškozením zdraví deterministického typu (2).

- **Radiační havárie** je radiační nehoda, vedoucí k nepřijatelnému závažnému uvolnění radioaktivních látek do životního prostředí. Jedná se o mimořádnou událost třetího stupně, která vyžaduje neodkladná opatření na ochranu obyvatelstva a životního prostředí. Tato opatření jsou stanovena ve vnějším havarijním plánu kraje. O radiační havárii na území ČR se hovoří především ve spojitosti s jadernými elektrárnami. Důsledky radiační havárie jaderné elektrárny se neomezuje pouze na prostory elektrárny, ale ovlivňují i její okolí zejména únikem radioaktivních látek do životního prostředí. I když je riziko havárie plynoucí z provozu jaderných zařízení malé, každá jaderná elektrárna sebou určité riziko nese (4).

1.4.2 Limity ozáření

Vyhláška 307/2002 Sb. rozlišuje několik druhů základních limitů jako závazných kvantitativních ukazatelů, jejichž překročení není podle zákona č. 13/2002 Sb. přípustné, a dále odvozené limity, omezující stejné případy ozáření jako základní limity pro radiační pracovníky, ale vyjádřené ve snáze měřitelných veličinách. Limity pro jednotlivé skupiny jsou dány součtem efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření (tab 4). Rozlišujeme obecné limity, limity pro radiační pracovníky a limity pro učně a studenty (od 16 do 18 let). Limitům nepodléhá lékařské ozáření, ozáření z přírodních zdrojů a havarijní ozáření zasahujících fyzických osob (11).

Tab. 4 Základní limity stanovené vyhláškou č. 307/2002 Sb. (4)

Veličina	Limity pro radiační pracovníky		Limity pro učně a studenty	Obecné limity
	za 5 za sebou jdoucích roků (mSv)	za rok (mSv)	za rok (mSv)	za rok (mSv)
E + E	100	50	6	1
H oční čočka	-	150	50	15
H kůže	-	500	150	50
H končetiny	-	500	150	-

1.4.3 Nejvýznamnější radiační nehody

Za dobu rozvoje jaderné energetiky a užití radionuklidů v různých oblastech, se stalo již více vážnějších událostí. V tabulce 5 jsou uvedeny příklady radiačních nehod.

Tab. 5 Významné radiační nehody od roku 1944 (4)

Místo	Rok	Počet ozářených	Počet zemřelých	Dozimetrické údaje
Los Alamos, USA	1945 - 1946	10	2	7,5 – 10 Gy (γ, měkké X paprsky)
Oak Ridge, USA	1958	8	0	0,7 – 3,4 Gy (n, γ záření)
Jugoslávie	1958	6	1	2 – 4,4 Gy (n, γ)
Lockport	1960	9	0	nezjištěno
Černobyl	1986	25 000	28	0,15 – 16 Gy (α, β, γ záření)
Goiania	1987	249	4	0,05 – 7 Gy (α, β, γ záření)
Tammik, Estonsko	1994	5	0	> 0,5 Gy, ¹³⁷ Cs v pouzdře 2,5 mSv/h
Irán	1996	1	0	4 Gy, ¹⁹² Ir 185 GBq
Lilo, Gruzie	1997	11	0	dávka nezjištěna ¹³⁷ Cs a ⁶⁰ Co (γ záření)
Tokai-mura	1999	24	2	0,1 – 8 Sv, (n a γ záření)
Istanbul	1998	10	0	0,1 – 2 Gy, ⁶⁰ Co, (γ záření)

Jaderná havárie Černobyl 1986, SSSR (nyní Ukrajina)

Největší jaderná havárie v historii jaderné energetiky se odehrála 26. dubna 1986. Svým obrovským dosahem měla dalekosáhlé zdravotní následky a dlouhodobý dopad na životní prostředí. K výbuchu došlo na čtvrtém bloku jaderné elektrárny po experimentálním testu, kdy se odehrálo několik závažných lidských chyb a nedodržení bezpečnostních předpisů. Většina zasahujících hasičů, členů armády a ostatních

zasahujících pracovníků nebyla informována o jakémkoliv radiačním nebezpečí. Mnoho jich následně zemřelo na akutní nemoc z ozáření (13).

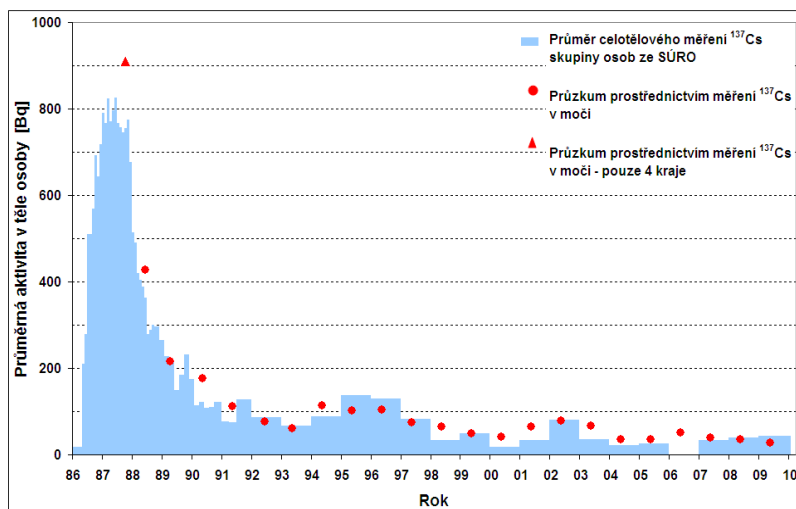
Po explozi reaktoru se do vzduchu se uvolnil radioaktivní mrak, ve které kontaminovaný materiál nebyl jednoduše rozprášen do okolí, ale roztrousil se nepravidelně v závislosti na počasí. Mrak postupoval západní částí Sovětského svazu, Východní Evropou a Skandinávií. Byly kontaminovány rozsáhlé oblasti Ukrajiny, Běloruska a Ruska, což si vyžádalo evakuaci a přesídlení asi 200 000 lidí. Přibližně 60 % radioaktivního spadu skončilo v Bělorusku (13).

Radioaktivní látky ve formě střeptů dopadaly v blízkosti zničeného reaktoru, mikročástice dopadaly převážně do vzdálenosti několik desítek kilometrů a malé mikročástice byly rozšířeny v okruhu několik stovek až tisíců kilometrů. Radioaktivní spad byl z velké většiny zapříčiněn deštěm.

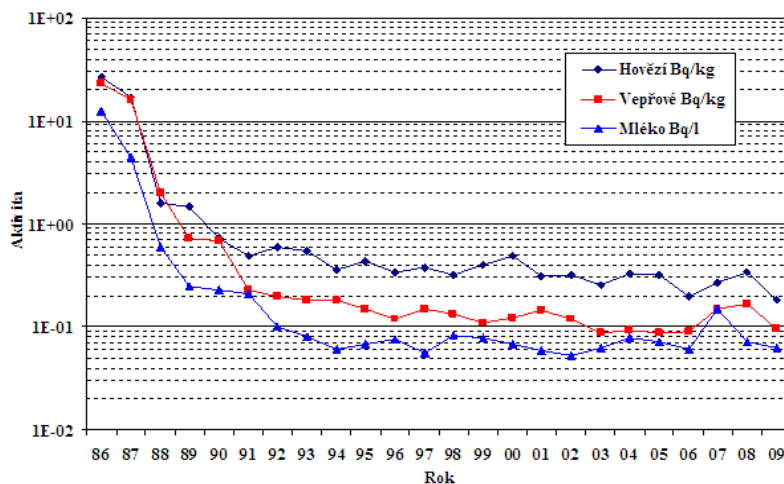
Vlasní průchod radioaktivního mraku nepředstavoval zvýšené riziko zevního ozáření, ovšem radioaktivní spad způsobil nezanedbatelné následky ve formě kontaminace. Nehomogenita v kontaminaci území byla způsobená především v důsledku nerovnoměrných srážek při přechodu jednotlivých vzdušných mas. Proto v místech, kde při průchodu mraku přšlo bylo větší zamoření terénu a následné ozáření obyvatelstva. V České republice způsobila radioaktivita z černobylské havárie za první rok ekvivalentní dávku průměrně 0,22 mSv u dospělých. V následujících letech klesala ekvivalentní dávka tak, jak se v životním prostředí snižoval obsah radioaktivních nuklidů (9).

V aerosolech bylo identifikováno až 20 různých radionuklidů. Nejvýznamnější radionuklidy, které podílely na ozáření byly zejména, krátkodobé ^{131}I , ^{132}I , ^{132}Te , ^{103}Ru a dlouhodobé ^{137}Cs , ^{134}Cs (Tab. 6). Hlavní pozornost byla soustředěna na sledování obsahu radionuklidů v mléce a mléčných produktech, protože ty byly největším zdrojem příjmu ^{131}I , ^{137}Cs a ^{134}Cs (Tab. 7). Mnoho takto kontaminovaných potravin a zemědělských produktů muselo být zlikvidováno. Vývoj obsahu ^{137}Cs u českého obyvatelstva a v potravinách je zachycen v tab. (9).

Tab. 6 Vývoj obsahu ^{137}Cs u českého obyvatelstva po černobylské havárii (9)



Tab. 7 Průměrné roční hmotnostní aktivity ^{137}Cs ve vepřovém a hovězím mase a objemové aktivity ^{137}Cs v mléce od roku 1986 (9)



Radiační nehoda v Goiâni 1987, Brazílie

Incident se odehrál na opuštěné radioterapeutické klinice, kde byl ponechán cesiový zdroj v ozařovači bez jakéhokoliv dohledu. Jednalo se o malou, vysoce aktivní kapsli obsahující chlorid cesný ve formě prášku o aktivitě 50,9 Tbq.

Do opuštěného objektu byl volný přístup. Dva sběrači odpadků jej odvezli a prodali,

čímž bylo kontaminováno mnoho dalších osob. K největšímu rozšíření kontaminantu došlo při otevření stínícího obalu a rozsypaní prášku na podlahu. Lidé, kteří s práškem přišli do kontaktu jej roznegli na botách do okolí a několika blízkých měst. Lidem se líbilo jak prášek modře světélkuje a někteří si s ním potírali tělo.

Rozsáhlá dekontaminace zahrnovala zbourání vysoce kontaminovaných domů a vybagrování svrchních vrstev půdy. Bylo kontaminováno na 400 lidí a 5 zemřelo. Od nálezů po získání zdroje zpět zůstalo v prostředí asi 7 Tbq.

1.5 Radionuklidy významné z hlediska kontaminace

Jód (¹³¹I, ¹³³I)

Kontaminace radioaktivním jódem je v civilním prostředí vysoce pravděpodobná při jaderných haváriích, kdy radiojód je součástí radioaktivního mraku uvolněného z havarovaného reaktoru. Radioaktivní jód je gama a beta emitör s fyzikálním poločasem rozpadu 8,04 dne. Nejdůležitějšími izotopy jódu jsou ¹³¹I a ¹³³I. Je velmi dobře vstřebatelný a rozpustný ve vodě. Do organismu se dostává vdechnutím nebo požitím. Po vstřebání do krevního řečiště se kumuluje ve štítné žláze obdobně jako neradioaktivní jód. Aktivita jódu ve štítné žláze se obvykle dekuje scintilačním detektorem s kolimátorem. Intenzita vstřebávání je především ovlivněna příjmem běžného jódu v potravě nebo onemocněním štítné žlázy. Za normálního stavu je to asi 30 % radiojódu, který následně opouští štítnou žlázu navázaný na hormon štítné žlázy s biologickým poločasem 80 dnů a je distribuován po celém organismu. Nevstřebaný radiojód je z těla vyloučen močí, jeho biologický poločas v krvi je 6 hodin.

Vzhledem ke specifickému vychytávání radiojódu ve štítné žláze, stává se tato žláza kritickým orgánem s poměrně velkou radisenzitivitou. Vysoké absorbované dávky způsobují jak akutní účinky ve formě hypofunkce, tak i pozdní účinky ozáření charakteristické vyšší pravděpodobností výskytu karcinomu tohoto orgánu. Kontaminace radioaktivním jódem po jaderné havárii v Černobylu je hlavní příčinou velkého zvýšení výskytu rakoviny štítné žlázy a prakticky jedinou příčinou výskytu tohoto onemocnění v dětské populaci (8).

Stroncium (^{89}Sr , ^{90}Sr)

Radioaktivní stroncium je dobře vstřebatelný beta a gama emitor, existující ve formě dvou izotopů ^{89}Sr a ^{90}Sr . ^{90}Sr je dobře vstřebatelné, patří mezi dlouhodobé osteotropní nuklidy a chemicky se chová jako vápník. Jeho fyzikální poločas rozpadu je 27,7 let.

Po podání do organismu sleduje metabolismus vápníku. K inkorporaci do kostí dochází již po 24 hodinách, kde se váže na hydroxyapatit kovalentní vazbou vytěsňujíc atomy vápníku. Tato vazba je velmi pevná a proto je eliminace radioizotopů stroncia pomalá a obtížná. Většina radioaktivního stroncia je vyloučena do 3 měsíců, zbylé množství je zabudováno trvale a nerovnoměrně, což způsobuje neuniformní ozáření kosti.

Nejzávažnějším zdrojem stroncia je v oblastech jaderných havárií jsou povrchově kontaminované plodiny, mléko, kořenové rostliny kontaminované půdou nebo přes další články potravinového řetězce.

Zabudováno v kostech radiostroncium bezprostředně ozařuje orgány krvetvorby a kontaminovaný pacient je pak ohrožen pancytopenickou anémií. Nejzávažnějším účinkem kontaminace stronciem jsou pozdní výskyty osteosarkomů, nádorových onemocnění, leukémie a jiných, které vzniknou po uplynutí několika let po kontaminaci.

^{89}Sr se chová obdobně jako ^{90}Sr , má však kratší poločas rozpadu, tedy 52,7 dne (8).

Plutonium (^{239}Pu)

Plutonium je silně radioaktivní těžký kov, alfa a gama emitor. Fyzikální poločas je 24 000 let. Izotop ^{239}Pu vzniká jak při štěpení uranu v jaderných reaktorech, tak při jaderném výbuchu. Bylo použito jako nálož jedné ze dvou bomb svržených na Nagasaki v Japonsku. Elementární plutonium je pokládáno za jednu z nejtoxičtějších anorganických látek. Tento přirozeně jedovatý prvek se po vstřebání váže na povrch kostí, kde je velmi silně vázán a jeho vylučování ledvinami je pomalé. Jako nejnebezpečnější byla zjištěna cesta inhalační (8).

Uran (^{238}U , ^{235}U , ^{239}U)

Uran je radioaktivní prvek, který emituje všechny typy záření, nejvíce však alfa částice. Nejčastěji se vyskytující izotopy uranu jsou ^{238}U , ^{235}U a ^{239}U využívané při

řetězové reakci. Poločas rozpadu je až několik miliónů let, proto aktivita klesá velmi zvolna. Uran se používá jako palivo v jaderných reaktorech nebo jako náplň jaderných bomb. Vstřebatelnost izotopů uranu z gastrointestinálního traktu je jako u ostatních těžkých kovů nízká. Dojde-li k průniku do organismu, jsou molekuly uranu velmi toxické pro parenchym ledvin již v koncentraci 0,1 mg/kg. V ledvinách lze v závislosti na koncentraci použitého uranu pozorovat nekrotické změny proximálních tubulů ledvin od 6 hodin po několik dní po kontaminaci (8).

Tricium (^3H)

Tricium je dalším široce používaným izotopem, který je slabým beta emitorem a nepředstavuje závažné riziko. Fyzikální poločas je 12,3 roku. Jde o atom vodíku se dvěma neutrony. Je využíván jak ve vodíkových pumách, tak ve výzkumných laboratořích. Nejčastěji se vyskytuje ve formě triciové vody T_2O , která je obdobně jako ostatní molekuly vody dobře vstřebatelná a rychle se vylučuje. Propustnost do všech tkání je též vysoká a biologický poločas je asi 10 dní. K inkorporaci do strukturálních molekul lidského těla (proteiny, mastné kyseliny, cukry) dochází jen u 3% molekul triciové vody (8).

Cesium (^{134}Cs , ^{137}Cs)

Mezi významné dlouhodobé radionuklidy patří zejména ^{137}Cs s poločasem rozpadu 30 let. Cesium emituje záření beta a gama. Po vstupu do živého organismu se césium chová jako draslík, který je typickým nitrobuněčným kationtem. Snadno se vstřebává (asi 80%) a poněvadž se volně pohybuje v buňce, může emitovanou radiací poškozovat buněčné organely i jádro buňky. Usazuje se především ve vaječnících a svalech. Jeho množství v buňce je určeno stupněm prokrvení tkáně. Jeho buněčný poločas je 110 dní a vylučuje se močí.

Jeho dceřinným prvkem je ^{134}Cs s poločasem rozpadu 2,5 roku. Metabolizuje se jako draslík a ukládá se hlavně ve svalech.

Do potravinového řetězce se dostává v důsledku povrchového zamoření vegetace, píče a potravin, pevně se váže na půdu. V přírodě ho nejvíce zůstává po havárii jaderné elektrárny v Černobylu. Potože se jedná o radionuklid s dlouhým poločasem rozpadu,

představuje cesium jeden z nejvýznamnějších kontaminujících radionuklidů při havárii jaderné elektrárny. Je součástí směsi štěpných produktů uvolněných do prostředí. Po úniku klesne zamoření na přijatelnou mez po 100 až 300 letech (13).

Cér (^{144}Ce)

Jedná se o prvek ze skupiny lanthanoidů, který je obsažen ve směsi štěpných produktů. Cér je beta a gama emitor s poločasem 284,3 dnů. Atomy tohoto prvku mají nízkou vstřebatelnost v trávicím traktu, z čehož vyplývá zvýšené riziko poškození tlustého střeva. Ta část, která se vstřebá se ukládá především v játrech, kostech a minimálně v ostatních orgánech (8).

Americium (^{241}Am)

Americium je vysoce radioaktivní prvek, dceřiný produkt plutonia, alfa zářič s poločasem rozpadu 432,2 let. Ve velkých dávkách představuje velké radiační riziko, zejména u inhalační cesty vstupu do organismu a kožními lézemi. Naopak vstřebávání gastrointestinálním traktem je minimální. Po vstupu do organismu se inkorporuje v kostní tkáni, poškozují játra, ledviny a gonády (8).

Kobalt (^{60}Co)

Izotop kobaltu ^{60}Co je produktem aktivace v jaderném reaktoru. Jde převážně o gama emitor s poločasem rozpadu 5,26 let. Je využíván především v medicíně jako zdroj záření k zevnímu ozařování pacientů. Z celého objemu vstřebaného radionuklidu je polovina vyloučena do půl dne, zbylé množství je distribuováno do celého organismu, odkud je převážná většina vyloučena za 6 dní močí nebo žlučovými cestami.

Fosfor (^{32}P)

Izotop fosforu je beta emitor s poločasem rozpadu 14 dní. Můžeme ho najít ve výzkumných laboratořích nebo lékařských přístrojích jako izotopový indikátor. Molekuly fosforu jsou dobře vstřebatelné všemi cestami vstupu do organismu. Fosfor se inkorporuje v kostní tkáni, kde způsobuje poškození zejména buněk s vysokou mitotickou aktivitou (8).

Radium (^{226}Ra)

Tento mimořádně silný radioaktivní zářič, vzniká jako produkt thoriové i uranové rozpadové řady a dále se radioaktivně přeměňuje. Jedná se o alfa a gama emitor s dalšími dceřinnými produkty a s poločasem rozpadu 1600 let. Dnes je radium využíváno minimálně, ale dříve se používalo hojně k brachyterapeutickému ozařování rakovinových nádorů. Radium se dobře vstřebává do kostí, a jelikož jeho retence v kostěných lamelách je velmi dlouhá a při nadlimitních kontaminacích dosahuje až jednotek Gy, je nebezpečná pro kostní dřen, kdy může způsobit anémii, chronickou formu nemoci z ozáření nebo leukémii.

Nejznámější případ vnitřní kontaminace radiem se odehrál ve 20. letech minulého století, kdy stovky dělnic v továrně na výrobu náramkových hodinek doplatilo na svou práci. Tyto ženy potahovaly ciferníky hodinek barvami obsahujícími radium, které pak ve tmě světélkovaly. Při tom docházelo k vdechování rozpadového produktu radia, tedy radonu. Dělnice po ujištění, že radium je bezpečné si malovali barvou nehty, tělo, ale i zuby, aby ve tmě zářily. Dalším zvykem bylo olizování špiček štětců pro přesnější malování, kdy malé množství barvy spolklly. Mnoho z nich v následujících letech zemřelo na rakovinu hrtanu, štítné žlázy a na nádory v ústní dutině (13).

Californium (^{252}Cf)

Californium je alfa zářič, poločas je rozpadu 2,638 let. Jeho biokinetika je podobná jako u ostatních transuranů. Atomy tohoto prvku se inkorporují především v kostech, játrech a gonádách.

Olovo (^{210}Pb)

Radioaktivní olovo emituje beta a gama záření s poločasem rozpadu 22,3 roku. Ukládá se především v kostech. Stopová množství můžeme nalézt i v játrech a ostatních tkáních.

1.6 Vnější kontaminace

Pojmem vnější (zevní, povrchová) kontaminace označujeme stav, kdy jsou radioaktivní látky z různých zdrojů, ve formě kapaliny nebo pevných částic, přítomny na povrchu těla osob, tedy na kůži a oděvu. Zevní kontaminace patří k nejčastějším případům zasažení osob radioaktivními látkami. Ke kontaminaci dochází přímým stykem s rozptýlenou radioaktivní látkou, potřísněním nebo sedimentací aerosolů nebo prachu. Jedná se o spektrum zasažení od nezávažné lokální zevní kontaminace, např. rukou při kontaktu s radioaktivními látkami, po závažné lokální kontaminace zářiči. Vnější kontaminace může být jediným upozorňujícím jevem na možnou vnitřní kontaminaci při pobytu v místnostech s radioaktivními aerosoly (8).

1.6.1 Charakter poškození při vnější kontaminaci

Většina radionuklidů jsou beta a gama emitory. Beta emitory jsou zvláště nebezpečné při zevní kontaminaci nechráněné kůže, kdy pronikají do pokožky v hloubce 2-5 mm a způsobují vážně popáleniny. V případě, že k této kontaminaci dojde, je dávka z beta záření v pokožce 5-10 vyšší než současná dávka ze záření gama.

Radiační dermatitida

Radiační dermatitida je druh postradiačního poškození kůže, ke kterému dochází po celotělovém nebo lokálním ozáření dávkami 3 Gy a vyššími. Ve spojitosti s vnější kontaminací vzniká při pobytu v radioaktivní stopě, kdy dojde k těžké kontaminaci kůže beta zářiči nebo při radiačních nehodách (4).

Podle závažnosti rozdělujeme radiační dermatitidu do tří stupňů. První stupeň akutní radiační dermatitidy nastupuje několik hodin po ozáření dávkou 3-6 Gy. Objeví se zarudnutí kůže nazývané erytém. Pro tento erytém je charakteristický jeho dvoufázový průběh. Časný erytém do 24 hodin zmizí, nastane období klidu trvajícím 10-15 dnů. Poté se projeví vlastní odezva na ozáření, tedy pozdní erytém, při kterém dochází ke zduření kůže a bolestivosti. Při dávce kolem 3 Gy dochází i k epilaci, která po dávce 6 Gy může být trvalá a to nejvýrazněji na místech s rychlou obnovou vlasů a chlupů, tedy hlava a vousy. Čím je dávka vyšší, tím nastupuje erytém dříve, stejně tak jako epilace. Po dávce 6 – 12 Gy kůže ztmavne s úplnou epilací. Při 12 – 15 Gy dojde k suchému zánětu kůže,

olupování epidermis a hyperpigmentaci (4).

Radiační dermatitida druhého stupně vzniká po ozáření nad 10 Gy. Po ozáření dávkou 16 – 20 Gy nastupuje pozdní erytém na začátku 2. týdne. Hlavním projevem je tvorba puchýřů, vznikající na podkladě oddělení pokožky od pojivového podkladu tekutinou, která vystupuje z cév. Hojení na konci 4. týdne je doprovázeno mokváním a jizvením kůže, depigmentací, případně pigmentací s trvalou epilací. Po vyšších dávkách je nástup příznaků rychlejší, kůže je oteklá, na místě puchýřů vznikají hluboké trhlinky hojící se jizvením, rozšíření kapilár a atrofie kůže. Kůže je tenká, jemná, šupinatá a snadno zranitelná (4).

Pokud dojde k těžšímu poškození cév, vyživujících tkáň, s následným odumřením a vznikne vřed, mluvíme o třetím stupni radiační dermatitidy. Nastupuje po dávce nad 25 Gy. Od prvního dne se rozvíjí akutní kožní nekróza, sahající do hloubky a špatně se hojící atrofickou jizvou. I po zhojení je další osud postiženého okrsku kůže nejistý. Nová pokožka je tenká a špatně odolává mechanické a termické zátěži i infekci. Rozvojem degenerativních změn může i po letech vzniknout pozdní vřed vyžadující chirurgický zákrok.

Lehké formy radiodermatitid se hojí několik týdnů, střední několik měsíců, těžké několik let. Nejvíce radiosenzitivní jsou bazální buňky epidermis, nejméně pak buňky potních a mazových žláz (4).

Obr. 8 Lokální poradiační poškození kůže



Tab. 6 Klinické známky radiační dermatitidy v závislosti na čase a dávce záření (8)

Příznak	Dávkový rozsah (Gy)	Čas nástupu (dny)
Sekundární erytém	3 - 10	14 - 21
Epilace	nad 3	14 - 18
Suchá desquamace	8 - 12	25 - 30
Vlhká desquamace	15 - 20	20 - 28
Tvorba puchýřů	15 - 25	15 - 25
Zvředovatění	nad 20	14 - 21
Nekróza	nad 25	nad 21

Průběh radiačního poškození kůže dělíme do pěti údobí. První stádium radiační dermatitidy je fáze prvotního erytému, po němž následuje bezpříznakové latentní období. Po jeho ukončení se rozvíjí manifestní fáze nemoci, stádium druhotného erytému, které ústí do stádia odeznívání poškození. Konečnou fází jsou pak přetrvávající následky nemoci (4).

1.6.2 Ochrana před vnější kontaminací

Ochrana při práci s otevřenými zářiči

Opatření k omezení kontaminace při práci s otevřenými zářiči mají za cíl snížit pravděpodobnost vzniku radiační nehody s následnou kontaminací. Patří mezi ně:

- na pracoviště, kde se s otevřenými zářiči pracuje, tedy do kontrolovaného pásma mají přístup pouze osoby zde zaměstnané, přičemž jsou opatřeni odpovídajícím dozimetrem, dále osoby nadřízené a kontrolní orgány (obr. 9),
- použití osobních ochranných pomůcek jako jsou gumové rukavice, ochranný oděv nebo brýle. Po skončení práce musí být rukavice svlékány velmi opatrně, aby nedošlo ke kontaminaci rukou.
- radionuklidy při manipulaci v žádném případě nebrat do ruky, ale použít odpovídající pracovní pomůcky jako pinzety, kleště nebo kontejnery (obr. 10).
- dojde-li ke kontaminaci, provede se dle vnitřního havarijního plánu pracoviště ihned předepsaná dekontaminace (4).

Obr. 9 Kontrolované pásmo



Obr. 10 Manipulační pinzeta



Ochrana před radioaktivním spadem

Účinky radioaktivního spadu působí ve srovnání s pronikavou radiací mnohem déle, ale energie záření, které spad emituje je podstatně nižší.

Ochranu proti záření lokálního jaderného spadu poskytují ochranné prostředky jednotlivce jen zčásti. Jde zejména o dokonalou ochranu proti záření alfa a částečnou ochranu proti záření beta, kdy jen zcela nepatrně je oslabováno záření gama.

K ochraně před ozářením z povrchové kontaminace slouží ochranné oděvy a jejich průběžná dezaktivace, popřípadě častá obměna normálních oděvů či improvizovaných prostředků ochrany povrchu těla s následnou hygienickou očištěním osob a speciální očištěním oděvů. Vhodné je rovněž provádět co nejčastěji částečnou hygienickou očištění osob v průběhu jejich činnosti v kontaminovaném prostoru (5, 14).

K ochraně jednotlivce slouží individuální prostředky ochrany.

- oděvy (speciální ochr. oděvy, protichemické oděvy se zdrojem kyslíku) (obr. 11)
- přezůvky, rukavice,
- jednorázové pláštěnky a filtrační převleky (obr. 12) ,
- vaky a kazajky pro děti (vaky pro novorozence, kazajky pro děti od 1,5 roku) (14).

Obr. 11 Ochranný oděv se zdrojem kyslíku



Obr. 12 Jednorázová ochranná pláštěnka



Pro ochranu civilního obyvatelstva neexistují žádné jednorázové ochranné pláštěnky, počítá se s použitím improvizovaných prostředků. Hlavu kryjeme šátkem, klobouky nebo přilbami. Trup, ruce a nohy se chrání kabáty, bundami, rukavicemi, kalhotami nebo kombinézami. Rukávy a nohavice je nutno ještě utěsnit.

Kolektivní ochrana představuje kombinaci ukrytí a evakuace. Pokud postupuje radioaktivní mrak, musí se dát přednost ukrytí před evakuací. Ukrytí zahrnuje improvizované úkryty, chránící pouze před radioaktivním spadem. Dále jsou to ochranné stavby, které při dostatečném utěsnění a vybavení filtračním a ventilačním zařízením poskytují dokonalou ochranu před kontaminací. Evakuace je přemístění obyvatel, hospodářských zvířat a věcných prostředků na jiné území. Evakuaci vyhláší Státní úřad pro jadernou bezpečnost na základě výsledků měření radiační studie (5, 14).

1.6.3 První pomoc a léčebná péče o zevně kontaminované

Opatření k likvidaci následků, tzv. dekontaminace prováděná při zevní kontaminaci radioaktivními látkami je označována jako dezaktivace. Je klíčovým a nezbytným bodem reakce krizového systému na radiační události s kontaminací osob, materiálu a infrastruktury (5).

Zevní dekontaminace se provádí před příchodem do zdravotnického zařízení, ve kterém následuje specializovaná lékařská pomoc. Dekontaminace osob při vnější kontaminaci radionuklidy významně snižuje riziko nebo zabraňuje vzniku radiační

dermatitidy.

V případě, že je postižený ohrožen na životě, provedou se život zachraňující výkony před vlastní dekontaminací. Prostory, kde byly život zachraňující výkony provedeny, společně se zdravotnickým personálem, se dekontaminují posléze (5).

Základním vodítkem pro další léčebný postup je co nejpřesnější stanovení dávky záření a její distribuce v ozářeném organismu. Měření dávkových příkonů slouží k odlišení zevní a povrchové kontaminace, ale také jako podklad k organizaci dekontaminačních prací. Toto měření zajišťují dozimetristé s příslušnými dozimetrickými přístroji a vyhodnocení osobních dozimetrů. Mezi dozimetry patří např. personální dozimetr DD80 a vyhodnocovací přístroj VDD80. Umožňuje stanovit dávku směsného záření gama a neutronů. Dále se používá osobní dozimetr RAD-50S či dozimetrický přístroj DP-86, sloužící k měření úrovně radiace a ke kontrole stupně zamoření povrchů (5).

Důležité je též roztrždit postižené podle jejich stavu a závažnosti poranění. Všechny postižené osoby jsou soustředěny na vhodném místě. Podle potřeby první pomoci jsou nemocní rozděleni do skupin od nejzávažnějších poranění, vyžadujících život zachraňující úkony, přes lehce postižené vyžadující minimální péči, ležící až po umírající. Určujícím faktorem při třídění a odsunu je popálenina či konvenční trauma.

Algoritmus dekontaminačního procesu

- Pomocí radiometrů jsou po přeměření od sebe odděleni kontaminovaní od nekontaminovaných, kteří jsou z dalšího postupu vyloučeni (5).
- Na naměřeném dávkovém příkonu závisí další postup. Po naměření dávkového příkonu do $3\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ se neprovádí žádná akce. U hodnot $3\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1} - 10\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ se provede monitoring osob s jejich evidencí do formuláře. Tento formulář obsahuje pořadové číslo, čas měření, jméno, bydliště a naměřenou úroveň kontaminace udanou v bequerelech na centimetr čtvereční. Takto se evidují osoby kontaminované nad úroveň $4\text{ Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$. U dávkového příkonu $4\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ nastává hranice pro dekontaminaci kůže a oděvu. Nad $10\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ se dekontaminují vozidla a osoby. V případě nízké kapacity dekontaminačního místa a vysokého počtu příjmu osob je

hranice $400 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ přípustná pro dekontaminaci osob (5).

- Zaznamenají se okolnosti nehody, mezi které patří údaje o zdroji, mechanismu nehody, časový průběh nehody a orientace těla vzhledem ke zdroji (5).
- Dále se chodící i ležící postižení musí zbavit původního ošacení, na kterém ulpělo nadpoloviční množství kontaminantu. Svlečený oděv je uložen do polyetyléhových pytlů, které se označí jménem, datem a hodinou pro další měření. Při svlékání pátráme po kožním erytému, který by mohl při nehodě vzniknout (5).
- Následuje oplach celého povrchu těla, který se uskutečňuje v dekontaminační sprše (obr. 13,14 a 15). Omytí se provádí vodou a detergenty, tedy chemickými látkami sloužícími k čištění. V ideálním případě má detergent Ph 5. Lze použít i improvizované prostředky jako 10% roztok EDTA (kyselina etylendiaminotetraoctová) nebo 1% roztok DTPA v kyselém vodním roztoku s pH cca 4. V praxi je doporučovaným postupem dvojitá sprcha s použitím klasického mýdla jako nouzového prostředku (5).

Pro vojska a civilní obyvatelstvo byly vyvinuty balíčky pro zevní dezaktivaci, obsahující speciální mýdlo s komplexonem. Pro armádu je to protichemický balíček jednotlivce IPB-80 a pro civilisty balíček označovaný jako Zdravotnické prostředky jednotlivce ZPJ-80 (14).

Při vlastní dekontaminaci je třeba dodržovat zvláštní postup. Po celou dobu dekontaminace je třeba dbát na to, aby se kontaminant nedostal do úst, nosu, očí nebo do rány. Na kartáč se netlačí, aby se zabránilo porušení kůže a proniknutí kontaminantu do krevního oběhu. Nekontaminované části můžeme chránit plastikovými štíty, připevněnými k tělu lepícími páskami. Nejprve se celé tělo od hlavy až k patě opláchne proudem teplé vody, která smyje větší částice. Poté se opět celé tělo od hlavy až k patě otírá pomocí mycí houby nebo kartáče krouživými pohyby. Následuje omytí vodou a osušení krouživými pohyby (5).

Pokud postižený není schopen projít dekontaminační sprchu, provede dekontaminaci zdravotnický personál pomocí mulů namočených ve fyziologickém roztoku. V oblasti poranění nebo popálenin je oťěr prováděn sterilními muly, abychom snížili riziko sekundární infekce (5).

Obr. 13 Dekontaminační sprcha



Obr. 14 Nafukovací dekont. sprcha



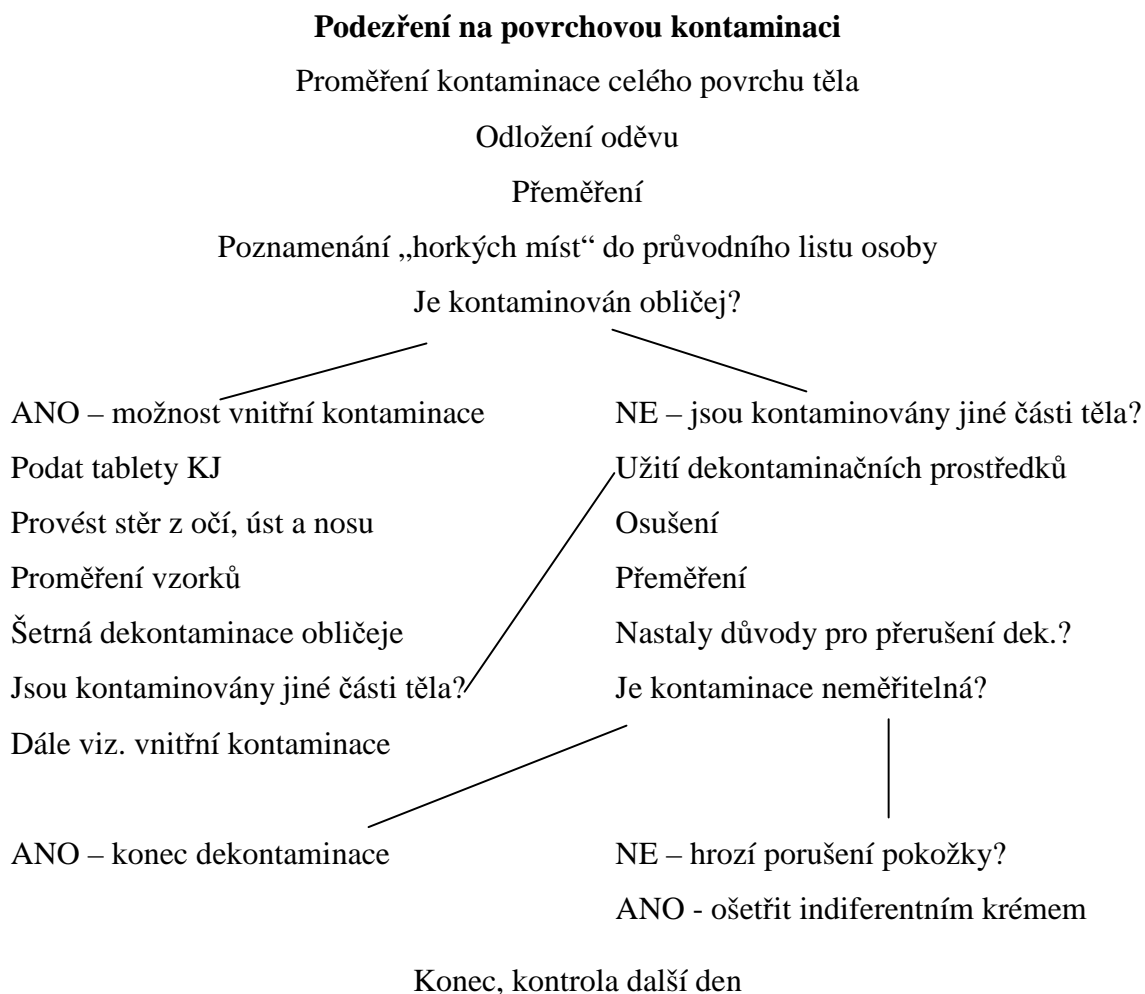
Obr. 15 Nafukovací dekontaminační sprcha pacienty na nosítkách



- Po důkladném osprchování se provede nová radiometrická kontrola. Toto přeměření má zacíl odlišit nedokonalou zevní dekontaminaci od vnitřní kontaminace. Je proto nutné aby toto měření provedl zkušený dozimetrista (5).
- V případě, že byla zevní dekontaminace nedostatečná, pokračuje se v dekontaminaci speciálními dekontaminačními prostředky. Patří mezi ně 5% roztok hypermanganu draselného. Po jeho použití se daná oblast oplachuje redukčním činidlem, nejlépe 5% roztokem hydroxylaminu nebo 5% roztokem siřičitanu draselného a posléze daný okrsek opláchneme vodou. Pokud došlo ke spolknutí radioaktivního materiálu, postupuje se dále dle léčebných postupů při vnitřní kontaminaci (5).
- Nedílnou složkou péče o ozářené a kontaminované je poskytování přesných

informací ozářeným, zabránění vzniku paniky a sebevražedným pokusům. Jelikož informace o ozáření vyvolává vysoce zátěžovou situaci s častým vyvoláním psychotických stavů, je na místě úvaha individuálního poskytnutí psychologické a psychiatrické pomoci (5).

Schéma 1 Algoritmus zevní dekontaminace (Traumatologický plán ČEZ-ETE 27.07.08.01)



Nemocniční péče o zevně kontaminované

Následnou specializovanou péči poskytují ustanovená Střediska speciální zdravotní péče o osoby ozářené při radiačních nehodách, působící při vybraných pracovištích určených fakultních nemocnic. Patří mezi ně Klinika popáleninové medicíny, Fakultní nemocnice Královské Vinohrady, Praha 10, která zabezpečuje ošetření lokálních

kožních poškození a kontaminovaných poranění. Dále Oddělení klinické hematologie II. interní kliniky Fakultní nemocnice Hradec Králové přijímá celotělově ozářené pacienty dávkou nad 1 Gy. Oddělení lékařské genetiky Fakultní Thomayerovy nemocnice s poliklinikou, Praha 4 provádí cytogenetická vyšetření lymfocytů periferní krve. Klinika nemocí z povolání Všeobecné fakultní nemocnice, Praha 2 zajišťuje příjem vnitřně kontaminovaných a celotělově ozářených do dávky 1 Gy.

Osoby zevně kontaminované je nutno dále sledovat pro možnost vzniku radiační dermatitidy. Zvláště nebezpečná je kontaminace beta zářiči.

Pacient je hospitalizován alespoň 1 – 2 dny, protože časný přechodný erytém se může objevit při dávce 3 Gy do 24 – 48 hodin po ozáření. Pokud se radiační dermatitida neprojeví, je postižený propuštěn. Při postižení radiační dermatitidou se zaměřujeme na tlumení bolesti, sterilní krytí a chlazení ozářené lokality. Pro rychlejší hojení volíme bandáže. Chirurgickou léčbu představuje náhrada ozářených okrsků kožními štěpy nebo amputace (8).

Po propuštění je dle závažnosti poškození nutno pozvat pacienta ke kontrolnímu vyšetření za 1-3 týdny kdy se projeví plné poškození kůže. Kůži je nutno chránit před mechanickými a dráždivými vlivy.

1.7 Vnitřní kontaminace

Jako vnitřní kontaminaci označujeme stav, kdy jsou radionuklidy přítomny uvnitř organismu, a ten je ozařován ionizujícím zářením, emitovaným těmito radionuklidy. Radioaktivní látky mohou vnikat do organismu inhalací (dýchacími orgány), ingestí (trávicím ústrojím), přestupem přes porušenou i neporušenou kůži a pomocí lékařské injekční aplikace. Radiační poškození při vnitřní kontaminaci lze klasifikovat na poškození bezpříznakové, akutní radiační poškození, chronická radiační poškození a pozdní následky. Deterministické poškození následkem vnitřní kontaminace vyžaduje příjem radionuklidů o velmi vysoké aktivitě, proto v praxi je důležitost vnitřní kontaminace nižší než zevního ozáření a zevní kontaminace (8).

Závažnost vnitřní kontaminace daná radiotoxicitou radionuklidů z hlediska vyvolání stochastických účinků je určována úvazkem efektivní dávky E_{50} , který je realizován v

orgánu nebo ve tkáni. Jde o efektivní dávku způsobenou vnitřní kontaminací po dobu přítomnosti radionuklidu v organismu, maximálně však padesát let (8). Závisí především na množství (aktivitě) radionuklidu deponovaného v orgánu či tkáni, druhu a energii emitovaného záření radionuklidem, efektivním poločase radionuklidu a radiosenzitivitě orgánu v němž došlo k depozici radionuklidu. Lze tedy usuzovat, že radionuklidy, které jsou pomalu vylučované nebo mají dlouhý poločas rozpadu jsou více raditoxické než radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu nebo s rychlým vylučováním z organismu.

Odhad dávek z vnitřního ozáření je složitější než ze zevního ozáření a to především díky tomu, že dávky z vnitřního ozáření nelze přímo měřit. Distribuce radionuklidů v těle může být velmi nehomogenní, dávky se realizují v delším časovém období a každý prvek se chová jinak. Distribuce radionuklidu v organismu se může měnit v čase. Chování radionuklidu závisí jednak na fyzikálně chemických vlastnostech, ale i na cestě vstupu do organismu (1).

1.7.1 Biokinetika radioaktivních látek

Při přítomnosti radionuklidu v organismu je jeho další osud daný jeho fyzikálně chemickými a chemickými vlastnostmi. Jeho biokinetika je velmi složitá.

Dle chování radionuklidů v biologických materiálech je můžeme rozdělit na transportabilní a netransportabilní. Transportabilní jsou rozpustné v biologickém materiálu a jsou schopné pronikat tkáněmi organismu. Jsou z cest vstupu rychle resorbovány, dostávají se do krve a krví jsou rozděleny do orgánů, ve kterých se vychytávají. Základními stavebními biologickými prvky jsou vodík, kyslík a uhlík, ale i velké množství dalších prvků jako fosfor, jód nebo draslík, které se podílí na metabolických procesech. Pokud se radioaktivní izotop těchto prvků dostane do organismu, sleduje stejnou biokinetickou cestu jako jeho neradioaktivní izotop, např. jód. Nebo se naopak může chovat jako jeho chemický analog, kdy např. cesium sleduje draslík, který je typickým nitrobuněčným kationtem a jeho množství v buňce je ovlivněno stupněm prokrvení tkáně. Dále např. stroncium, barium a radium sledují chování vápníku. K netransportabilním náleží radionuklidy vzácných zemin, plutonia a

transplutoniových prvků. Tyto radionuklidy nemají přírodní analogy a jejich chování v těle je určeno jejich afinitou k buněčným komponentám a transportnímu systému v těle. Podle distribuce radionuklidů po jejich vniknutí do krevního řečiště je rozdělujeme do čtyř skupin.

- radionuklidy s rovnoměrným rozdělením v organismu, jsou jednoduché kationty, které tvoří snadno rozpustné sloučeniny, mezi které patří Na, K, Rb, Cs, H a C.
- dvojmocné radionuklidy deponované do kostní matrix, jsou to Ca, Sr, Ra, Pu, Np nebo těžké lantanoidy
- trojmocné a vícemocné radionuklidy se rozdělují mezi kosti a orgány s velkým zastoupením elementů retikuloendoteliální soustavy, jakými jsou lymfoidní tkáň, játra a kostní dřev. Patří k nim lehké lantanoidy, zvláště lanthan, cer, praseodym
- radionuklidy deponované selektivně v určitých orgánech, jako například jód ve štítné žláze, železo v erytopoetické tkáni

Vylučování radioaktivní látky z organismu je závislé na její fyzikální přeměně, tedy na poločase rozpadu radionuklidů. Dále pak na vlastním biologickém chování radionuklidu a jeho vylučování. Vylučování se děje především močí a stolicí, v menší míře potom kůží, potem, slinami, mateřským mlékem a výjimečně i plícemi. Močí se vylučují lehce rozpustné látky. Nerozpustné látky, koloidní látky a látky vázané na bílkoviny se dostávají do jater, žlučí do střeva a dále pak stolice.

Chování radionuklidů v lidském těle popisují tzv. biokinetické modely, jsou to lineární diferenciální rovnice, které umí do výpočtu zahrnout různé fyziologické funkce nebo individuální rozdíly. V posledních letech zaznamenaly tyto metody díky zlepšující se výpočetní technice značný pokrok. Využívají celé řady modelů jako například plicní modely, modely zažívacího traktu nebo kostní modely (1).

1.7.2 Cesty vstupu radioaktivních látek do organismu

Inhalační kontaminace

Radionuklidy jsou vdechovány ve formě radioaktivních plynů a aerosolů se vzduchem. V případě vdechnutí aerosolu dochází k fyziologickému procesu samočištění

dýchacích cest a plic. Tento proces je životně důležitým obranným mechanismem organismu. Nejdříve se vdechnuté radioaktivní látky dostávají do oddílu nasofaryngeálního, následuje oddíl tracheobronchiální a nakonec do plic. V samotných plicích se zadrží jen asi 10 – 15 % vdechnutých radioaktivních látek (8).

V závislosti na velikosti částic aerosolů radionuklidy pronikají do jednotlivých oddílů dýchací soustavy. Částice větší než 15 μm se zachytí v dutině nosní a hltanu, částice o velikosti 5-15 μm se vychytávají v bronchiálním stromu a částice menší než 5 μm mohou být vdechnuty až do plicních sklípků (8).

Přibližně polovina vdechnutých radioaktivních látek se zachytí v horních cestách dýchacích. Radioaktivní látky zachycené v nosní dutině jsou odstraněny smrkáním. Vdechnutý aerosol může být kdekoliv v místě depozice rozpuštěn a vstřebán, nebo je tenkou hlenovou vrstvou posouván ciliárním mechanismem řasinek epitelu do ústní dutiny, odkud po spolknutí kontaminuje zažívací trakt. V rámci první pomoci a následné léčby je nutné tento fakt brát v úvahu. Pokud se dostane do plic je zachycen makrofágy a vyplaven k řasinkovému epitelu bronchiálního stromu. Rozpustné sloučeniny radionuklidů se z plicních alveolů vstřebávají do krevního řečiště a následně se rozdělí v tělesných orgánech obdobně jako po intravenózní injekci. Nebo jsou vtaženy do lymfatických cév a zachyceny v lymfatických uzlinách odkud se absorbují do tělních tekutin.

Biologický poločas vylučování radionuklidů z dýchacích cest je asi 20 dní, v případě kontaminace plicních sklípků je to kolem 120 dní. Mezi radionuklidy, které se velmi rychle absorbují patří například sloučeniny cesia a jodu. Naopak radionuklidy s malou absorpcí jsou sloučeniny uranu. Obzvláště nebezpečné je ^{239}Pu , jehož biologický poločas v plicích je asi 150 dní (8).

Pokud by však došlo ke vdechnutí plynu nebo páry je situace jiná. Molekuly plynu se při vdechnutí dostanou do kontaktu s povrchem dýchacích cest, kde reagují s povrchovou vrstvou nebo se v ní rozpustí a následně jsou dle svých chemických vlastností absorbovány do tělních tekutin. Dobře rozpustné plyny patří páry jódu, páry rtuti a ^{14}C . Nerozpustné a nereaktivní plyny jsou opět vydechnuty. Patří mezi ně ^{41}Ar , ^{85}Kr a ^{133}Xe .

Charakter postižení dýchacích cest při kontaminaci inhalací

Vlivem vnitřní kontaminace, nejčastěji inhalací popisujeme dva typy patologických stavů, jsou to pneumonitida a radiační fibróza. V důsledku kontaminace dutiny ústní dochází dále k poškození sliznice horních cest dýchacích, kdy poškození epitelu se projevuje těžkým, obtížně hojitelným zánětem dýchacích cest i okolního vaziva (4).

Radiační pneumonitida se manifestuje za 4-6 měsíců po ozáření plic jednorázovou dávkou 8 Gy a vyšší. Klinicky se projevuje jako nehnisavý exsudativní zánět, kdy jsou plíce méně provzdušněné s přítomností intersticiálního až intraalveolárního edému, zánětlivou infiltrací alveolů, zmnožením makrofágů a zvýšenou buněčností vazivové tkáně. Postiženého trápí dušnost, neproduktivní kašel, teplota a pleuritická bolest (4).

Radiační fibróza plic má období latence delší než 6 měsíců, prahová dávka je 8 Gy. Jedná se o konečné stadium postradiačních plicních změn, charakteristické zmnožením plicní tkáně. Nekrotické změny způsobené zářením jsou hojeny fibrotickou jizvou, v jejímž důsledku se snižuje vzdušnost plicní tkáně (4, 8).

Vnitřní kontaminace ingescí

Dalším způsobem vnitřní kontaminace je požití radioaktivních látek, které putují gastrointestinálním traktem jako ostatní potrava. Ke kontaminaci dochází přímo spolknutím kontaminované vody, jiných tekutin a potravin, dále polknutím radioaktivních látek, které byly vdechnuty a přesunuty ciliárním epitelem směrem do hltnu nebo vykašlány z horních cest dýchacích do úst. Takto je přibližně polovina vdechnutých radioaktivních látek přesunuta do zažívacího traktu.

Vstřebávání je ovlivněno rychlostí pasáže, nejintenzivnější je do dvou hodin po spolknutí a končí za tři až šest hodin. Nejkritičtější úsekem je tlusté střevo, ve kterém se nevstřeba radioaktivní látky zahušťují společně se stolicí několik dní a poté odchází přirozenou cestou mimo organismus. Absorbované dávky stěny tlustého střeva jsou proto oproti zbytku trávicí trubice nejvyšší (8).

Požité radiouklidy mají rozdílnou vstřebatelnost. Vstřebatelné radionuklidy poškozují svým účinkem tkáně, ke kterým jeví afinitu, tedy převážně v tenké a v horní oddíl tlustého střeva. Nevstřebatelné izotopy poškozují převážně tlusté střevo. V

ostatních částech trávicího traktu se radionuklidy prakticky nevstřebávají. Izotopy jódu a cesia prokazují takřka stoprocentní vstřebatelnost. Plutonium, radium a stroncium mají poměr vstřebatelného množství menší, tedy asi ze 60 % a nižší. Izotopy vzácných zemin, tvořící největší část štěpných produktů se prakticky nevstřebávají. Prochází tedy celým zažívacím traktem a jejich největší účinnost je v tlustém střevě, ve kterém se zadrží (8).

Charakter poškození gastrointestinálního traktu při kontaminaci ingescí

Stupeň poškození zažívacího traktu při požití radioaktivní látky závisí především na radiační dávce. Spektrum postižení je zarudnutí sliznice až po těžké defekty charakteru trofických vředů. Při ozáření sliznice dutiny ústní dávkou vyšší než 16 Gy dochází k jejímu poškození a vzniku trofických vředů, spojeném s destrukcí chuťových pohárků. Komplikací ozáření dutiny ústní je poškození funkcí slinných žláz. Hltan je relativně radiorezistentní do dávek 25 Gy, kdy již vznikají nekrózy. Při ozáření ústní dutiny, jícnu a žaludku mají postradiační změny charakter akutního katarálního zánětu. Dávky vyšší než 16 Gy postihují jícen těžkým zánětem sliznice, který se projeví tlakem a bolestí za sternem a bolestivým polykáním. V žaludku jsou buňky epitelu radiosenzitivnější a kontaminace vede ke vzniku těžko se hojících vředů, spojených s masivním krvácením. Tenké střevo, zvláště duodenum je k záření nejcitlivější. Při dávkách vyšších než 50 Gy dochází k nevratnému poškození epitelu s obnažením klků a jejich zmenšováním s následným narušením resorbce, bariérové schopnosti, krvácením s nekrozním až gangrenózním zánětem. Jelikož se většina radionuklidů vstřebala v tenkém střevě, nebývá radiační poškození tlustého střeva tak výrazné. Jako pozdní následky se mohou objevit trofické vředy a srůsty způsobující obstrukci tlustého střeva. V případě kontaminace rekta se může poškodit sliznice rekta, projevující se krvácením, zarudnutím a edémem (4, 8).

Kontaminace penetrací přes kůži a sliznice

Radioaktivní látky mohou kontaminovat organismus porušenou tak i neporušenou kůží. Kůže samotná je za fyziologických podmínek pro radionuklidy, kromě tritia a jódu ve formě par, nepropustná. Ke kontaminaci tedy dochází při poranění nebo popálení

kožního krytu, kdy radioaktivní látky mohou z povrchu volně pronikat do krevního řečiště. Sliznice dobře přístupné ke vstřebávání radionuklidů jsou sliznice dutiny nosní a ústní, nosohltan a bronchiální kmen. Nerozpustné sloučeniny zůstávají v ráně a takto kontaminované rány se vlivem emitovaného ionizujícího záření hůře hojí. Proto je třeba při léčbě dbát na řádné vypláchnutí všech radionuklidů z rány (8).

1.7.3 Ochrana před vnitřní kontaminací

Ochrana při práci s otevřenými zářiči

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.6.2, je třeba při práci s radioaktivními látkami dodržovat opatření, která mají za cíl snížit pravděpodobnost vnitřní kontaminace. Mimo opatření uvedená v kap. 1.6.2 je třeba dodržovat ještě další opatření zabráňující vnitřní kontaminaci.

- místnosti, ve kterých se s radionuklidy pracuje musí mít kromě odpovídajícího izolačního a stínícího zařízení, zabezpečen i systém ventilace. V případě, že může dojít k úniku radioaktivních látek do ovzduší, jsou veškeré tyto činnosti prováděny v uzavřených prostorách, jako jsou digestoře nebo hermetické boxy (obr. 16),
- nepipetovat radionuklidy ústy,
- v kontrolovaném pásmu se nesmí jíst, pít ani kouřit (4).

Obr. 16 Digestoř pro práci s radionuklidy



Ochrana před radioaktivním spadem

Inhalaci a ingesci radioaktivních částic lze zabránit použitím ochranných prostředků jednotlivce. K tomuto účelu slouží typové prostředky individuální ochrany) (14).

- ochranná maska – patří sem vojenská ochranná masky s širokým sortimentem typů filtrů a civilní ochranné masky (obr. 17),
- ochranná rouška (obr. 18) (14).

Pokud tyto prostředky nejsou k dispozici, lze použít např. motoristické brýle chránící sliznici spojivek, nebo průmyslové protiprachové respirátory chránící před aspirací částic. I improvizované primitivní prostředky mají relativně vysokou účinnost.

Ochrana před ingescí radionuklidů spočívá v ochraně potravin, potravinových surovin a pitné vody před vnější kontaminací pomocí vhodných obalů. Dále v realizaci adekvátních opatření v zemědělství a vodohospodářství a v radiometrické kontrole potravin, které mohou být kontaminovány vnitřně, tj. k jejichž kontaminaci dojde vstupem radionuklidů do potravinového řetězce (5, 14).

Obr. 17 Ochranná maska armády ČR



Obr. 18 Ochranná rouška



1.7.4 Léčebná péče o vnitřně kontaminované

Na možnost vnitřní kontaminace se usuzuje při přítomnosti radioaktivních látek v ústech, nosu, spojivkách a ráně. Diagnostiku lze kromě radiometrického měření podpořit i cíleným dotazem na postiženého. Při pozitivním nálezů navazuje vnitřní

dekontaminace na dekontaminaci zevní.

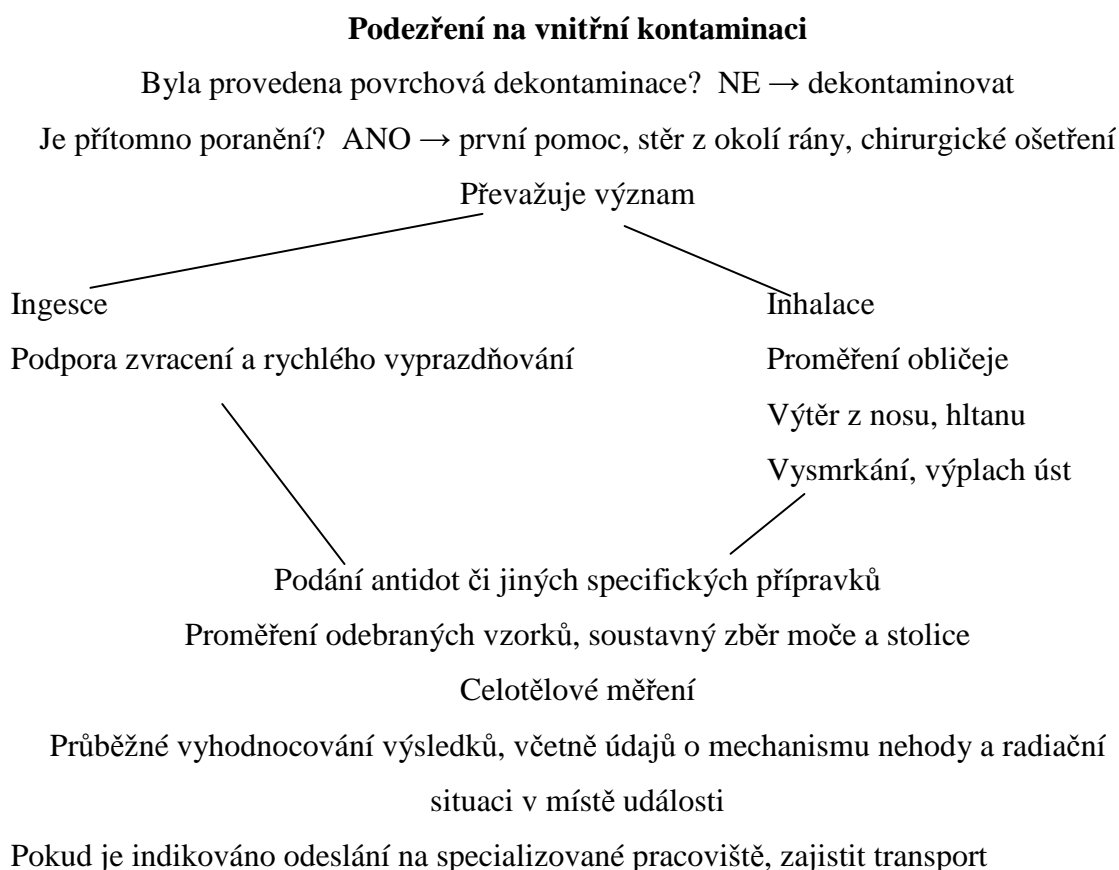
U vnitřní kontaminace je na prvním místě zjištění jakým radionuklidem byl postižený zasažen, aby mohl být zvolen správný postup následné léčby. Jednou z látek unikajících při havárii jaderných zařízení je radioaktivní jód. Ochranou proti hromadění radiojodu ve štítné žláze je použití jodové profylaxe. Užívají se tablety s neradioaktivním jodem ve formě jodidu draselného (KI), který nasycí štítnou žlázu a zabrání hromadění jodu aktivního. Tablety jodidu draselného se užívají pouze na základě doporučení krizového štábu, které obyvatelé obdrží prostřednictvím televizních nebo rozhlasových relací. Jodová profylaxe se plánuje na celém území havarijního plánování jaderné elektrárny a její dávkování je součástí příbalového letáku.

První zdravotnická pomoc

- V rámci první pomoci se provede celková povrchová dekontaminace jako v případě vnější kontaminace (viz.kap. 1.6.3). Tato dekontaminace je navíc doplněná o dekontaminaci dutiny ústní, nosní, hltanu, uši a oči. Dutinu ústní dekontaminujeme vyčištěním zubů a výplachem 3% roztokem kyseliny citronové či jakýmkoliv lehce kyselým roztokem. Hltan vykloktáme 3% roztokem peroxidu vodíku. Dutinu nosní opláchneme vodou nebo fyziologickým roztokem, stejně tak oči a spojivkový vak od vnitřního k zevnímu koutku tak, abychom se vyhnuli kontaminaci slzného kanálku. Ucho se oplachuje při sprchování a posléze se očistí pomocí navlhčené štětičky (5).
- Při podezření na ingesci radionuklidů je vhodné mechanickým podrážděním vyvolat zvracení, či provést výplach žaludku (5).
- Přeměření obličeje, výtěr z nosu, hltanu poukáže na inhalační kontaminaci, kterou omezíme vysmrkáním a výplachem nosu. Při významné kontaminaci plic je možné provést plicní laváž, její efekt je ovšem nejistý (5).
- Pokud jsou přítomna poranění, lze vnitřní kontaminaci porušenou kůží omezit podporou krvácení, podvázáním končetiny a vyplachováním rány vodou. Součástí péče jsou stěry z rány, zběžná očista a provizorní krytí (5).
- V průběhu zevní dekontaminace je vhodné podat antidota, tedy látky s opačným účinkem, či jiné specifické přípravky.

- Během dekontaminace je nutné zajistit sběr veškerého biologického materiálu, jeho řádné označení a přeměření.
- Vnitřně kontaminovaní se k další léčbě transportují do zdravotnických zařízení a Středisek speciální zdravotní péče (viz.kap 1.6.3).

Schéma 2 Algoritmus vnitřní dekontaminace (Traumatologický plán ČEZ-ETE 27.07.08.01)



Nemocniční péče o vnitřně kontaminované

Hlavním léčebným záměrem u vnitřně kontaminovaných je snížení vstřebávání a zvýšení vylučování radionuklidů. Pokud nebylo učiněno dříve, provede se výplach žaludku, ústní i nosní dutiny, klyzma, podání močopudných přípravků a látek snižujících vstřebávání (5).

Léčba by se měla zajistit co nejdříve, přičemž je důležité zjistit, jakým

radionuklidem byla osoba kontaminována. Při znalosti typu radionuklidu můžeme použít tzv. chelátotvorné přípravky, které váží daný radionuklid a přispívají k jeho výraznějšímu vylučování (tab. 7) (5).

Tab. 7 Přehled léčebných postupů při vnitřní kontaminaci (5)

Radionuklid	Medikace	Podání	Účinek
Jód	jodid draselný (KI)	novorozenci - ¼ tbl. (16 mg KI), děti do 3 let - ½ tbl. (32 mg KI), děti 3-12 let – 1 tbl. (65 mg KI), dospělí 2 tbl. (130 mg KI)	kompetitivní inhibice jódu ve štítné žláze
Plutonium Ytrium	dietyltriamin pentaoctan vápenatý (DTPA)	1 g Ca – DTPA ve 250 ml 5% F1/1, podávat přes 30 min.	vyvázání
Uran	bikarbonát sodný	pomalá infuze, 250ml 14% roztoku	alkalizace moči
Cesium Rubidium Thalium	berlínská modř	1g v 100 – 200 ml vody, p.o., 7 dní	mobilizace z orgánů
Radium Stroncium	síran barnatý, alginát sodný	BaSO ₄ : 100g v cca 250 ml vody. Alginát sodný: 10mg v 250 ml	snížení vstřebávání
Tritium	voda	podání 6-12 litrů vody denně	ředění a vylučování
Olovo Polonium Kobalt	D-penicilamin	1g za den i.v., 0,9g po 4-6 hod., p.o.,	vyvázání

Ve zdravotnickém zařízení se dále pokračuje v léčbě poranění, symptomatické léčbě a ve sběru biologického materiálu, který se odesílá do radiochemické laboratoře SÚRO k proměření aktivity. Odebírá se krev a moč na biochemické vyšetření. Krev se dále odesílá na vyšetření periferního krevního obrazu s diferenciálním rozpočtem, stanovení radionuklidů v krvi a k cytogenetickému vyšetření chromozomálních aberací.

1.8 Radioprotekce

Jako radioprotektivní označujeme opatření a látky, které mají za cíl snížit účinky ionizujícího záření. Rozeznáváme tři druhy radioprotekce (2).

- Fyzikální zahrnuje mechanické stínění svazku záření, zvýšení vzdálenosti od zdroje záření a frakcionovanou expozici,
- biologická je založena na biologických jevech jako je hypoxie (snížený obsah kyslíku), hypotermie (snížení tělesné teploty), hypotenze (nižší krevní tlak) a hormonální vlivy (samice jsou více radiorezistentní),
- chemická radioprotekce je uskutečňována pomocí tzv. radioprotektivních látek. Radioprotektivní účinek je posuzován podle dávky redukujícího faktoru, DRF. Tento faktor je podílem hodnot středních letálních dávek skupin chráněných a nechráněných jedinců 30 dnů od ozáření (2).

Chemická radioprotekce

- Radioprotektivní látky s krátkodobým účinkem – tyto látky je nutné aplikovat minuty až maximálně hodiny před ozářením (např. zvýšení radiorezistence organismu před vstupem do radioaktivní stopy) (2).
 - Radioprotektivní látky obsahující síru (např. gamafos, který má relativně vysokou účinnost)
 - Indolylalkylaminy
 - Blokátory vápníkového kanálu
- Radioprotektivní látky s dlouhodobým účinkem je možné podat i 24 hodin před ozářením (např. při radioterapeutickém ozařování) (2).
 - Imunomodulátory, cytokiny
 - Inhibitory syntézy prostaglandinů
 - Dextrazoxan

Aplikace látek s radioprotektivním účinkem je zmanče problematická. Dosud nebyla vynalezena taková látka, která by vykazovala vysoký DRF. Většina látek má navíc nežádoucí vedlejší účinky jako zvracení, nauzea nebo malátnost s hypotenzí. Proto se výzkum zaměřuje spíše na úspěšnost léčby postradiačních poškození (5).

2 CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY

Cílem práce je vytvořit kompletní výukový program zaměřený na vnější a vnitřní kontaminaci radioaktivními látkami na základě dostupných materiálů a literatury. Tento výukový program bude sloužit jako učební pomůcka pro studenty, aby se lépe orientovali v této problematice

Hypotéza: Stále přetrvává nedostatek kvalitních didaktických pomůcek využívajících moderní výukovou techniku.

3 METODIKA

Pro zpracování kapitoly vnější a vnitřní kontaminace radioaktivními látkami jako didaktické pomůcky bylo využito dostupných materiálů, starší i novější literatury a webových stránek týkajících se této problematiky. Tištěná verze práce je vytvořena v textovém editoru Microsoft Word a samotný výukový program v e-learningovém prostředí Moodle.

4 VÝSLEDKY

Za základě teoretické části, uvedené v této bakalářské práci byl vytvořen výukový program v e-learningovém prostředí Moodle.

Výukový program se nazývá Vnější a vnitřní kontaminace radioaktivními látkami. Přístupný je na internetové adrese <http://moodle.zsf.jcu.cz>

Struktura výukového programu

Výukový program je rozdělen do devíti témat.

Téma 1: Základní pojmy v oblasti ionizujícího záření a radioaktivity,

Téma 2: Účinky ionizujícího záření na lidský organismus,

Téma 3: Zdroje kontaminace,

Téma 4: Radiační nehody,

Téma 5: Radionuklidy významné z hlediska kontaminace,

Téma 6: Vnější kontaminace,

Téma 7: Ochrana před vnější kontaminací a dekontaminace,

Téma 8: Vnitřní kontaminace,

Téma 9: Ochrana před vnitřní kontaminací a dekontaminace

Součástí každého tématu je

- shrnutí látky, obsahující teoretickou část,
- studijní materiál ve formě Power Pointové prezentace s obrázky a tabulkami,
- doporučená literatura,
- procvičovací test.

5 DISKUSE

Výukový program vnější a vnitřní kontaminace radioaktivními látkami je sestaven na základě dostupných materiálů a literatury. Kromě textu v textovém editoru Microsoft Word obsahuje i výukový program v e-learningovém prostředí Moodle. V programu Moodle jsou jednotlivá témata doplněná textem a prezentacemi s obrázky a tabulkami.

Srovnání s jiným výukovým programem zaměřeným na vnější a vnitřní kontaminaci nemůžu poskytnout, protože jsem takový program nenašla. Existují programy týkající se obecných poznatků o ionizujícím záření, radioaktivitě či jaderné energetice. Informace o studiu kontaminace lze dnes získat převážně z odborné literatury, která je ovšem ve velké většině zaměřená na zevní ozáření a ochranu před ním. Dostatek informací poskytují učebnice radiobiologie, ale i publikace zaměřené na jaderné zbraně. Dále pak informace o kontaminaci v medicíně jsem čerpala z literatury zabývající se nukleární medicínou.

Tato bakalářská práce shrnuje všechny poznatky získané z dostupných zdrojů a přináší ucelený pohled na vnitřní a vnější kontaminaci radioaktivními látkami.

6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvořit kompletní výukový program zaměřený na vnější a vnitřní kontaminaci radioaktivními látkami, který bude sloužit jako učební pomůcka pro studenty oborů Radiologický asistent a Ochrana obyvatelstva na Zdravotně sociální fakultě Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích.

Cíl práce byl splněn. Byl vytvořen výukový program v textovém editoru Microsoft Word a v e-learningovém prostředí Moodle.

Hypotéza práce zněla: stále přetrvává nedostatek kvalitních didaktických pomůcek využívajících moderní výukovou techniku.

Hypotéza byla potvrzena. Většina studijních materiálů je přednášena z knižních materiálů a v dané problematice chybí moderní výukové materiály.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOLEKTIV AUTORŮ: *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Azin CZ, SÚJB, 619 s, ISBN 80-238-3703-6
2. KOLEKTIV AUTORŮ: *Ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření*. Dům techniky, Ostrava, 1998, ISBN 80-02-01230-5
3. KONEČNÝ, J.: *Radiační fyzika*. Jihočeská univerzita, ZSF, České Budějovice, 2006, 109 s., ISBN 80-7040-843-X
4. KUNA, P., NAVRÁTIL L., a kol.: *Klinická radiobiologie*. Praha: Manus, 2005, 222s, ISBN 80-86571-09-2
5. MATOUŠEK, J., ÖSTERREICHER, J., LINHART, P.: *CBRN: jaderné zbraně a radiologické materiály*. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, Ostrava, 2007, 216 s., ISBN 978-80-7385-029-6
6. MATOUŠEK, J., URBAN, I., LINHART, P.: *CBRN: detekce a monitorování, fyzická ochrana, dekontaminace*. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, Ostrava, 2008, 232 s., ISBN 978-80-7385-048-7
7. ÖSTERREICHER, J.: *Praktické aspekty vojenské radiobiologie*. Univerzita Obrany, 2007, 87 s.
8. ÖSTERREICHER, J., VÁVROVÁ, J.: *Přednášky z radiobiologie*. 1.vyd., Praha: Manus, 2003, 112 s., ISBN 80-86571-01-7
9. *Radiační monitorovací síť, radiační situace v ČR po Černobylské havárii* [online], [cit.2010-03-25], dostupné z <http://www.suro.cz>
10. *Radiační ochrana, biologické účinky ionizujícího záření*, [online], [cit.2010-04-25], dostupné z <http://www.astronuklfyzika.cz/RadiacniOchrana.htm>

11. *Vyhláška č. 307/2002 Sb.*, Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, [online], [cit.2010-04-15]. Dostupné z <http://www.sujb.cz>
12. *Vyhláška č. 318/2002 Sb.*, Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, [online], [cit.2010-04-15]. Dostupné z <http://www.sujb.cz>
13. *Wikipedie, Černobylská havárie, Jaderná zbraň* [online], [cit.2010-03-30]. Dostupné z <http://cs.wikipedia.org>
14. *Základy medicíny katastrof, kap. 5*, [online], [cit.2010-03-30]. Dostupné z <http://zsf.sirdik.org>
15. *Zákon č. 18/1997 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, v platném znění*. Státní úřad pro jadernou bezpečnost, [online], [cit.2010-04-15]. Dostupné z <http://www.sujb.cz>

8 KLÍČOVÁ SLOVA

- dekontaminace
- radioaktivní látky
- vnější kontaminace
- vnitřní kontaminace
- zdroje kontaminace