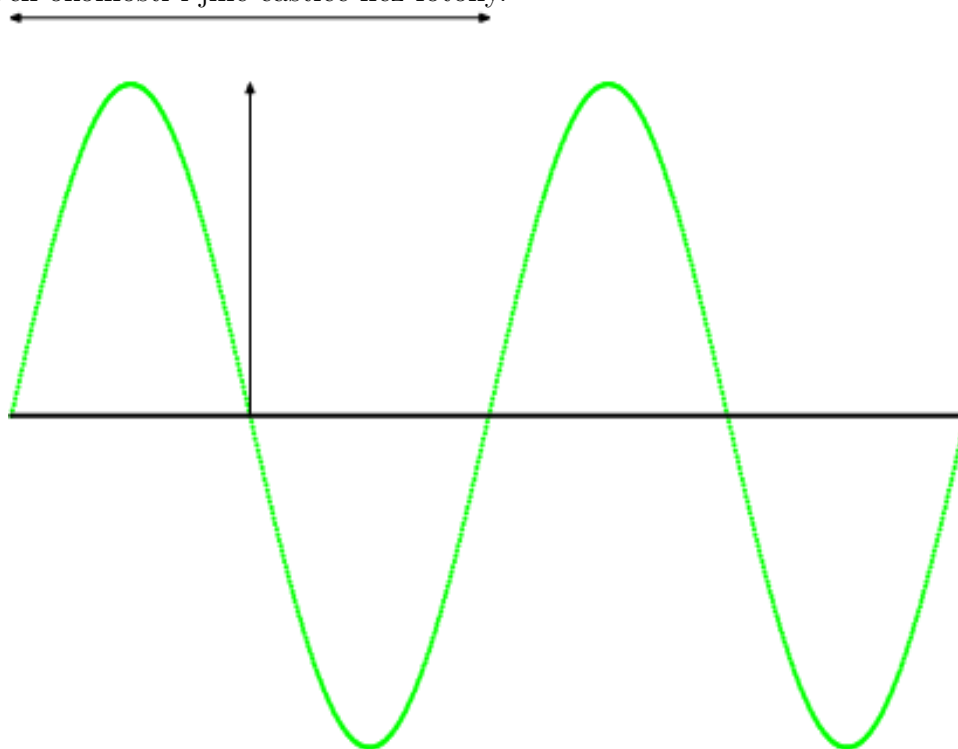


Kapitola 1

Úvod

Záření můžeme rozlišit na *korpuskulární* a *elektromagnetické*, popř. (odlišný způsob dělení) na *ionizující* a *neionizující*.

Korpuskulární záření je tvořeno proudem částic, např. elektronů, protonů, neutronů, jader atomů a dalších. *Elektromagnetické* je tvořeno elektromagnetickým vlněním o definované vlnové délce a intenzitě (dané výškou vlny). V některých situacích se ovšem i toto záření chová jako proud světelných kvant – fotonů (jejichž energie je tím vyšší, čím má záření kratší vlnovou délku), takže některé děje související s tímto typem záření je vhodnější popisovat jako proud fotonů, jiné jako vlnění. „Vlnový charakter“ mohou mít za určitých okolností i jiné částice než fotony.



Obrázek .1 Schéma vlny, charakterizované délkou (horizontální šipka) a amplitudou (vertikální šipka)



Obrázek .2 Rozsah vlnových délek záření s vyznačením (šedě) oblasti viditelného světla

Ionizující záření je charakterizováno tím, že při jeho průchodu hmotou vznikají elektricky nabitě částice, ionty.

Od tohoto jevu byla odvozena starší jednotka ionizujícího záření, rentgen. Charakterizovala mohutnost náboje, který vznikl ve vzduchu při průchodu daného záření. Problém s touto jednotkou spočíval v tom, že byla definována pouze pro vzduch a na jiné látky (zvláště pak kapalné a pevné) byla převoditelná jen s velkými obtížemi a s problematickou přesností. Výhodou této jednotky je fakt, že k jejímu měření potřebujeme pouze elektroskop, vlhkoměr (druhým významným faktorem vybíjení elektroměru je vlhkost vzduchu) a stopky, takže se dá snadno a levně improvizovat.¹

Mezi ionizující typy záření patří záření částicová (alespoň běžné typy, jako jsou proudy jader hélia (α záření), elektronů (β záření), pozitronů ($\beta+$ záření), neutronů, protonů atd.) a elektromagnetická záření s vlnovou délkou kratší než má ultrafialové světlo.

Mezi neionizující záření patří elektromagnetická záření o vyšší vlnové délce a některá „exotická“ částicová.

¹ Toto provedl pozdější akademik F. Běounek po ztroskotání vzducholodi Italia na krách Severního ledového oceánu, takže v improvizovaných podmínkách robinzonády na ledových krách získal v té době zcela unikátní data o radioaktivitě v blízkosti zeměpisného pólu, neovlivněná pevninou (ostrovem) nebo hmotou plavidla, která byla jediným vědeckým výstupem této nešťastné expedice.

Kapitola 2

Zdravotní poškození neionizujícím zářením

2.1 Ultrafialové záření

Rozlišujeme UV-A (320 – 400 nm), UV-B (280 – 320 nm) a UV-C (pod 280 nm).

2.1.1 Zdroje

Zdrojem UV záření jsou předměty zahřáté na vysokou teplotu, poskytující spojité spektrum. Jejich maximum a omezení v oblasti kratších vlnových délek závisí na teplotě předmětu (proto se barvy často charakterizují stupni Kelvina). Příkladem takto extrémně zahřáté hmoty může být elektrický oblouk. Slunce vydává rovněž spojité tepelné spektrum, ale z něj jsou v neviditelných (UV, IR) i viditelných oblastech odfiltrovány čáry, vlnové délky specificky pohlcované nejvyššími vrstvami sluneční atmosféry. Další filtraci zajišťuje zemská atmosféra, zhrubaplatí, že vlnové délky vzdálenější viditelnému světlu jsou pohlcovány silněji. Výbojky vydávají čárové spektrum, odpovídající vyzařování excitovaných elektronů na vnějších sférách atomů prvku, který je použit jako pracovní látka. Existují i LED, vydávající UV záření v oblasti UV A.

UV-A a UV-B jsou součástí slunečního záření a i při zamračené obloze pronikají až na zemský povrch. UV-C je atmosférou filtrováno s vysokou účinností a v praxi připadají v úvahu pouze jeho umělé zdroje. Na filtraci UV záření se podílí především atmosférický ozón. Ten se přirozeně nachází v horní části atmosféry, kde vzniká působením slunečního záření na kyslík. Filtrační účinky však má i ozón přízemní, který je jinak nežádoucí složkou tzv. fotochemického smogu, vznikajícího lidskou činností, v tomto ohledu ale působí příznivě.

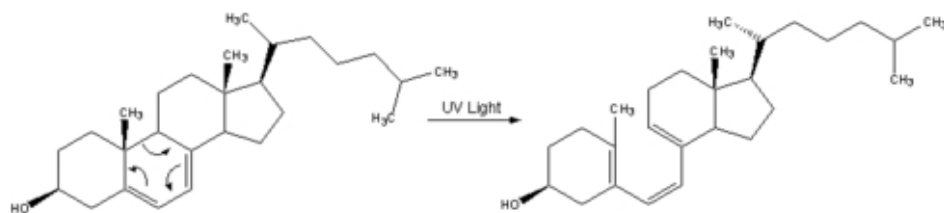
2.1.2 Účinky

Baktericidní účinky UV záření využívají i germicidní lampy, což jsou v podstatě zářivky z křemenného skla (propustného pro UV záření), neobsahující na stěně vrstvu luminiforu, který pohlcuje UV záření a září v oblasti viditelného světla (jak je tomu u normálních zářivek). Jejich masívnější využívání není epidemiology příliš podporováno, protože sterilizační účinek je silně závislý na kvalitě povrchu a jeho čistotě. Seběmenší nerovnost nebo zrnko prachu vytváří stín, v němž mohou bakterie přežít výrazně delší dobu. Je tedy nutné zajistit, aby odpovědný personál nenahrazoval zapnutím germicidní lampy úklid a desinfekci povrchů.

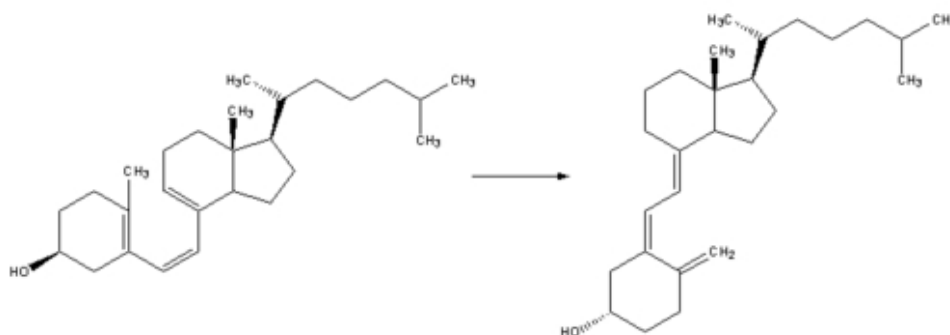
Germicidní účinky UV záření lze snadno demonstrovat na misce s bakteriální kulturou, ozářenou po vyočkování UV lampou. Při nižší expozici vznikají u ozařovaných mikroorganismů mutace, což lze využít k výzkumným účelům i k demonstraci mutagenní aktivity, aniž by bylo nutno manipulovat s chemickými mutageny.

Příznivé účinky UV záření na lidský organismus spočívají v tom, že ozářením kůže vlnovými délkami kolem 300 nm vzniká v povrchových kapilárách z cholesterolu kolující v krvi provitamin, který organismus dokáže dle potřeby přeměnit na vitamín D (= na rozdíl od vitamínu D v kapkách a kapslích se nelze touto cestou předávkovat).

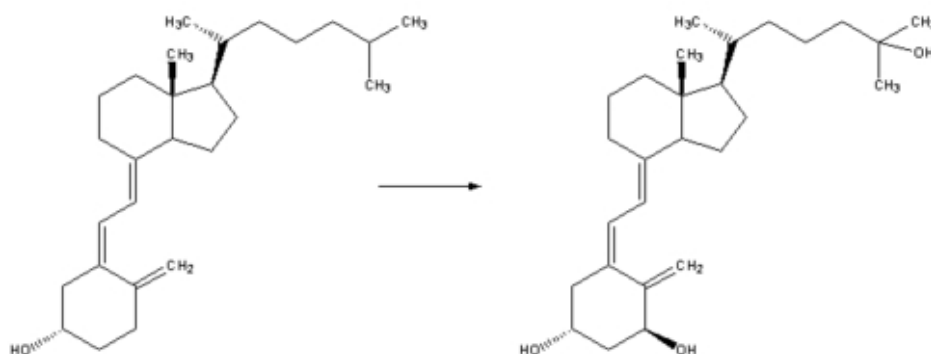
K uvedené přeměně dochází ve třech fázích



Obrázek 2.1.1 První fáze, způsobená světlem v kožních kapilárách



Obrázek 2.1.2 Druhá fáze, probíhající v jaterní tkáni



Obrázek 2.1.3 Třetí fáze, probíhající v ledvině (všechny tři obrázky z Wikipedie)

Uvedená reakce je důležitá též v prevenci osteoporózy, nicméně expozice UV zářením postačuje relativně krátká (cca hodina mimo poledne v lehkém oděvu), delší expozice jsou z hlediska tvorby vitamínu D nevýznamné a jsou spojeny s vyšším rizikem vzniku rakoviny kůže.

Vitamín D nevzniká u pacientů bez ledvin, závislých na dialýze (nemá kde proběhnout třetí fáze reakce), teoreticky i při těžkém poškození jater, avšak tak těžký stav, při kterém by v játrech nedocházelo ke druhé fázi výše uvedené reakce, zpravidla není spojen s tak dlouhým přežitím pacienta, aby se avitaminóza D stačila projevit.

Výše zmíněné baktericidní účinky přímo na kůži se užívaly např. u kožní tuberkulózy. Toto záření má příznivý vliv i na některá neinfekční afekce kůže (např. lupénka).¹

Na druhé straně je kůže UV zářením iritována, dochází ke vzniku zánětu (ještě citlivější povrchovou tkání je spojivka), posléze reaguje zvýšenou pigmentací (opálení). Při vyšších dávkách se může objevit až nekróza kůže, podobná spáleninám. Dlouhodobé působení UV záření vyvolává rychlejší stárnutí kůže a vznik karcinomů. Ty se z těchto důvodů

¹ Používaly se a používají tzv. Finsenovy lampy, v nichž je zdrojem UV záření elektrický oblouk.

vyskytují na místech těla nechráněných oděvem a u profesí, pracujících na volném prostranství. Patří mezi nejčastější zhoubné (z hlediska histologických znaků) nádory u nás, jejich prognóza je však relativně dobrá: rostou pomalu, metastázuji vzácně a nevyvolávají nádorovou kachexii. Naopak vysoce zhoubný melanom kůže je dáván do souvislosti s jednorázovou silnou expozicí, „spálením“, především u osob neadaptovaných na sluneční záření.

Nejlepší ochranou vůči uvedeným účinkům UV záření je nechodit zbytečně na slunce. Pochopitelně, jiný je režim ozařování např. pacientů s lupénkou na pobřeží Mrtvého moře nebo v jiných lázeňských lokalitách.

Místní účinky má UV záření na již zmíněnou spojivku, nicméně při vyšších intenzitách může pronikat i do hloubi oka. V takovém případě dochází k poškození vnitřních struktur oka, až k oslepnutí. Rizikové jsou jednak profesionální expozice (např. sváření elektrickým obloukem), práce s výbojkami apod., zrak však může být poškozen i při nošení tmavých brýlí bez UV filtru v létě zejména v jižněji položených zemích. Zornička totiž reaguje pouzera viditelné světlo, takže se roztahuje a proud UV záření poškozují hluboké tkáně oka víc, než kdyby brýle nebyly. Problém byl akcentován přechodem výrobců brýlí ze skla (které samo o sobě částečně UV záření zachycuje) na plasty pro UV záření lépe prostupné. Z toho důvodu byla zavedena kompenzační opatření.

Test na přítomnost UV filtru v brýlích v současné době mívá většina optiků, k dispozici jsou i průhledné UV záření pohlcující laky, jimiž je možné ošetřit i např. dioptrické brýle. Teoreticky by se však v současné době tmavé brýle, ani dioptrické, neměly legálně prodávat bez UV filtru. Mohlo by se to tedy spíše týkat nějakých „památečních“ brýlí z dřívější doby.

2.2 Viditelné světlo

Má rozmezí vlnových délek přibližně 400 – 760 nm. Citlivost zrakových receptorů vůči světlu na krátkovlnném konci spektra velice strmě klesá, na dlouhovlnném je pokles povolný. Byl činěny pokusy (již na přelomu 19. a 20. století), při nichž pokusné osoby adaptované na tmu byly s to detekovat záření o vlnové délce přes 1000 nm.

2.2.1 Zdroje

Zdrojem viditelného světla mohou být rovněž zahřáté předměty (spojité spektrum, charakterizované stupni Kelvina) i výbojky (čárové spektrum). Dalším zdrojem jsou zářivky, u nichž dochází k výboji produkujícímu UV záření a na povrchu trubic je luminifor, vydávající při buzení UV zářením světlo viditelné. Nejnověji používaným zdrojem jsou LED. Zářivky i LED zdroje mají rovněž čárové spektrum.

2.2.2 Účinky

Viditelné světlo s účastí vidění. Existují hygienické normy pro osvětlení, charakterizované osvětlením (v luxech - jednotka pro množství světla, dopadající na metr čtvereční plochy) a závisející především na zrakové náročnosti prováděné činnosti. Je zohledňováno rovněž oslnění, tj. výskyt zdrojů světla nebo jejich odrazů v zorném poli (zornička se zužuje na základě celkového množství dopadajícího světla, tím v tmavší části zorného pole nejsou rozpoznatelné detaily), popř. střídání světla a tmy (především pokud pracovníci musejí přecházet z jednoho místa na druhé; např. u operačních sálů bývají silně osvětleny i další místnosti, pokud do nich přechází personál v průběhu operace nebo mezi operacemi, právě aby nedocházelo k jejich oslnění). Toto opatření zohledňuje skutečnost, že zornička

reaguje na světlo a tmu sice ve zlomcích sekundy, ale adaptace na světlo a tmu se účastní i chemické pochody na sítnici, jejichž čas potřebný ke změně režimu je mnohem delší. Některé práce je nutno provádět po několik desítek minut trvající adaptaci na tmu (pracovníci u RTG skiaskopického vyšetřování¹). Protože tyčinky, zajišťující vidění za šera, prakticky nejsou citlivé k červené barvě, je možný pobyt na světle ve tmavočervených brýlích, aniž by došlo k výraznějšímu narušení adaptace na tmu.

V některých situacích je zohledňována i barevná kvalita světla (např. malířské ateliéry bývají situovány okny k severu, aby se během dne minimálně měnila barva a intenzita světla). Denní světlo je rovněž téměř nezbytné pro posuzování barev v medicíně (změny barvy pokožky, sliznic apod. u pacientů), proto jsou vysoké požadavky na přívod denního světla i ve zdravotnických zařízeních. Problém čárového spektra (výbojky, zářivky, LED) spočívá v tom, že deformuje barvy. Toto osvětlení je tudíž problematické jak v medicíně (změny barvy u pacienta) tak i např. v uměleckých galeriích, muzeích apod. Minimálně v těchto destinacích nelze nahradit klasické žárovky zářivkami, výbojkami nebo LED. Barevné ladění má jednak psychologické působení, jednak může mít vliv i na intenzitu osvětlení (v místnostech, kde se vyskytují velké plochy vzájemně doplňkových barev, je nutno ke stejné intenzitě osvětlení zajistit silnější zdroj světla).

2.2.3 Negativní účinky na zdraví

Výbojky, zářivky i LED mají též tzv. *stroboskopický efekt* (střídání záblesků z výbojky nebo zářivky se šerem či tmou neosvětlené místnosti). Ten přispívá ke zrakové únavě. Ve větších místnostech bývá proto zvykem zářivky, popř. výbojky zapojovat tak, aby se jejich záblesky střídaly (lze dosáhnout buď fázovým posunem pomocí cívek a kondenzátorů nebo elegantněji připojením každé třetiny na jinou fázi střídavého proudu). Problém může nastat u menších místností, kde na to není dostatek světla nebo při „náhradě“ klasických žárovek kompaktními zářivkami nebo LED, kdy něco podobného není možné a struktura elektrické sítě s tím nepočítá. V případě LED napojených na rozvod 24 nebo 12 voltů nemusí ke stroboskopickému efektu docházet, záleží na konkrétním řešení tohoto rozvodu.

Klasická žárovka stroboskopický efekt nemá, protože její vlákno nestačí mezi jednotlivými pulsy proudu vychladnout natolik, aby se tím významně změnila intenzita jeho záření.

Speciální předpisy platí pro *laserové zdroje*, které mohou poškodit při vyšších intenzitách přímo sítnici oka. Dokonce i „neškodná“ laserová ukazovátka mohou vyvolat bolest a chvilkovou desorientaci, laserové zaměřovače vojenských zbraní již mohou zničit buňky sítnice. Průmyslové lasery pracují často s ještě vyššími intenzitami.

Intenzivní viditelné světlo vyvolává na kůži *photodermatitidu* a může přispívat i k *zánětu spojivek* (tzv. „sněžná slepota“ při dlouhodobém pobytu bez ochrany v krajině zapadané sněhem; na ní se ovšem spolupodílí i UV záření).

Společně s IR zářením se podílí viditelné světlo i na vzniku *úžehu* (viz dále).

2.3 Infračervené záření

Opět rozeznáváme pásma IR-A (760 – 1400 nm), IR-B (1400 – 3000 nm) a IR-C (nad 3000 nm)².

¹ Tuto dnes již archaickou techniku můžete vidět ve filmu „Kam čert nemůže“

² Pozor: Rozložení je symetrické kolem viditelného světla. Je to tedy seřazeno podle vlnové délky následovně: UVC – UVB – UVA – viditelné světlo – IRA – IRB – IRC

2.3.1 Zdroje

Zdrojem IR záření jsou zahřáté předměty, IR-A a IR-B jsou složkou slunečního záření, dopadajícího na povrch Země. IR záření produkuje některé výbojky a LED, jeho zdrojem jsou i nejrůznější tepelné zářiče, vydávající sálavý žár, často spolu s viditelným světlem.

2.3.2 Účinky

Při vysokých intenzitách má infračervené záření *tepelný efekt*, který může vést až ke vzniku popálenin. Dlouhovlnné IR záření proniká do větší hloubky tkání. Průnik tkáními, popř. vyzařování IR teplejšími místy jsou použitelné v medicíně k diagnostickým úkonům. Občas bývá vy(zne)užíváno i efektu, že při některých vlnových délkách na IR fotografovaných osobách „zmizí“ šaty (nebo jsou viditelné např. jen švy, knoflíky, zdrhovadla apod.).¹

Akutní celkové postižení zářením se nazývají *úžeh* a *úpal*.

Úžeh vzniká celkovým přehřátím organismu viditelným i IR zářením na jeho vzniku se podílí rovněž teplota vzduchu, relativní vlhkost a proudění vzduchu, tedy celý tzv. *termický komplex*. Vzniká celkové přehřátí organismu, doprovázené nevolností a zvracením.

Úpal je zapříčiněn především přehřátím hlavy, přičemž dlouhovlnná složka IR-B může pronikatskrze povrchové struktury a dráždit mozkové obaly. Příznaky jsou podobné úžehu, více v popředí je však nevolnost a silné bolesti hlavy. Oba stavy mohou u disponovaných jedinců vyvolat epileptické nebo epileptiformní křeče. Prevencí obou je vyhýbání se otevřenému prostranství na slunci a dostatečný pitný režim, prevencí úpalu pak navíc dbání o nošení pokrývky hlavy. V 19. století nosili evropští návštěvníci tropických zemí tzv. tropické helmy, vybavené mezivrstvou, pohlcující infračervené záření.

Je diskutováno o vlivu *extrémně dlouhodobých expozic* IR záření na kůži, kdy byly popsány (spíše jako rarita) případy vzniku nádorů na takto ozařovaných místech. Např. u buddhistických mnichů, nosících ve vysokohorských podmínkách pod oděvem košík se žhavými uhlíky (zde byla možnost současného působení chemických látek) nebo u osob, které dlouhá léta spávaly na zapnuté elektrické podušce a měly změny od hyperpigmentace až po nádorové bujení rozmístěny na kůži jako „fotografii“ odporových drátů v přístroji. Rozhodně je však riziko takovýchto poruch zdraví velice nízké.

Akutní místní postižení (mimo popálenin) je poškození oka, vedoucí k zákalu oční čočky. Vyskytovalo se především u pracovníků, kteří byli vystaveni působení sálání z pecí nebo horkého materiálu. Po této příčině nese i název: *sklářská katarakta*.

Patofyziologickým zdůvodněním tohoto onemocnění je skutečnost, že čočka i za ní uložený sklivec představují bezcévnou tkáň, vyživovanou pouze relativně pomalou difuzí tkáňového moku. Z tohoto důvodu je odvod zachyceného tepla z těchto tkání podstatně méně efektivní než ze tkání normálně prokrvených a výsledkem je snazší zahřátí tkáně na teplotu, při níž dochází k denaturaci bílkovin. Z výše uvedených důvodů má tkáň čočky velmi omezené možnosti reparace, takže její zakalení je trvalé.

2.4 Záření o vyšších vlnových délkách

Ještě delší elektromagnetická vlnění, jako mikrovlny a vlny používané v radiokomunikacích, mají účinky především tepelné (ohřev pokrmů v mikrovlnné troubě).

¹ Výrobci některých mobilních telefonů dodávají k zabudovaným fotoaparátům filtr, propouštějící jen IR záření.

2.4.1 Účinky

V současné době se objevují práce, prokazující, že vyzařování z mobilních telefonů by mohlo přispívat k riziku některých zhoubných nádorů mozku. Na druhé straně však existují studie, podle nichž mládež s mobilními telefony nezačíná kouřit, přestává kouřit, popř. kouří méně, a tento efekt působí zase zdravotně pozitivně. Vědecké autority jsou velmi rezervované vůči užívání mobilních telefonů malými dětmi, pokud pro to neexistuje nějaký racionální a závažný důvod (např. dětští diabetici).

Je třeba vzít v potaz i fakt, že pokusy, ukazující negativní dopad např. záření z mobilního telefonu na zdraví byly provedeny na potkanech, majících podstatně menší vzdálenost mezi uchem a mozkiem a též podstatně nižší průtok krve mozkiem, takže u člověka je ozáření proti nim jednak výrazně nižší (intenzita i tohoto záření klesá s druhou mocninou vzdálenosti), jednak je z lidského mozku lépe odváděno vzniklé teplo.

Existují také práce, zabývající se možným *negativním vlivem* elektromagnetického vlnění, vznikajícího u vedení vysokého napětí a podobných zdrojů. Podle posledních výzkumů se však zdá, že za pozorované vyšší výskyty některých typů nádorů nemůže vlnění jako takové, ale skutečnost, že u těchto zařízení vznikají elektricky nabitě částice, které působí jako chemické karcinogeny.

Současně je možno vyvrátit jako naprosto nepodložené zvěsti o tom, že v potravinách ozařovaných mikrovlnami „zůstává záření“ nebo dokonce „radioaktivita“. Je jasné, že při silném tepelném ohřevu potravin i potravinových surovin mohou vznikat mimo jiné i látky zdraví škodlivé.

Mikrovlnný ohřev, působící do hloubky potraviny, nikoli pouze na jejím povrchu (a následně vedením či prouděním) je relativně nejšetrnější ze všech možných typů ohřevu. Jeho náhrada jiným způsobem tepelné úpravy potravy vede spíše ke zvýšení zátěže podobnými nežádoucími látkami. Jediné, co lze v souvislosti s mikrovlnnými troubami racionálně kritizovat, je používání tzv. „hnědícího nádobí“, které se v proudu mikrovln ohřeje a sekundárně zahřívá potraviny na povrchu. Daleko racionálnější je potravinu předehtout v mikrovlnce následně dopracovat na rendlíku či pánvi; použijeme-li plynový sporák, tak oproti použití „hnědícího nádobí“ i ušetříme.

Mezi pozitivní účinky tohoto záření patří i skutečnost, že zajišťuje *komunikaci pomocí mobilních zařízení*, od telefonů až po WIFI připojení k internetu. Zejména zavedení mobilních telefonů se projevilo zvýšením rychlosti komunikace se zdravotní službou při úrazu nebo náhlém zhoršení stavu chronicky nemocných osob a promítlo se i do snížení úmrtnosti na dopravní úrazy a akutní kardiovaskulární příhody.¹

Na dnešní „mobilizovanou“ generaci působí zážitky z doby, kdy např. nebylo možné se dovolat z dětského tábora do nemocnice a muselo se přivolání sanitky řešit nějak „oklikou“, např. ve spolupráci s policií nebo armádou, jako zážitky z lovu na mamuty, byť někteří starší vyučující podobné situace stačili zažít na vlastní kůži.

¹ Existovaly indicie, že k tomu může dojít, např. brněnská studie, prokazující pokles zbytečných úmrtí na dopravní nehody na linkách MHD po zavedení spojení jednotlivých vozů s dispečinkem, ale nikdo si na ně v 90. letech v souvislosti s budováním mobilní sítě nevzpomenul.

Kapitola 3

Ionizující záření

Patří mezi ně elektromagnetické záření s vlnovou délkou kratší než UV-C, tj. rentgenové záření, γ záření a kosmické záření, dále částicové záření, nejčastěji se setkáváme s α (jádra atomů helia), β (proud elektronů, popř. jako β^+ proud pozitronů) a neutronovým zářením.

3.1 Zdroje

Zdroje ionizujícího záření rozeznáváme přírodní a umělé. Do přírodních zdrojů patří Slunce a další astronomické objekty, vyzařující velké výkony jak elektromagnetického (RTG, γ a kosmické), tak částicového záření. Další záření vzniká sekundárně, vlivem interakce záření a hmoty, např. atomů z nejvyšších vrstev atmosféry. Elektricky nabitě částice jsou magnetickým polem Země soustředovány do van Allenových pásů, které se klenou vysoko nad rovníkem, ale v oblasti magnetických pólů vstupují do atmosféry. Tyto pásy jsou zdrojem sekundární radiace a jejich interakce s atmosférou dává vznik polárním zářím, nicméně současně tvoří „past“ na částice, přicházející ze Slunce a z vesmíru; bez jejich existence by příkon tohoto záření výrazně narostl. Existují teorie, podle nichž některá zaznamenaná velká hynutí organismů v historii Země byla způsobena dočasným oslabením magnetického pole Země. Složka kosmického záření z van Allenových pásů je silně závislá na zeměpisné šířce (narůstá od rovníku k polárním oblastem). Intenzita kosmického záření rovněž roste s nadmořskou výškou, ještě více než v horách jsou exponováni cestující vysoko letícími letadly.

Vedle Slunce jsou na obloze zdroje rentgenového a γ záření, které se mu co do intenzity, alespoň v některých kategoriích vlnových délek, vyrovnají. Nejmohutnější předpokládaný zdroj těchto druhů záření, střed naší galaxie, je od nás odstíněn gigantickými oblaky prachu, umožňujícími pouze částečný průchod IR a radiových vln. Je to patrně štěstí, protože podle pozorování některých galaxií (které vidíme „shora“, respektive „zespodu“) mohou centra galaxií podobných našim produkovat stejné množství uvedených typů záření jako celý jejich zbytek). Zdrojem uvedených záření jsou další hvězdy, popř. hvězdy odlišné od Slunce, které během své existence procházejí stádiem supernovy. Silné záření vzniká i při interakcích zbytků po výbuchu supernovy (neutronové hvězdy nebo černé díry) s rozmetanou hmotou hvězdy, okolním hvězdným plynem, nebo ve vícenásobných hvězdných soustavách interakcí s hmotou vyvrženou z dalších hvězd v soustavě. Procesy v okolí neutronových hvězd a černých děr jsou rovněž horkými kandidáty na zdroj kosmického záření, které škálu elektromagnetického záření na jejím konci, v oblasti nejkratších vlnových délek a nejvyšších energií, uzavírá.

Vedle stabilních zdrojů pozorujeme na obloze (především pomocí družic, protože na povrch Země se toto záření skrze atmosféru nedostane) krátkodobé záblesky v oblasti γ záření. Zatím se nepodařilo jejich ztotožnění s nějakými optickými objekty, takže neznáme ani jejich vzdálenost (a tím ani intenzitu). Předpokládá se, že jejich původ je v objektech velikosti nanejvýše hvězdy. Jejich vzdálenost a hustota výskytu jsou důležité z hlediska prognózování pravděpodobnosti, s jakou se takový záblesk objeví v blízkém okolí Země (= do vzdálenosti několika desítek světelných let) a jaké to bude mít následky pro zemskou biosféru. Podle pesimistických prognóz by to znamenalo konec všech mnohobuněčných organismů na Zemi. Nejnovější výzkumy však tyto procesy spojují s událostmi kolem černých děr a podobných objektů, od Země velmi vzdálených.

Dalšími přirozenými zdroji ionizujícího záření jsou radioaktivní izotopy, vyskytující se v zemské atmosféře, kůře i zaintegrované do živých organismů. Jejich zdrojem jsou jednak radioizotopy s velmi dlouhým poločasem rozpadu, z období před vznikem sluneční soustavy, kdy v této části galaxie explodovaly jako supernovy hvězdy první generace a z jimi rozmetaného materiálu vzniklo Slunce a planety kolem něj. Tyto izotopy se rozpadají v rozpadových řadách, obsahujících i členy s poločasem rozpadu podstatně kratším.

Radioizotopy vznikají rovněž interakcí slunečního záření a prvků v horních vrstvách atmosféry. Takto vzniká např. izotop uhlíku C^{14} , který si udržuje konstantní koncentraci v organismech pokud jsou naživu a po jejich smrti už jen ubývá.

Některé přírodní radioizotopy mohou být uměle zakoncentrovány a využívány jako umělé zdroje záření.

Mezi umělé zdroje můžeme počítat „nepřirozené“ nakupení přírodních radioizotopů, uměle vytvořené radioizotopy (ať už záměrně, nebo vznikající jako spíše nežádoucí odpad v energetických reaktorech), rentgenové lampy, různé typy urychlovačů a v havarijním případě i jaderné exploze.

Z hlediska ozáření lidí při jaderných explozích jsou nebezpečné především neutrony a záření γ , ostatní záření mají kratší dolet. K neřízené řetězové reakci může dojít též při jaderných nehodách (např. slití roztoku štěpných izotopů do příliš velké nádoby, navíc nevhodného tvaru). Většinou dojde k nebezpečnému až letálnímu ozáření osob v okruhu několika až několika desítek metrů. Specifickým zdrojem jsou γ lasery, připravované v souvislosti s projektem SDI. V centru tohoto zařízení vybuchne jaderná nálož a okolo rozmístěné krystaly ze speciálních materiálů soustředí (během toho zlomku sekundy, než dojde k jejich zničení) vzniklé γ záření do úzkých paprsků o velmi vysoké intenzitě, které dokážou např. zničit elektroniku nepřátelské družice. Podle některých zdrojů jsou tyto zařízení schopna „vypálit“ instalace i pod desítkami metrů horniny nebo betonu, takže mohou být použita i k ničení velitelských stanovišť a podobných objektů na Zemi.

Rentgenové záření vzniká ve speciálních elektronkách bržděním urychlených elektronů na vhodném materiálu. Energie elektronů (daná napětím mezi anodou a katodou) determinuje vlnovou délku záření, s jejím nárůstem vlnová délka klesá (energie jednotlivých fotonů, a tím i pronikavost záření roste). Rentgenové záření vzniká i při některých jaderných procesech, stejným způsobem jako γ záření.

Částicové záření vzniká při rozkladu některých radioizotopů, některé částice mohou být ovlivněny urychlovači; takto ovlivněné částice mají definovanou energii a tvoří kompaktní svazek, mohou být proto užity např. v medicíně.¹

Umělé radioizotopy vznikají při ozařování prvků částicemi z urychlovačů, popř. ve štěpných reaktorech. Některé z nich jsou ze směsi vzniklých izotopů izolovány a využívány jako zdroje záření pro technické, výzkumné a v medicíně léčebné i diagnostické účely. Potenciálně by bylo možno takto využít i štěpné produkty energetických jaderných reaktorů (jaderné elektrárny), ale produkty speciálních malých reaktorů v současné době vycházejí levněji.

3.1.1 Radioizotopy

Radioizotopy jsou izotopy prvků s nestabilním jádrem. Nestabilita je dána odlišným počtem neutronů oproti stabilním izotopům. Některé prvky ovšem žádný stabilní izotop nemají (nebo není znám).

Radioizotopy jsou charakterizovány *aktivitou a poločasem rozpadu*.

¹ Viz betatron na MOU.

Poločas rozpadu je doba, za kterou se rozpadne právě polovina atomů příslušného izotopu. Tato doba je vlastně důsledkem toho, že každý atom izotopu (nezávisle na druhých) má určitou pravděpodobnost, že se následně rozpadne. Při velkých počtech atomů, které jsou v námi běžně vnímaných množstvích hmoty obsaženy, je realita velice blízka idealizovaným výpočtům podle počtu pravděpodobnosti.

Z poločasu rozpadu atomů příslušného izotopu a jejich množství obsaženém ve sledovaném materiálu plyne další charakteristika radioaktivních materiálů, a tou je **aktivita**. Vyjadřuje se jednotkou Becquerel [Bq], což je jeden rozpad za sekundu. Nejčastěji se však pracuje s měrnou aktivitou, která se vztahuje ke hmotnosti, popř. objemu (tedy $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ (v případě některých kapalin) nebo $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (v případě některých plynů, včetně vzduchu)).

Teoreticky je možné při známém množství izotopu o známém poločasu vypočítat aktivitu, nicméně v naprosté většině případů je aktivita vytvářena větším počtem izotopů, tudíž se musí zjišťovat měřením.

Pro pokles aktivity orientačně platí, že za dobu deseti poločasů poklesne aktivita na tisícinu. Problém nastává v situaci, kdy je radioaktivní kontaminace tvořena izotopy s extrémně rozdílnými poločasy rozpadu (běžný stav při nehodách jaderných zařízení i jaderných výbuších vč. jaderných zbraní). Aktivita po nehodách jaderných reaktorů nebo úložišť je akcentována skutečností, že se v těchto zařízeních hromadí izotopy se dlouhým poločasem rozpadu (protože ty s krátkým neustále zanikají), takže zamoření může být výrazně delší než zamoření použitím jaderné zbraně.

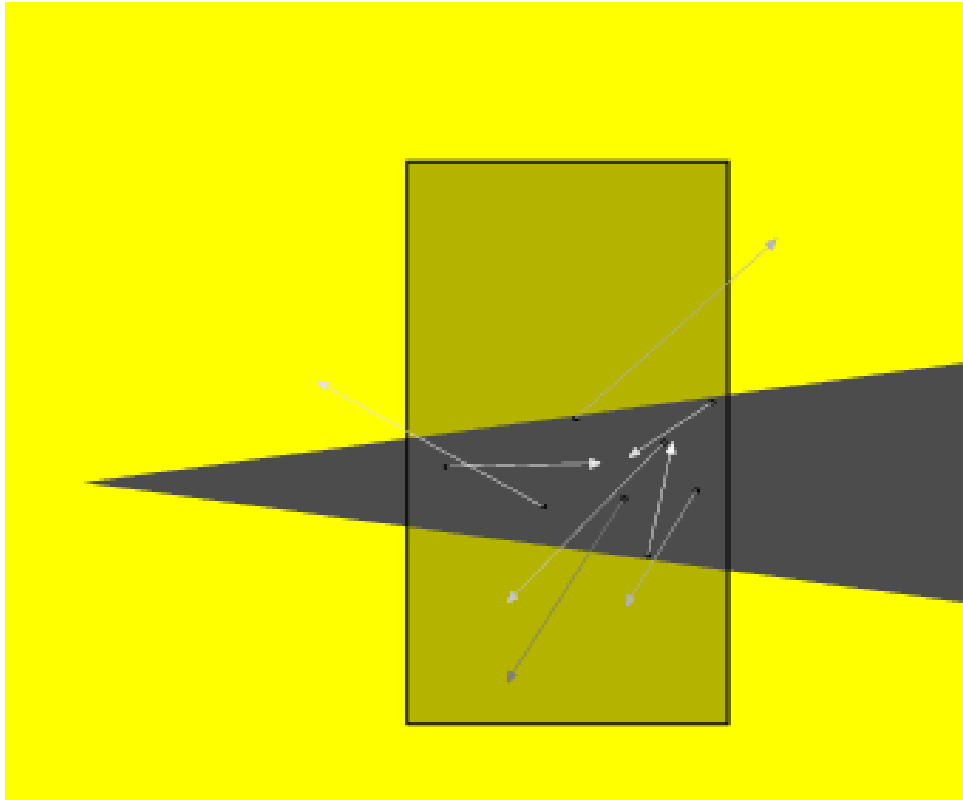
3.1.2 Jednotky pro měření ionizujícího záření

Záření předává ozařované hmotě energii. Tuto energii nazýváme **dávka** a vyjadřujeme ji jednotkou Gray (Gy) (představuje jeden joule předaný kilogramu ozařované hmoty). Může se (podle druhu záření) výrazně lišit od množství záření, které na ozařovaný objekt sice dopadne, ale projde skrz bez interakce se hmotou (a tudíž se nestává součástí dávky). Při interakci záření a hmoty vzniká sekundární záření, které je zčásti pohlceno v okolní hmotě, zčásti z ozařované hmoty vyletí ven.

Toto se nazývá Comptonův jev a jeho důsledkem je, že mohou být ozářeny i ty části těla, které jsou chráněny před primárním paprskem záření. Směr comptonovských fotonů je čistě náhodný, mohou tedy, mj., vyletovat i kolmo na směr primárního paprsku. Pochopitelně stejným mechanismem mohou vznikat i terciární a další fotony. Jediné omezení je, že následující foton má vždy nižší energii a tedy i pronikavost, takže s vyšší pravděpodobností předá svou energii ozařovanému objektu (tudíž se při vyšetření nebo ošetření pacienta ionizujícím zářením jedná o jev negativní). Tento jev může být snížen prakticky jen co největším zúžením primárního paprsku.

Energie, kterou toto záření vynesou z ozařovaného objektu, se nestává součástí dávky.

Dávku lze relativně snadno propočítat pro homogenní tělesa pravidelných geometrických tvarů. Člověk je ovšem těleso krajně nehomogenní (od vzduchu v plicích a plynových bublin ve střevě po tvrdé tkáně) a může být ke zdroji záření natočen různě, což dávku také ovlivní. Pro modelování sloužící k propočtu dávek, které člověk získá z různých typů záření v různých režimech ozařování, se používají speciální loutky z umělé hmoty, napodobující vlastnosti lidských tkání, umožňující zasunout do jednotlivých částí „těla“ měřící techniku, tzv. fantomy.



Obrázek 3.1.1 Comptonův jev. Paprsek prozařuje hranol a z ozářené části vy-
letují náhodně směřované comptonovské fotony.

3.1.3 Biologický účinek

Jednotlivé typy záření mají různý biologický účinek. Proto se pro hodnocení ozáření živých objektů používá **dávkový ekvivalent**, jehož jednotka je Sievert (Sv), což je Gy násobený kvalitativním faktorem příslušného typu záření. Protože ve zdravotnictví se nejčastěji setkáváme s rentgenovým a γ zářením, které mají kvalitativní faktor 1, tudíž jsou dávka a dávkový ekvivalent numericky shodné, dochází někdy k jejich zaměňování.

Pro prognózování účinku je ještě nutno zohlednit různou citlivost ozářených tkání (od tkání s vysokou citlivostí, jako je mléčná žláza, štítná žláza, kostní dřeň, až po tkáň relativně odolné, např. vazivo, kosti). Je tudíž rozdíl, zda bylo ozáření celotělové nebo jen části těla (a které), z jakého směru záření šlo, jak bylo pronikavé, atd.; to vše jsou faktory, které je nutno zohlednit při odhadu následků ozáření.

3.1.4 Měření ionizujícího záření

Dopady částic je možno měřit různými typy čidel. Velmi známý je *Geiger-Müllerův počítáč*. Čidlo tohoto zařízení je tvořeno trubicí s velmi zředěným plynem, jehož vodivost se průletem částice ionizujícího záření na okamžik změní, což navazující elektronické obvody převedou buď „klasicky“ do charakteristického cvakání ve sluchátkách nebo reproduktorku, modernější pak počítají průlety částic a vztahují je k časové ose. Z principu není podobnými měřidly možné zjišťovat částice s velmi malou pronikavostí (především *alpha*), protože ty nemohou proletět stěnou trubice.

α částice měříme u vzorků vzduchu nebo hmoty ve speciálních komůrkách, v nichž dopady těchto částic na vhorný luminifor (nejčastěji ZnS) vyvolají světelné záblesky, jejichž četnost v čase měří fotonásobič napojený na příslušnou elektroniku¹

Vedle detektorů existují ještě *dozimetry*, které sledují dávku, obdrženou určitým materiálem (nebo také člověkem).

Nejznámější jsou filmové dozimetry, používané pracovníky radiologických pracovišť a nošené nahrudníku. Jde o kousek speciálního fotografického filmu v obalu nepropouštějícím viditelné světlo. Části filmu jsou ještě překryty destičkami z různých materiálů. Po expozici (týdny až měsíce, pokud nedojde např. k nehodě) je film vyvolán a vyhodnoceno zčernání fotografické emulze. Ze zčernání ploch krytých materiály o různé propustnosti pro záření je možno odhadnout pronikavost záření, jemuž byl pracovník vystaven, a z tohoto údaje dávkový ekvivalent pro hluboké tkáně. U pracovníků manipulujících v blízkosti rentgenového paprsku rukama se používají též dozimetry prstenové.

Ty bývají (vzhledem k nutnosti malých rozměrů) nejčastěji na bázi termoluminiscence. Principem této metody je skutečnost, že řada minerálních krystalů je schopna v sobě zachytit energii ionizujícího záření a následně ji vyzářit při zahřátí na definovanou teplotu ve formě viditelného světla. Naměřené světelné záření je poroporcionální expozici ionizujícímu záření. Objev termoluminiscence znamenal vedle využití v dozimetrii rovněž převrat v archeologii, protože umožňuje určit absolutní stáří předmětů z pálené hlíny (na základě radioaktivity okolí a skutečnosti, že v době vypalování se termoluminiscenční „hodiny“ vynulují)²

Dozimetrie α záření je založena na existenci speciálních plastů, jejichž povrch dopad této částice naruší a toto narušení může být leptáním zvětšeno až na úroveň, umožňující jednotlivé dopady spočítat pod mikroskopem. Protože radon je čistý α zářič, používají se tyto dozimetry i pro stanovení jeho koncentrace v interiérech.

Nevýhodou dozimetrů je ovšem skutečnost, že svého nositele nijak nevarují v případě, kdy je ozařován třeba i letální dávkou záření. Proto tam, kde by mohlo dojít ke vzniku nebezpečných intenzit záření, je nutno dozimetrii vždy doplnit měřicí technikou, pracující a případně způsobující poplach v reálném čase.

Důležitou charakteristikou ionizujícího záření je jeho *pronikavost*, tj. schopnost proniknout do hloubi hmoty. Z tohoto hlediska mají nejnižší hodnoty částice (α , které ve vzduchu mají dolet několik cm a dokáže je zastavit už velice tenká vrstva hmoty (např. list papíru). Dolet částic (β je vyšší a v organismu mohou proniknout do hloubky několika cm. Neutrony mají pronikavost závislou na energii, ale obecně pro ně není několik km vzduchu žádnou překážkou a lidským tělem mohou dobře proletět skrz³. Ionizující elektromagnetické záření má rovněž pronikavost vysoce závislou na energii fotonů. Dlouhovlnná rentgenová záření mohou být zachycena z podstatné části již několika cm měkkých tkání lidského těla, krátkovlnné RTG a γ záření lidským tělem procházejí bez většího úbytku⁴. Vzhledem k definici dávky (do níž je započtena jen energie částic, které jsou v ozařované hmotě pohlceny) to znamená, že pronikavější záření bývají obecně méně škodlivá (vztaženo na počet rozpadů v okolí člověka nebo počty dopadů částic naměřené nějakým jednoduchým měřicím přístrojem).

¹ Dříve jeden výzkumný pracovník, adaptovaný na tmu, a druhý, v sousední světlé místnosti, zapisující hlášené záblesky a měřící čas.

² Problém nastal v okamžiku, kdy léta tradované a z učebnice do učebnice opisované datování různých kultur a událostí, případně zařazení konkrétních nálezů mezi pravé či naopak fasifikáty. v konfrontaci s tímto testem neobstály.

³ Tudíž s hmotou těla neinteragují a jejich energie není součástí obdržené dávky.

⁴ Proto pro ně platí totéž, co o neutronech.

Poměr mezi méně a více pronikavými zářeními částečně vyrovnává skutečnost, že pokud částice nebo světelné kvantum se hmotou reaguje, vnese do ní více energie částice záření pronikavého.

3.1.5 Dopad na zdraví

V případě ionizujícího záření rozlišujeme dva kvalitativně odlišné typy účinku: Účinky *stochastické* a *nestochastické*.

Účinky **nestochastické** mají práh a s dávkou (respektive dávkovým ekvivalentem) narůstá mohutnost těchto účinků. Mezi nestochastické účinky patří např. *nemoc z ozáření*. Ta se dostaví až po překročení určitého prahu a podle mohutnosti dávky se rozvine první stupeň (v lehčí nebo těžší variantě), druhý stupeň nebo třetí stupeň.

První stupeň je charakterizován poškozením kostní dřeně a orgánů produkujících imunokompetentní buňky, dochází k úmrtí na sekundární infekce, anémie apod. Lehké formy je možné přežít pod krytím antibiotik, s krevními transfúzemi, speciální dietou apod. U těžkých forem prvního stupně nepomůže zpravidla ani transplantace kostní dřeně.¹

Tuto formu nemoci z ozáření vytváříme uměle u pacientů s leukémií (zpravidla v kombinaci s působením vhodných cytostatik) a následně zavádíme do organismu kostní dřeň co nejvíce shodnou ve znacích HLA systému.

Druhý a třetí stupeň nemoci z ozáření mají infaustní prognózu. Druhý stupeň je charakterizován rozpadem sliznic trávicího ústrojí s následnými stavy podobnými těžkému průběhu cholery, dysenterie apod. Postižení umírají zpravidla do několika dnů od ozáření. Třetí stupeň je charakterizován narušením nervové činnosti, stavy zmatenosti až ztrátou vědomí. Smrt nastává do několika hodin, při vysokých intenzitách záření již v minutách.

Existují látky, které účinky záření zeslabují *radioprotektiva* nebo naopak zesilují *radiomimetika*. Jejich účinek je poněkud oslaben tím, že musejí být podány nějakou dobu (desítky minut až hodiny) před ozářením. Radioprotektiva mohou např. chránit personál, radiomimetika naopak dovolit snížení dávky pro léčebné ozařování. Ve vojenství jsou rezervovaná pro přípravu na jaderný konflikt, protože některá radiomimetika splňují vlastnosti látek, aplikovatelných jako bojové chemické zbraně, radioprotektiva bývají ve spektru léků u vojenských útvarů, s nimiž se počítá pro aktivity v první linii jaderného konfliktu.

Podávání jodidu, případně jiných substituentů působí nikoli přímo radioprotektivně, ale má vyblokovat uložení radionuklidů v organismu.

Dalším nestochastickým účinkem je poškození oka (až vznik zákalu vedoucí k oslepnutí), štítné žlázy (narušení její funkce; především v souvislosti s kumulací radioizotopů jodu), pohlavních žláz (sterilita), kůže (nekrózy, tzv. rentgenové vředy, které bývaly u rentgenologů palpujících při vyšetřování v paprsku RTG záření, a také u radiochemiků).

Stochastické účinky vznikají náhodně, jejich intenzita není závislá na dávce; na dávce je závislá pravděpodobnost, že účinky nastanou.

Stochastickými účinky jsou nádory u ozářených a jejich potomstva (prakticky se zohledňují dvě následující generace) a vrozené vývojové vady u potomstva ozářených (opět ve více generacích, opět jsou zohledňovány první dvě následující). Vrozené vady se mohou projevit také zvýšením potratovosti popř. snížením plodnosti (vrozená vada neslučitelná se životem může vést k potratu, je-li potrat příliš časný, pak není detekován jako takový, ale jen jako potíže s otěhotněním, a to jak u ozářených žen, tak u partnerek ozářených mužů).

¹ Teoreticky by mohli mít pracovníci potenciálně ohrožení nemocí z ozáření z profese uloženy v tekutém dusíku vzorky své kostní dřeně, aby se v případě nehody mohli podrobit autotransplantaci, u níž je prognóza lepší. V praxi se však něco podobného nepodařilo dosud zorganizovat.

Horní mez stochastických účinků je dána nástupem nestochastických účinků. Pod touto mezí byla experimentálně prokázána lineární závislost mezidávkou (dávkovým ekvivalentem) a jejími následky, zpravidla vyjádřenými jako suma úmrtí na nádory a vrozené vady u ozářené populace a následujících dvou generací, vztažených na vhodný počet obyvatel (100 000, 1 000 000). Průběh této závislosti v oblastech hodnot blízkých přirozenému radiačnímu pozadí je experimentálně obtížně dostupný. Především z toho důvodu, že indikovaný „spontánní výskyt“ chorob identických s následky přidaného ozařování může fluktuovat v dosti rozsáhlém rozmezí.

U některých organismů (jednobuněčné organismy, rostliny, nižší živočichové) a u nekompletních organismů (tkáňové kultury) byla popsána *radiační hormeze*, tj. nízké dávky vyvolávají zvýšení růstu a odolnosti vůči některým škodlivinám. Tento jev je vysvětlován vznikem mírného poškození a následným „přestřelením“ obranných mechanismů, vedoucích ke zvýšení kondice ozařovaných organismů.

Hormeze nebyla jednoznačně prokázána u vyšších živočichů, byť po ní bylo cíleně pátráno už ve 40. a 50. letech minulého století, a to za podmínek mnohdy výhodnějších pro tento výzkum než nyní.¹ Pro hormezi svědčí existence některých lidských populací v oblastech s vyšší radioaktivitou podloží (některé oblasti Indie, Brazílie), popř. populace v polárních oblastech (s vyšším příkonem kosmického záření). Ovšem uvedené populace jsou v porovnání s jinými odlišné jak po genetické stránce, tak i způsobem života; akceptovatelné je i vysvětlení, že v takovýchto oblastech může dojít k selekci jedinců s vyšší mírou schopnosti reparovat radiační poškození (podobné genetické dispozice jsou popsány pro některé chemické škodliviny).

Lineární model umožňuje snadný propočít stochastických následků na populaci, pokud je k dispozici počet ozářených a průměrný dávkový ekvivalent. Není-li u některého populačního segmentu překročen práh nestochastických účinků, je výsledek stejný i v případě nerovnoměrného ozářením populace.

3.1.6 Radiační zátěž populace

Zdroje radiační zátěže se liší podle životních podmínek populace. Pro naši populaci (tu část, která nemá profesionální expozici ionizujícímu záření) platí, že přibližně třetina celoročního dávkového ekvivalentu je realizována z radonu, o další třetinu se dělí záření z okolí (radioizotopy ve stavebních materiálech, vzduchu, půdě apod.) a radioizotopy z našeho vlastního organismu (včetně zmiňovaného C^{14}), o zbylou pak kosmické záření a umělé zdroje.

¹ Metodami, které by současné etické komise nepovolily.



Obrázek 3.1.2 Rozdělení zdrojů zátěže běžné populace; radon a umělé zdroje jsou preventabilní, ostatní nikoli

Tyto poměry jsou závislé na přírodních podmínkách a životním stylem, proto mohou být v jiných státech odlišné.¹

Z přírodních zdrojů je preventabilní především ozáření radonem. Radon (různé izotopy) se uvolňuje rozpadem izotopů radia. Izotopy radonu mají poločas rozpadu od několika hodin do několika dní. Rozpadají se alfa rozpadem, vzniká z nich izotop s velmi krátkým poločasem rozpadu a následně opět alfa rozpadem izotop stabilnější. Z atomu radonu tedy, když se začne rozpadat, vyjdou dvě částice α . Jak bylo uvedeno výše, jejich pronikavost je velice nízká. V podstatě je zastaví vrstva odumřelých buněk na povrchu pokožky. Jednu z mála příležitostí ozářit vitální (a tudíž ovlivnitelné) buňky mají atomy radonu, které byly vdechnuty do dýchacích cest a plic. Radon může ostřelováním částicemi α vyvolat v buňkách epitelů dýchacích cest přeměnu na rakovinové buňky a po kouření a znečištění ovzduší je to třetí nejdůležitější příčina tohoto nádoru u neprofesionálů (profesionálové mohou mít profesionální riziko radonu, vedoucí ke zvýšení jeho podílu na plicních nádorech, nebo naopak expozici jiným škodlivinám, např. azbestu, které se pak mohou svým významem dostat před radon).

Radon se uvolňuje z rádia obsaženého v uranové rudě; v této situaci ovšem naprostá většina jeho atomů zůstane uvězněna v krystalické mřížce oxidů těžkých kovů, které tato ruda obsahuje, a nedostane se ven. Podstatně důležitějším zdrojem radonu jsou horniny,

¹ Např. radon se zcela jistě nebude kumulovat v chýších z palmového listí nebo ve stanech.

v nichž je sice obsažena (v potrovnání s rudou) jen velice nepatrná koncentrace, ale díky tomu, že se jedná o km^3 horniny, může jít o značné množství rádia. Pokud má daná hornina vhodnou strukturu (např. žula, protože je krystalická a při tvorbě krystalů běžně dochází k tomu, že prvky, které jsou cizorodé vůči těm, z nichž se skládají krystaly, jsou vytlačovány do štěrbin mezi nimi), může z ní vytvořený radon unikat. To ještě podporuje stáří příslušného geologického útvaru, kdy následné horotvorné pochody vedly ke vzniku trhlin, v nichž se může radon shromažďovat a unikat na povrch. Protože se vývěr radonu soustředí do relativně malé oblasti, mohou ho unikat kvanta, která mohou vyvolat zdravotní riziko. Výron na volném prostranství je velice rychle promíchán s okolním vzduchem a radon se stává jeho součástí. V takovém případě bývá pro koncentraci radonu v ovzduší důležitější momentální meteorologická situace (především tlak vzduchu a teplota), která ovlivňuje výstup radonu z povrchových vrstev půdy. Jestliže je ovšem nad radonovým vývěrem postaven dům, slouží jako překážka pro rozptylování radonu, může v jeho interiéru dojít k extrémní koncentraci radonu (až přes $10\,000\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)¹, jejíž rizikovost je srovnávána s celoživotním kouřením několika cigaret denně.

Opatření ke snížení radonu jsou dvojí. Jednak zvýšené větrání (to platí i u následného výskytu radonu z jiných zdrojů), jednak zabránění průniku radonu z půdy do obytných prostor. V případě novostaveb nebo rozsáhlých rekonstrukcí je na místě velmi důkladná izolace základů, která průnik radonu zamezí.

Problémem je, že toto opatření může být u již stávajících domů cenově srovnatelné s jejich stržením a novou výstavbou. Proto se dělají další, méně náročná opatření. U podsklepených domů je možné uzavřít průchod ze sklepa do obytné části domu a zpřístupnit sklep zvláštním vchodem zvenčí, aby sklepní vzduch, syčený radonem pronikajícím z podloží, nepřecházel do obytných místností. U nepodsklepených domů se někdy budují tzv. radonové studny, což je na sucho vykopaná jáma s průlinčitými stěnami, do níž radon (výrazně těžší než vzduch) přednostně difunduje a průnik pod podlahu domu se omezí nebo úplně zastaví. Radonová studna je poté odvětrávána nějakým stálým větrákem, napojeným například na zvonkový transformátor.

Dalším zdrojem radonu může být stavební materiál domu. Důležitá je především jeho struktura. V historickém jádře Jáchymova byly vyklíženy některé památkově chráněné domy, mezi jejichž stavební materiál byl přimíšený smolinec, v době rozkvětu města nežádoucí hlušina při těžbě stříbrné rudy. Nicméně v těchto domech nebývá zvýšené množství radonu, pokud tam není ještě nějaký jeho další zdroj, nýbrž vysoké hodnoty záření γ . Příčinou je skutečnost, že v kompaktním kusu smolince sice vzniká úctyhodné množství radonu, ale jeho atomy se nemohou dostat z krystalické mřížky ven, takže do okolního vzduchu téměř nic z takto vzniklého radonu nepřejde.

Splavování ze svahů Krušných hor však zaneslo uranovou rudu do jílů, tvořících v některých lokalitách Podkrušnohorské uhelné pánve tenké mezivrstvy mezi slojemi hnědého uhlí. Vzhledem ke způsobu těžby se pak takto kontaminovaný jíl dostal do elektrárenských pecí a procesem spalování došlo k jeho zakoncentrování a vytvoření typické „popílkové“ struktury.

Rizikové jsou i haldy takto vzniklé škváry a popílku, v jejich bezprostřední blízkosti je však pohyb omezen vzhledem k výskytu dalších škodlivin, silné prašnosti i případného rizika úrazu. Na větší vzdálenost, požadovanou normami např. pro bytovou zástavbu, už dochází k tak velkému naředění radonu vzduchem, že koncentrace radonu v přízemním

¹ „Světový rekord“, ze Švédska, je kolem $300\,000\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, český rekord (z oblasti Středočeského plutonu) je cca třetinový; pro srovnání: v uranových dolech je limit pro radon v místech, kde se nezdržují stabilně horníci $200\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

vzduchu již není z tohoto zdroje významně ovlivňována. Problémem je použití takovéto škváry a popílků na stavební materiál, jakým jsou škvárobetonové tvárnice nebo panely.

V 70. a 80. letech minulého století docházelo k občasnému použití takovýchto materiálů pro individuální výrobu tvárnice, v jednom případě i k výrobě panelů a následné bytové výstavbě. V uvedených domech byly naměřeny hodnoty ve stovkách až tisících $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, ve výjimečně nepříznivých případech až hodnoty přes $10000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Byla prováděna opatření jako nucené větrání a hermetizace vnitřních povrchů stěn, v některých domcích byly obkládány spací kouty olověnými plechy (toto jako ochrana před gama zářením z uranové rudy).

I relativně nízký únik radonu ze stavebního materiálu může vést k vysokým koncentracím radonu v interiéru tehdy, jestliže se jedná o hermetizované budovy s recyklací podstatné části vzduchu skrze klimatizační zařízení. Důvodem je skutečnost, že radon patří do skupiny inertních plynů a není možné ho v běžném klimatizačním zařízení ze vzduchu odstranit.

Vzhledem k rozpustnosti radonu ve vodě je možný jeho výskyt v pramenech. Význam to má především v případě studní, protože z vodotečí radon snadno a poměrně rychle uniká. K dopravení skutečně významných množství radonu do bytu je potřeba větších objemů vody, běžné vaření a mytí nestačí. V případě vanové koupele nebývá průnik radonu přes hladinu vody ve vaně velký a zevní ozařování těla α částicemi není příliš rizikové, protože ty jsou zachyceny již povrchovou vrstvou odumřelých buněk na pokožce, kde je biologická odezva nemožná. Za rizikové je naopak považováno sprchování, protože rozpustnost radonu ve vodě po ohřevu (bojler, průtokový ohříváč) poklesne a po výtrysku vody ze sprchové růžice vzniká velký povrch, přes který radon z vody rychle uniká. Ve sprchovém koutě tak mohou, naštěstí jen na omezenou dobu, vzniknout opravdu velmi vysoké koncentrace radonu.

Posledním možným zdrojem radonu pro bytové interiéry je zemní plyn, jehož některá ložiska jsou radonem více či méně kontaminována. V současné době je toto riziko sledováno a jednotlivé šarže zemního plynu jsou proměřovány. V případě výskytu nadlimitního množství radonu jsou tyto šarže použity v průmyslových zařízeních, nikoli v domácnostech.

Stanovení radonu může být provedeno dvoují metodikou: Extrémně vysoké koncentrace radonu, jaké se nacházejí např. v půdním vzduchu, nad hladinou ve starých studnách, v silně zamořených sklepních prostorách apod. jsou měřeny sledováním záblesků při dopadech jednotlivých částic alfa záření na vhodný lumifor. Dříve to bylo prováděno pomocí pozorovatele dlouhodobě adaptovaného na tmu, v současné době jsou záblesky zesilovány fotonásobičem, převáděny na elektrické impulzy a sčítány elektronicky. Nižší koncentrace, očekávané např. v obytných interiérech, jsou stanovovány pomocí čidel ze speciálního plastu, který je narušován dopadem α částic. Jedná se o kolečka velikosti přibližně 10 Kč mince, která jsou v interiéru vystavena na vhodnou dobu (týdny až měsíce). Následně jsou vyleptána. Při tomto procesu jsou dopady jednotlivých částic α zviditelněny. Počet dopadů a doba expozice jsou přepočteny na aktivitu radonu¹

Další přírodní zdroje jsou preventabilní pouze ve velmi omezené míře. Vyžadují totiž např. přestěhování blíže k rovníku nebo do nižší nadmořské polohy, což obojí sníží tu složku kosmického záření, jejímž zdrojem jsou van Allenovy pásy. Radioaktivita ze stavebního materiálu budov (ve smyslu záření, nikoli výše uvedeného radonu) není příliš zajímavá, s výjimkou naprosto extrémních případů, k jakým by při elementárním dodr-

¹ Jak bylo uvedeno výše, radon je tvořen směsí více izotopů s různým poločasem rozpadu, tudíž je důležitější aktivita než koncentrace.

žení stavebních předpisů nemělo dojít. Je to mj. i proto, že budova odstíní zhruba tolik kosmického záření, kolik vyzáří ionizujícího záření stavební materiál.

Zdrojem určitých problémů mohou být radioaktivní skvrny, vzniklé v souvislosti s radioaktivním spadem po jaderných výbuších ve 40. a 50. letech minulého století a po havárii v JE Černobyl. Poloha míst ze zvýšenou radioaktivitou (v současné době tvořenou především izotopy Sr a Cs, kumulujícími se v živých organismech) je odborníkům známa a nebyl by problém jejich zakreslení např. do autoatlasu nebo turistických map. V uvedených lokalitách mohou být nakumulovány radioizotopy především v plodnicích hub, kdy jejich opakovaným požíváním hub z téže lokality v sezóně by mohlo být dosaženo z tohoto zdroje i několikanásobku ročního limitu pro populaci. Požadavek na zveřejnění uvedených lokalit je patrně legitimní a z hlediska zdravotní prevence obhajitelný.

Pro profesionální riziko jsou důležité některé umělé zdroje, používané v oblastidefektoskopie (zdroje intenzivního záření γ). Další oblasti s rizikem ionizujícího záření jsou všechna pracoviště s radionuklidy a jadernými reaktory, těžba a zpracování rudy i přepracování jaderného odpadu.

3.1.7 Zdravotnictví a ionizující záření

Z umělých zdrojů jsou nejdůležitější medicínské diagnostické úkony, a z nich rentgenové vyšetřování. Terapeutické úkony nejsou z tohoto hlediska tak zajímavé, protože jsou cíleny na osoby s již existujícím rizikem až ohrožením života, tudíž „vyháníme“ větší riziko rizikem nižším.

V případě RTG diagnostiky je stále se zvyšující tlak na to, aby bylo co nejvíce nahražováno alternativními zobrazovacími metodami (především ultrazvuk), aby byly používány přístroje umožňující nasazení nejkratší ještě vhodné vlnové délky (čím kratší vlnová délka tím menší procento fotonů uvázne ve tkáni a nepodílí se na dávce) a využití kontrastních látek.

Z jednotlivých RTG snímků je nejvíce zatěžující mamografie, při níž je až 70% fotonů zachyceno v ozařované tkáni. Další snižování zátěže zajišťuje použití zesilovačů obrazu, zesilovacích fólií apod., v současné době též digitalizace obrazu.

Při chodu rentgenového zařízení vznikají v ozářeném vzduchu volné radikály, jejichž vdechnutí má účinky velmi blízké ozáření. Z tohoto důvodu je nutné během chodu rentgenu a ještě i nějakou dobu po větrání, které odvede ozářený vzduch z interiéru. Uvedené radikály relativně rychle (minuty) zaniknou, takže ve vnějším prostředí riziko nepředstavují, na rozdíl od interiéru, kde by byl vdechován vzduch bezprostředně po ozáření.

Primární paprsek (před vstupem do těla) má být vykryt tak, aby byla ozářena co nejmenší plocha, právě potřebná pro příslušnou diagnostiku.¹ Toto krytí bývá dále doplňováno prostředky z olovnaté gumy (zástěry, popř. příkrývky).

Vyšetření prováděná pomocí radioizotopů jsou spojena s daleko menší radiační zátěží (uvádí se, že průměrné radioizotopové vyšetření zatěžuje dávkovým ekvivalentem 1 % průměrného rentgenového snímku).

V případě manipulace s otevřenými zářiči (= zdroj záření není hermeticky uzavřen, popř. je aplikován do pacienta např. v injekci) musí pracoviště splňovat předepsané hygienické normy, až na detaily odpovídající normám pro běžnou chemickou laboratoř. Stejně

¹ Jako odstrašující příklad ukazovali svého času na 3 LF UK snímky „srdce a plíce“ kojenců, na nichž byl kojeneček celý i s rukama maminky, která ho přidržovala. Přitom zajímavý byl skutečně jen ten hrudník a bylo možno ostatní části těla vykrytí clonami už na výstupu z přístroje.

tak je nutno zajistit i bezpečnost práce v laboratořích, jde je používáno stanovení některých látek pomocí RIA.¹

Zbytky roztoků, potřísněné jednorázové injekční stříkačky, tampony, použité kity apod., ale i např. moč a stolice pacientů² jsou uskladňovány v tzv. vymíracích komorách nebo boxech. Využívá se skutečnosti, že pro podobná vyšetření jsou užívány izotopy s velice krátkým poločasem rozpadu, takže již po několika dnech dojde k natolik výraznému poklesu aktivity tohoto odpadu, že může být likvidován spolu s běžným odpadem³ ze zdravotnických zařízení.

Kanalizace u těchto pracovišť je zpravidla upravena tak, aby jí procházel odpad dostatečně dlouhou dobu, během níž dojde k vymření radioizotopů na úroveň, umožňující vypuštění do běžné kanalizace.

V případě použití izotopů s delším poločasem rozpadu, např. tritia, je nutné veškerý takový odpad přesouvat do speciálních dlouhodobých skladů, kde je uložen spolu s průmyslovým a jiným odpadem kontaminovaným radioizotopy o vyšším poločasurozpadu. Takové sklady existují v nepřístupných štolách ve známé oblasti „Malá Amerika“ nedaleko Prahy.

Organizace diagnostických úkonů má co nejvíce snížit expozici pracovníků. Při snímkování by měl být v době ozařování pacient sám. v případech, v nichž to není možné (malé děti, mentálně nekompetentní osoby apod.) by měl s nimi být během snímkování doprovod (pokud nejde o gravidní ženu), a to někdo z rodiny v případě ambulantních pacientů, zdravotnický personál z příslušného oddělení u hospitalizovaných pacientů.

Ovlivnění okolí pracovišti s výskytem záření. Toto ovlivnění je řešeno jednak vzdáleností (budování těchto pracovišť v odlehlejší části zdravotnického zařízení) a izolačními materiály. Pro dveře se zpravidla používají olověné plechy (a musí být technicky vyřešena jejich vyšší váha), pro okna a podobné průhledné stínící přepážky olovnaté sklo.⁴ Existují také protiradiační nátěry, které lze uplatnit na některé plochy.

Stěny jsou stíněny pomocí síranu barnatého, který může být přidáván do betonu, omítek i sádry. Všechny průrazy skrze stěny (voda, plyn, elektřina, sítě) by měly být zalomené, aby nevznikla rovná díra, skrze kterou paprsek záření projde ven.

Uvedené ochranné prvky je třeba *hlídat* při dozoru na opravy a úpravy v takto izolovaném prostoru (byl pod novou elektrickou krabicí umístěn materiál s barytem o dostatečné tloušťce? byly omítky nahrazeny omítkou rovněž s baritem? byly nové průrazy zalomené a vedené v baritové omítkě / betonu? byl narušený protiradiační nátěr nahrazen barvou stejných vlastností? atd.). Ve starších budovách je třeba dávat pozor na výměnu kanalizace a elektroinstalace, v nichž se dříve⁵ používalo olovo (odpadové trubky, pláště kabelů) a původní projekt mohl počítat s jejich izolačními vlastnostmi v průřezích skrze stínící zdi, takže jejich náhrada moderními materiály, např. plasty, může vytvořit „okna“ ve stínění místnosti se zdroji záření.

Na dozoru by se měl ve vlastním zájmu podílet i odborný personál zařízení, protože jednak chrání své zdraví, jednak může, zejména vedení pracoviště spolu s vedením zdravotnického zařízení, nést právní (spolu)odpovědnost za defekty v těchto protiradiačních úpravách.

¹ Radioimmunoassay, při níž je stanovována sledovaná látka pomocí kompetice s toutéž látkou značenou radionuklidem, nejčastěji radioaktivním jodem.

² Není-li k dispozici speciální úprava kanalizace.

³ Většinou ovšem biologicky kontaminovaným.

⁴ Pozor, nemá končit ve skleněném odpadu!

⁵ Ještě polovina minulého století.

3.2 Problematika radiofobie

Smyslová nejistitelnost ionizujícího záření¹ představuje jeden ze zdrojů obav z ionizujícího záření. Dalším zdrojem jsou reálně existující nehody i snahy úřadů některé negativní jevy v souvislosti s následky záření zatajovat². Důvěryhodnosti oficiálních prohlášení našich státních představitelů nepřispělo ani utajování informací v souvislosti s jadernou havárií v Černobyli. Uvedené zkušenosti běžné populace vytvořily živnou půdu pro apriorní odmítání jakéhokoli úředního dementi.

V souvislosti s ionizujícím zářením se objevily spekulace o rizikovosti pacientů, kteří se podrobují radioterapii. V případě zevně ozařovaných pacientů prakticky žádné zbytkové záření neexistuje. V případě pacientů s implantovanými uzavřenými zářiči je kontakt s nimi mnohonásobně menší zátěží než např. nošení hodinek se světélkujícími ručičkami, buzenými přídatkem nějakého radioizotopu, tedy opět zanedbatelně malé. Určité riziko těsného kontaktu by se mohlo vyskytnout v souvislosti s pacienty, kteří byli vyšetřováni preparáty s obsahem radioizotopů (pokud by se jednalo o zářiče γ nebo β). U čistých α zářičů takového riziko nehrozí, protože jeho částice neproletí ven z těla povrchovou vrstvou pokožky.

U všech typů existuje riziko spojené s krví či exkrementy pacientů v době, než se použitý izotop vyloučí z těla, popř. dojde k jeho rozpadu na zanedbatelné hodnoty. Proto je prováděn výše popsáný sběr a speciální uložení kontaminovaných zdravotních materiálů a exkrementů.

Uvedená smyslová nejistitelnost ionizujícího záření vede buď k silnému nadhodnocení nebo naopak podhodnocení rizika. Jako nadhodnocení lze uvést příklad pracovnice, která se poranila jehlou plnicího stroje při plnění ampulí roztokem technecia. Tento prvek je čistý zářič α , takže riziko pro okolní osoby bylo prakticky nulové, a to i v přípravě cesty do zdravotnického zařízení pomocí MHD, přesto se zbytečně čekalo na speciální sanitku pro „radioaktivně kontaminované pacienty“. Jako podhodnocení lze uvést případ pracovníka, kterému při defektoskopii vypadl z ozařovací hlavice váleček radioaktivního kobaltu (silný zářič γ), načež jej nechráněnou rukou vrátil do hlavice a tu zavřel. Během následujících měsíců mu postupně na příslušné ruce upadaly prsty a oslepl na přivrácené oko.³

Bezpečnost energetických jaderných reaktorů je vesměs zajištěna nadstandardním způsobem a pravděpodobnost úniku radioaktivity mimo oblast elektrárny je i při těžké nehodě velmi malá. Problémem by mohl být teroristický útok, použití těžké vojenské techniky⁴ nebo meteoritický impakt. Větší problém představuje těžba uranové rudy, při níž zůstává hlušina se zbytky uranu na haldách a je potenciálním zdrojem kontaminace, byť zde jednoznačně převažují toxické účinky uranu a dalších těžkých kovů (analogicky jako při těžbě jiných kovových rud). Těžba uranu pro potřeby energetiky tvoří ovšem malé procento uranu vytěženého pro potřeby vojenské.

Hlavní problém jaderné energetiky představuje vyhořelé palivo, které je podle některých koncepcí přepracováváno (čímž se zvyšuje jeho stabilita a snižuje se objem), nebo

¹ Pokud pomineme vnímání záblesků při průletu vysokoenergetických částic sítnicí oka; tento jev popsali kosmonauti.

² V USA i SSSR byly v 50. letech prováděny velmi problematické experimenty, kdy byli ionizujícímu záření i radioaktivnímu spadu vystavováni nic netušící civilisté (někteří občané USA, respektive pozůstalí, byli v závěru minulého století odškodněni). V SSSR byly testovány účinky jaderných zbraní na vojenské technice i „dobrovolných“.

³ Kdyby ten váleček byl rozžhavený do rudého žáru, zcela jistě by na něj nesahal, přestože by vzniklé poranění bylo reálně menší.

⁴ Podle některých konvencí je útok na civilní jaderné zařízení s následným únikem radiace považován za útok jaderný se všemi odpovídajícími následky proútočnicka.

jsou skladovány přímo tyče. Materiál je nejprve delší dobu uchováván v prostorách elektrárny, protože rozpadové teplo izotopů s krátkým poločasem rozpadu by vedlo k jeho zahřátí nad úroveň tavení nebo odpařování některých složek. Po vymření podstatné části izotopů s krátkým poločasem je už možné odpad skladovat ve speciálních kontejnerech, v nichž je zajištěno pasivní chlazení. Tyto kontejnery musejí být bezpečně uloženy na dobu řádově desetitisíců let, což představuje hlavní problém radioaktivního odpadu, protože lidstvo jednoduše nemá s tak dlouhým skladováním čehokoli žádné praktické zkušenosti¹.

Je rovněž jasné, že vyhořelé palivo, potenciálně zajímavé jak pro teroristy, tak i pro některé režimy usilující o nezávislou výrobu jaderných zbraní, bude muset být nějakým způsobem dlouhodobě stráženo. Režim v okolí takového zařízení bude patrně srovnatelný s režimem, jaký panoval před rokem 1989 v hraničním pásmu.

Náklady s tím spojené značně přesahují období, kdy je z téhož paliva uvolňována energie pro výrobu elektřiny. Tímto mechanismem dochází k oddělení přínosu (pro generaci palivo využívající) a nákladů na uskladňování (pro generaci zajišťující bezpečnost odpadu), přičemž neexistuje reálná možnost efektivně předat výnost z výroby energie vzdáleným potomkům.

Na druhé straně je současný jaderný odpad potenciálním zdrojem jednak paliva pro tzv. množivé reaktory, jednak řady užitečných prvků a radioizotopů. Lze očekávat, že s pokročením technické úrovně distanční práce s těmito materiály bude tento odpad využíván jako cenná surovina. Mezi prvky, které se v tomto odpadu vyskytují, jsou i „prvky vzácných zemin“, nezbytné pro optoelektroniku(LED), na jejichž těžbu má tč. světový monopol Čína, která jej využívá i politicky a ideologicky.²

Ochuzený uran (zbytky uranu po výrobě obohaceného, vhodného do některých typů jaderných reaktorů a pro jaderné nálože) se využívá ve vojenství pro svou vysokou hustotu. Jsou z něj vytvářena vřetena, tvořící centrální části protipancéřových střel. Při explozi střely dojde k částečnému odpaření uranu a vzniku jemného prachu s obsahem oxidů uranu a dalších sloučenin tohoto kovu. Problémem opět není radioaktivita, ale vysoká toxicita uranu, srovnatelná s toxicitou jiných těžkých kovů.

Při radiofobii jsou tedy některé reálně existující negativní účinky ionizujícího záření nadhodnocovány, někdy jsou zaměňovány účinky záření s toxicitou zářičů. Radiofobii může odstranit pouze dlouhodobá otevřená informační politika, jaká není u nás (a nejen u nás a nejen v souvislosti s radioaktivitou) obvyklá.

3.2.1 Jaderné nehody

Jaderné nehody jsou odstupňované od nejlehčích po nejtěžší následujícím způsobem:

- 0 – odchylka
- 1 – anomálie
- 2 – nehoda
- 3 – vážná nehoda
- 4 – havárie bez vážnějšího rizika
- 5 – havárie s rizikem vně zařízení
- 6 – těžká havárie
- 7 – velmi těžká havárie

¹ A pokud ano, tak negativní: Pyramidy a jiné královské hrobky byly v průběhu podstatně kratší doby vyloupeny s účinností téměř sto procentní.

² Aneb jak by mohl rozvoj jaderné energetiky u nás mít dopad na dodržování lidských práv v Číně.

Vedle této stupnice existují ještě termíny „projektová“ a „nadprojektová“ havárie. *Projektová* havárie je taková, kterou je s to jaderné zařízení zvládnout vlastními silami pomocí zařízení, která jsou jeho integrální součástí. *Nadprojektová* možnosti samotného zařízení překračuje, nicméně i tak může být zvládnutelná (zvládnutí je zaintegrováno do reakcí systémů a organizací, chránících stát při mimořádných událostech). Pochopitelně, teoreticky existují i nezvládnutelné situace, např. bezohledě vedená válka, teoretický útok velkého rozsahu, opravdu velký meteoritický impakt apod., nicméně jde o situace, při nichž by bylo postižení jaderného zařízení více-méně podružné.

Jaderná nehoda v *Černobyli* 26. 4. 1986 byla paradoxně vyvolána snahou o zavedení vyšší úrovně bezpečnosti jaderných reaktorů. Pokus, který byl proveden, měl zjistit, zda je možné reaktor v případě havárie chladit za pomoci pohybové energie, která je uložena v rotující turbíně.

Pokud byl ovšem proveden pod silným tlakem politických autorit bez náležité přípravy. Dokonce musela být „hardwarově“ odstraněna některá bezpečnostní zařízení (údajně štípacími kleštěmi), aby bylo možné v něm pokračovat. V situaci, kdy se ukázalo, že energie z rotující turbíny nestačí, se obsluha reaktoru ocitla ve slepé uličce. Nicméně i tehdy by se reaktor patrně regulérně odstavil, avšak obsluha se chtěla tomuto konci „za každou cenu“ vyhnout, protože by vedl k několikátýdení odstávce reaktoru. Proto se jej pokusila znovu zapnout. Protože jaderný reaktor není stolní lampička, při tomto zapínání se dostal do nestabilního stavu, přestal být říditelný a nakonec se přehřál a explodoval.

Nebezpečnost radioaktivity byla dána tím, že šlo o reaktor moderovaný grafitem, který v podstatě představoval výrobu zbrojního plutonia maskovanou jako jaderné energetické zařízení (při moderování grafitem vzniká velké množství těžkých nestabilních izotopů, vč. plutonia, vhodného k výrobě jaderných náloží).¹

Grafit, prostoupený velkým množstvím silně radioaktivních izotopů s dlouhým poločasem rozpadu, byl rozhozen do okolí reaktoru. V reaktoru samotném začal hořet a uvolněné izotopy se staly součástí „Čerlobylského mraku“. Nicméně i tak byla naprostá většina rozptýlené radioaktivity tvořena izotopy jodu.

S výjimkou pracovníků elektrárny a hasičů byla populace postižena především radioaktivním jodem, vyvolávajícím především nádory štítné žlázy s velmi dobrou prognózou QUOD VITAM.

Hlavním problémem byla reakce vlády SSSR a vlád dalších socialistických zemí, kdy opatření pro ochranu obyvatelstva bylo provedeno pozdě, pokud vůbec provedeno bylo a naopak byla proveden řada opatření zcela kontraproduktivních, jako pořádání Závodu míru v Kyjevě a pořádání prvomájových průvodů v době kolem kulminace spadu.

Populace z evakuovaného území byla rozptýlena po SSSR v režimu utajování a systematického ničení dokumentace, proto chybí a budou chybět objektivní údaje o dopadu této havárie na zdraví v delším časovém horizontu.²

V Československu měla černobylská havárie však i paradoxně pozitivní dopad. Protože „Černobylský mrak“ prošel nad Moravskou bránou, kde byla nasávací oblast tehdejšího monopolního výrobce Sunaru³, došlo k nadlimitní kontaminaci místního mléka radioaktivním jodem. Výroba byla tudíž velice rychle přestěhována do nepostižených částí Čech a po několika letech vrácena zpět. Při tomto stěhování byl dvakrát po sobě proveden

¹ Bomba pro Nagasaki byla plutoniová.

² Je dobrý připomenout i to, že vše se dělo za podmínek gorbačovského „uvolňování“ socialismu a „glasnosti“, a že tudíž ani takto reformovaný socialismus se nedokázal chovat jinak než stalinský režim v době havárie skladu radioaktivního materiálu na Uralu a v souvislosti s testováním účinků jaderného výbuchu na živých vojácích.

³ Sušené mléko pro kojeneckou a barolecí mléčnou výživu.

generální úklid, jehož důsledkem bylo naprosté vymizení případů Reyova syndromu u novorozenců a kojenců, vyvolaného aflatoxiny v mléčné výživě, první „počernobylské“ byly popsány až v 90. letech.¹

Od cca 1 000 „černobylských mrtvých“, vypočtených na základě ozáření obyvatelstva (pro ozářenou generaci, tedy v reálu něco přes deset ročně pro celé bývalé Československo), je tedy třeba odečíst několik stovek „Černobylem zachráněných“ dětí, které nezemřely na Reyův syndrom. Po roce 1990 se navíc ve větší míře uplatnily prolaktační aktivity, které snížily toto riziko cestou zvýšení počtu kojených dětí a prodloužením průměrné doby kojení.

V *Jaslovských Bohunicích* stojí fakticky dvě elektrárny. Jedna z nich, V1 je klasická sovětská konstrukce, v podstatě odpovídající koncepci reaktorů v JE Dukovany. Druhá, A1 je původní československá konstrukce, reaktor moderovaný těžkou vodou a chlazený CO_2 . Tato konstrukce byla na svou dobu velice progresivní. Umožňovala např. měnit palivové tyče za plného chodu reaktoru, zatímco V1 (a také Dukovany i Temelín) potřebují k tomuto úkonu reaktor vypnout a vychladit, provést tedy několikátýdenní odstávku zařízení. Za tuto progresivitu a nevyzkoušenost platila poměrně zložitou obsluhou, která nakonec vedla k fatální havárii.

5. 1. 1976 došlo k první těžké nehodě, vyvolané prasknutím těsnění. Tuto nehodu zachránila obsluha utěsněním reaktoru zavážecím zařízením. Při nehodě zahynuli dva pracovníci, kteří byli v té době pod reaktorem. Zahynuli udušením CO_2 , který tyto prostory po úniku z reaktoru zaplavil, nikoli na radioaktivitu. Havárie byla vyhodnocena stupněm 3.

22. 2. 1977 došlo k prasknutí silikagelového sáčku v novém souboru tyčí (silikagel zde působil jako exikátor při transportu a uskladnění), který obsluha zapomenula před zavedením nového souboru palivových tyčí do reaktoru vyjmout. Sáček „v korunové ceně“ způsobil zablokování kanálů, jimiž se do reaktoru v případě potřeby zasouvají kadmiové tyče (pohlcují neutrony a zastavují štěpnou reakci) a následně se stal reaktor neovladatelným a došlo k roztavení jádra a částečné dehermetizaci. Byla silně kontaminována voda primárního okruhu a reaktor musel být odstaven do režimu čekání na takový pokles radioaktivity, který umožní jeho technickou likvidaci (což je prováděno v současné době). Havárie byla vyhodnocena stupněm 4.

Obě havárie elektrárna ustála v rámci projektu, nejednalo se tedy o „nadprojektové havárie“.

V elektrárně Fukušima I došlo 11. 3. 2011 k nadprojektové havárii. Uvedená havárie byla způsobena zemětřesením a převážně následnou vlnou tsunami o výšce, s níž projekt nepočítal. Reaktory primárně přírodní katastrofu ustály, ale měly být následně chlazeny, čemuž zabránilo poškození vedení (z něhož mohl být brán proud do elektrárny), poškození části agregátů a těm zbývajícím nebyla včas dodána nafta. Uvedené problémy byly způsobeny tím, že obnovení dodávky energie do elektrárny mělo nastavenou v plánu záchranných prací příliš nízkou prioritu a vedení záchranných prací nezareagovalo s dostatečnou pružností na vznik této situace.

Po ztrátě proudu se již stojící reaktory přehřály rozpadovým teplem, vytavily a částečně dehermetizovaly.

Radiace v menší míře (a hlavně především ve formě radioaktivních izotopů jodu) unikla mimo objekt a zamořila přilehlé území. To bylo dočasně evakuováno (v současné

¹ Jak jsme na našem pracovišti mohli pozorovat při vedení diplomových prací studentů přírodovědecké fakulty, z roku na rok výrazně poklesl počet zárodků mikroskopických hub v Sunaru z desítek až stovek v gramu na jednotky až zlomky jednotek v gramu.

době je již významná část obyvatel zpět ve svých domovech). V současnosti již také probíhají práce na odstraňování škod pomocí dšlkově řízených robotů a podobných zařízení.

Všechny mrtvé pracovníky elektrárny má nasvědování zaplavení části tohoto objektu nadprojektovou tsunami, nikoli radioaktivita nebo únik z reaktoru.

Havárie byla ohodnocena stupněm 7.

Na havárii reagovala zelená část politické scény naprosto hystericky a neadekvátně. V Německu vedla k uzavření zcela bezproblémově funkčních jaderných elektráren a pod hlavičkou Energiewende k jejich „náhradě“ elektřinou z větrných parků v Severním moři. Problémem je, že tato energie velmi chaoticky kolísá a ke stabilizaci sítě bylo nutno zvýšit spotřebu hnědého a černého uhlí německou energetikou, což je částečně maskováno „kreativním výkaznictvím“.

Zvýšila se také závislost Německa na ruském plynu, kterou ještě posílí dokončení plynovodu Nord Stream II.

Německo rovněž nemá kapacity na transfer elektřiny ze Severního moře na průmyslový jih a jihozápad, takže tuto energii posílá zčásti přes polskou a českou rozvodnou síť (do Bavorska). Tyto sítě jsou občas německou „ekologickou“ elektřinou zatěžovány na více než sto procent plánované kapacity (tj. fungují na úrovni nadprojektových rezerv).

Radioaktivita z Fukušimy byla sice naměřena i na našem území, ale to je dáno extrémní citlivostí používaných metod, které jsou schopny zachytit i rozdíl mezi různými typy povrchu chodníků (např. náhradu asfaltu betonem nebo keramickými dlaždicemi, obsahujícími více K^{40}).

3.2.2 Jaderná energetika a zdraví

V současné době je systematicky sledován vliv JE Temelín na zdraví okolní populace.

Byly vytypovány venkovské a městské oblasti v blízkosti a větší vzdálenosti od tohoto zařízení. Uvedené oblasti jsou ještě rozděleny na podoblasti, rovněž na základě vzdálenosti od jaderné elektrárny.

Data pro vyšetření zdravotního stavu (a možných dalších faktorů) obyvatelstva jsou získávána od Českého statistického úřadu. Po věkové standardizaci jsou sledovány následné parametry (zvláště muži a ženy):

- Celková úmrtnost
- Úmrtnost na kardiovaskulární choroby
- Úmrtnost na zhoubné nádory
- Celková úmrtnost v produktivním věku
- Úmrtnost na kardiovaskulární choroby v produktivním věku
- Úmrtnost na nádory v produktivním věku
- Tzv. „ztracená léta“
- Výskyt samovolných potratů
- Počet dětí s porodní hmotností pod 2 500g

Navíc jsou počítány tříleté klouzavé průměry uvedených parametrů.

Navíc je sledována sociodemografická charakteristika populace v daných lokalitách.

Bylo nalezeno lepší zdraví v oblastech blíže k jaderné elektrárně, což je vysvětlitelné nikoli „příznivým vlivem záření“, ale lepšími sociálními podmínkami (zaměstnanost a vyšší platy). Byla zachyceny při longitudinálním sledování i některé negativní trendy ve zdravotních charakteristikách, ale ty jsou stejné v blízkých i vzdálených oblastech.

Obecně byly v oblastech některých jaderných elektráren nalezeny vyšší výskyty některých typů dětských leukémií. Všeobecně je však přijímán názor, že se jedná o důsledek

míšení velkých počtů obyvatel (nejprve dojde k několikaletému přílivu pracovníků elektrárnu stavějících, poté přísun kmenových pracovníků provozu a údržby), kdy dochází k opakované infekci viry, zvyšujícími riziko těchto malignit.

Obsah

1	od	1
2	Zdravotn škozen ionizuj m z■n	3
2.1	Ultrafialov āřen	3
2.1.1	Zdroje	3
2.1.2	■inky	3
2.2	Viditeln o	5
2.2.1	Zdroje	5
2.2.2	■inky	5
2.2.3	Negativn■činky na zdrav	6
2.3	Infra ven āřen	6
2.3.1	Zdroje	7
2.3.2	■inky	7
2.4	Z■n yšš vlnových d	7
2.4.1	■inky	8
3	Ionizuj z■n	9
3.1	Zdroje	9
3.1.1	Radioizotopy	10
3.1.2	Jednotky pro m■n nizuj ho z■n	11
3.1.3	Biologický ú ek	12
3.1.4	M■n nizuj ho z■n	12
3.1.5	Dopad na zdrav	14
3.1.6	Radia z ž populace	15
3.1.7	Zdravotnictv onizuj z■n	19
3.2	Problematika radiofobie	21
3.2.1	Jadern hody	22
3.2.2	Jadern ergetika a zdrav	25