



UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE
3. LÉKAŘSKÁ FAKULTA



Klinika pracovního lékařství FNKV

Vojtěch Kratochvíl

**Možnosti prevence poškození ionizujícím
zářením v nukleární medicíně**
*Prevention Options of Insults Caused by Ionizing
Radiation in Nuclear Medicine*

Diplomová práce

Sušice, leden 2008

Autor práce: **Vojtěch Kratochvíl**

Studijní program: **Všeobecné lékařství**

Vedoucí práce: **Doc. MUDr. Evžen Hrnčír, CSc., MBA**

Pracoviště vedoucího práce: **Klinika pracovního lékařství FNKV**

Rok obhajoby: 2008

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou práci zpracoval samostatně a použil jen uvedené prameny a literaturu. Současně dávám svolení k tomu, aby tato diplomová práce byla používána ke studijním účelům.

V Sušici dne 6. ledna 2008

Vojtěch Kratochvíl

Obsah

1. Úvod	3
2. Fyzikální základy pro ochranu před ionizujícím zářením	4
2.1. Ionizující záření	4
2.1.1. Veličiny a jednotky	4
2.2. Interakce záření s hmotou	5
3. Biologické účinky ionizujícího záření	6
3.1. Základní mechanismy účinku ionizujícího záření	6
3.1.1. Zásahová teorie	6
3.1.2. Radikálová teorie	7
3.2. Patogeneze poškození živého organismu působením ionizujícího záření	7
3.3. Radiosensitivita	8
3.4. Účinek ionizujícího záření na člověka	9
3.4.1. Nestochastické (deterministické) účinky	10
3.4.2. Stochastické účinky	10
3.4.3. Akutní nemoc z ozáření	12
3.4.4. Akutní lokalizovaná poškození	13
3.4.4.1. Poškození kůže	13
3.4.4.2. Poruchy fertility	14
3.4.5. Pozdní nenádorová poškození	14
3.4.6. Poškození plodu in utero	14
3.4.7. Nádorová onemocnění	15
3.4.8. Genetické účinky	18
4. Zdroje ozáření člověka	20
4.1. Ozáření z přírodních zdrojů	20
4.1.1. Kosmické záření	20
4.1.2. Zemské záření	20
4.1.2.1. Zevní ozáření	21
4.1.2.2. Vnitřní ozáření	21
4.2. Ozáření z umělých zdrojů	21

4.2.1. Lékařská expozice	21
4.2.2. Ozáření z jaderného palivového cyklu	22
4.2.3. Ozáření z výbuchu jaderných zbraní	22
4.2.4. Zdroje v držení obyvatel	23
4.2.5. Profesionální ozáření	23
5. Prevence poškození ionizujícím zářením	24
5.1. Způsoby ochrany před ionizujícím zářením	24
5.2. Základní principy ochrany před ionizujícím zářením	25
5.2.1. Princip zdůvodnění	26
5.2.2. Optimalizace ochrany před zářením	26
5.2.3. Limity dávek a referenční úrovně	27
5.3. Legislativa	28
6. Ochrana v nukleární medicíně	29
6.1. Monitorování	29
6.2. Stavební specifika a struktura oddělení	30
6.3. Ochrana zdravotního personálu	30
6.4. Ochrana pacientů	31
7. Závěr	32
Souhrn	33
Summary	34
Seznam použité literatury	35
Zdroje použitých obrázků a tabulek	36

1. Úvod

Člověk je vystaven účinkům ionizujícího záření od nepaměti. Po druhé světové válce se však expozice ionizujícímu záření významně zvýšila prudkým rozvojem jeho využití v různých oblastech lidské činnosti. Současně s tím rostly i znalosti o jeho účincích, což vedlo následně k potřebě efektivně chránit exponované maximální možnou mírou. To platí i v nukleární medicíně. V současnosti již dosáhla ochrana před účinky ionizujícího záření relativně vysoké úrovně, přesto se stále vyvíjí. Pochopení podstaty obecných principů i konkrétních opatření není záležitostí zcela jednoduchou, neobejde se bez odpovídajících znalostí z fyziky, biologie a v menší míře i jiných oborů.

2. Fyzikální základy pro ochranu před ionizujícím zářením

2.1. Ionizující záření

Ionizující záření je záření, jehož kvanta mají tak vysokou energii, že jsou schopna ionizovat (nebo excitovat) atomy prostředí, kterým procházejí. Rozlišujeme ionizující záření korpuskulární a fotonové (7).

Korpuskulární ionizující záření je charakterizováno elektrickým nábojem, hmotností a pohybem. Jeho částice se podle hmotnosti dělí na těžké (záření alfa, protony, neutrony), středně těžké (mezony) a lehké (elektrony, pozitrony).

Fotonové ionizující záření je elektromagnetické záření o krátkých vlnových délkách. Má duální charakter, tedy vlastnosti jak elektromagnetického záření, tak vlastnosti částic o nulové hmotnosti. Rozeznáváme fotonové záření gama a rentgenové záření. Rozdíl mezi nimi je ve vlnové délce a v tom, že gama záření vzniká v atomovém jádře a rentgenové záření v elektronovém obalu.

2.1.1. Veličiny a jednotky

Chceme-li charakterizovat účinek ionizujícího záření na biologický objekt, musíme definovat veličiny a jednotky, které udávají míru tohoto účinku.

Vhodnou veličinou k zhodnocení míry účinku ionizujícího záření na látku je tzv. absorbovaná dávka. Je definována jako podíl energie předané ionizujícímu záření ku hmotnosti absorbující látky. Její jednotkou je Gy (gray) = J / kg.

Biologický účinek ionizujícího záření na živé organismy závisí vedle dávky též na druhu ionizujícího záření a na podmínkách ozáření, tj. na lineárním přenosu energie a na prostorové distribuci dávky. Zmíněné faktory zohledňuje veličina dávkový ekvivalent (H). Je to součin absorbované dávky (D) a příslušných bezrozměrných modifikujících faktorů (Q, N). Platí tedy: $H = D \cdot Q \cdot N$. Jakostní činitel (Q) charakterizuje různou kvalitu záření z hlediska jeho biologického účinku. Jeho velikost je dána velikostí lineárního přenosu energie, která udává míru ionizace. Platí jen pro člověka a jedná se o významný

údaj využívaný v prevenci před zářením. Veličina N je součin ostatních modifikujících faktorů (na základě konvence je ve všech případech $N=1$). Jednotkou dávkového ekvivalentu (H) je sievert (Sv), který má stejný rozměr jako dávka, tedy J / kg .

2.2 Interakce záření s hmotou

Ionizující záření ztrácí při průchodu absorbující látkou svou energii a předává ji atomům prostředí. Interakce mezi ionizujícím zářením a látkou se dá popsat jak na úrovni interakce jednotlivé částice ionizujícího záření s atomy a jejich součástmi (elektronový obal a jádro), tzv. elementární procesy interakce, tak jako souhrnný projev (pronikavé vlastnosti záření a možností jeho odstínění) (7, 9).

Při interakci ionizujícího záření s obaly atomů se na ztrátách energie podílejí excitace, ionizace, rozptyl a brzdné rentgenové záření.

Výsledkem interakce mezi ionizujícím zářením a jádry atomů je vznik transmutovaného jádra, které může být stabilní, nebo radioaktivní, a emise částice nebo kvanta záření gama.

3. Biologické účinky ionizujícího záření

Interakce ionizujícího záření se živými systémy se řídí stejnými fyzikálními zákony jako interakce záření s látkou. Rozdíl spočívá především v tom, že biologické systémy mají vysoký stupeň hierarchické organizace (jednotlivé jednotkové objemy mají rozdílné a funkčně odstupňované postavení, proto důsledky jejich ovlivnění se mohou případ od případu značně lišit). Dalším specifickým živých organismů je schopnost reparace části důsledků ozáření. Reparační procesy jsou aktivní děje naprogramované v genetické výbavě a zajištěné na vyšší úrovni složitými regulačními mechanismy s významnou účastí humorálních působců (3, 4).

3.1. Základní mechanismy účinku ionizujícího záření

Klíčovým procesem při poškození biologického systému je ionizace. K ionizaci dochází buď přímo, nebo nepřímo. Podle toho byly formovány dvě základní teorie: zásahová a radikálová (3, 8). Kromě zmíněných teorií existuje v současnosti celá řada dalších, např. teorie duálové radiační akce, molekulárně biologická teorie účinků ionizujícího záření a jiné.

Množství iontů vzniklých podél stopy ionizující částice na jednotku dráhy se označuje jako iontová hustota. Čím je iontová hustota větší, tím větší je pravděpodobnost zásahu některé důležité molekuly a většího biologického účinku.

3.1.1. Zásahová teorie

Teorie „přímého“ účinku (zásahová) předpokládá bezprostřední absorpci zářivé energie uvnitř jádra buňky. To způsobuje změny v chemických vazbách, které vedou k poškození jaderných struktur, k inaktivaci až rozpadu zasažené molekuly. Přímý účinek převládá v buňkách s nízkým obsahem vody. Přímě ionizovat mohou jen nabitě částice s kinetickou energií dostatečnou k ionizaci.

3.1.2. Radikálová teorie

Pro radikálovou teorii „nepřímého“ účinku je klíčovým procesem radiolýza vody s tvorbou volných radikálů, které jsou odpovědné za poškození důležitých molekul. Protože biologické systémy obsahují vysoký podíl vody, nabývá tento proces velkého významu. Vzniklé radikály pak mohou reagovat s molekulami DNA a vytvářet jednoduché nebo dvojné zlomy na této molekule a tím potenciálně letální poškození.

3.2. Patogeneze poškození živého organismu působením ionizujícího záření

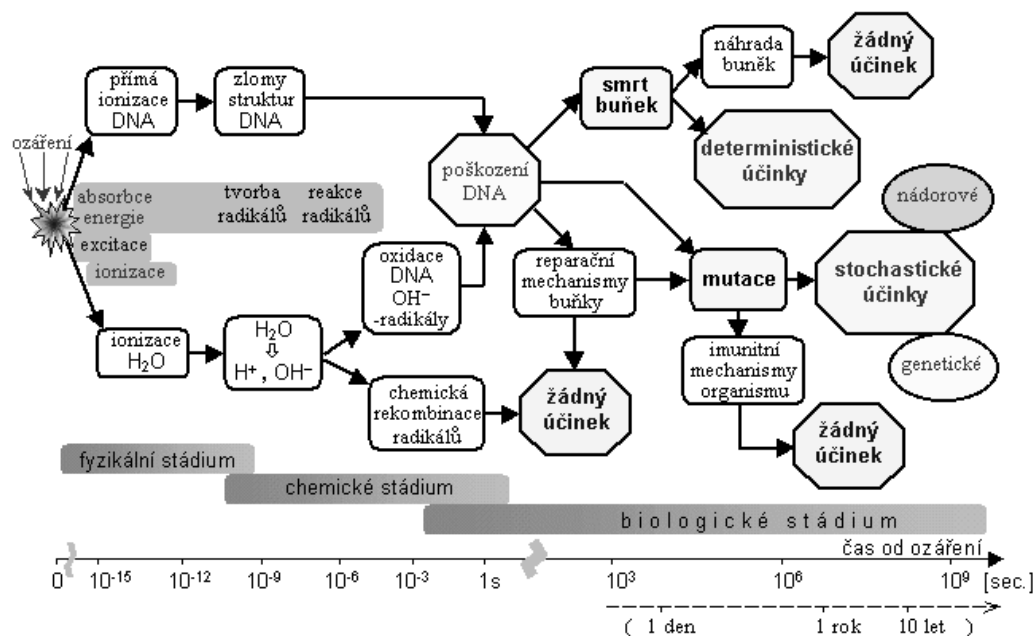
Dávka ionizujícího záření absorbovaná v biologickém prostředí zahajuje složitý proces různých dějů. Rozlišujeme následující stadia: fyzikální, fyzikálně-chemické, chemické a biologické (7, 9).

Ve stadiu fyzikálních dějů dochází k přenosu energie od ionizující částice na atomy prostředí a molekuly.

V průběhu tzv. fyzikálně-chemického stadia dochází k některým přenosům energie uvnitř molekuly. Již na této úrovni lze zaznamenat první poškození biologického systému.

Následují děje chemické. Zde již zřetelně dochází k primárnímu poškození biologických struktur. Vznikají reaktivní látky (volné radikály), které na molekulární úrovni vedou ke změnám molekul, které tak ztrácejí své specifické vlastnosti. Za jednu ze základních poruch na molekulární úrovni se pokládá zlom dvojitá DNA. Na subcelulární úrovni dochází k odchylkám v průběhu biochemických pochodů. Mění se aktivita enzymů, je narušena fosforylace, syntéza nukleových kyselin, specifických bílkovin apod. Buněčná úroveň poškození se projevuje buď zánikem buněk, nebo změnou cytogenetické informace (mutace) při zachované schopnosti dalšího dělení. V ozářené populaci buněk se vedle sebe mohou uplatňovat oba procesy.

Konečným stadiem je fáze biologická. Jde o komplex interakcí produktů předešlých fází na různých úrovních organismu. Poškozené struktury se též mohou v této fázi reparovat.



Obr.1 Schématické znázornění významných procesů a jejich časové posloupnosti při účincích ionizujícího záření na živou tkáň.

3.3. Radiosensitivita

Kromě absorbované dávky a dávkového ekvivalentu je významným faktorem rozhodujícím o míře biologického účinku ionizujícího záření tzv. radiosensitivita, tj. vnímavost k účinkům ionizujícího záření. Lze ji posuzovat na úrovni buňky, nebo na úrovni tkání (3).

Radiosensitivita buňky se liší v jednotlivých fázích buněčného cyklu. Nejvyšší je na konci G1 fáze, naopak nejnižší je v S fázi.

V případě lidských tkání rozumíme radiosensitivitou vnímavost k vyvolání akutních klinicky významných důsledků. Nejvyšší radiosensitivitu vykazují lymfatická tkáň, zárodečný epitel varlete, aktivní kostní dřeň, střevní epitel i jiné výstelkové tkáně, vaječníky a kůže (6). Zvláštní postavení mezi radiosensitivními

orgány mají gonády, jejichž ozáření se může projevit genetickými důsledky u potomstva.

3.4. Účinek ionizujícího záření na člověka

Dříve se tyto účinky dělily empiricky na časné a pozdní. Toto dělení však bylo postupně nahrazeno tříděním novým, které lépe vyhovovalo požadavkům radiační ochrany. Toto třídění se opírá o vztah dávky a účinku pro jednotlivé typy poškození a o buněčné mechanismy, které jsou jejím patofyziologickým podkladem. Rozlišujeme tak účinky stochastické a deterministické. Je to dělení praktické, ale nesmíme zapomínat, že je stále určitou mírou didaktické (2). Při ozáření tkání a orgánů člověka se současně rozvíjí buněčné změny, které by mohly vést k obojímu účinku. Záleží na podmínkách ozáření, charakteru terčových tkání i časovém faktoru, která konkrétní chorobná změna se bude manifestovat.

ČASNÉ	POZDNÍ		
	Somatické		Genetické
Akutní nemoc z ozáření	Nenádorová pozdní poškození	Zhoubné nádory	Genetické změny
Akutní lokalizované poškození	- chronická radiační dermatitida		
- akutní radiační dermatitida	- katarakta		
- poškození fertility	Pozdní následky navazující na akutní poškození		
Poškození plodu in utero			
DETERMINISTICKÉ		STOCHASTICKÉ	

Tab.1: Klasifikace účinků ionizujícího záření na člověka

3.3.1. Nestochastické (deterministické) účinky

Mezi deterministické účinky patří akutní nemoc z ozáření, akutní lokalizovaná poškození, nenádorová pozdní poškození a poškození plodu in utero (tab.1).

Tyto účinky se objevují až po dosažení určité prahové dávky a s dávkou (respektive dávkovým ekvivalentem) narůstá intenzita těchto účinků. Vztah mezi dávkou a účinkem graficky nejlépe charakterizuje esovitá křivka (obr.2). Ta vyjadřuje pravděpodobnost efektu vyvolaného jednorázovým ozářením, charakterizovaného jednoznačným klinickým projevem a způsobeného postižením mnoha buněk. V oblasti nejmenších dávek efekt vůbec nenastává. Při určité vyšší dávce se efekt projeví u malého procenta ozářených. To je oblast prahové dávky. S dalším stoupaním dávky stoupá i procento postižených a při určité dávce jsou již postiženi všichni ozáření. Platí tedy, že pro každý z deterministických účinků existuje dávkový práh, s dávkou roste pravděpodobnost odezvy i intenzita účinku (3).

Klinické obrazy jsou do jisté míry charakteristické časovým průběhem, popřípadě prostorovou distribucí postižení a do jisté míry i určitou kombinací jednotlivých patogenetických složek. Jejich patogenetickým podkladem je především deplece buněčných populací. Mohou se zde uplatňovat i regenerační mechanismy a poškození se může částečně upravit. Při rozložení dávky v čase je potřeba toto rozložení respektovat. Hlavním kvantitativním parametrem umožňujícím hodnocení rizika je hodnota prahové dávky.

3.3.2. Stochastické účinky

Pod účinky stochastickými rozumíme nádorová onemocnění a genetické změny (tab.1).

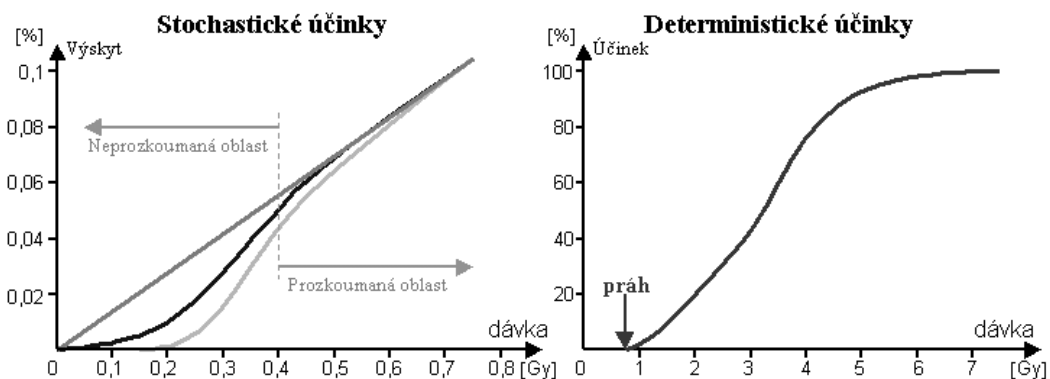
Jsou to takové účinky, které může vyvolat i minimální dávka. Jedná se tedy o bezprahové účinky, kdy každé zvýšení dávky je spojeno s úměrným zvýšením pravděpodobnosti změn vázaných na ozářenou tkáň. Graficky je tento vztah tradičně vyjádřen polopřímkou (obr.2). Tato představa lineární a bezprahové

závislosti je hypotetická. Dokázat lineární závislost mezi dávkou a účinkem při minimálních dávkách se doposud nepodařilo. Lineární funkci platnou pro vyšší dávky tato teorie extrapoluje až k nule. Opírá se přitom o výsledky experimentálních a epidemiologických studií o vztahu mezi ozářením a výskytem nádorů. Ovšem ani tyto studie nedávají jednoznačnou odpověď (4). Výhodou zmíněné teorie je především nepodcenění možného rizika při ozáření nízkými dávkami ionizujícího záření. Další praktickou výhodou je relativně snadný výpočet průměrné dávky při nehomogenním ozáření tkáně nebo orgánu, kdy můžeme dávky jednoduše průměrovat bez ohledu na to, zda jsou dostatečně vysoké, či zanedbatelně nízké, protože podle lineární bezprahové teorie má každá dávka biologický význam. Obdobně lze postupovat i při nehomogenním ozáření populace.

Stochastický charakter účinků spočívá v tom, že lze předpovědět vzestup výskytu těchto onemocnění v ozářené populaci, ale nelze rozpoznat u žádného postiženého jednotlivce, zda právě v jeho případě jde o důsledek ozáření. Nádory a genetická postižení se totiž neliší od obdobných poruch zdraví vznikajících spontánně u neozářených osob. U stochastických účinků není vyjádřena závislost intenzity projevů na dávce, tj. větší dávka nevyvolá vznik agresivnějších malignit nebo hrubších malformací. Buněčným podkladem stochastických účinků jsou mutace a maligní transformace, pro které je význam reparačních procesů omezený. Při rozložení dávky v čase se proto dávka za dlouhé období prostě sčítá, tj. platí zásada adice dávek. Hlavním kvantitativním parametrem umožňujícím hodnocení rizika jsou koeficienty rizika pro jednotlivé stochastické účinky, jímž v grafickém znázornění odpovídá různý sklon přímk.

Teorie bezprahové linearit je jen hypotézou, a proto má řadu odpůrců. Někteří považují skutečné riziko plynoucí z ozáření nízkými dávkami za vyšší, jiní za nižší. Nejvýznamnějším alternativním modelem, který se do větší pozornosti dostal v posledních letech, je koncepce radiační normeze, tj. stimulačního pozitivního působení malých dávek ionizujícího záření. Nejpravděpodobnější je výklad, že jde o „vedlejší produkt“ ozáření zásahem do regulačních mechanismů (3). Je skutečností, že v některých experimentálních studiích byla pozorována po malých dávkách odchylka opačného směru než

po dávkách velkých, dokonce jsou hlášeny i nálezy poklesu spontánní frekvence výskytu nádorů u lidí ozářených malými dávkami ionizujícího záření. Nic z toho však není dostatečně doložené.



Obr.2: a – stochastické účinky, b – deterministické účinky

3.3.3. Akutní nemoc z ozáření

Akutní nemoc z ozáření se rozvíjí po jednorázovém ozáření celého těla nebo jeho části vyšší dávkou pronikajícího záření. V závislosti na velikosti dávky převládají v klinickém obraze příznaky poškození krvetvorných orgánů, trávicího ústrojí nebo centrálního nervového systému.

Hematologická forma vzniká typicky po ozáření dávkou asi 3-4 Gy. V prvním dnu po ozáření se objevují nespecifické příznaky (únava, bolest hlavy) a zvracení. Následuje období latence, které trvá 1-2 týdny, přecházející do finálního stadia, kdy dochází k sepsi a krvácivým projevům. Podkladem je likvidace prekursorů krvetvorby a buněk retikuloendotelového systému. Pokud dávka není příliš velká, nastupují po 6-8 týdnech známky pomalého postupného zlepšování.

Při ozáření dávkou kolem 10 Gy jsou časné příznaky výraznější a po krátké latenci nastupují již 4.-6. den příznaky charakterizované krvavými průjmy, ileem nebo střevní perforací. Jedná se o střevní (intestinální) formu akutní nemoci z ozáření. Patogeneticky jde o nekrózu buněk střevní výstelky s hrubou poruchou vodního a minerálního metabolismu.

Při dávkách nad 50 Gy nastupují bezprostředně výrazně akcentované prodromální příznaky, které přecházejí v psychickou dezorientaci a zmatenost,

nastupují křeče a bezvědomí, nemocný umírá na nervovou formu akutní nemoci z ozáření.

3.3.4. Akutní lokalizovaná poškození

3.3.4.1. Poškození kůže

Radiační dermatitida prvního stupně se typicky rozvíjí při dávce asi 3-4 Gy. První zjistitelnou reakcí je časný erytém. Objevuje se v prvních hodinách a trvá okolo 24 hodin. Jde o rozšíření kapilár vlivem látek podobných histaminu. Pak odeznívá a po období latence se v 2.-4. týdnu objevuje pozdní erytém. Příčinou jsou poruchy mikrocirkulace s trombotizací drobných cév, které se prolínají se změnami zánětlivými, charakterizovanými exudací s přítomností erytrocytů a leukocytů. Ve třetím týdnu lze obvykle pozorovat epilaci, která může být od dávky 6 Gy trvalá.

Radiační dermatitida druhého stupně vzniká při ozáření dávkami kolem 15-20 Gy, kdy se exudát hromadí v úrovni poškozené vrstvy bazálních buněk a epidermolýzou vznikají puchýře. Odlučováním puchýřů a popřípadě jejich infekcí se stav dále komplikuje. V příznivějším případě po dalších dvou až třech týdnech nastává obnova pokožky z okrajů defektu a z přežívajících kmenových buněk vlasových folikulů.

Pokud bylo postižení cév při vyšších dávkách těžší nebo rozvoj infekce hlubší, okrsky ozářené tkáně odumírají a jejich odloučením se tvoří vřed. Vzniká obraz radiační dermatitidy třetího stupně. Hlubší vředy se velmi obtížně a dlouho hojí. Zahojí-li se defekt, je další osud postiženého okrsku kůže nejistý. Nová pokožka je často velmi tenká a nemá dostatečně spolehlivou podkladovou vrstvu. Špatně odolává vlivům mechanickým, chemickým nebo mikrobiálním. V dalším průběhu může převládnout rozvoj degenerativních změn a později (po několika letech) se může rozvinout i pozdní (druhotný) vřed, který často vyžaduje plastickochirurgický výkon.

3.3.4.2. Poruchy fertility

Poruchy fertility se obvykle řadí mezi lokální poškození. Muži jsou z tohoto pohledu k ionizujícímu záření vnímavější než ženy. Nutno mít na paměti, že v prvním měsíci po ozáření se spermioqram nemění, účinky se projevují teprve později.

3.3.5. Pozdní nenádorová poškození

Do této kategorie patří především chronická radiační dermatitida. Odlišujeme typ atrofický a hypertrofický. Atrofický typ má epidermis tenkou, hladkou, vznikají teleangiektázie. V takové kůži se snadno tvoří trhlínky a vznikají sekundární vředy. Zjišťují se ložiskové depigmentace a hyperpigmentace. U hypertrofického typu je kůže silnější, kožní záhyby výraznější, vznikají ložiskové hyperkeratózy, ze kterých může vycházet spinocelulární karcinom.

Jiným charakteristickým projevem je zákal oční čočky. Ať už vzniká po jednorázovém nebo dlouhodobém ozáření, vyžaduje vždy ke svému vývoji poměrně dlouhou dobu. Ozáření způsobí v ekvatoriální rovině čočky poškození epitelových buněk, které za normálních okolností pomalu proliferují po celý život a vytvářejí vlákna čočky přikládající se na její pouzdro. V závislosti na velikosti dávky je tvorba těchto vláken porušena, vznikají tečkovité nebo síťovité zákaly. Přitom oční čočka patří ke tkáním, které jsou na ozáření velmi citlivé.

Jako možný pozdní nestochastický účinek se někdy uvádí i zkrácení střední doby života v ozářené populaci a urychlené stárnutí.

3.3.6. Poškození plodu in utero

Ozáření v období preimplantace a blastogeneze se řídí pravidlem vše, nebo nic. Ozářená zygota nebo blastocysta buď zanikne jako celek, nebo v případě ztráty ojedinelé buňky vývoj pokračuje bez dalších důsledků, protože okolní buňky se širokou diferenciační a proliferační schopností tuto ztrátu plně nahradí.

Z hlediska vlivu na embryo je kritickým časovým úsekem období velké organogeneze (4.-8. týden po oplození vajíčka). Ozáření působí v závislosti na dávce zánik části buněk zárodku. Buď se uplatní především úbytek formativní hmoty, který se v důsledku projevuje zmenšenými rozměry orgánů či zakrnělým vzrůstem plodu, nebo vlivem ztrát chybějící buňky na kritických místech orgánových základů, kde se spojují, či naopak rozčleňují pupeny, lišty apod. Takto je především postižen vývoj centrální nervové soustavy. Mohou být ale postiženy i jiné části. Nejčastějšími nálezy jsou mikrocefalie, mikroftalmie, anoftalmie, rozštěpy páteře, rozštěpy patra... Představy o existenci prahové dávky nejsou jednotné, raději se používá termín kritická dávka jako minimální dávka, která ještě může vyvolat u určitého procenta zárodků nepříznivý efekt. Někteří odborníci dokonce navrhují, aby pro tyto účinky byla přijata představa bezprahové lineární závislosti.

Významným ohrožením při ozáření v časném fetálním období je opožděný rozvoj CNS, který se po narození projeví mentální retardací s celkovou zaostalostí.

3.3.7. Nádorová onemocnění

Zhoubné nádory představují nejzávažnější pozdní somatické účinky ionizujícího záření. Jde o nekontrolované proliferace poškozených (nádorových) buněk. Buňka se může maligně zvrhnout působením řady faktorů a jedním z nich je i ionizující záření. Mechanismus, kterým k tomu dochází, není doposud zcela znám. Nádor nevzniká okamžitě po expozici ionizujícímu záření, ale po několikaletém stádiu latence, které je u jednotlivých nádorů různě dlouhé.

Nádory vyvolané ionizujícím zářením se nikterak neliší od nádorů vyskytujících se v neozářené populaci. Proto hlavním zdrojem informací o podmínkách rozvoje nádorů po ozáření jsou epidemiologické studie. Ideální epidemiologická studie respektuje následující požadavky: 1. sledované i kontrolní skupiny musí být dostatečně početné; 2. u ozářené skupiny musí být co nejpřesněji stanoveny dávky v terčovách tkáních; 3. sledování musí být dostatečně dlouhé, alespoň 40 let od ukončení expozice; 4. musí být přesně

vymezeno kritérium postižení; 5. musí být zajištěn co nejúplnější sběr informací o členech souboru a přihlédnuto přitom k vlivu migrace v populaci. Cílem epidemiologických studií je stanovit míru rizika poškození ve vztahu k podmínkám expozice.

Pro kvantifikaci rizika výskytu nádorů v důsledku ozáření se používá tzv. koeficientu rizika. Je to individuální pravděpodobnost onemocnění nádorem příslušného typu do konce života po ozáření terčové tkáně jedním sievertem. Zpravidla se udává v řádu 10^{-4} na 1 Sv. Jelikož závažnost zhoubných nádorů různých orgánů nebo tkání není stejná, normalizují se koeficienty rizika na společnou míru závažnosti. K tomu se využívá převod počtu vzniklých nádorů na počet úmrtí na nádor (koeficient rizika úmrtí na nádor). Matematicky je vyjádřen jako součin koeficientu rizika a faktoru závažnosti (g). Faktor závažnosti znamená frakci pacientů, u nichž je léčení neúspěšné. Je menší než 1 a u neléčitelných nádorů roven 1.

První poznatky o zhoubných nádorech vyvolaných ionizujícím zářením se objevovaly již před druhou světovou válkou. Nešlo o plánované epidemiologické studie, ale o rozbor množících se kasuistik v některých profesích, kde docházelo k ozáření vysokými dávkami ionizujícího záření. Jednalo se o rakovinu kůže u rentgenologů, bronchogenní karcinom u horníků a kostní sarkomy u osob pracujících s radioaktivními svítivými barvami. Během organizovaných epidemiologických studií, které probíhaly po druhé světové válce, se záhy objevily další nádory, které mají etiologický vztah k ionizujícímu záření.

Rakovina kůže vzniká na podkladě hyperplastických změn při chronické dermatitidě způsobené vysokými dávkami záření. Její indukce je takto vázána na dosažení vysoké prahové dávky pro průvodní nestochastické poškození kůže.

Plíce a dolní cesty dýchací jsou na ozáření velmi citlivé. Zhoubné nádory mohou vznikat jednak inhalací radioaktivních látek (jak tomu je u horníků) nebo zevním ozářením. Střední dobu latence zkracuje kouření v anamnéze.

Při působení ionizujícího záření na kost mohou vznikat sarkomy. Vnímavost k zevnímu ozáření není příliš vysoká, ale významným faktorem je vnitřní ozáření osteotropními radionuklidy (např. u zmíněných osob pracujících s radioaktivními svítivými barvami). Ty se hromadí v oblastech endosteálních

buněk, které jsou vlastní terčovou tkání. V minulosti vznikly rozsáhlé soubory exponovaných osob, které zahrnují široké pásmo úrovní ozáření. Získané poznatky pak byly využity pro odvození limitu pro obsah ^{226}Ra v těle.

V rámci epidemiologických studií, které probíhaly v Japonsku po atomovém útoku na Hirošimu a Nagasaki, se brzy objevila asociace mezi ionizujícím zářením a leukémiemi. První případ byl zaznamenána asi 2 roky po expozici, maximum výskytu pak spadalo do období 5-10 let po expozici. Zaznamenány byly akutní leukémie a chronické myeloidní leukémie. V případě chronické lymfatické leukémie nebyla příčinná souvislost s ionizujícím zářením prokázána. Byla popsána i závislost na věku. Akutní leukémie jsou záležitostí především dětského věku, chronická myeloidní leukémie je oproti tomu v dětství vzácná a vyskytuje se nejčastěji v 5. dekádě života. Muži jsou postiženi častěji než ženy.

Vysokou vnímavost na vznik nádoru po ozáření má mléčná žláza u žen, zejména pokud se ozáření uskutečnilo v adolescentním věku nebo v mladší dospělosti. Nádor vzniká z buněk mlékovodů a šíří se infiltrativně do okolí. Střední doba latence je poměrně dlouhá, asi 25 let.

Velmi vnímavá na ozáření je z hlediska vzniku zhoubných nádorů i štítná žláza. Při ozáření převládají karcinomy papilárního a folikulárního typu. U žen je riziko asi 2 až 2,5krát vyšší než u mužů a poněkud vyšší je u dětí než u dospělých.

Při výčtu tkání a orgánů, u kterých hraje roli ionizující záření při vzniku nádoru, dojdeme postupně až k těm, u nichž je zmíněná role minimální, nejistá či dokonce nulová. Mezi ty, u nichž se zvýšený výskyt nádorů po ozáření pokládá víceméně za prokázaný, patří žaludek, lymforetikulární tkáň, slinné žlázy. Převážná část pozorování svědčí pro zvýšený výskyt nádorů po ozáření u kůže (bazaliom), hltanu, jater, pankreatu, tenkého střeva, tlustého střeva a konečníku. V případě CNS, ledvin a močového měchýře, dělohy, ovarií, příštítných tělísek, jícnu a hrtanu jsou názory na zvýšený výskyt nádorů po ozáření nejednotné.

Orgán	Koeficient rizika
Mléčná žláza	$25 \cdot 10^{-4}$
Červená kostní dřeň	$20 \cdot 10^{-4}$
Plíce	$20 \cdot 10^{-4}$
Štítná žláza	$5 \cdot 10^{-4}$
Kosti	$5 \cdot 10^{-4}$

Tab.2: Přehled koeficientů rizika u vybraných orgánů

3.3.8. Genetické účinky

Odhad pravděpodobnosti genetického poškození v závislosti na dávce ozáření je možný jen zprostředkovaně, protože nejsou k dispozici primární údaje o postižení lidských populací. Vychází se z výsledků pokusů na malých hlodavcích a z dalších experimentálních dat. K provedení extrapolace získaných informací ze zvířat na člověka je třeba znalostí o molekulární a buněčné povaze mutací, o pravidlech přenosu dědičných znaků u člověka, o spontánní frekvenci geneticky podmíněných odchylek v lidské populaci aj.

Mutací rozumíme náhle vzniklou, neusměrněnou, trvalou změnu vlastností nebo znaku organismu podmíněnou změnou genetického materiálu. Mutace jsou genové (bodové) a chromosomální. Genové se pak dále dělí na gametické a somatické.

Důsledky mutací se manifestují velmi různorodým způsobem. Genetické poškození může vést k hrubému narušení vývoje plodu a jeho obalů a způsobit potrat. Genetická komponenta se může podílet na zvýšení perinatální a kojenecké úmrtnosti. Zvláštní kategorií jsou vrozené malformace charakterizované anatomickými odchylkami. Projevem genetického poškození může být i zvýšená frekvence specifických znaků se známým typem dědičnosti, tedy znaků dominantních, recesivních nebo vázaných na pohlaví. Genetická komponenta spoluurčuje dále výskyt konstitučních a degenerativních nemocí v populaci (hypertenze, obezity, artrózy) a předpokládá tedy, že zvýšená frekvence mutací by vedla i k vyššímu výskytu těchto chorob.

Jak bylo zmíněno výše, pro posouzení genetického rizika z ozáření je nezbytné znát také kvantitativní údaje o spontánním výskytu geneticky podmíněných poruch v populaci. Odhaduje se, že asi 10% narozených dětí je nositelem geneticky podmíněné vady. Některé studie mluví i o vyšších číslech.

V ochraně před zářením je snaha vyjádřit genetické riziko ve stupnici, která umožní srovnání s kvantitativními ukazateli rizika zhoubných nádorů. Tím se má umožnit jednotné hodnocení pozdních důsledků ozáření jednotlivých orgánů a tkání. Hodnocení genetických důsledků ozáření člověka se proto omezuje jen na první dvě filiální generace. Do počtu genetických poruch se zahrnují takové, které umožňují přežití. Za těchto podmínek se bere jako koeficient rizika hodnota 10^{-2} Sv. Tento koeficient rizika by přibližně platil po ozáření otců a matek, tedy pro část populace s reálným předpokladem rodičovství.

4. Zdroje ozáření člověka

Ozáření člověka v běžném životě je způsobeno různými zdroji, které lze rozdělit na přírodní, ty představují přibližně 90% radiační zátěže populace, a umělé, které tvoří zbylých 10% (9). Pod prvými rozumíme ty, jež existují nezávisle na člověku, byť by mohla lidská činnost rozsah ozáření jimi způsobený někdy i výrazně ovlivnit.

4.1. Ozáření z přírodních zdrojů

Průměrné ozáření z přírodních zdrojů (přírodní pozadí) je svou celkovou hodnotou 2,2 mSv ročně nejvyšším příspěvkem k ozáření průměrného obyvatele ze všech zdrojů. Přitom rozhodující podíl na něm má vdechování dceřiných produktů radonu. A právě u tohoto zdroje lze reálně připustit, že by výjimečně mohly být dosaženy hodnoty způsobující při chronickém ozáření i nestochastické poškození plic. Odhad je však teoretický a neopírá se o praktická pozorování. Navíc právě toto ozáření lze různými opatřeními výrazně snížit.

4.1.1. Kosmické záření

Kosmické ozáření je mimozemským ozářením člověka. Dávky jím způsobené jsou relativně nízké, do 15 μ Gy. Radiační zátěž z kosmického záření roste se zvyšující se nadmořskou výškou. V obydlich je poněkud nižší vlivem stínění stavebních konstrukcí. Většímu ozáření kosmického původu jsou vystaveni cestující letadly, roční dávkový ekvivalent leteckého personálu (profesionální ozáření) je odhadován na 1 mSv.

4.1.2. Zemské záření

Původní (primordiální) přírodní radionuklidy obsažené ve všech složkách zemského prostředí i v jiných organismech pocházejí z doby vzniku Země a jsou zdrojem zevního i vnitřního ozáření člověka.

4.1.2.1. Zevní ozáření

Zevní ozáření na volném prostranství je způsobeno především radionuklidy ^{238}U , ^{40}K , ^{87}Rb a ^{232}Th . Odhadované ozáření z tohoto zdroje je 61 μSv ročně. Roli hraje stínění venkovního záření stavebními konstrukcemi domů a ozáření z radionuklidů v stavebním materiálu.

4.1.2.2. Vnitřní ozáření

Ve vnitřním ozáření obyvatel z přírodních zdrojů (1,7 mSv) hraje zcela převládající roli ^{222}Rn (70%) a jeho krátkodobé dceřinné produkty spolu s ^{220}Rn (10%) a jeho dceřinnými produkty. Ze zbytku připadá polovina na ozáření radioaktivním draslíkem (^{40}K). Draslík patří mezi biologické esenciální prvky, jejichž obsah organismus přísně homeostaticky kontroluje. Vnitřní ozáření z ^{40}K nelze tedy prakticky zvýšit a zvýšená přítomnost draslíků v prostředí způsobí jen zvýšení dávky zevního ozáření.

^{222}Rn je inertní plyn, který se difúzí uvolňuje z pevných a zejména z porózních látek do vzduchu. Pokud je radon emanován ze zemského povrchu, je velmi rychle rozptýlen do vyšších vrstev atmosféry. Avšak radon emanovaný z podloží či stavebních materiálů do místnosti se tam může kumulovat vzhledem k poměrně dlouhému fyzikálnímu poločasu. Existují tři hlavní zdroje radonu: zemní vzduch z podloží objektu, stavební materiál, voda z podzemních zdrojů.

4.2. Ozáření z umělých zdrojů

4.2.1. Lékařská expozice

Ozáření lidí vyšetřovaných nebo léčených pomocí zdrojů ionizujícího záření je bezpochyby největším ozářením člověka mimo přírodní pozadí. Dávky z lékařské expozice se u jednotlivých obyvatel velmi odlišují, od hodnot nulových do násobků dávek z přírodního pozadí. Z lékařských aplikací se na ozáření podílí zejména metody radiologické, v menší míře pak i metody nukleární medicíny.

Uvádí se, že průměrné radioizotopové vyšetření zatěžuje jedním procentem dávkového ekvivalentu průměrného rentgenového snímku. Otázka zátěže obyvatelstva z radioterapie je na okraji zájmu, neboť velká většina indikací se týká maligních onemocnění.

Vyšetření (zdroj)	Efektivní dávka
Přírodní pozadí	průměrně 2,2 mSv/rok
Snímek končetin a kloubů	0,01 mSV
Snímek hrudníku	0,02 m Sv
Snímek břicha	1 mSv
CT hlavy	2,3 mSv
CT hrudníku nebo břicha	8-10 mSv

Tab.3: Průměrné efektivní dávky při některých vyšetřeních

4.2.2. Ozáření z jaderného palivového cyklu

Jaderné elektrárny uvádějí do životního prostředí tak malé aktivity radionuklidů, že jejich stanovení v prostředí je velmi obtížné až nemožné. Odhad ozáření obyvatel se proto opírá zejména o údaje o výpustích z jaderných elektráren a o modelování „osudu“ vypouštěných radionuklidů. Obyvatelé v blízkosti jaderných zařízení dostávají pochopitelně podstatně vyšší dávky, než je celosvětový průměr, ale i tak se pohybují mezi zlomkem procenta a nejvýše několika málo procenty dávky z přírodního pozadí.

4.2.3. Ozáření z výbuchu jaderných zbraní

Životní prostředí bylo opakovaně kontaminováno radioaktivními látkami při pokusných výbuších jaderných zbraní v atmosféře. Radioaktivní spad z výbuchu lze rozdělit na lokální, troposférický, který se vzhledem k přibližně měsíčnímu poločasů pobytu v atmosféře stačí rozšířit i na celou hemisféru, a stratosférický, který je dlouhodobou složkou spadu a zasahuje, byť jen v malém

rozsahu i na opačnou hemisféru. Ačkoliv spad obsahuje zpočátku mnoho různých radionuklidů, jen ^{14}C , ^{137}Cs , ^{95}Zr a ^{90}Sr přispívají významněji k úvazku kolektivního efektivního dávkového ekvivalentu.

4.2.4. Zdroje v držení obyvatel

Zdroje ionizujícího záření, zejména radionuklidy, mohou být součástí řady předmětů běžného užívání (televizory, svítivé barvy,...). Výroba takových předmětů je hodnocena z hlediska ozáření a regulována tak, aby výsledné individuální i kolektivní dávky byly nízké.

4.2.5. Profesionální ozáření

Některé profesní skupiny obyvatelstva jsou vystaveny expozici ionizujícího záření v rámci svého pracovního zařazení. Takto exponovaná část populace je důkladně monitorována a následně jsou přijímána opatření, která minimalizují riziko poškození účinkem ozáření. Jsou zavedeny roční dávkové limity, které nesmí být překročeny. Míra ozáření těchto lidí při užití všech preventivních opatření nebývá velká a v rámci populace nabývá jen nepatrného významu zřejmě i proto, že se jedná o početně malou část obyvatelstva.

5. Prevence poškození ionizujícím zářením

Základním požadavkem ochrany obyvatelstva je, aby jeho expozice byla co nejnižší, jak lze prakticky (tj. použitím technicky a ekonomicky dostupných metod) dosáhnout, zároveň se ale nevzdávat možnosti využívat ionizující záření ve prospěch člověka.

Cílem ochrany před ionizujícím zářením je vyloučit účinky deterministického typu a snížit na přijatelnou úroveň riziko stochastických účinků u exponovaných jedinců a jejich potomstva (3).

5.1. Způsoby ochrany před ozářením

Teoreticky lze k ochraně před ionizujícím zářením využít biologických, chemických a fyzikálních poznatků (7). Z praktického hlediska je ale nejvýznamnější přístup fyzikální.

Biologická ochrana spočívá v zlepšení výživy organismu a v nespecifickém zvyšování jeho odolnosti.

Základem chemické ochrany je podání radioprotektivních látek, které chrání organismus jak proti přímému, tak proti nepřímému účinku ionizujícího záření.

Fyzikální ochrana před zevním ozářením spočívá v uplatnění tří principů: vzdálenosti, stínění a času. Využití vzdálenosti vychází z fyzikální zákonitosti nepřímé úměrnosti hustoty toku částic nebo fotonů čtverci vzdálenosti od bodového zdroje. Při šíření látkou k tomu přistupuje interakce záření s danou látkou, což se projeví rozptylem a pohlcením částic nebo fotonů. Interakce záření s látkou je využívána v ochraně k podstatnému zeslabení (jež je exponenciální, jde-li o bodový zdroj) nebo k úplnému zastavení toku záření (u nabitých částic) použitím vhodných materiálů ke stínění. Význam časového faktoru je dán tím, že rozhodující veličina v ochraně, dávka, je časovým integrálem dávkového příkonu. Úspory času ozáření znamenají přímo úměrnou úsporu dávky.

Ochrana proti vnitřnímu ozáření, resp. proti průniku radioaktivních látek toto ozářením způsobujících do lidského organismu, spočívá v požadavku izolace

zdroje a na požadavku čistoty, tj. odstranění radioaktivních látek z míst, kam tyto látky pronikly a odkud hrozí jejich vniknutí do těla. Izolace radioaktivní látky nebo organismu od této látky je dosahována řadou prostředků mechanických (těsné zapouzdření zdroje, přetlakový izolační oblek s přívodem vzduchu) nebo funkčních (tlakový spád a směr proudění vzduchu, zajišťované ventilačními systémy, ty slouží i pro očistu, odstranění kontaminovaného vzduchu). K odstranění radioaktivních látek z povrchů slouží obvyklé čisticí prostředky a postupy nebo speciální dekontaminační činidla.

Významným předpokladem, i když ne přímo metodou ochrany před zářením, je radiační monitorování osob a prostředí.

5.2. Základní principy ochrany před zářením

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, je snahou ochrany před ionizujícím zářením vyloučit účinky deterministického typu a v případě stochastických účinků snížit riziko vzniku na přijatelnou mez. Je ale otázkou, jak danou přijatelnost posuzovat. Proto byly formulovány tři základní požadavky, při jejichž splnění lze ozáření považovat za přijatelné (2):

- Žádná činnost vedoucí k ozáření lidí se nesmí provozovat, pokud z ní neplyne dostatečný prospěch ozářeným jedincům nebo společnosti, aby se vyrovnala zdravotní újma způsobovaná ozářením (princip zdůvodnění).
- V rámci určité činnosti musí být výše individuálních dávek, počet exponovaných osob a pravděpodobnost expozic udržovány tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout s uvážením ekonomických a sociálních hledisek (princip optimalizace).
- Expozice jednotlivců musí být podřízena dávkovým limitům, které představují nepřekročitelný strop kontrolovatelné expozice (princip nepřekročení limitů).

5.2.1. Princip zdůvodnění

Jedná se zpravidla o velice komplexní proces rozhodování, který zahrnuje mnohá hlediska (hospodářská, politická, ekologická, vojenská, národnostní,...). Řádně uplatněno musí být samozřejmě i hledisko ochrany.

5.2.2. Optimalizace ochrany před zářením

Cílem optimalizace je nalézt stupeň ochrany, při němž další vynakládání prostředků již není kompenzováno rovnocenným snižováním újmy. Podstatou optimalizační analýzy je tedy určení úrovně ochrany před zářením, kdy bude součet nákladů a škody způsobené újmou nejmenší.

Jaké budou dávky záření při provozu zdroje ozáření je výsledkem jednak volby technologických postupů a ochranných opatření při projekci a výstavbě a jednak důsledkem každodenní činnosti v konkrétním uspořádání procesu užití zdroje. Za provozu jsou změny ve stupni ochrany realizovatelné volbou počtu a kvalifikace osob, použitím ochranných pomůcek a nestavebních komponent ochrany, organizací práce, monitorováním ozáření. Dopad těchto prostředků na ochranu nelze vždy přesně vymežit a jen zčásti lze vyčíslit náklady na tato opatření. Optimalizace ochrany za provozu je prováděna především na základě odborného odhadu a zkušeností bez použití kvantitativních metod. Rozhodování zahrnuje nutně intuitivní komponentu.

Ochrana před zářením v rámci projekce a výstavby pracoviště má k dispozici výraznější technické i organizační prostředky. Přínos těchto opatření ke snížení dávek lze vyčíslit a náklady na výstavbu a provoz jsou dostupné. Proto se v optimalizaci ochrany ve fázi projekce a výstavby klade důraz na kvantitativní metody a optimalizace ochrany před zářením využívá postupy inženýrské optimalizace, jež se vyvinuly v jiných odvětvích průmyslového konání.

5.2.3. Limity dávek a referenční úrovně

Obecné limity jsou nezbytné a závazné ukazatele v ochraně před ionizujícím zářením. Jsou stanoveny ve dvou veličinách. V efektivní dávce vzhledem ke stochastickým účinkům a ve středním dávkovém ekvivalentu v orgánu nebo tkáni vzhledem k deterministickým účinkům. Oba limity musí být respektovány současně. Dávkové ekvivalenty v tkáni však nelze přímo stanovit. Proto se v praxi pro regulaci a kontrolu ochrany používají jako kritéria odvozené limity vyjádřené v přímo měřitelné veličině. Hodnoty těchto limitů jsou spojeny s limity dávkového ekvivalentu definovaným vztahem, modelem, který zaručuje, že při nepřekročení odvozeného limitu nebude překročen základní limit. Zvláštní postavení mají druhotné limity, jež jsou odvozeny z prvotních limitů dávkového ekvivalentu pomocí jednotného, předpisy vymezeného modelu. Jsou určeny jako základ limitování ozáření v praktické činnosti. Pro vnitřní ozáření jsou určeny limity příjmu radioaktivních látek inhalací a ingescí, pro zevní ozáření byly stanoveny limity indexu dávkového ekvivalentu.

Vedle prvotních limitů dávkového ekvivalentu a limitů druhotných, jež spolu s předchozími tvoří základní, tj. obecné limity vyhlášené předpisy, je třeba ještě uvést limity autorizované, stanovené pro jednotlivá zařízení nebo skupinu činností kompetentními orgány, tj. hygienickou službou, zpravidla na základě optimalizace ochrany.

Od limitů, které jsou závazné a vedou tedy k zastavení nebo omezení činnosti, je třeba odlišit jiné číselné hodnoty významné pro plánování a kontrolu ochrany. V oblasti kontroly jsou to úrovně indikující vyšetření příčin a popřípadě následků zjištěných vyšších hodnot, úrovně stanovující požadavek záznamu dávky nebo jiné určené hodnoty a dále úrovně indikující nezbytnost (okamžitého) zásahu do vzniklé situace ohrožení.

Za zmínku stojí hodnoty základních limitů u profesionálně exponovaných a u ostatního obyvatelstva. U profesionálně exponovaných se vzhledem k nestochastickým účinkům zdá jako dostatečný limit 500 mSv/rok (středního dávkového ekvivalentu) u všech tkání kromě oční čočky. U ní byl limit stanoven na 150 mSv, pro populaci bez profesionální expozice na 15 mSv/rok.

U stochastických účinků byl pro profesionálně exponované stanoven limit 50 mSv/rok (efektivního dávkového ekvivalentu), pro ostatní populaci pak 1 mSv/rok s doplňkovým limitem 5 mSv/rok s tím, že průměrný roční efektivní dávkový ekvivalent za dobu života nepřekročí zmíněný limit 1mSv/rok.

5.3. Legislativa

Problematiku používání zdrojů ionizujícího záření a ochrany zdraví před nepříznivými účinky ionizujícího záření upravují u nás zejména zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie (atomový zákon), v platném znění, a vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, v platném znění (1).

Zákon č. 18/1997 Sb. rozděluje zdroje ionizujícího záření do pěti tříd podle míry ohrožení životního prostředí a zdraví osob při práci s nimi. Pracoviště, kde jsou tyto zdroje používány, se dělí do tří kategorií. Pracovníci vystavení ionizujícímu záření jsou členěni do dvou kategorií podle míry dávek, které mohou při své práci absorbovat. Otázkami ochrany populace před ionizujícím zářením se u nás zabývá Státní úřad pro jadernou bezpečnost, nikoliv orgány ochrany veřejného zdraví.

Vyhláška 184/1997 Sb. se věnuje limitům ozáření a ozáření obyvatelstva obecně.

6. Ochrana v nukleární medicíně

Nukleární medicína je klinickým oborem, zabývajícím se diagnostikou a léčbou pomocí otevřených radioaktivních zářičů ve formě radiofarmak, které jsou podávány do těla (nejčastěji intravenózně, inhalací, ingescí) (5). Tím dochází k vnitřnímu ozařování pacientů a zevnímu ozáření těch, kteří přicházejí s pacienty do kontaktu.

Nedílnou součástí nukleární medicíny je využívání poznatků radiobiologie (kapitola 3), dozimetrie ionizujícího záření a radiační ochrany (kapitola 5). V následujících částech budou popsána specifika platná pro nukleární medicínu.

6.1. Monitorování

Pracovníci oddělení nukleární medicíny musí být vybaveni osobním dozimetrem. Základem je fotografická emulze, v níž vlivem ozáření vzniká latentní obraz, který lze vyvoláním zviditelnit. Zčernání filmu je úměrné dávce ozáření. Je sestrojen tak, aby jeho údaje odpovídali součtu dávkových ekvivalentů od jednotlivých druhů záření v hloubce tkáně 10 mm. Tuto hodnotu pak lze hodnotit ve vztahu k stanoveným limitům. Osobní dozimetr je nošen na pracovním oděvu v oblasti sternu. Po uplynutí kontrolního období (jeden až tři kalendářní měsíce) se odesílá k vyhodnocení do centrální laboratoře v Praze.

Pracovníci, u nichž je zvýšené nebezpečí ozáření rukou, nosí navíc ke zmíněnému osobnímu dozimetru ještě dozimetr prstový, který však obsahuje termoluminiscenční látku.

Při hodnocení ozáření pracovního personálu je nutné k výsledkům z dozimetrů připočítat ještě dávku z vnitřního ozáření, která se ale individuálně nesleduje.

Souběžně s monitorováním pracovníků se provádí i monitorování pracoviště. Využívají se jak dozimetry, tak detektory ionizujícího záření hodnotící v reálném čase. Na odděleních nukleární medicíny se pak kvůli práci s otevřenými zářiči přistupuje i k měření kontaminace povrchu radioaktivními látkami, které má za cíl signalizovat odchylky od správných pracovních postupů, nedostatečnou

funkci či selhání bariér bránících rozptylu radioaktivních látek a nedostatky v udržování čistoty a pořádku pracoviště.

6.2. Stavební specifika a struktura oddělení

Součástí radiační ochrany na odděleních nukleární medicíny jsou speciální stavební opatření, kterými rozumíme dostatečnou tloušťku zdiva, barytové omítky, dveře vyložené olověným plechem aj., jež snižují na minimum zevní ozáření z otevřených zářičů mimo vyhrazený prostor. V objektu nukleární medicíny, zejména je-li na lůžkové části zajišťována i radionuklidová terapie, se zřizuje vedle běžné splaškové kanalizace i samostatná kanalizace ústí do oddělené jímky s kontrolovaným režimem vypouštění.

Při řešení celkového uspořádání pracoviště nukleární medicíny se bere v úvahu pohyb radioaktivních látek, pracovníků a pacientů. Tyto cesty se setkávají v místnosti pro aplikaci radionuklidů, jinak by ale měly být vedeny odděleně se samostatnými vstupy. Oddělení nukleární medicíny jsou zařazována převážně do kategorie II. Vyhrazuje se na nich tzv. kontrolované pásmo. Kontrolovaným pásmem pracoviště se rozumí ta část, v níž pracovníci mohou za rok obdržet dávky, které přesahují 3/10 radiačních limitů. Mají do něj přístup jen oprávněné osoby, nesmí zde pracovat osoby mladší 18 let a gravidní ženy. Kontrolované pásmo se zpravidla dělí na tři úseky: úsek pro příjem, zpracování a přípravu radiofarmak, úsek radioizotopové radiodiagnostiky a lůžkovou část. Do kontrolovaného pásma se začleňuje vymírací místnost, kde je skladován radioaktivní odpad. Mimo kontrolované pásmo se nacházejí pracovny lékařů, administrativní úsek, denní místnosti pro personál, čekárny pro pacienty.

6.3. Ochrana zdravotního personálu

Řada momentů důležitých pro ochranu zdravotního personálu již vlastně byla zmíněna. Ať už jsou to stavební a strukturní specifika pracoviště nukleární medicíny nebo monitorování personálu, dodržování limitů dávek,...

Význam má užívání ochranných pomůcek jakými jsou olověné zástěry a rukavice zhotovené z gumy a s přísadou olova, které kromě ochrany před ionizujícím zářením poskytují i ochranu před povrchovou kontaminací při práci s radionuklidy.

V rámci režimových opatření by se nikdo z personálu neměl v kontrolovaném pásmu pohybovat delší dobu, než je nezbytně nutné. Proto jsou veškeré pracovny a denní místnosti umístěny mimo kontrolní pásmo.

Významnou roli v ochraně před ionizujícím zářením hrají vstupní a periodické preventivní prohlídky, při kterých je posuzován nejen zdravotní stav, ale i zhodnocena zdravotní způsobilost k výkonu povolání (stanoveno zákonem). Preventivní prohlídky periodické se konají po 1-3 letech.

6.4. Ochrana pacientů

I zde platí základní principy zdůvodnění, optimalizace a nepřekročení dávkových limitů (viz výše). Co však ještě zmíněno nebylo, jsou režimová opatření týkající se pacientů, která vycházejí ze struktury oddělení nukleární medicíny. Neaplikovaní pacienti mají čekárnu mimo kontrolované pásmo, aplikovaní pacienti, kteří se tak stávají otevřenými zářiči, pak zůstávají v kontrolovaném pásmu (vyšetřovna, čekárna, pokoje lůžkového oddělení) tak dlouho, dokud jako otevřený zářič ohrožují ostatní lidi v okolí.

7. Závěr

Dlouholeté zkušenosti s ionizujícím zářením ukazují, že jeho účinky nelze podceňovat a zodpovědná ochrana proti ozáření je na místě. Současné znalosti o ionizujícím záření umožňují volit vhodné a efektivní způsoby ochrany, kterými významně snižujeme výskyt onemocnění, u nichž je asociace s expozicí ionizujícímu záření prokázána. V současnosti je u nás ochrana před ionizujícím zářením na relativně vysoké úrovni (platí obecně, nejen pro nukleární medicínu), proto není vhodné některé reálně existující negativní účinky ionizujícího záření nadhodnocovat a vyvolávat tak mezi obyvateli radiofobii, která je neadekvátní současné situaci.

Souhrn

Tato práce se komplexně věnuje problematice ochrany před ionizujícím zářením v nukleární medicíně. Vychází od základních poznatků o fyzice ionizujícího záření, pokračuje hodnocením jeho biologických účinků a na podkladě těchto poznatků dokládá nutnost preventivních opatření. Obecné principy ochrany, stejně jako konkrétní opatření v nukleární medicíně, pak uzavírají celou práci.

Summary

This thesis treats comprehensively the issue of protection against ionizing radiation in nuclear medicine. Its cornerstone lies in the physics of ionizing radiation, the work continues with evaluation of biological effects of ionizing radiation and it concludes from this knowledge that preventive measures are necessary. The whole study is finished by exploration of general principles as well as particular measures of protection.

Seznam použité literatury

- [1] Brhel, P., Manoušková, M., Hrnčář, E.: Pracovní lékařství: základy primární pracovnělékařské péče, Národní centrum ošetrovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, Brno, 2005
- [2] Hušák V.: Zdravotní rizika ionizujícího záření a ochrana před ním, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 1992
- [3] Klener, V.: Hygiena záření, Avicenum, Praha, 1988
- [4] Kunz E.: Příručka lékaře o ochraně před zářením, Avicenum, Praha, 1990
- [5] MZČR: Koncepce oboru nukleární medicína, [on-line], [cit. 2.1.2008], dostupnost z www: < www.mzcr.cz/data/c441/lib/15a.rtf >
- [6] Nekula, J., Heřman, M., Vomáčka, J., Köcher, M.: Radiologie, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 2005
- [7] Rosina, J., Navrátil, L.: Lékařská biofyzika. MANUS, Praha, 2000
- [8] Ullmann, V., Puchálková, Z., Ullmannová, L.: Radiační ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření v nukleární medicíně, [on-line], [cit. 24.12.2007], dostupnost z www: <<http://astronuklfyzika.cz/RadOchrana.htm>>
- [9] Záření a zdraví, [on-line], [cit. 20.12.2007], dostupnost z www: <www.med.muni.cz/dokumenty/pdf/zareni.pdf>

Zdroje použitých obrázků a tabulek

Obr.1: Ullmann, V.: Paprsky života i smrti, [on-line], [cit. 2.1.2008], dostupnost z www: < <http://astronuklfyzika.cz/PaprskyZivotaSmrti.htm>>

Obr.2: Tománek, P.: Radiační hygiena, [on-line], [cit. 25.12.2007], dostupnost z www: < <https://biofyzika.lfp.cuni.cz/file.php/1/referaty/4-RadiacniHygiena.ppt>>

Tab.1: Hušák, V.: Zdravotní rizika ionizujícího záření a ochrana před ním, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 1992, s. 9

Tab.3: Nekula, J., Heřman, M., Vomáčka, J., Köcher, M.: Radiologie, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 2005, s. 11