

**JIHOČESKÁ UNIVERZITA  
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
Zdravotně sociální fakulta**



# **ZÁKLADY RADIAČNÍ OCHRANY**

*doplňkové texty pro posluchače kombinované formy studia  
studijního programu „Ochrana obyvatelstva“*

*studijního oboru „Civilní nouzová připravenost“*

**ČESKÉ BUDĚJOVICE 2007**

## Obsah

1. Biologické účinky ionizujícího záření .....	4
2. Principy radiační ochrany.....	8
3. Infrastruktura systému radiační ochrany .....	15
4. Usměrnování ozáření při činnostech.....	17
4.1. Usměrnování lékařského ozáření .....	19
4.2. Jaderné elektrárny .....	23
5. Přírodní zdroje.....	27
6. Radiační havárie.....	29
7. Literatura .....	32
8. Otázky.....	33

**Klíčová slova:** ionizující, ochrana, princip, radiační, újma

## Radiační ochrana

V souladu s obecnými principy je cílem radiační ochrany zabezpečit dostatečnou úroveň ochrany zdraví a umožnit přitom přínos z využití zdrojů ionizujícího záření (ZIZ) a jaderné energie. Při řešení praktických problémů musí se radiační ochrana opírat o soubor vzájemně konsistentních principů, základních pojmů, kritérií a přístupů, tedy o zformulovanou koncepci [Klener 2000].

Rozvoj radiační ochrany začal krátce po objevu X – záření K.W. Roentgenem v roce 1895 a radioaktivity H. Bequerelem v roce 1896. Již v roce 1896 E.H.Grubbe popsal poškození rukou radiační popáleninou (ke konci tohoto roku bylo známo již 23 těchto případů). V roce 1902 byl poprvé vznik nádorového onemocnění u pracovníka přičítán působení ionizujícího záření u pracovníka se ZIZ; v letech 1911 až 14 bylo popsán vznik 198 nádorových onemocnění především u radiologů, z nichž 54 zemřelo. V letech 1920 až 1940 byla zjištěna radiační poškození, zejména kůže u rentgenologů i pacientů, poškození u pracovníků ve výrobě svítících (radioaktivních) barev. Tyto skutečnosti vedly k prvnímu doporučení omezujícímu ozáření - stanovit množství 0,1 $\mu$ g <sup>226</sup>Ra jako bezpečné depo a dávku 0,6 rad (cca 6 mGy)/týdně na kost a dřev jako limitující ozáření. Od konce druhé světové války došlo k rozvoji epidemiologických studií účinků ozáření (v důsledku použití jaderných zbraní v Hiroshimě a Nagasaki a rozšiřování lékařských a profesionálních expozičních) a využití výsledků těchto studií k určení koeficientů rizika pravděpodobnosti smrti pro fatální nádory. Od 50. let minulého století došlo významnému rozvoji radiobiologického a později molekulárně-biologického výzkumu, což byl důsledek možného použití jaderných zbraní a předpokládaného rozvoje jaderné energetiky. 70. až 80. léta minulého století přinesla pokrok v objasňování kancerogeneze a v ujasňování rozdílu mezi deterministickými a stochastickými účinky IZ.

V roce 1921 British X and Radium Protection Committee přijala pravidla radiační ochrany směřující k omezování ozáření při práci. V roce 1934 ICRP (Mezinárodní komise pro radiologickou ochranu) přijala první limity 0,2 R/den (cca 2 mGy/den). V letech 1956-58 byly ICRP stanoveny dávkové limity pro celé tělo, gonády a kost. dřev na 5 rem/rok (50 mSv/rok), pro ostatní orgány (15-75) rem/rok (150 – 750 mSv/rok) a stanoven tzv. akumulací vzorec  $D=5 \times (\text{věk}-18)$ . V roce 1991 by ICRP [ICRP 1991] vydáno Doporučení č. 60, které stanovilo současný systém radiační ochrany - principy - zdůvodnění činnosti nebo zásahu, optimalizace ochrany nebo zásahu, dodržení limitů dávky pro jednotlivce při činnostech, zajištění bezpečnosti zdrojů, které platí do dnešní doby. Mezinárodní agentura pro atomovou energii ve Vídni (IAEA) rozpracovala toto doporučení ve formě Základních bezpečnostních standardů BSS [IAEA 1996], podobně jako Evropská unie [EU 1996]. Tato Směrnice Rady Evropy 96/29 se stala základem legislativy EU a byla rovněž přijata naší republikou (vyhláška 184/1997 Sb. a její novela vyhláška 307/2002 Sb. v platném znění).

Současná koncepce radiační ochrany vychází:

- ze soudobých poznatků o biologických účincích ionizujícího záření,
- ze soudobých obecných přístupů společnosti k ochraně zdraví obyvatelstva před faktory technického rozvoje a životního prostředí,
- z potřeb současné i očekávané praxe, tj. bere v úvahu všechny situace v ozáření lidí, jež se vyskytují nebo mohou vyskytnout, a skýtat pro ně principiální řešení.

## 1. Biologické účinky ionizujícího záření

Absorpce energie ionizujícího záření v látce má kvantový charakter; dochází k excitacím a ionizacím atomů či molekul, tj. energie je předávána elektronům. Pro některé druhy záření a určité energie mohou nastat primárně i jiné jevy (např. rozptyl nebo jaderné reakce u neutronů, Comptonův jev nebo materializace fotonů  $\gamma$ -záření apod.), avšak ve svém důsledku sekundárně vzniklé částice také ztrácejí energii excitacemi a ionizacemi. Tím se ionizující záření principiálně liší od jiných fyzikálních a chemických faktorů, které rovněž mohou negativně ovlivňovat biologické systémy (např. zvýšená teplota, UV-záření, jedy apod.).

Kvantový charakter přenosu energie záření hmotě vede k tomu, že i v homogenně ozářeném vzorku lze nalézt mikroskopické objemy (objekty, místa) s větším počtem ionizací a excitací, nebo naopak místa, kde k žádnému předání energie prakticky nedošlo. Pomocí pravděpodobnosti vzniku ionizací (která je pochopitelně úměrná dávce záření) lze charakterizovat počet nezasažených, tj. přežívajících mikroskopických objektů (buněk) v závislosti na dávce záření – na základě tohoto byl formulován tzv. *zásahový model/teorie* – k dosažení biologického efektu je nutno zářením zasáhnout (jednou nebo několikrát) určitou citlivou strukturou. Taková citlivá struktura v biologických objektech existuje – je to molekula DNA. Zásah nemusí odpovídat jedné excitaci nebo ionizaci, může to být také shluk ionizací, průchod částice citlivou strukturou apod.

Se vznikem a rozvojem mikrodozimetrie se očekávalo, že se podaří objasnit rozdíly v biologické účinnosti různých druhů záření právě odlišným rozdělením specifické energie, tj. předpokládalo se, že buňka reaguje podle množství energie v ní deponované. Toto očekávání se však nesplnilo, neboť biologická reakce závisí nejen na množství energie, ale také na jejím rozložení uvnitř biologického objektu.

Biologické systémy obvykle obsahují vysoké procento vody a značná část energie záření se proto absorbuje ve vodě. Je tedy důležité vědět, jak působí ionizující záření na molekuly vody. Radiolýzou vody vznikají vysoce reaktivní produkty, jako je hydroxylový radikál  $\text{OH}^\bullet$ , vodíkový radikál  $\text{H}^\bullet$ , hydratovaný elektron  $e_{\text{aq}}^-$  a v přítomnosti kyslíku vzniká také značné množství peroxidu vodíku  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Všechny tyto produkty mohou vyvolávat další (sekundární) reakce s biologickými molekulami, a mluvíme proto o *nepřímém účinku záření* – na rozdíl od přímého, kdy je energie záření přenesena bezprostředně na biologickou molekulu. Ve vodném roztoku závisí podíl nepřímého účinku záření na koncentraci biologických molekul, v nichž účinek sledujeme. Čím je menší koncentrace (tzn. že na jednu biomolekulu připadá více molekul vody), tím je nepřímý účinek záření větší. Buňky představují prostředí s poměrně vysokou koncentrací biologických molekul a je zde nutno brát v úvahu jak přímý, tak i nepřímý účinek záření.

Molekula DNA je v buňkách unikátní a je pro existenci buňky velmi důležitá, neboť v ní je obsažena základní informace o struktuře a funkci buňky. U vícebuněčných organismů je navíc v molekule DNA obsažena základní informace o struktuře a funkci organismu jako celku, a to v každém okamžiku jeho vývoje – počínaje od zárodečných buněk a konče smrtí dospělého jedince. Ionizující záření je typické tím, že produkuje ve vysoké míře *zlomy DNA*. Obecně jsou však radiační změny DNA velmi různorodé – kromě jednoduchých a dvojitých zlomů vznikají také poškození basí, cross-linky uvnitř DNA, lokální denaturace DNA, apod. Často vznikají tato poškození dohromady s jednoduchými nebo dvojitými zlomy.

Řada studií se věnuje souvislosti mezi vznikem dvojitých zlomů (DSB) a letálním nebo mutagenním účinkem záření. Proporce nereparovaných DSB se zvětšuje při vyšším LET záření, z čehož plyne, že kvalita DSB se může lišit. V poslední době je stále více pozornosti věnováno tzv. *komplexním poškozením DNA*. Jedná se o poškození vzniklé jako následek vydělení většího množství energie záření ve formě klastru. Takové jevy nastávají i pro  $\gamma$ -záření, a přestože jejich četnost je malá, mohou významně přispívat k výslednému radiobiologickému efektu. Komplexní poškození vznikají s podstatně větší četností pro hustě ionizující záření; kyslíkový poměr pro jejich vznik je menší než pro zlomy DNA (jejich modifikovatelnost na fyzikálně-chemické úrovni je menší) a jejich reparovatelnost enzymatickými systémy je rovněž menší.

Molekuly DNA jsou uspořádány v buňce do chromosomů; zlomy DNA mohou vést ke vzniku *chromosomových aberací*. Chromosomové aberace jsou považovány za hlavní příčinu letálního účinku záření. To se potvrzuje podobnou nebo shodnou závislostí vzniku aberací a letálního účinku záření na různých podmínkách ozáření, jako jsou např. přítomnost kyslíku, dávková závislost, závislost na fázi buněčného cyklu, fyzikální vlastnosti záření apod. Frekvence vzniku chromosomových aberací závisí nelineárně na dávce. Lineárně-kvadratická závislost pro vznik dicentrických aberací u buněk ozářených slabě ionizujícím zářením se vysvětluje touto skutečností, že pro vznik této aberace jsou zapotřebí dva DSB, jejichž výtěžek závisí na dávce lineárně. Lineární komponenta je způsobena vznikem shluků ionizací a excitací i pro slabě ionizující záření. Pro silně ionizující záření (neutrony nebo  $\alpha$ -záření) je lineární komponenta dominantní.

Zlomy DNA a následně chromosomální aberace jsou většinou neslučitelné s životními funkcemi buňky. Nejčastěji dochází k zániku buňky při pokusu o dělení, kdy neproběhne zdárně separace chromosomů do dceřiných buněk. Zůstane tedy jedna buňka, která následně zahyne. Některé typy aberací zachovávají v buňce prakticky všechny geny ve funkčním stavu a ty se pak mohou dále dělit, i když jejich vlastnosti mohou být pozmeněné. Buňky s pozmeněnými vlastnostmi jsou nebezpečné pro organismus, neboť mohou vést k nádorovému bujení.

Kromě reprodukční smrti buňky se často setkáváme [Klener 2000]s pojmem “programovaná smrt” neboli *apoptóza*. Tento typ smrti se od nekrózy liší koordinovaným působením určitých enzymů na počátku procesu. Apoptóza indukovaná zářením je závislá na přítomnosti funkčního genu p53, který nemusí být potřebný pro apoptózu indukovanou jinými prostředky. Programovaná smrt buňky je zřejmě určitou ochranou organismu před nádorovým bujením, neboť podnětem k apoptóze je určitý typ poškození DNA. Jestliže buňka nedokáže včas opravit vzniklé poškození, stává se pro organismus rizikovou a je vhodnější tuto buňku nahradit doplněním ze zdravé populace; dochází proto k jejímu sebezničení. Je otázkou, zda by nebylo možné v některých případech zvýšit účinnost radioterapie využitím apoptózy. Programovaná buněčná smrt je v současné době předmětem intenzivního výzkumu.

Kromě letálních účinků způsobuje záření také vznik *dědičných změn* v živých systémech, tj. změn v genetickém kódu. Může se jednat o genové mutace, ale také o chromosomové aberace slučitelné s životem buňky. V důsledku genetických změn mohou buňky např. změnit svoji schopnost růstu v určitém prostředí.

Velká pozornost byla věnována porovnání různých typů záření z hlediska jejich mutagenní účinnosti. Účinnost různých typů záření se porovnává pomocí tzv. *relativní biologické účinnosti* (RBE) záření. RBE určitého (testovaného) typu záření je koeficient, který udává,

nakolik je tento typ záření biologicky účinnější než tzv. referenční záření (obvykle X nebo  $\gamma$  záření). Čím je větší účinnost záření, tím menší dávka je potřebná pro dosažení určitého biologického efektu. RBE je tedy poměr dávek  $D_\gamma / D_z$ , kde  $D_\gamma$  je dávka referenčního záření a  $D_z$  je dávka testovaného záření pro stejný biologický efekt. RBE závisí na dávce, dávkové rychlosti, typu záření (na LET, energii, u neutronů také na spektru sekundárních částic) a může se lišit pro různé sledované biologické efekty. V oblasti malých dávek záření je při lineárních dávkových závislostech veličina RBE na dávce nezávislá. Pro mutagenní účinky záření u savčích buněk ozářených urychlenými těžkými ionty RBE roste se vzrůstající hustotou ionizace, dosahuje maxima při LET (100-200) keV/ $\mu$ m a pro ještě větší LET hodnoty RBE opět klesá. Uvedená závislost společně s dalšími radiobiologickými výsledky vedly k doporučení zavést multiplikačních koeficientů pro záření různé kvality.

Vhodným modelem lidského organismu pro popis účinků záření na člověka je představa lidského těla jako souhrnu sebeobnovných buněčných populací. Sebeobnovné buněčné populace jsou plně rozvinuty v organismu plodu a novorozence, později se diferencují a plně jsou zachovány po celý život jen v některých tkáňových a buněčných systémech, např. v systému červené krvetvorby. V periferní krvi člověka cirkulují bezjaderné erythrocyty, které jsou plně vybavené svým tvarem a obsahem hemoglobinu pro transport kyslíku. Vliv ionizujícího záření na červenou krvetvorbu lze zjednodušeně vysvětlit tím, že vnímavými populacemi jsou kompartmenty buněk schopných dělení. Po jednorázovém ozáření se velikost těchto kompartmentů v závislosti na výši dávky zmenší. Přijmeme-li představu, že lidský organismus je souborem buněčných populací různých růstových charakteristik, pak při znalosti prostorové a časové distribuci dávky můžeme patogenetické pochody vedoucí ke klinickým projevům poměrně výstižně rekonstruovat. Pro komparativní posuzování účinků ionizujícího záření na biologické systémy je zaveden pojem radiosenzitivita.

Ozáření člověka může vyvolávat některé chorobné změny projevující se v průběhu dnů až týdnů, jiné v průběhu roků a desetiletí. To vedlo v minulosti k rozlišování časných a pozdních následků ozáření. V posledních desetiletích bylo zavedeno jiné třídění opírající se o základní typy *vztahu dávky a účinku*. Poznání tohoto vztahu a jeho popis vhodným kvantitativním parametrem je hlavním cílem biologických a medicínských studií zaměřených na ochranu před ionizujícím zářením. Na základě těchto znalostí lze pro činnosti za kontrolovaných podmínek vymezit cíle a kritéria radiační ochrany a pro případy mimořádných situací spojených s ozáření lidí odhadnout možné následky i úkoly zdravotnické pomoci. Účinky ionizujícího záření se z hlediska integrovaného savčího organismu dělí na *deterministické*, kdy při dosažení určité dávky ionizujícího záření *efekt zákonitě nastává*, a *stochastické*, kdy se stoupající dávkou *stoupá pravděpodobnost poškození*.

Pro *deterministické účinky* je charakteristická prahová závislost na dávce. Kvantitativním ukazatelem, pomocí něhož lze odhadnout možné následky ozáření, je prahová dávka pro ten který účinek, popřípadě hodnota 50% efektivity vztažená ke zvolené referenční době po ozáření, tedy např. LD 50/30. Důležitým rysem této skupiny účinků je měnící se klinický obraz se stoupající dávkou, jinak řečeno, intenzita projevů a jejich zdravotní závažnost je závislá na dávce.

Akutní nemoc z ozáření vniká typicky po *jednorázovém celotělovém ozáření* vyšší dávkou pronikavého záření. Takové případy nejsou časté a v denní praxi radiační ochrany se s nimi nesetkáváme. Přesto je rozbor takových případů velmi instruktivní pro pochopení patogenetických představ o rozvoji deterministických účinků. Akutní nemoc z ozáření u člověka byla podrobně popsána u obětí jaderného útoku na japonská města v roce 1945,

později se vyskytla řada jednotlivých případů ozářených při nehodách reaktorů nebo při ztrátě kontroly nad radionuklidovými zdroji; rovněž černobylská havárie přispěla k poznání tohoto syndromu pro rozsáhlou skupinou jednorázově ozářených pracovníků elektrárny a záchranářů.

Druhým typem významných biologických změn v důsledku ozáření jsou *stochastické účinky*, jež jsou důsledkem změn v buňkách přeživších ozáření. Změněná buňka se může, po značném časovém odstavu, vyvinout v nádor. Obranné a reparační schopnosti organismu činí tento vývoj při malých dávkách velmi nepravděpodobným, nicméně nejsou známy žádné dávky, pod nimiž by ke vzniku nádoru nemohlo dojít. Kancerogenní účinek záření byl prokázán v epidemiologických studiích u různých ozářených populací, kde byl pozorován zvýšený výskyt nádorů oproti srovnatelné kontrolní populaci. S hlediska jednotlivce roste s dávkou záření pravděpodobnost vzniku nádoru, nikoliv intenzita či stupeň účinku. Stochastický, tedy náhodný s hlediska určitého jedince, charakter mají i dědičné důsledky ozáření, projevující se u potomstva ozářených osob.

V návaznosti na studiu biologických účinků záření byly analyzovány poznatky o radiační kancerogenezi - za základ výpočtů byla zvolena data o úmrtích na zhoubný nádor u obětí jaderného bombardování japonských měst. Pomocí těchto analýz byly odvozeny koeficienty objektivní *zdravotní újmy*, do které jsou zahrnuty koeficienty rizika úmrtí na nádor, koeficienty charakterizující význam vyléčených nádorů a koeficienty dědičných poškození, a to všechno zvlášť pro obecnou populaci a zvlášť pro pracovníky.

Tabulka : Koeficienty pravděpodobnosti výskytu stochastických účinků [ICRP 1991]

Ozářená populace	Újma ( $10^{-2}$ Sv $^{-1}$ )			
	Letální nádor	Jiné nádory	Závažné dědičné změny	Celkem
Pracující	4	0,8	0,8	5,6
Obyvatelé	5	1	1,3	7,3

Obecně vyjadřují modely rizika funkční závislost velikosti rizika na vnějších faktorech. Hodnocení kancerogenního rizika ve vztahu k radiační dávce, resp. expozici vychází z *bezprahového lineárního modelu*.

Jestliže lze zabránit vzniku deterministických účinků tím, že dávka nepřekročí prahovou hodnotu daného účinku, v případě stochastických účinků nelze jejich vznik zcela vyloučit; můžeme jej pouze omezit pravděpodobnost jejich vzniku na míru pokládanou za přijatelnou pro jednotlivce a společnost.

## 2. Principy radiační ochrany

Z obecných úvah o motivech rozhodování a konání platí poznání, že lidé konají nějakou činnost, pokud jim přináší větší přínos a výhody než činí náklady a spojené nevýhody, tedy dostatečný čistý přínos; výhody a nevýhody nemusí mít nutně materiální povahu. Bude tedy mít nároky na přiznání přijatelnosti jen takto *zdůvodněná činnost* vedoucí k ozáření lidí. Ovšem čistý přínos lze často dalším vynaložením úsilí či nákladů zvýšit, např. vynaložením tolika prostředků na ochranná opatření, až další náklady již nepřinesou úměrné snížení ozáření lidí. Tento přístup usilující, aby všechny dávky byly tak nízké jak je rozumně dosažitelné při uvážení ekonomických a sociálních hledisek, nazýváme stručně *optimalizací ochrany* před zářením.

I při zdůvodněné činnosti s optimalizovanou ochranou však mohou být přínos a újma (reprezentovaná dávkami záření) nestejně rozděleny mezi dotčené osoby, v krajních podmínkách by i při optimalizované ochraně mohli jednotlivci dostat vysoké dávky. Proto je nezbytné pro druhy ozáření vyznačující se nestejnou distribucí přínosu a dávek, jako je ozáření při práci a ozáření obyvatel (nikoliv lékařské ozáření, kde se většinou přínos i újma týkají stejných osob), zabránit závažným nerovnostem a stanovit obecnou garanci nejvýše přijatelného individuálního rizika stochastických poškození, jímž jsou *obecné limity* individuálních dávek.

Zdůvodnění činností vedoucích k ozáření, optimalizace radiální ochrany a dodržení obecných dávkových limitů jsou *základními principy*, zavedenými do radiální ochrany již publikací ICRP č. 26 [ICRP 1977] a rozvinutými a doplněnými dále v publikaci ICRP č. 60 [ICRP 1991] a v Základním bezpečnostním standardu BSS [IAEA 1996]. Zejména poslední dokument k principům radiální ochrany přidal explicitně i požadavek *zajištění bezpečnosti zdrojů ionizujícího záření*.

Zavedením veličiny *efektivní dávky*, jako míry celkové újmy, dovolilo hodnotit ozáření osob ve většině aplikací, i při nehomogenním ozáření více orgánů a tkání. Hodnocení důsledků ozáření jednotlivého orgánu bylo možné již při stanovení koeficientu rizika pro tento orgán a mělo význam při ozářeních s převažující depozicí energie v tomto orgánu na př. ve štítné žláze při hodnocení úniku radioaktivních izotopů jódu z reaktoru. Kvantitativní optimalizace se ovšem stala reálně možnou až po určení rizika pro všechny tkáně a orgány a vytvoření veličiny efektivní dávka.

Efektivní dávka je vhodnou veličinou i pro stanovení obecných limitů rizika stochastických účinků pro jednotlivce s tím, že limity tkáňové ekvivalentní dávky mají zabránit deterministickým účinkům, tam kde je možnost vyššího ozáření tkáně i při dodržení limitu efektivní dávky. V době kdy efektivní dávka, resp. její nedávný předchůdce, efektivní dávkový ekvivalent, nebyla zavedena, byl pro limitování situací nehomogenního ozáření více orgánů a tkání používán přístup kritického orgánu či tkáně. Při něm se ozáření limitovalo dle dávky v nejzávažněji ozářeném orgánu, tedy v tom, kde se dávka nejvíce přiblížila k příslušnému limitu tkáňového dávkového ekvivalentu, ozáření ostatních orgánů a tkání bylo při tomto přístupu prakticky zanedbáno.

Člověk je během svého života neustále ozařován z přírodních i umělých zdrojů záření a veškeré aktivity člověka jsou spojeny s kumulací dávek proměnlivého příkonu (vdechováním



radioaktivních látek ze vzduchu, jejich příjmem v potravinách, ozařováním z radioaktivních látek ve vlastním organismu, pobytem a pohybem při příkonu zevního ozáření různém dle lokality i nadmořské výšky, kontaktem s umělými zdroji ozáření atd.).

Doporučení ICRP č. 60 [ICRP 1991] přineslo základní rozlišení dvou lidských aktivit, rozdílných co do vlivu na existující již ozáření lidí - záměrné, plánované *činnosti*, („practice“), vedoucí k předvídanému, a tedy pod kontrolou stojícímu ozáření lidí, přispívajícímu k dosavadní úrovni jejich ozáření z přírodních a umělých zdrojů a aktivity, kdy zdroj se dostane mimo kontrolu - *zásahy* („intervention“).

K činnostem řadíme nejen ty, jež zavádějí nové soustavy zdrojů, expozičních cest a jednotlivců, ale i ty, jež mění síť expozičních cest z existujících již zdrojů k člověku a tak zvyšují ozáření jednotlivců nebo počet ozařovaných.

Cílem zásahů je snížit/omezit stávající nebo hrozící ozáření osob odstraněním zdrojů, změnou expozičních cest nebo snížením počtu ozařovaných osob (nejde zde ovšem o opatření k snížení ozáření v rámci činností, na př. na základě optimalizační revize dosavadních postupů nebo ochranných opatření). Doporučením ICRP č. 60 [ICRP 1991] bylo do kategorie „zásahů“ sloučeno řešení dvou zdánlivě odlišných situací - kontaminace prostředí po havarijním úniku radioaktivních látek a ozáření v důsledku „minulých“ povolených činností (tzv. staré zátěže např. po uranové těžbě) či vyšší ozáření radonem a produkty jeho přeměny v bytech, které vyžaduje zásah. Oběma situacím je ovšem společné to, že vznikly nezáměrně a snížení ozáření vyžaduje v obou případech zásah do stávající situace mimořádnými prostředky. Návrh nového doporučení ICRP chce tyto typy expozic odlišit na expozice havarijní a potenciální.

Zatím co pro radiační ochranu při *činnostech* platí plně uvedené principy zdůvodnění, optimalizace ochrany a dodržení limitů individuálních dávek (s výjimkou oblasti lékařského ozáření), řídí se *zásahy* principem zdůvodnění a optimalizace, tzn. požadavkem, aby snížení újmy způsobené ozářením v důsledku provedení zásahu převýšilo škody a náklady se zásahem spojené, včetně nákladů sociálních, a aby přínos zásahu byl co nejvyšší. Žádné obecné limity se na zásahové situace nevztahují; jsou však mezinárodně stanovená kritéria – zásahové úrovně/akční úrovně, při jejichž překročení se daný zásah považuje za zdůvodněný a příp. i optimalizovaný.

Opatření k omezení ozáření osob, ať již při činnostech nebo v rámci zásahů, lze uplatnit v kterémkoliv článku expozičního řetězce, u zdroje, v cestách expozice i u exponovaných osob. Opatření u zdroje jsou nejméně rušivá, nejvíce efektivní a je jim jistě vhodné dávat přednost, ovšem pokud je lze vůbec uplatnit. Opatření v prostředí více obtěžují a při ochraně obyvatel mají negativní sociální dopady, jejich účinnost je omezena tím, že se mohou týkat jen některých expozičních cest a omezené skupiny jedinců z obyvatelstva.

I když principy radiační ochrany jsou obecné, je stupeň regulovatelnosti různých druhů ozáření a zásahů rozdílný a může ovlivnit vhodnost použití různých prostředků regulace. Je účelné obecně rozlišit tři druhy ozáření [Klener 2000]:

- *ozáření při práci*, zahrnující zásadně všechna ozáření, k nimž došlo při práci a zásadně jako důsledek práce,
- *ozáření lékařské*, jež je především ozářením osob jako součástí vyšetřovacích a léčebných postupů na nich prováděných; je sem zařazováno i ozáření dobrovolníků – neprofesionálů

při pomoci při vyšetřeních, ozáření návštěvníků pacientů a ozáření při lékařských výzkumech,

- *ozáření obyvatel (obecné)*, kam spadají veškerá ostatní ozáření, tedy ozáření z radioaktivních látek, uváděných záměrně do prostředí z jaderných a jiných zařízení u nás i v zahraničí, ze zdrojů zevního ozáření při pobytu v jejich blízkosti (v čekárně nemocnice, na ulici), při užití zdrojů ionizujícího záření v rámci obecné výuky ve škole, a i z radioaktivních látek v prostředí z pokusů jaderných zbraní (jejich provozovatelé uvádějí, že jde o testy výrobku v rámci výroby zbraní, zajišťované podle principů radiační ochrany).

Na ozáření obyvatel z přírodních zdrojů, jež se dříve uvádělo jako samostatný druh ozáření, se nyní nahlíží jako na ozáření trvalé, dle BSS [IAEA 1996] *chronické*, jehož ovlivnění, pokud je v některých případech zdůvodněné očekávatelným čistým přínosem, má charakter zásahu. Na ozáření z přírodních zdrojů při práci se sice v duchu zásad Mezinárodní organizace práce nahlíží obecně jako na expozici při práci, ale požadavky radiační ochrany se na toto ozáření uplatňují, jen je-li přímou součástí práce (na př. při podzemní těžbě surovin) nebo, je-li usměrnění tohoto ozáření v kompetenci provozovatelů činností a překračuje li určité hodnoty (jde převážně o přítomnost radonu a produktů jeho přeměny v ovzduší pracovišť, zásahová úroveň uvedená v našich předpisech je 1000 Bq EOAR ).

Při činnostech i zásazích je často prakticky jisté, že k ozáření dojde, jeho výši lze předpovědět, i když s určitou mírou nejistoty. Vedle těchto „normálních“ ozáření se však v rámci činností i zásahů vyskytují operace, zahrnující zdroje ionizující záření a spojené s možností neočekávaného ozáření v důsledku nehody nebo selhání přístrojů či lidí, tedy s *ozářením potenciálním*. U řady zdrojů jsou právě nehody a selhání jedinou příčinou významnějších dávek. Jelikož lze dosáhnout určitého stupně kontroly i nad pravděpodobností a velikostí těchto ozáření, nabývají přístupy ochrany před zářením v takových případech charakter zajištění bezpečnosti zdrojů a bezpečného zacházení s nimi. Ochrana před zářením se tak sblíží s obory technické a jaderné bezpečnosti a aspekty zábrany potenciálnímu ozáření vešly do současných formulací principů ochrany před zářením a bezpečnosti zdrojů, natolik, že se jeví na místě mluvit o *systému ochrany před zářením a bezpečnosti zdrojů záření* [IAEA 1996].

Při posuzování, zda navrhovaná činnost je *zdůvodněna*, tj. přináší dostatečný čistý přínos, vstupují do analýzy veškeré přínosy i ztráty a náklady, nikoliv pouze ty, jež jsou poskytovány nebo způsobovány některým skupinám osob. Jde o přínosy a ztráty, z nichž některé lze vyčíslit, některé však jen velmi obtížně, pokud vůbec, jako je tomu v případě přínosu k uspokojování tužeb a estetických potřeb, nebo škod vyvolaných strachem či omezením prožitků. Rozhodování o nových činnostech, např. o využití nových zdrojů energie, je zpravidla velmi komplexní, zahrnuje uvážení mnoha hledisek hospodářských, politických, ekologických, vojenských, národnostních a pod. Je patrné, že jde většinou o celostátně významná a ne příliš častá rozhodnutí. Hledisko ochrany před zářením je zde jedním z mnoha uvažovaných, je však třeba zajistit, aby bylo kvalifikovaně uplatněno a řádně zohledněno, zejména v posuzování alternativ, jež je často prvou, přípravnou fází rozhodování.

Zásadně stejný postup platí i v rozhodování o zavedení předmětů spotřeby představujících zdroje ozáření, jako jsou na př. hodinky s radioaktivní hmotou na číselnících, hlásiče požáru na ionizačním principu apod., kde je ingerence orgánů radiační ochrany přímější. Mezinárodně již bylo dohodnuto, že zavádění radionuklidů do potravin, hraček a kosmetiky

jakož i užití jich k frivolním účelům (např. zdobení bižuterie), se pokládá za nezdůvodněné [EU 1996].

K dennímu rozhodování o zdůvodněnosti ozáření dochází ve zdravotnictví při indikaci vyšetření nebo léčení s pomocí zdrojů ozáření pacienta. Platí pro ně stejné požadavky jako na zdůvodnění jiných činností, ovšem s tím, že pro lékařská ozáření pacientů neplatí dávkové limity (ty platí jen na ozáření návštěvníků u nemocných s aplikovanými zářiči nebo pomocníků z řad neprofesionálů při lékařských úkonech). Vyšetření indikovaná klinickým stavem pacienta jsou obvykle odůvodněná, i když některé dříve obvyklé, „automatické“, indikace byly odbornými kruhy shledány nadále nezdůvodněnými. Skupinová vyšetření vyžadují pečlivého zhodnocení s hlediska přínosu vyšetřovaným nebo případně širším populačním celkům a řada dříve prováděných masových a skupinových akcí byla opuštěna.

Za nezdůvodněná jsou považována radiologická vyšetření pro detekci krádeže, pro právní a pojišťovací účely, pro účely zaměstnávání a pro výzkum, pokud nejsou prováděna v souladu s Helsinskou deklarací. Proces zdůvodňování se uplatní nejen při rozhodování o nové činnosti, ale též při sledování stávajících činností a jejich revisí na základě nových informací o jejich efektivitě nebo důsledcích.

Jaké ozáření lidí, ať již personálu nebo obyvatel, způsobí určitá činnost, je výsledkem jednak volby technologických postupů a ochranných opatření při projekci a výstavbě, jednak důsledkem každodenní realizace činnosti v konkrétním uspořádání procesu užití zdrojů. Cílem radiační ochrany v obou případech je zajistit, aby velikost individuálních dávek, počet ozářených osob a pravděpodobnost ozáření tam, kde není prakticky jisté, že k němu dojde, byly tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout při respektování hospodářských a sociálních hledisek (princip optimalizace radiační ochrany je ztotožňován s tzv. *principem ALARA* („as low as reasonably achievable“).

Dopad snižování dávek ozáření nelze vždy přesně vymezit a jen zčásti lze vyčíslit náklady na tento proces. *Optimalizace* radiační ochrany je prováděna zejména na základě odborného odhadu a zkušeností bez použití přesných kvantitativních metod, opírá se o rozbor výsledků monitorování ve vztahu k prováděným operacím se zdroji záření. V rámci projekce a výstavby má radiační ochrany výraznější technické (na př. stavební uspořádání provozu, stínění, ventilace, záchyt radioaktivních látek z medií) i organizační prostředky realizace. Přínos těchto opatření ke snížení dávek lze často dosti přesně předpovědět a náklady na výstavbu a další provoz jsou známé nebo odhadnutelné. Proto se v optimalizaci ochrany ve fázi projekce klade důraz na kvantitativní metody ochrany a optimalizace radiační ochrany využívá postupy inženýrské optimalizace, jež byly vyvinuty v jiných odvětvích průmyslového konání.

Cílem optimalizace je nalézt stupeň ochrany (charakterizovaný určitou hodnotou kolektivní dávky), při němž další vynakládání prostředků již není kompenzováno rovnocennou úsporou újmy (úměrné určité kolektivní dávce). Přímou kvantitativní metodou nalezení tohoto optima je diferenciální analýza nákladů a přínosu. V základní rovnici výroby

$$B = V - (P + X + Y)$$

kde B je čistý zisk, přínos, V - hrubý přínos, P - náklady výroby či činnosti, X - vyčleněné náklady na ochranu, Y - újma spojená s činností, jsou k maximalizaci přínosu analyzovány veličiny X a Y ve vztahu k nezávislé proměnné S - kolektivní dávce z činnosti, což lze vyjádřit vztahem

$$\frac{dV}{dS} - \left( \frac{dP}{dS} + \frac{dX}{dS} + \frac{dY}{dS} \right) = 0.$$

V analýze se přímo srovnávají přírůstky nákladů na ochranu a újmy, což vyžaduje vyjádření obou položek ve srovnatelných veličinách. Peněžní vyjádření újmy předpokládá stanovení peněžního ekvivalentu jednotky kolektivní efektivní dávky a souvisí s nezbytností vážít, jaké prostředky pro radiační ochrany a na jakém místě lze vynaložit, což vyžaduje existenci obecné míry účinnosti vynaložených prostředků. Hodnocení ceny újmy však může být velmi kontroverzní a zahrnuje implicitní i explicitní ocenění *ztráty zdraví a lidského života* a někdy i jiných než zdravotních škod. Hodnotí však statisticky průměrné zdravotní škody, nikoliv poškození nebo smrt konkrétní osoby. Relativní hodnocení zdraví a života je nadto procesem objektivním, jakékoli rozhodnutí o vynaložení nebo nevynaložení prostředků na radiační ochrany je současně rozhodnutím o ceně zdravotní újmy nebo její úspory a je správné, aby bylo společností usměrňováno.

Pokud jde o omezování ozáření osob - *limity ozáření* jsou považovány nikoli za hodnoty zaručující přijatelnost, ale za hranici mezi oblastí dávek zcela nepřijatelných a oblastí, kde je nutno určit skutečnou přijatelnost ozáření optimalizací ochrany před zářením. Limity jsou jakousi „obálkou“ pro sumu optimalizačních mezí, směrných hodnot.

Vyhláška č. 307/2002 Sb. v platném znění rozlišuje několik druhů základních limitů jako závazných kvantitativních ukazatelů, jejichž překročení není podle atomového zákona přípustné, a dále odvozené limity, omezující stejné případy ozáření jako základní limity pro pracovníky, ale vyjádřené ve snáze měřitelných veličinách. Základní limity pro pracovníky se zdroji se považují za nepřekročené i tehdy, nejsou-li překročeny stanovené odvozené limity – ovšem překročení odvozeného limitu ještě neznamená nutně překročení limitu základního, protože oba byly spojeny konzervativním modelem. Při více cestách ozáření (např. zevní ozáření, vnitřní ozáření z požití radionuklidů, vnitřní ozáření z vdechnutí radionuklidů) se nepřekročení základních limitů pro pracovníky se zdroji považuje za splněné, pokud součet podílů ozáření z jednotlivé cesty ozáření a příslušných odvozených limitů je menší než jedna.

Rozlišují se *základní limity pro pracovníky se zdroji*, vztahující se na ozáření, kterému jsou vystaveni v přímém vztahu k vykonávané práci pracovníci kategorie A nebo B (viz dále), *základní limity pro učně a studenty*, vztahující se na ozáření, kterému jsou vědomě, dobrovolně a po poučení o rizicích s tím spojených vystaveny osoby po dobu jejich specializované přípravy na výkon povolání se zdroji ionizujícího záření a *základní limity obecné*, vztahující se na ozáření ze všech činností vedoucích k ozáření, kromě ozáření výše uvedených, lékařského ozáření, ozáření osob podílejících se na zásazích v případě radiační nehody a případů ozáření, na které se vztahují limity zvláštní (viz dále). Tyto obecné limity se uplatňují na průměrné ozáření v kritické skupině obyvatel (viz dále) pro všechny cesty ozáření a ze všech činností.

Do čerpání limitů ozáření se na pracovištích se zdroji ionizujícího záření nezapočítává ozáření z přírodních zdrojů, kromě ozáření z těch přírodních zdrojů, které jsou vědomě a záměrně využívány (např. těžba a úprava radioaktivních surovin), a kromě případů, kdy ani po provedení nápravných opatření nebylo možné objemovou aktivitu radonu v ovzduší snížit v době výkonu práce pod hodnotu 1000 Bq/m<sup>3</sup>. Limity ozáření se nevztahují na ozáření osob podílejících se na zásazích v případě radiační nehody, avšak toto ozáření nesmí překročit desetinásobek základních limitů pro pracovníky se zdroji, pokud nejde o případ záchranu

lidských životů, či zabránění rozvoje radiační nehody s možnými rozsáhlými společenskými a hospodářskými důsledky.

Základní limity se vztahují na součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků této dávky z radioaktivních látek ( $\Sigma E + \Sigma E_{50}$ ) přijatých do organismu za stejné období (tímto způsobem se vykládá pojem „úvazek vnitřního ozáření“, použitý ve vyhlášce) popř. na ekvivalentní dávky v určitém orgánu či tkáni ( $H_T$ ). Hodnoty platných základních limitů jsou uvedeny v tabulce .

*Zvláštní limity* jsou stanoveny pro ozáření dobrovolníků při péči o pacienty, návštěvníků či spolužijících – 1 mSv u osob do 18 let a 5 mSv u ostatních za dobu vyšetřování nebo léčení pacienta a pro ozáření plodu. U těhotných žen pracujících na pracovištích se zdroji záření se ozáření neprodleně poté, co žena těhotenství zjistí a oznámí zaměstnavateli, omezuje úpravou podmínek práce tak, aby bylo nepravděpodobné, že součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření *plodu*, alespoň po zbývající dobu těhotenství, *překročí 1 mSv*. Původ této hodnoty je limit pro jednotlivce z obyvatelstva, jehož představuje plod vnesený budoucí matkou na pracoviště se zdroji ionizujícího záření. Z uvedeného též vyplývá, že nadále není požadováno vyloučení těhotné ženy z práce se zdroji záření.

Vedle limitů, vedoucích k omezení nebo zastavení ozáření, se v radiační ochraně, zejména pro hodnocení výsledků monitorování, používají i hodnoty, představující kritérium k určité aktivitě – tzv. *referenční úrovně*. Rozlišujeme úrovně *záznamové* - určující od jaké hodnoty dávky (zpravidla 1/10 ročního limitu) nebo jí odpovídající měřené veličiny, se mají výsledky monitorování zaznamenávat; *úrovně vyšetřovací* - indikující vyšetření buď v důsledku překročení úrovně, tedy především dávek obdržených osobami - tyto hodnoty bývají zpravidla vázány na 3/10 dávkového limitu, nebo příčin tohoto překročení, hodnota úrovně zde bývá vázána na indikaci změn proti obvykle očekávané situaci; *úrovně zásahové*, jejíž dosažení je pokynem k provedení mimořádného opatření – zásahu.

Požadavky systému radiační ochrany nejsou (a nemohou být) uplatňovány na ozáření, jejichž regulace leží mimo lidské možnosti. Takovým je na př. ozáření z  $^{40}\text{K}$  v lidském organismu. Za prakticky neovlivnitelné je považováno ozáření kosmickým zářením při pobytu na zemi; přesuny do různých nadmořských výšek jako metoda regulace ozáření prakticky nepřicházejí v úvahu. Ovšem vedle těchto ozáření, vylučujících se svou povahou ze systému radiační ochrany, existují i činnosti vedoucí k ozáření a zdroje záření, jež nestojí za to, aby byly regulovány. Patří sem stanovení hranice, nad kterou obsah radionuklidů v látce činí tuto zářičem hodným pozornosti, vymezení činností, způsobujících při normálním průběhu jen velmi malé dávky a tedy neúčelných k uplatňování požadavků ochrany. Dále sem patří přeprava nízko kontaminovaných materiálů, problém „NORM“ (naturally occurring radioactive materiále - jde především o přístup k hodnocení koncentrace radionuklidů přírodního původu v řadě neradiačních technologií) i zásady „uvolňování“ radioaktivních látek do prostředí bez další kontroly a jakékoli regulace.

K udělení výjimky pro zdroj nebo situaci v prostředí jsou tak dva důvody - buď zdroj způsobí velmi malé individuální dávky a malé kolektivní dávky za normálních a nehodových podmínek, nebo žádným rozumným regulačním opatřením nemůže být dosaženo významného snížení uvedených dávek. Pro poskytnutí výjimek z požadavků systému radiační ochrany jsou obecnými kritérii:

- individuální radiační rizika z činnosti nebo zdroje, jež jsou vyjímány, musí být dostatečně nízké, aby nebylo třeba je usměrňovat; za očekávanou efektivní dávku se zanedbatelným rizikem pro jednotlivce z obyvatelstva se pokládá hodnota „desítky  $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ “,
- kolektivní dávka z činnosti nebo zdroje, jež jsou vyjímány, musí být dostatečně nízká, aby neodůvodňovala usměrňování a kontrolu, za takovou v důsledku jednoho roku činnosti se pokládá hodnota cca 1  $\text{mSv}$ ,
- činnosti nebo zdroje, jež jsou vyjímány, musí být inherentně bezpečné bez znatelné pravděpodobnosti, že by mohla být výše uvedená kritéria překročena.

### 3. Infrastruktura systému radiační ochrany

Za prosazení požadavků radiační ochrany a bezpečnosti zdrojů v rámci státu nesou odpovědnost vlády a obvykle je realizují prostřednictvím systému, v němž prvořadou roli hraje kompetentní odborná organizace radiační ochrany. Odpovídají i za plánování a provedení akcí v rozdílných zásahových situacích. Obvykle zajišťují též určité podstatné služby ochrany a bezpečnosti, jež jsou mimo schopnosti právnických osob schválených pro činnosti nebo tyto služby doplňují. Je tedy třeba, aby existovala *národní infrastruktura*, jež by usnadňovala vládě realizovat její odpovědnost za ochranu před zářením a bezpečnost zdrojů. Jejimi podstatnými součástmi jsou - právní předpisy, orgán radiační ochrany a bezpečnosti zdrojů záření, zmocněný schvalovat a dozírat na činnosti a prosazovat předpisy do praxe; dostatečné zdroje a přiměřený stav vyškoleného personálu. Infrastruktura musí též zajistit cesty a prostředky k řešení společenských potřeb, ležících mimo právní odpovědnost osob autorizovaných k vedení činností - např. státní orgány zabezpečují potřebnou organizaci k detekci jakéhokoli vzrůstu radioaktivních látek v prostředí; musí též zajistit kontrolu zdrojů ozáření, za něž neodpovídá žádná jiná organizace, jako jsou přírodní zdroje a radioaktivní zbytky z minulých činností.

Národní infrastruktura musí též zabezpečit, že bude prováděna výchova a výcvik odborníků v radiační ochrany, jakož i výměna poznatků mezi odborníky. Souvisí s tím odpovědnost za zajištění odpovídajících prostředků k informaci veřejnosti, jejich představitelů a informačních médií o zdravotních a bezpečnostních aspektech situací zahrnujících ozáření a o regulačních opatřeních. Jejím úkolem je též zabezpečit další podstatné prostředky a služby, ležící mimo možnosti provozovatelů činností, jako prostředky pro zásahy, osobní dosimetrii, kalibraci a porovnávání měřících zařízení. Služby mohou zahrnovat centrální evidenci záznamů o expozici při práci a informace o spolehlivosti vybavení. Poskytování těchto služeb na národní úrovni však nesnižuje konečnou odpovědnost provozovatelů činností.

Plné a správné zajištění radiační ochrany vyžaduje, aby *regulující orgán* radiační ochrany ustavený vládou reguloval zavádění a provádění jakékoli činnosti zahrnující zdroje záření. Takový orgán. musí být vybaven dostatečnou pravomocí a zdroji k účinnému usměřování a být nezávislý na vládním útvaru či agentuře, jež jsou odpovědné za podporu činností, jež mají být usměřovány. Musí být rovněž nezávislý na autorizovaných provozovatelích činností, projektantech a konstruktérech zdrojů záření. Vedle schvalování veškerých činností a dozírání na ně, zabezpečuje tento orgán přímo řadu citovaných funkcí národní infrastruktury a podílí se na usměřování realizace ostatních. V ČR roli regulujícího orgánu plní státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB).

Závažnost důsledků ozáření a rozsah možného ohrožení při nedostatečné radiační ochrany vyžadují, aby přiměřená ochrana a bezpečnost byly zajištěny od počátku jakékoliv činnosti. To předpokládá především možnost nezávislého posouzení přijatelnosti zamýšlené činnosti před jejím zahájením i nezávislé kontroly v jejím průběhu a ukončování. Základní administrativní náležitostí je tedy uplatnění *systému registrace a schvalování činností*, ať již se jedná o výrobu zdrojů a užití záření a radioaktivních látek, jadernou výrobu energie, včetně jaderného palivového cyklu nebo činnosti vymezené orgánem radiační ochrany např. spojené s ozářením z přírodních zdrojů, vyžadujícím usměřování. Atomový zákon nepřipouští užívání zdrojů záření, a u radioaktivních látek (od určitých hodnot) ani jejich odběr, bez

příslušného povolení SÚJB, jež může být uděleno, jen jsou li zabezpečeny požadavky  
radiální ochrany



#### 4. Usměrnování ozáření při činnostech

Činnosti spojené s ozářením představují v podstatě usměrnovaný pohyb lidí v poli záření. Dávka pracovníkům může být v zásadě v procesu povolování dané činnosti předvídána a vymezována a na základě toho může účinnost radiační ochrany hodnocena a upravována. Provozní řád a monitorovací plány (viz. kap. 4.2.) pracoviště, požadované předpisy radiační ochrany, představují jednu z forem zajištění (a dokumentace) potřebné ochrany. Podrobnosti jejich propracování se liší, jako se liší technologie užití zdrojů nebo prací v poli záření. Jen některé druhy prací přitom vyžadují průběžnou regulaci úkonů podle dosud kumulované dávky, jde o práce, jež zpravidla čerpají nejvíce z limitu dávky, a vyžadují tedy podrobnou analýzu a optimalizaci ochrany. U větší části prací je hodnocení dostatečnosti ochrany prováděno ve větších časových odstupech.

Rozlišení v ochranných opatřeních je na místě u různých pracovníků s přímým vztahem ke zdrojům, již proto, že vyžadovat náročnější ochranu, než je přiměřené riziku, vede k oslabení skutečně potřebné ochrany. Požadavek regulované/zvýšené ochrany lze většinou vymezit prostorově, a proto se zavádějí tzv. *kontrolovaná pásma*, jako oblasti, kde jsou nebo mohou být vyžadována zvláštní ochranná a bezpečnostní opatření (jako zvláštní vybavení a pracovní postupy, hodnocení ozáření jednotlivých pracovníků, regulace přístupu osob a kontrola kontaminace osob a předmětů) k usměrnění normálního ozáření nebo zábrany šíření se radioaktivní kontaminace za normálních pracovních podmínek či k zábrany potenciálního ozáření nebo jeho omezení. Vymezení pracovníků kontrolovaného pásma posloužilo i k vymezení osob pro zvláštní zdravotní sledování. K rozhranění bylo použito kritérium možnosti překročení 3/10 ročního dávkového limitu. Zavedení regulace i do oblasti pracovišť se zvýšeným ozářením z přírodních zdrojů vyvolalo potřebu odlišit tato pracoviště od těch, kde se „nákládá“ se ZIZ, ale kde není třeba vytvářet kontrolovaná pásma – v těchto prostorách se vytyčují tzv. *sledovaná pásma*, jejich hranici zpravidla tvoří prostor, ozáření osob může překročit 1/10 dávkového limitu.

Na rozdíl od pracovníků se ZIZ nemůže být pohyb obyvatel a jejich kontakt s prostředím, ve kterém se mohou nacházet radioaktivní látky uvolněné ze zdroje, nebo s polem zevního záření ze zdroje, provozovatelem zdroje prakticky usměrnován. Veškerá a dostatečná opatření k ochraně obyvatel proto musí být provedena u zdroje samého, omezením výпустí radioaktivních látek do prostředí a záření vycházejícího ze zdroje. Odhad dávek, které provoz zdroje, jakož i nehody, způsobí nebo mohou způsobit, se provádí pomocí modelů šíření radioaktivních látek v prostředí, scénářů kontaktu obyvatel s prostředím a dat o vztahu příjmu radioaktivních látek nebo zevního ozáření s dávkami u obyvatel. Modely musí respektovat místně konkrétní situace v uvedených vztazích, opírají se tedy zpravidla o zvláštní předprovozní studie. Není reálně možné zjišťovat dávky u všech obyvatel a proto se dávkové limity, resp. optimalizační meze, vztahují na průměrnou dávku v tzv. *kritické skupině obyvatel*, reprezentující obyvatele nejvíce ozářené z daného zdroje určitou expoziční cestou. Tento přístup respektuje skutečnost nehomogenní distribuce dávek mezi obyvateli, danou nerovnoměrným rozptýlením radioaktivních látek ze zdroje v prostředí, rozdíly v kontaktu s prostředím mezi obyvateli a rozdíly ve vlastnostech a charakteristikách obyvatel v závislosti na věku, pohlaví, apod. Obecně je ovšem nutno zohlednit všechny dávkové příspěvky ze zdroje, a tedy všechny expoziční cesty a radionuklidy.

Pracoviště, kde mají být vykonávány radiační činnosti, se navrhuje, staví a uvádí do provozu způsobem, který umožní bezpečné nakládání se zdroji ionizujícího záření při provozu a který

zabezpečí dostatečnou radiační ochranu osob na pracovišti i osob pobývajících v jeho okolí. ZIZ na těchto pracovištích se nesmí používat, dokud neprošel úspěšně přijímací zkouškou nebo zkouškou dlouhodobé stability a pokud od poslední úspěšné zkoušky dlouhodobé stability uplynula delší lhůta, než je stanovena pro její periodické provádění, nebo nastaly jiné důvody k provedení této zkoušky (uzavřený radionuklidový zářič musí být doprovázen osvědčením prokazujícím jeho vlastnosti, např. těsnost) a může fyzicky převzít jen ten, kdo na základě povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle atomového zákona.

Pracoviště, kde se ukončily radiační činnosti, se může vyřadit až po odstranění všech zdrojů ionizujícího záření nebo po jejich zabezpečení proti neoprávněnému použití a po očištění pracoviště od radionuklidů provedené takovým způsobem a v takovém rozsahu, že nikde na pracovišti nejsou překročeny uvolňovací úrovně uvedené ve vyhlášce 307/2002 Sb. v platném znění.

Aplikace různých typů zdrojů mají specifické legislativní, technické a organizační požadavky z hlediska regulace ozáření.

Pokud jde o *průmyslové aplikace ZIZ*, využívá se jak generátorů záření produkujících rentgenové záření, elektronové nebo neutronové svazky, tak záření gama, beta, alfa i jím produkované neutrony vznikající při rozpadech radionuklidů.

Mezi nejužívanější průmyslové aplikace patří:

- nedestruktivní testování materiálu využívající převážně rentgenové a gama záření (defektoskopie),
- měřidla a indikátory (gauging devices) jako jsou vlhkoměry, hustoměry, hladinoměry, tloušťkoměry či jiné analyzátory, využívající hlavně záření gama a beta a neutronů,
- karotážní práce ve vrtech pro geologické účely, využívající záření gama, alfa a neutronové záření,
- analyzátory pro zkoumání složení materiálu, jeho krystalické struktury, pomocí rentgenového nebo gama záření,
- rentgenová fluorescence a její spektrální analýza a metody aktivační, používá se rentgenové záření, gama a neutrony,
- průmyslové ozařovače využívají nejčastěji gama záření resp. elektronové svazky,
- iontové generátory, mezi které patří ionizační hlásiče požáru, eliminátory statické elektřiny, chromatografy využívající hlavně alfa záření, méně často i záření beta a rentgenové.

Průmyslové zdroje se podle vyhlášky 307/202 Sb. v platném znění většinou zařazují do kategorií - jednoduché zdroje (většina měřidel), významné zdroje (defektoskopy a ozařovače) a velmi významné zdroje (průmyslové ozařovače). Podle kategorie, do které zdroj patří, jsou vyžadovány specifické postupy pro povolování SÚJB. Pro zdroje jednoduché je potřeba povolení k používání, pro významné zdroje navíc povolení k provozu pracoviště, pro velmi významné zdroje pak ještě povolení k umístění, výstavbě a k jednotlivým etapám uvádění do provozu. Pro všechny uvedené kategorie zdrojů je třeba povolení k přepravě, pokud jsou překročeny limity dané normativy ČR a povolení k provádění zkoušek přijímacích a dlouhodobé stability. Pokud se radionuklidové zářiče nepoužívají a nejedná se o zářiče, které jsou tvořeny technologickými celky nebo medii pracoviště, umísťují se v ochranných stínících krytech nebo kontejnerech, stíněných skladovacích prostorách.

Zvláštní kategorii tvoří pracoviště s *otevřenými radionuklidovými zářiči*. Maximální aktivita otevřených radionuklidových zářičů, které mohou být současně zpracovávány na jednotlivých

pracovních místech pracovišť s otevřenými zářiči I., II. nebo III. kategorie, kategorizovanými na základě vybavení pracoviště a pracovních míst, se stanoví na základě kritérií zohledňujících ve vzájemné návaznosti typ aplikace (viz. dále nukleární medicína), vybavení pracovních míst a celého pracoviště ventilačními, izolačními a stínicími zařízeními, provedení kanalizace, fyzikální charakteristiky materiálů, které mají být zpracovávány, zejména těkavost a prašnost, náročnost a potenciální rizikovitost očekávaných pracovních operací.

Na pracovištích s otevřenými radionuklidovými zářiči III. kategorie a II. kategorie, pokud není v podmínkách povolení stanoveno jinak, musí být zřízen samostatný kanalizační rozvod pro vypouštění radioaktivních odpadových vod z pracoviště a napojen na samostatnou zachytnou nádrž .

Specifické požadavky jsou kladeny na ZIZ používané v medicíně a rovněž na jaderná zařízení

#### 4.1. Usměrnění lékařského ozáření

Požadavky na ochranu zdraví pacientů před ionizujícím zářením při lékařských ozářeních jsou součástí jednak obecných ustanovení zákona č. 18/1997 Sb. v platném znění – atomový zákon, jednak podrobnosti uvádí vyhláška 307/2002 Sb. v platném znění. Je stanoveno, že lékařské ozáření může provádět *pouze držitel povolení* k nakládání se zdroji ionizujícího záření, a to pouze se *zdroji typově schválenými* SÚJB, popřípadě s použitím radiofarmak, registrovaných podle ustanovení zákona č. 79/1997 Sb., o léčivech, po kladném vyjádření SÚJB. Lékařské ozáření *nepodléhá limitům*. Důležitá je ale povinnost respektovat při lékařských ozářeních dva ze základních principů radiační ochrany – *princip zdůvodnění* a *princip optimalizace*.

Diagnostické nebo terapeutické aplikace zdrojů ionizujícího záření je odpovědností indikujícího lékaře i lékaře provádějícího úkon vedoucí k ozáření. Indikující lékař musí být kvalifikován, aby posoudil jak očekávatelný přínos, tak i újmu z ozáření s úkonem spojenou, s uvážením alternativních technik a postupů. Vyhláška 307/2002 Sb. v platném znění vymezuje, kteří zdravotničtí pracovníci mohou nést odpovědnost za toto ozáření. Klinicky správně indikované vyšetření je pokládáno za zdůvodněné ve smyslu principů radiační ochrany.

Optimalizace ochrany před zářením je uplatňována při projekci přístrojů, zařízení i pracovišť a při provozu volbou ověřených metod a důsledným zajištěním a kontrolou jakosti, jež je vyhláškou blíže specifikována. U vyšetření je cílem „dosažení nejnižší expozice nezbytné k diagnostickému záměru, s uvážením standardu přijatelné kvality zobrazení, stanoveného profesionálním tělesem a příslušných vodítek lékařské expozice“ [IAEA 1991]. *Směrné hodnoty* pro lékařská ozáření, stanovené ve vyhlášce 307/2002 Sb. v platném znění, se opírají o tzv. dobrou (s hlediska zdravotního účelu i radiační ochrany) a ověřenou praxi u typického pacienta a jsou vydávány v dohodě s odbornými lékařskými společnostmi; směrné hodnoty jsou nově zavedeným institutem, který má přispět k usměrnění lékařské expozice. Nemají charakter závazných ukazatelů a jsou metodou prvního přiblížení k posouzení optimalizace. Jejich překračování je podnětem k přešetření příčin nepřiměřeně vysoké zátěže pacientů a k nápravným opatřením týkajícím se zpravidla techniky vyšetření. Vyhovění požadavkům směrných hodnot nemá přitom vyloučit další úsilí o nalezení optimalizovaných hodnot, které mohou být na konkrétním pracovišti ještě nižší než vyhlášené směrné hodnoty.

Požadavky na ochranu pacientů směřují v konečném důsledku ke snižování kolektivní dávky obyvatelstvu z tohoto zdroje. Tuto kolektivní dávku obyvatelstvu lze samozřejmě snižovat volbou vhodných technických parametrů vyšetření, tj. snižováním individuálních dávek při vyšetření jednotlivého pacienta. Cestou ke snížení populační zátěže je však i omezení počtu prováděných vyšetření, tedy *usměrňování indikací* k vyšetřením důsledným uplatňováním principu zdůvodnění vyšetření.

Významným krokem ke snižování dávky při používání lékařských zdrojů v *diagnostice* byly aktivity Světové zdravotnické organizace zaměřené na tvorbu programů zajišťování kvality lékařských ozáření [WHO 1982]. Cílem je zlepšení kvality zobrazení a tím zvýšení obsahu diagnostické informace, snížení radiační zátěže pacientů a zdravotnického personálu a snížení nákladů na radiodiagnostická vyšetření. Součástí tohoto programu jsou i specifické požadavky na výše uvedené zkoušky zajišťující, že daný zdroj vyhovuje požadavkům stanoveným pro použití tohoto zdroje k lékařskému ozáření:

*Typové zkoušky* jsou povinné u každého zařízení (nejen určeného k lékařským aplikacím), které chce výrobce uvést na trh. Jejich cílem je ověřit, že vlastnosti zařízení odpovídají těm, které výrobce uvádí v technické dokumentaci, a že jsou ve shodě s platnými mezinárodně uznávanými normami. Typové zkoušky provádějí autorizované zkušebny. Předmětem těchto zkoušek je široké spektrum požadavků, včetně mechanické, elektrické a radiační bezpečnosti.

*Přejímací zkouška* se provádí po instalaci nového zařízení nebo po jeho modifikaci - cílem je ověřit, že nové zařízení je v souladu s příslušnými ustanoveními technických norem, s vlastnostmi zařízení uvedenými v technické dokumentaci výrobce a ověřenými při typovém schvalování a s dalšími požadavky stanovenými v kupní smlouvě mezi dodavatelem a odběratelem. Přejímací zkoušku může provádět jen oprávněná osoba, která by neměla být v žádném vztahu k dodavateli zařízení. Pokud přejímací zkoušku provádí pracovník dodavatele, měl by si budoucí uživatel určit nezávislého a kvalifikovaného odborníka k analýze výsledků zkoušky. Rozsah přejímací zkoušky se liší podle náročnosti zařízení a účelu, ke kterému je zařízení určeno. Povolené tolerance pro měřené parametry musí vzít v úvahu jejich dosažitelnost nejen u nových přístrojů, ale také u staršího vybavení. Velmi důležitá je řádná dokumentace všech výsledků přejímací zkoušky - jednak poskytuje objektivní zhodnocení, že je zařízení předáváno uživateli plně funkční a má optimální výkonnost, jednak také výsledky této zkoušky tvoří základní standard pro porovnávání výsledků všech dalších zkoušek během provozu zařízení.

*Zkouška dlouhodobé stability* se provádí po přejímací zkoušce; má za cíl ověřit funkčnost zařízení. Aby se prokázala dlouhodobá spolehlivost a standardní výkonnost zařízení, opakuje se tato zkouška v pravidelných, i když delších časových intervalech, nejpozději jednou za rok. Provádí se také při podezření na chybnou funkci některé z komponent zařízení a po každé opravě či kalibraci zařízení. Zkoušky dlouhodobé stability, stejně jako přejímací zkoušky, mají *charakter absolutních měření*. Může je proto provádět pouze oprávněná, vysoce kvalifikovaná osoba.

Je třeba zdůraznit, že příznivé výsledky přejímací zkoušky nebo zkoušky dlouhodobé stability ještě nezaručují bezchybný chod rentgenového pracoviště a úroveň jeho diagnostických výkonů, stejně jako nízkou radiační zátěž pacientů. Vedle kontroly zdroje je nezbytnou podmínkou pro dosažení zdůvodněné a optimalizované expozice dodržování správnosti postupů v celém procesu, tzn. např. u rtg diagnostiky, správné zpracování a vyhodnocení

ozářeného filmu. Vestou k dosažení úspěchu v celém procesu je vypracování a schválení *standardních postupů* jednotlivých lékařských aplikací ZIZ.

Pro zajištění kvality a standardnosti zobrazení během každodenního provozu lékařského ZIZ mají velký význam *zkoušky provozní stálosti*. Týkají se již nejen vlastního zdroje, ale i dalších částí procesu (např., v případě rtg. diagnostiky - zobrazovacího řetězce, receptoru obrazu - kazet a zesilujících fólií, vyvolávacího procesu, podmínek čtení filmů). Zkoušky provozní stálosti mají *charakter relativních měření*. Používají jednoduchých a snadných, časově nenáročných postupů. Provádějí se rutinně v relativně krátkých časových intervalech, a také kdykoliv dojde během denní služby k podezření na špatnou funkci některého z článků zobrazovacího řetězce. Tyto zkoušky obvykle provádí pověřený pracovník rentgenového oddělení.

Nová rentgenová zařízení musí být vybavena tam, kde je to možné, přidruženým zařízením a příslušenstvím, která poskytnou kvantitativní informaci o ozáření, jemuž je vystavena vyšetřovaná osoba. Skiaskopie bez zesilovače obrazu se nesmí používat. Skiaskopických rentgenových zařízení bez automatické regulace dávkového příkonu je možné použít jen v mimořádných a odůvodněných případech.

Lékařské zdroje určené zejména k terapeutickému použití se zpravidla umísťují do samostatných ozařoven nebo vyšetřoven a obsluhují se z chráněných obsluhoven s výjimkou zařízení, jejichž konstrukce nebo účel použití vylučují překročení limitů ozáření (podle typu zdroje se instalují pevné nebo posuvné ochranné zástěny).

Nová terapeutická radiologická zařízení se nesmějí používat bez odpovídajícího dozimetrického vybavení pro testování vlastností zdrojů ionizujícího záření a bez simulátoru

*Terapeutické* aplikace ZIZ mají rovněž svá specifika; všechny tyto zdroje (včetně terapeutických rentgenů a simulátorů) jsou zařazeny do kategorie významných zdrojů ionizujícího záření, musí být, kromě výše uvedených požadavků na ZIZ používané v diagnostice (zkoušky, ochrana pacientů a pracovníků), zajištěno bezpečné nakládání s nimi i po ukončení jejich využívání. Proto již při žádosti o povolení k provozu radioterapeutického pracoviště je třeba zpracovat návrh způsobu vyřazení těchto ZIZ z provozu, včetně uvedení finančních nákladů, které budou spojeny s jejich likvidací. V případě radionuklidových zářičů (teleterapeutické ozařovače, brachyterapie) musí být uvedené náklady ověřeny Správou úložišť radioaktivních odpadů. Nemocnice, jako držitel povolení k nakládání s těmito zdroji, je pak povinna rovnoměrně vytvářet finanční rezervu tak, aby byly v potřebném čase k dispozici dostatečné prostředky pro likvidaci radioaktivního odpadu a pro zajištění vyřazování pracoviště s významným zdrojem záření z provozu.

Výměnu zářičů v radionuklidových (teleterapeutických i brachyterapeutických) ozařovačích mohou provádět pouze osoby (právnícké nebo fyzické), které mají povolení SÚJB k tomuto způsobu nakládání – tj. k uvádění zdrojů ionizujícího záření do oběhu. Tyto osoby musí:

- zabezpečit přepravu zářičů v souladu s požadavky stanovenými ve zvláštních předpisech (např. zákon č.111/1994 Sb., o silniční dopravě), i když by (s ohledem na aktivitu zářičů dodávaných na radioterapeutická pracoviště) nemusely mít zvláštní povolení SÚJB pro přepravu ve smyslu zákona č. 18/1997 Sb. v platném znění,
- zajistit likvidaci vyřazených zářičů.

Přestože je pracoviště radioterapie (resp. zdravotnické zařízení, ve kterém se nachází), je při odběru a při používání radionuklidových zářičů považováno za původce *radioaktivních odpadů*, nepovažuje se shromažďování a skladování těchto zářičů, ke kterému dochází při provozu radioterapeutického pracoviště v souladu s vydaným povolením, za nakládání s radioaktivními odpady. To znamená, že zdravotnické zařízení nemusí mít pro tuto činnost zvláštní povolení. Podmínkou však je, že při výměně nebo likvidaci radioaktivních zářičů prokazatelně zajistí předání vyřazených radionuklidových zářičů právnímu subjektu, který povolení pro nakládání s radioaktivními odpady má.

Specifickou oblast lékařských aplikací tvoří práce s otevřenými zářiči na odděleních *nukleární medicíny*, která je spojena jak s rizikem *vnějšího* ozáření, tak i s rizikem vniknutí radioaktivních látek do organismu s následným *vnitřním ozářením*.

Opatření redukující *zevní ozáření* osob z daného zdroje (nejen však v oblasti medicínských aplikací) vychází ze tří základních principů nazývaných ochrana časem, ochrana vzdáleností a ochrana stíněním a jejich vzájemné kombinace. Pro redukci kolektivní expozice existuje další prostředek – snížení počtu ozářených osob. *Ochrana časem* - účinky ozáření jsou úměrné dávce, radiační pole je charakterizováno příkonovými veličinami - násobek redukce času expozice se proto rovná i násobku redukce dávky. Podobně snadno lze dokumentovat i ohodnotit *ochranu vzdáleností* u bodových zdrojů ionizujícího záření, kdy snižování příkonových veličin je přímo úměrné čtverci vzdálenosti, což v praxi představuje velmi účinný nástroj ochrany.

K dostatečnému snížení příkonových veličin v prostorách s předpokládaným pobytem osob je proto nutno používat i třetí postup ochrany, to jest *stínění*. Návrh stínění lze rozdělit do dvou kroků - ocenění (výpočet, měření) hodnoty veličiny radiačního pole bez stínění a stanovení takové hodnoty dané veličiny, která má být stíněním v zájmovém prostoru dosažena. Poměr těchto hodnot - koeficient zeslabení je potom vstup do druhého kroku, jímž je vlastní návrh stínění. Prvý krok je přitom aplikací principů radiační ochrany - uplatňování základních limitů (obecných i pro pracovníky), optimalizace ochrany a omezení expozice pro daný zdroj (předpokládané doby pobytu osob v zájmovém místě, počty a typ osob - obyvatel, pracovník, apod.). Druhý krok se týká transportu záření, samotných výpočtů stínění.

*Vnitřní ozáření* se rozumí situace, kdy je živý organismus ozařován ionizujícím zářením, vysílaném radionuklidy, v něm přítomnými. Může se jednat o vnitřní kontaminaci, vzniklou po příjmu umělých nebo přírodních radionuklidů nebo o přítomnost přírodních radionuklidů v organismu v přírodní izotopické směsi prvku, který je normální součástí organismu, nebo o důsledek lékařské použití radionuklidů.

Radionuklidy se dostávají do organismu několika cestami – *ingescí, inhalací, poraněním přes kůži* (sem lze zařadit i injekční aplikaci při lékařském použití), *absorbci* přes neporaněnou kůži (tritium). Jakmile je radionuklid přítomen v těle, jeho biokinetika je velmi složitá a k jejímu popisu je třeba zavést zjednodušující předpoklady. Kinetika radionuklidu je ovšem vždy určována jeho chemickou vazbou a fyzikálními vlastnostmi kontaminantu (velikostí pevných či aerosolových částic). Pro odhad dávek z vnitřní kontaminace jsou z výše zmíněných možných cest vstupu radionuklidu do organismu nejdůležitější *ingescce* a *inhalace*, a to jak pro obyvatele, tak pro pracovníky.

I když je lidské tělo převážně složeno z kyslíku, uhlíku a vodíku, obsahuje velké množství ostatních prvků [ICRP 1975]). Téměř všechny tyto prvky mají radioaktivní izotopy, které,

když se dostanou do těla, sledují stejné biokinetické cesty jako jejich neradioaktivní izotopy. Některé prvky (např. fosfor, jód, draslík) se podílejí na specifických metabolických procesech, čímž je též řízena jejich distribuce a transport v těle. Radionuklidy dalších prvků se obvykle chovají jako jejich analogy, přítomné v těle ve větším množství. Tak například cesium sleduje draslík a alkalické zeminy stroncium, baryum a radium sledují chování vápníku. Další radionuklidy, jako např. plutonium či americium nemají přírodní analogy a jejich chování v těle je určeno jejich afinitou k buněčným komponentám a transportnímu systému v těle; chování těchto radionuklidů není dosud zcela probádáno.

## 4.2. Jaderné elektrárny

Jaderná elektrárna (JE) je specifické a velmi komplexní zařízení, na kterém z hlediska ochrany zdraví a životů jejich pracovníků a obyvatel v jejím okolí před účinky ionizujícího záření je třeba zajistit nejen všechny dříve uvedené požadavky radiační ochrany, nýbrž i řadu technických, organizačních a dalších požadavků vyplývajících z vlastní technologie JE. Tyto požadavky a jejich zajištění se souhrnně nazývají jadernou bezpečností. Jaderná bezpečnost je chápána jako stav a schopnost JE a osob ji obsluhujících zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo nedovolenému úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezovat následky nehod. Tato definice naznačuje, že potenciální riziko JE spočívá v možnosti ztráty kontroly nad řízením štěpné řetězové reakce a v množství radioaktivních látek nahromaděných v aktivní zóně reaktoru během jeho provozu, zejména v souvislosti s jejich možnou disperzí do životního prostředí v důsledku nedovoleného úniku.

Izolaci radioaktivních látek obsažených v aktivní zóně energetického reaktoru a zamezení jejich úniku do životního prostředí zajišťuje systém *čtyř ochranných technických bariér*, jimiž jsou palivová matrice, pokrytí paliva, primární okruh reaktoru a systém ochranné obálky. Integrita těchto bariér je základním předpokladem bezpečnosti jaderné elektrárny.

Pro komplex technických a organizačních opatření zaměřených na prevenci jejich porušení se v oboru jaderné bezpečnosti vžil mezinárodní název "*defence in depth*", neboli ochrana do hloubky. Ochrana do hloubky je strukturovaná do pěti odstupňovaných úrovní. Dojde-li k selhání jedné úrovně, přechází ochranné funkce na další úroveň. Cílem *první úrovně* ochranných opatření je prevence selhání provozních systémů, tj. prevence výskytu abnormálního provozu. Opatření první úrovně představují široké spektrum zásad, které se uplatňují ve všech fázích realizace jaderného zařízení počínaje výběrem vhodné lokality, konzervativním projektovým řešením s náležitými bezpečnostními rezervami do dosažení mezních stavů, vysokou jakostí výroby, montáže, vlastního provozu, údržby atd.

Dojde-li k selhání *první bariéry* vyvstává přirozená nutnost zajistit potřebnou kontrolu nad vznikem abnormálního provozu, jejíž nedílnou součástí je detekce selhání, jeho korekce a co nejrychlejší návrat systému do podmínek normálního provozu. To je úkolem *druhé úrovně* ochrany do hloubky. Příkladem druhé úrovně ochranných opatření jsou pojišťovací ventily zamezující nepřipustnému převýšení tlaku v primárním a sekundárním okruhu, systém limitování maximálního výkonu reaktoru, systém kontroly teploty primárního chladiva na výstupu z aktivní zóny a všechna ostatní mezní nastavení ochranných systémů.

Ani sebedokonalejší preventivní opatření nesníží pravděpodobnost výskytu závažnějších nehod zcela na nulu. K zvládnutí málo pravděpodobných nehod, jejichž scénář může být

předpokládán, jsou v projektu připravena potřebná technická opatření, aby následky takových stavů byly udrženy v mezích standardní ochrany pracovníků a obyvatelstva. Toto je úkolem *třetí úrovně* ochrany do hloubky. Typickým příkladem takovýchto projektových nehod jsou havárie spojené se ztrátou chladiva, tzv. *LOCA* havárie (Loss of Coolant Accident). Třetí úroveň ochranných opatření má v těchto případech zajistit dostatečné chlazení aktivní zóny, a tím předejít nepřijatelnému přehřátí paliva, ztrátě integrity jeho povlaku a následnému tavení aktivní zóny.

Ochrana do hloubky na *čtvrté úrovni* předpokládá, že za určitých velmi málo pravděpodobných okolností mohou nastat případy, kdy opatření prvních tří úrovní nezabrání poškození aktivní zóny, a klade si proto za cíl zabránit úniku štěpných radioaktivních produktů do životního prostředí. Komponenty primárního okruhu se za tím účelem umísťují do hermetických prostorů ochranné obálky představované u moderních jaderných elektráren *kontejnmentem*. Opatření této úrovně mají současně chránit ochrannou obálku před jejím porušením, neboť ochranná obálka představuje poslední bariéru proti případnému úniku radioaktivních látek do životního prostředí. Ochranná obálka je dimenzována s dostatečnou rezervou tak, aby si zachovala svou integritu i v podmínkách, kdy se veškerá tepelná a tlaková energie primárního chladiva okruhu uvolní do jejího vnitřního prostoru.

Nebudeme zde rozebírat problematiku jaderné bezpečnosti, je předmětem jiných přednášek, zde stručně zmíníme některé specifické aspekty radiační ochrany, zejména požadavky *programů monitorování*. Ochranným opatřením v případě radiační havárie, jejichž plánování a zavádění je popsáno ve vnitřní a vnějších havarijních plánech je věnována kap. 6. Cílem opatření požadovaných těmito dokumenty je zajistit maximální ochranu pracovníků a okolního obyvatelstva v případech, kdy výše zmíněná technická a organizační opatření patření selhala a došlo k vážnému poškození aktivní zóny reaktoru a následné ztrátě integrity ochranné obálky.

Z charakteru pracovních činností a souvisejících zdrojů záření v JE vyplývá, že primárním rizikem pro pracovníky JE je riziko vnějšího ozáření, druhotným rizikem riziko vnitřního ozáření. Principy ochrany pracovníků v jaderné elektrárně jsou stejné jako na ostatních pracovištích se zdroji ionizujícího záření, tzn. osobní efektivní dávky pracovníků musí být udržovány na rozumně dosažitelné nízké úrovni. Praktické způsoby uplatnění tohoto principu závisejí na konkrétních podmínkách a především na typu jaderné elektrárny (jejích technologických součástích) a na řídicím a monitorovacím systému, a proto dále budou uvedena obecně platná zásady.

Osobní monitorování pracovníků JE musí poskytnou informaci nejen o celkové efektivní dávce jednotlivce za sledované období (zpravidla jeden měsíc), ale i o rozložení této dávky v závislosti na prováděných činnostech (zajišťuje se tzv. operativním monitorováním při jednotlivých činnostech). Velkou pozornost v procesu monitorování a usměrňování osobních dávek je třeba věnovat pracovníkům, kteří dodavatelsky zajišťují údržbu, opravy a jiné činnosti vedoucí k ozáření, a to zejména s ohledem na skutečnost, že tytéž činnosti mohou tyto pracovníci vykonávat na více elektrárnách, ať již na území ČR nebo mimo ně. V projektu jaderné elektrárny musí být vyčerpávajícím způsobem specifikovány všechny technické prostředky i metodiky, které budou používány pro měření a vyhodnocování individuálního vnějšího i vnitřního ozáření.

Přesto, že na celkové kolektivní efektivní dávce pracovníků v JE za normální situace se úvazek kolektivní efektivní dávky v důsledku příjmu radionuklidů velmi malou měrou (méně



než 1 %), je třeba kontrole vnitřního ozáření pracovníků věnovat trvalou pozornost. To se týká především všech pracovních operací s potenciálním rizikem příjmu radionuklidů, převážně inhalační cestou. Proto standardním zařízením elektrárny je celotělový počítač a laboratoře pro měření obsahu radionuklidů v exkretech. Vybraní pracovníci jsou pravidelně monitorováni na celotělovém počítači a stanovuje se rovněž aktivita  $^3\text{H}$  v jejich moči.

Program *monitorování pracovišť JE* poskytuje trvalou a úplnou informaci o příkonu ekvivalentních dávek a o objemové aktivitě radionuklidů v ovzduší v různých částech elektrárny, znalost těchto údajů je nutnou podmínkou pro uplatňování principu optimalizace radiační ochrany. Zároveň charakterizuje stav nejdůležitějších technologických součástí a může včas avizovat odchylky od normálního provozu a iniciovat nutná opatření. Celý systém radiačního monitorování vnitřních prostor jaderné elektrárny je stěžejní součástí projektu elektrárny a musí obsahovat podrobné údaje o typech používaných měřidel, jejich umístění, rozsazích měření a odolnosti měřidel, technickém řešení přenosu dat z těchto měřidel a způsobu zpracování a vyhodnocení těchto dat.

Vliv JE na okolní obyvatelstvo a na životní prostředí je dán především úrovní kvality technologického zařízení a úrovní řízení technologických procesů. Mírou této kvality je ozáření jednotlivce z obyvatelstva, resp. ozáření kritické skupiny obyvatelstva v důsledku radioaktivních výpustí do okolí. Kritickou skupinou se rozumí na základě racionálních modelů identifikovaná homogenně ozařovaná skupina osob (z daného zdroje a danou expoziční cestou), a to tak, že efektivní nebo ekvivalentní dávky jednotlivce z této skupiny jsou vyšší než kteréhokoliv jednotlivce z ostatní populace. Odhad ozáření musí zahrnovat obě expoziční cesty, tj. vnější ozáření od radionuklidů nacházejících se v okolí člověka a vnitřní ozáření v důsledku příjmu radionuklidů požitím nebo dýcháním.

Ochrana obyvatel je *legislativně* zakotvena v atomovém zákoně (zákon č. 18/1997 Sb. v platném znění) a jeho prováděcích předpisech, zejména ve vyhlášce č. 307/2002 Sb. v platném znění, o požadavcích na zajištění radiační ochrany a ve vyhlášce č. 219/1997 Sb. v platném znění, o podrobnostech k zajištění havarijní připravenosti jaderných zařízení a pracovišť se zdroji ionizujícího záření a o požadavcích na obsah vnitřního havarijního plánu a havarijního řádu.

Součástí povoloovacího procesu provozu jaderného zařízení je schválení tzv. limitů a podmínek bezpečného provozu, které mj. obsahují i limity a podmínky stanovené pro výpusti z tohoto zařízení do okolí. Provozovatel zařízení je povinen trvale monitorovat (tj. sledovat, měřit, hodnotit a zaznamenávat) nejen výpusti do okolí, ale i okolí zařízení.

U monitorování *výpustí* je požadováno soustavné *bilanční měření* všech radionuklidů významně přispívajících k ozáření obyvatelstva a nepřetržitá měření schopná rychle *signalizovat odchylky* od běžného provozu (jednoznačný požadavek měřit výpusti radionuklidově specificky a nikoliv pouze sumárně). Kritériem bezpečnosti provozu jaderně energetického zařízení jsou hodnoty ozáření kritické skupiny obyvatel. V případě, že by u kritické skupiny obyvatel mohlo dojít k ozáření (od jaderné elektrárny a od všech ostatních jiných zařízení uvádějících radionuklidy do životního prostředí) převyšujícímu jednu dvacetinu základních limitů pro obyvatele (tj. 250  $\mu\text{Sv}$  roční efektivní dávky), je nutné optimalizaci radiační ochrany prokázat kvantitativní studií.

Provozovatel má zákonnou povinnost být připraven na všechny mimořádné události související s provozem zařízení a tuto připravenost musí průběžně ověřovat (tzv. havarijní připravenost). Připravenost se dokládá tzv. vnitřním havarijním plánem, ve kterém mj. musí

být uvedeny a klasifikovány všechny uvažované mimořádné události, které mohou nastat při provozu zařízení, pro jednotlivé mimořádné události zde musí být uvedeny podrobné popisy činností (tzv. zásahové postupy a instrukce) včetně programu monitorování.

Pro výpočet efektivní dávky na jednotlivce z obyvatelstva v *okolí jaderné elektrárny* se uvažují se veškeré vypusti do ovzduší, tzn. z obou ventilačních komínů. Započítávají příspěvky všech vypouštěných radionuklidů, i těch radionuklidů, které se běžně neměří, a které jsou významné zejména z hlediska příspěvku ke globálním kolektivním dávkám. Pro vypusti do vodotečí byly stanoveny limity pro tritium a pro ostatní významné radionuklidy. Důvod pro toto rozdělení spočívá v tom, že tritium je řízeně odpouštěno, a úvazek efektivní dávky je z něho dominantní a nezávisí na úrovni dekontaminace vody, na těsnosti palivových článků apod.

Za normálního provozu slouží monitorování okolí jaderné elektrárny k potvrzování bezpečného provozu ve vztahu k okolí, v případě mimořádného úniku radionuklidů do prostředí je základním východiskem ke zhodnocení rizika tohoto úniku a jeho dopadu na obyvatelstvo. Při tvorbě programu monitorování okolí a při volbě vhodné techniky pro měření se dává přednost dosažení co nejmenších detekovatelných hodnot před uskutečňováním měření a odběrů na mnoha místech. Cílem monitorování je zaregistrování významných odchylek od hodnot přírodního pozadí. Tyto významné odchylky však lze očekávat jen za abnormálních a havarijních situací.

## 5. Přírodní zdroje

Primárním zdrojem přírodních radionuklidů jsou *horniny*; typické hmotnostní aktivity významných radionuklidů  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{226}\text{Ra}$  a jeho přeměnových produktů jsou v horninách přibližně v radioaktivní rovnováze s  $^{238}\text{U}$ ) jsou -  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{238}\text{U}$ ) v rozmezí (1-1000) Bq/kg, v uranových ložiscích více než desítky tisíc Bq/kg (průměr – řádově desítky Bq/kg),  $^{232}\text{Th}$  (1 – 100) Bq/kg (průměr rovněž řádově desítky Bq/kg),  $^{40}\text{K}$  (70-1800) Bq/kg (průměr - stovky Bq/kg). Podobné hodnoty nalezneme v *půdách*. Běžné hodnoty objemových aktivit radonu v půdním vzduchu 1 m pod povrchem země v ČR jsou v typickém rozmezí (1–100) kBq/m<sup>3</sup>, v extrémních případech více než 1000 kBq/m<sup>3</sup>.

Přírodní radionuklidy obsažené v horninách se uvolňují do *vod* poměrně složitými procesy, které závisí na geochemických, fyzikálních a hydrologických poměrech; objemové aktivity jednotlivých radionuklidů ve vodě jsou rozmezí (1–100) mBq/l. V případě radonu je situace jiná - v podzemní vodě jsou objemové aktivity  $^{222}\text{Rn}$  na úrovni objemových aktivit radonu v pórech hornin a půd - (10–1000) Bq/l; extrémní hodnoty dosahují vody v místech uranových ložisek v podzemních vodách - pro  $^{222}\text{Rn}$  (10–1000) kBq/l ( Jáchymov); tyto vody jsou často využívány lázeňsky.

V porovnání s podzemní vodou jsou hodnoty v povrchových vodách řádově nižší. Samostatnou problematikou související s přírodní radioaktivitou vod je výskyt přírodních radionuklidů v *sedimentech* vodotečí. V důsledku dlouhodobé kumulace radionuklidů lze v některých sedimentech nalézt hmotnostní aktivity přírodních radionuklidů na úrovni (100–10000) Bq/kg, a to i v tocích neovlivněných důlní činností.

Přírodní radionuklidy se rovněž uvolňují do ovzduší - radon uniká ze Země do atmosféry difúzí a rychle se rozptýluje. Průměrná objemová aktivita radonu v *atmosféře*, která se ustálí jako rovnováha mezi jeho přísunem ze Země a jeho rozpadem, se pohybuje kolem (5–10) Bq/m<sup>3</sup>; v důsledku inverzních stavů v přízemní vrstvě kolísá během dne a noci přibližně dvakrát, v extrémních případech i o řád. Radon se postupně přeměňuje na další radionuklidy (krátkodobé  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  a dlouhodobé  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ); ty zůstávají zčásti ve vzduchu, zčásti se usazují na povrchy předmětů na Zemi. Ozáření radonem vede v průměru k nejvyššímu radiačnímu ozáření populace; průměrná efektivní dávka na jednotlivce z obyvatelstva je u nás odhadována na více než 2 mSv/rok.

Vysoké koncentrace radonu se v ČR vyskytují v některých bytech a domech; rozpětí hodnot v domech je široké, pohybuje se od nejnižších koncentrací (5–10) Bq/m<sup>3</sup> daných obsahem radonu v atmosférickém vzduchu - až k enormně vysokým hodnotám 10 000 Bq/m<sup>3</sup>, tj. více než 200krát vyšší než je průměrná hodnota v České republice (těmto hodnotám odpovídá roční efektivní dávka až 500 mSv).

Přírodní radionuklidy se rovněž dostávají do rostlin - kořenovým přestupem z půdy (koeficienty přestupu pro kořenový přestup pro uran, radium, thorium, olovo a polonium jsou v rozmezí od 0,0001 do 0,01), přestupem z kontaminované vody při zálivce (významné zejména u listové zeleniny), depozicí přírodních radionuklidů na rostliny z ovzduší. S přihlédnutím k uvedeným aktivitám ve složkách prostředí (půdě, vodě, ovzduší) jsou v rostlinách hmotnostní aktivity přírodních radionuklidů až desítky mBq/kg. Obdobně lze

odhadnout obsahy přírodních radionuklidů v mase a mléce hospodářských zvířat, kde jsou významné expoziční cesty především ingesce potravy a vody.

Na pracovištích, kde může dojít k *významnému zvýšení ozáření osob z přírodních zdrojů* (paluby letadel při letech ve výšce nad 8 km, doly, jeskyně a další pracoviště v podzemí, pracoviště, na nichž nakládáno s vodou - lázeňská zařízení, stáčírny a úpravný povrchové a podzemní vody apod.) je třeba *monitorováním* zjistit úroveň ozáření, a pokud jsou překročeny (vyhláškou 307/2002 Sb. v platném znění) stanovené směrné/zásahové úrovně, *přijímat* opatření podobná opatřením na ochranu pracovníků na pracovištích, kde se nakládá se zdroji ionizujícího záření

Specifickou oblastí je zvýšené ozáření přírodními zdroji v *obytných budovách a vybraných zařízeních* (školská, zdravotnická zařízení). Dlouhodobý program hodnocení tohoto ozáření obyvatel, tzv. *Radonový program*, vyústil v požadavky na kontrolu úrovně ozáření ve stávajících a nově stavěných budovách a směřující k regulaci tohoto ozáření formou jak preventivních organizačních a technických *opatření před výstavbou* (výběr stavebního pozemku v závislosti na obsahu půdního radonu, stavební úpravy při výstavbě směřující ke snížení úrovně ozáření v obytných/pobytových prostorách), tak ve *stávajících* budovách a zařízeních (protiradonová technická organizační opatření). Opět, rozhodování o tom, zda má být provedeno dané ochranné/nápravné opatření, se rozhoduje v závislosti na tom, zda jsou vyhláškou 307/202 v platném znění stanovené *směrné/mezní hodnoty* vztahující se k ozáření osob.

## 6. Radiační havárie

Používání ZIZ v různých odvětvích medicíny, průmyslu, zemědělství a výzkumu stále roste a zákonitě je spojeno s možností vzniku nehod a havárií. Je však jen málo oblastí lidské činnosti, kde byla zároveň s rozvojem aplikací věnována taková pozornost zajištění jejich bezpečnosti z hlediska ochrany zdraví, jako je používání zdrojů ionizujícího záření. Přesto však nelze absolutně vyloučit, že k neplánovanému ozáření lidí dojde. Likvidace radiačních nehod a havárií vyžaduje velmi rychlé operativní rozhodování vedoucí k realizaci opatření na ochranu zdraví pracovníků a obyvatel a opatření na ochranu majetku [Klener 2000].

Neplánované ozáření či rozptyl radioaktivních látek je mimořádnou situací, vznikající nejednou překvapivými a nepředpokládanými mechanismy a končící velmi různorodými následky. Základní rozdělení mimořádných situací je rozdělení na radiační nehody a radiační havárie. **Radiační nehodou** rozumíme událost, která má za následek nepřipustné uvolnění radioaktivních látek nebo ionizujícího záření nebo nepřipustné ozáření osob. Jako **radiační havárii** označujeme potom radiační nehodu, která vyžaduje opatření na ochranu obyvatelstva a životního prostředí. Důsledky radiačních nehod se zpravidla omezují na prostory pracoviště se zdroji ionizujícího záření, radiační havárie pak ovlivňují i jeho okolí zejména únikem radioaktivních látek do životního prostředí.

Na pracovištích se ZIZ mohou vyskytovat jak zdroje způsobující vysoké dávkové příkony tak při porušení těsnosti systému bariér mohou být uvolněny do životního prostředí vysoké objemové aktivity vedoucí k významným příjmům radioaktivních látek. Ztráta kontroly nad zdrojem může tedy vést nejčastěji k ozáření jednoho nebo několika málo pracovníků, kteří tak mohou být ohroženi akutním lokálním nebo celotělovým poškozením. Nápravná opatření při radiačních nehodách jsou zaměřena především na vyloučení výskytu deterministických poškození u pracovníků. V takové závažné míře bývají jednotlivci z obyvatelstva ohroženi jen v ojedinělých případech, kdy je silný zdroj záření ztracen nebo zcizen a dostane se do veřejně přístupného prostoru, kde je pak nalezen neinformovanými osobami, které s ním následně nevhodně zacházejí.

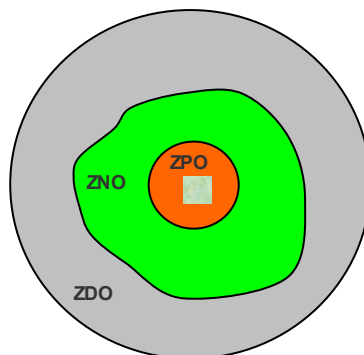
Větší skupiny obyvatelstva mohou být ozářeny, či kontaminace ovzduší, vod, zemského povrchu, potravních řetězců může nastat při radiačních haváriích jaderných zařízení spojených s rozptýlením/únikem radioaktivních látek do životního prostředí. S možností deterministických poškození se v těchto případech mimo areál havarovaného zařízení setkáváme jen zcela výjimečně; ovšem úniky radioaktivních látek zejména do ovzduší představují z hlediska ozáření obyvatelstva riziko (zpravidla je vyšší než pro úniky do hydrosféry) - úniky do ovzduší totiž způsobují vyšší dávky a dostávají se k člověku v kratším čase.

Na rozdíl od regulace ozáření při činnostech, regulace ozáření při zásazích není založena na limitech - použití předem určených limitů jako východiska pro rozhodování o zásazích by mohlo vést k opatřením neúměrným z hlediska jejich přínosu, tedy v rozporu s principem zdůvodnění – nýbrž byly mezinárodně přijaté zásahové úrovně [IAEA 1994, 1996], které převzaly i naše právní předpisy – vyhláška 307/2002 v platném znění. Optimalizace zásahu je však vždy omezena nutností zabránit jakýmkoli prostředky vzniku deterministických účinků.

Základní principy havarijního plánování a odezvy jsou shodné pro všechny typy nehod a havárií. Lišit se bude volba jednotlivých opatření a časový sled jejich provádění. Volba ochranných opatření závisí na povaze nehody nebo havárie, délce jejího trvání a zasažené oblasti. Kromě málo pravděpodobných radiačních havárií JE, jsou častější radiační nehody, příp. havárie se zdroji ionizujícího záření během jejich výroby, přepravy nebo použití, či nesprávného zacházení, ztráty nebo odcizení, poškození zdroje nebo jeho stínění, apod..

*Následky radiační nehody či havárie* se mohou velmi lišit v závislosti na typu a povaze události, celkovém množství a složení směsi uniklých radionuklidů a jejich vlastnostech charakteru prostředí, do kterého jsou radionuklidy uvolňovány, mechanismu šíření radionuklidů. *Důležitými expozičními cestami* jsou pak zevní ozáření z poškozeného zařízení nebo zdroje mimo kontrolu, zevní ozáření z mraku uvolněného radioaktivního materiálu, inhalace radioaktivních látek z mraku, zevní ozáření z deponie radioaktivních látek na povrchu terénu, kontaminace povrchu těla a oděvu, požití potravy a vody kontaminované radioaktivními látkami.

Pro JE *vnitřní i vnější havarijní plán* musí vycházet z konkrétního typu zařízení a potenciálu pro únik různých radionuklidů. Důsledky na okolí vypočítané pro řadu předpokládaných havarijních sekvencí pak tvoří další zdroj pro tvorbu vnějších havarijních plánů. Pro havarijní plánování rozlišujeme dvě základní oblasti - *areál* pracoviště se zdroji ionizujícího záření a jeho *okolí*. V okolí JE je zpravidla na základě bezpečnostních analýz stanovena *zóna havarijního plánování* (ZHP). ZHP se dělí [IAEA 1997, 2003] na zónu automatického přijetí neodkladných ochranných opatření po varování (ZPO), zónu, kde se plánují neodkladná ochranná opatření (ZNO), zónu, kde se plánují následná/dlouhodobá ochranná opatření (ZDO) (viz obr.)



Provozovatel pracoviště se zdroji ionizujícího záření zodpovídá za plánování a případné zavedení neodkladných opatření zmíňující dopady havárie - ochranu lidí v areálu pracoviště, vyrozumění příslušných úřadů a poskytnutí všech potřebných informací, doporučení a technické pomoci, varování obyvatelstva v okolí pracoviště.

V okolí JE zodpovídá za ochranu obyvatelstva místní státní správa, na celostátní úrovni pak vláda. Do zodpovědnosti ústředních orgánů a vlády patří zejména organizace následných opatření, která nevyžadují okamžitou implementaci a přesahují svým rozsahem kompetence či možnosti nižších územních správních celků.

Z hlediska časového průběhu radiační havárie se rozlišují v zásadě předúniková a úniková (časná) fáze a fáze podniková (dlouhodobá, následná). Jestliže v *časné fázi havárie* je většina dostupných informací o možném radionuklidovém složení úniku a jeho velikosti (zdrojový

člen) a o pravděpodobném vývoji havárie, jejich následcích zatížena značnou nejistotou a informace jsou založeny prakticky na hodnocení stavu technologie v daném zařízení, rozhodování o ochranných opatřeních bude tedy vycházet ze stavu zařízení a předpovědi jeho změn, na dostupné informaci o radiační situaci v areálu a na meteorologických datech - budou známy výsledky monitorování ve ventilačním komíně, v prostorách elektrárny, z teledozimetrického systému a postupně i z okolí JE (měření mobilních skupin, atd.). V časně fázi lze očekávat vyšší dávkovými příkony (jak ze zevního ozáření, tak v důsledku vnitřní kontaminace - inhalace a od depozice na zemském povrchu) než ve fázi podnikové [ICRP 1993], [IAEA 1997, 1999].

V *podnikové fázi* lze očekávat již úplný přehled o radiační situaci v dotčených oblastech; dominantní část pokračujícího ozáření je způsobena zevním ozářením z depozitu a vnitřní kontaminací po požití radionuklidů v potravinách. Rozhodnutí o povaze a rozsahu ochranných opatření budou založena na výsledcích monitorování životního prostředí a obsahu radionuklidů v potravních řetězcích. Podobně jako jiné státy i Česká republika provozuje jako jeden z prostředků adekvátní reakce na radiační havárii - Celostátní radiační monitorovací síť (RMS). RMS je řízena Státním úřadem pro jadernou bezpečnost ve spolupráci se Státním ústavem radiační ochrany. Monitorování provádí několik subsystémů - *síť včasného zjištění (SVZ)*, která sestává z cca 60 měřících bodů s automatizovaným přenosem naměřených hodnot, *teritoriální a lokální síť* (v okolí obou JE) *termoluminiscenčních dozimetrů, síť měřících míst kontaminace ovzduší a laboratoří* (vybavených pro gamaspektrometrické případně radiochemické analýzy obsahu radionuklidů ve vzorcích životního prostředí a potravních řetězců), připraveny a cvičeny jsou *mobilní pozemní a letecké skupiny*.

Z ochranných opatření se pro časnou fázi havárie plánují a příp. realizují *neodkladná ochranná opatření*, jakými jsou *vyrozumění odpovědných institucí, varování obyvatelstva, ukrytí, evakuace, jódová profylaxe, omezení pobytu osob, dekontaminace osob a poskytnutí speciální zdravotní péče* ozářeným a kontaminovaným osobám. V podnikové fázi jsou aplikována *následná a dlouhodobá opatření* jakými jsou *dekontaminace* určených kontaminovaných oblastí, budov, zařízení, *regulace potravních řetězců, veterinární a zemědělská opatření*, příp. i *přesídlení* osob z nejvíce kontaminovaných oblastí. Následná opatření se zavádějí až po získání spolehlivých údajů (výsledků monitorování) s ohledem na sociální, psychologické a ekonomické aspekty - společenské a ekonomické ztráty spojené s nepodloženými rozhodnutími mohou být vzhledem k délce trvání následných opatření značné. Je tedy důležité rozhodovat o provedení následných opatření na základě co nejúplnější informace s použitím co nejlepších odhadů možných dopadů jednotlivých uvažovaných variant.

Při zavádění ochranných opatření jsou, kromě uvedeného, vodítkem mezinárodně doporučené a našimi právními předpisy přijaté zásahové a směrné hodnoty předpokládaných a odvrácených dávek. Tyto hodnoty, jež se vztahují k danému opatření a dané době od úniku radionuklidů jsou uvedeny ve vyhlášce 307/2002 v platném znění.

## 7. Literatura

- [EC 1996] Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the danger arising from ionizing radiation, Official Journal of the European Communities, Vol. 39, 29 June 1996.
- [IAEA 1994] IAEA Safety Series No 109: Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency, Vienna, 1994
- [IAEA 1996] International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No 115, IAEA, 1996.
- [IAEA 1997] Generic Assessment Procedures for Determining Protective Actions during Reactor Accident, TECDOC-955, IAEA, Vienna, 1997.
- [IAEA 1999] Generic Procedures for Monitoring in a Nuclear and Radiological Emergency, TECDOC-1092, IAEA, Vienna, 1999.
- [IAEA 2003] Methods for Developing Arrangements for Response to a Nuclear or Radiological Emergency, TECDOC-953 (updating) IAEA, Vienna, 2003.
- [ICRP 1975] ICRP Publication 23: Reference Man - Anatomical, Physiological and Metabolic Characteristics, Pergamon Press, 1975.
- [ICRP 1977] ICRP Publication 26: Recommendations of the ICRP, Annals of the ICRP, 1, 1977, č. 3.
- [ICRP 1991] ICRP Publication 60: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP, 21, 1-3, Pergamon Press, 1991.
- [ICRP 1993] International Commission on Radiological Protection: Principles for Intervention for Protection of the Public in a Radiological Emergency, Publication 63, Pergamon Press
- [Klener a kol. 2000] Principy a praxe radiační ochrany, SÚJB/AZIN CZ Praha, 2000



## 8. Otázky

1. Z čeho vychází současná koncepce radiační ochrany
2. Jak působí ionizující záření na DNA
3. Jaké jsou deterministické a stochastické účinky ionizujícího záření
4. Jaké jsou základní principy radiační ochrany
5. Jak se vyjadřuje analýza nákladů a přínosů
6. Co je peněžní vyjádření újmy
7. Jaké limity ozáření rozeznáváme
8. Co jsou referenční úrovně
9. Jaký je rozdíl mezi kontrolovaným a sledovaným pásmem
10. Co reprezentuje kritická skupina obyvatel
11. Kde se v průmyslu používají zdroje ionizujícího záření
12. Jak se usměrňuje lékařské ozáření
13. Jak se dostávají radionuklidy do organismu
14. Jaké typy monitorování jsou na jaderné elektrárně
15. Jaké jsou nejdůležitější přírodní zdroje ionizujícího záření
16. Co je radiační nehoda a co radiační havárie
17. Jaké jsou havarijní plány a co především obsahují