

Záření a zdraví

Obsah

1	Úvod	3
2	Zdravotní poškození neionizujícím zářením	5
2.1	Ultrafialové záření	5
2.2	Viditelné světlo	8
2.3	Infračervené záření	11
2.4	Záření o vyšších vlnových délkách	13
3	Ionizující záření	16
3.1	Zdroje	16
3.2	Měření ionizujícího záření	20
3.3	Jednotky	24
3.4	Biologický účinek ionizujícího záření	26
3.5	Radiační zátěž populace	29
3.6	Problematika radiofobie	38

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.

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. 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 pro nás „exotická“ částicová záření, např. neutrina.

Kapitola 2

Zdravotní poškození neionizujícím zářením



Obrázek 0.1 Stupnice záření dle vlnových délek, šedě je vyznačeno viditelné světlo

2.1 Ultrafialové záření

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

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. Zhruba platí, že vlnové délky vzdálenější viditelnému světlu jsou pohlcovány silněji.

Dalším zdrojem jsou výbojky, vydávající čárové spektrum, odpovídající vyzařování excitovaných elektronů na vnějších

sférách atomů prvku, který je použit jako pracovní látka. Velice často to bývá rtuť.

V posledních několika letech se objevily LED, vyzařující UV záření v kategorii UVA.

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 má i ozón přízemní, který je jinak nežádoucí složkou tzv. fotochemického smogu, vznikajícího lidskou činností.

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 nemají epidemiologové příliš v lásce, protože sterilizační účinek je silně závislý na kvalitě povrchu a jeho čistotě. Seběmenší nerovnost nebo zrnko prachu vytváří stín, v němž mohou bakterie přežít delší dobu. 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.

UV záření má účinky jednak příznivé, spočívající v tom, že ozářením kůže vlnovými délkami kolem 300 nm vzniká v povr-

chových kapilárách z cholesterolu kolujícím v krvi provitamín, který organismus dokáže dle potřeby přeměnit na vitamín D (= na rozdíl od vitamínu D v kapkách a kapslích se nelze touto cestou předávkovat, protože přeměnu na aktivní formu může organismus ovlivňovat). Ultrafialové záření má rovněž baktericidní účinky, přímo na kůži se aplikovalo např. u kožní tuberkulózy; má příznivý vliv i na některé neinfekční afekce kůže (např. lupénka). 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 vyskytují na místech těla nechráněných oděvem a u profesí, pracujících na volném prostranství. Patří mezi nejčastější zhoubné nádory (z hlediska histologických znaků) 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 na slunce. Na produkci provitamínu D plně postačuje denně cca 1 hodina v lehkém oděvu v polostínu zejména v jižnějších zemích v časném dopoledni nebo pozdním odpoledni. Vyšší expozice žádný další pozitivní efekt nepřinášejí, zato zvyšují riziko kožních nádorů. 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 pouze na viditelné světlo, takže se roztahuje a proud UV záření poškozují hluboké tkáně oka víc, než kdyby brýle nebyly. 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.¹

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 pozvolný. 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. Jeho zdrojem mohou být rovněž zahřáté předměty (spojité spektrum, charakterizované stupni Kelvina), výbojky (čárové spektrum) a v poslední době stále více rozšířené LED.

Viditelné světlo s účastní vidění. Existují hygienické normy pro osvětlení, charakterizované osvětlením (v luxech – jednotka pro množství světla, dopadající na metr čtvereční plo-

¹ Tmavé brýle těchto vlastností se snad už ani nedají koupit, mohly by ještě přetrvávat v rodinách jako např. „rezervní brýle po babičce“.

chy) a záviselí 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 vyšetřování)¹. 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.

¹ Skiaskopie je dnes již asi obsolentní, pokud byste ji chtěli vidět, pusťte si film „Kam čert nemůže“, v němž M. Horníček takto vyšetřuje J. Hlaváčovou

Osvětlení zářivkami, i kompaktními, a LED svítidly může barvy deformovat, protože tyto prostředky dávají čárové spektrum. Tudíž při jejich použití mohou být přehlédnuty i významné změny barvy, pokud se odehrávají v mezerách mezi čárami. Z tohoto důvodu jsou tato svítidla silně nevhodná i pro galérie, muzea a podobné prostory, protože mohou silně deformovat vyznění barev vystavených exponátů.¹

Je dobré vědět také to, že čím silnější zdroj, tím efektivnější je přeměna elektřiny na světlo. 100 W žárovku nenahradíme 60 a 40 W, ale buď dvěma 60 W (budou svítit o něco silněji) nebo třemi 40 W (budou svítit o něco slaběji). 25 W žárovek bychom museli použít nejméně šest. Podobné zákonitosti platí i pro kompaktní zářivky a snad alespoň i pro některé typy LED svítidel.

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).

Výbojky a zářivky poskytují 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).

¹ Naprostý nesmysl je křišťálový lustr s kompaktními nebo LED svítidly, protože smysl tohoto zařízení je vrhání duhových záblesků světla, lámaného broušenými skleněnými prvky, k čemuž v případě čárových zdrojů světla nemůže docházet. To už je lepší náhrada žárovek svíčkami.

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 fotodermatitidu 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 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) ¹. Jeho zdrojem jsou zahřáté předměty, některé výbojky a existují i infračervené LED zdroje², IR-A a IR-B jsou složkou slunečního záření, dopadajícího na povrch Země.

Při vysokých intenzitách má infračervené záření tepelný efekt, který může vést až ke vzniku popálenin. Dlouhovlnné IR záření proniká do větší hloubky tkání. Průnik tkáněmi, popř. vyzařování IR teplejšími místy je použitelné v medicíně k diagnostickým úkonům. Občas bývá vy(zne)užíváno i efektu, že

¹ Pozor: Rozložení je symetrické kolem viditelného světla. Je to tedy seřazeno podle vlnové délky následovně: UVC – UVB – UVA – viditelné světlo – IRA – IRB – IRC

² často v ovladačích domácí elektroniky.

při některých vlnových délkách na IR fotografovaných osobách "zmizí" šaty (nebo jsou viditelné např. jen švy)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 nevolnostmi a zvracením.

Úpal je zapříčiněn především přehřátím hlavy, přičemž dlouhovlnná složka IR-B může pronikat skrze 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

¹ „Umí“ to i některé fotoaparáty v mobilech, protože jejich plastové čočky dobře propouštějí infračervené paprsky, pokud jsou kryty filtrem, blokujícím viditelné světlo.

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). V současné době se objevují práce, prokazující, že vyzařování z mobilních telefonů by mohlo přispívat k riziku některých zhoubných nádorů mozku. Vědecké autority jsou velmi rezervované vůči užívání mobilních telefonů malými dětmi, pokud pro to neexistuje nějaký racionální a závažný důvod (např. dětská diabetici).

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. Dalším pozitivním efektem tohoto záření je mobilní připojení populace, které prokazatelně snižuje dobu mezi nástupem zdravotních potíží (nebo úrazem) a uložením na specializované lůžko. Tento efekt je tak silný, že v případě dopravních úrazů a náhlých kardiovaskulárních příhod je vystopovatelný i v rutinních zdravotních statistikách¹.

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 nádorů² 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 zvěsti³ 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 potravin, nikoli pouze na jejím povrchu (a následně vedením či prouděním) je relativně nejšetrnější ze všech možných typů ohřevu. Jeho náhrada jiným

¹ Tento efekt v podstatě nebyl očekáván, byť existuje studie brněnských soudních lékařů ze 70. let, která prokázala absenci „zbytečných“ úmrtí na dopravní nehody na ulicích, jimiž jezdí prostředky MHD, které v té době byly čerstvě vybaveny vysílačkami ke spojení s dispečinkem, přes něž mohla být zavolána i sanitka. Bohužel, tuto studii nikoho nenapadlo v době, kdy se u nás diskutovalo o zavádění mobilních telefonů, vytáhnout.

² V některých studiích těsně pod, v jiných těsně nad hranicí statistické významnosti.

³ Šíří je různé weby, zabývající se „zdravým“ životním stylem.

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 předežhřátou v mikrovlnce následně dopracovat na rendlíku či pánvi; použijeme-li plynový sporák, tak oproti použití „hnědícího nádobí“ i ušetříme.

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 částicová 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 soustřeďovány 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. Potenciální problém je toto záření i pro kosmonauty, cestující na Mars.

Vedle Slunce jsou na obloze zdroje rentgenového a γ záření, které se mu co do intenzity, alespoň v některých kategoriích vlnových délek, vyrovnají. Nejmohtnější 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.)¹

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 (které se dále rozpadají na „krátce žijící“), 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. Tyto radioizotopy mohou být rovněž uměle zakoncentrovány a využívány jako umělé zdroje záření.

Ionizující záření vzniká rovněž při jaderných reakcích, a to jak při činnosti jaderných reaktorů, tak při explozích nukleárních náloží. 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). Větši-

¹ Podle posledních teorií se jedná snad o zdroje spíš slabší a blíže Zemi.

nou 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 informací může vypálit γ laser např. velitelský bunkr skrytý desítky metrů ve skále nebo pod desítkami metrů betonu.

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.

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.

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.

Radioizotopy jsou charakterizovány *aktivitou* a *poločasem rozpadu*.

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 blízká 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)).

3.2 Měření ionizujícího záření

Dopady částic je možno měřit různými typy čidel. Velmi známý je *Geiger-Müllerův počítač*, jehož čidlo je tvořeno trubicí s velmi zředěným plynem, jehož vodivost se průletem částice ionizujícího záření na okamžik změní, což navazující elektronické obvody převedou „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 alfa), protože ty nemohou proletět stěnou trubice.

Vedle detektorů existují ještě *dozimetry*, které sledují dávku, obdrženou určitým materiálem (nebo také člověkem). Nejznámější jsou filmové dozimetry, používané pracovníky radiologických pracovišť a nošené na hrudníku. Jde o kousek speciálního fotografického filmu v obalu nepropouštějícím viditelné světlo. Části filmu jsou ještě překryty destičkami z kovu. Po expozici (týdny až měsíce, pokud nedojde např. k nehodě) je film vyvolán a vyhodnoceno zčernání fotografické emulze. Ze zčernání ploch krytých kovem je možno odhadnout pronikavost záření, jemuž byl pracovník vystaven, a z tohoto údaje dávkový ekvivalent pro hluboké tkáně.

U pracovníků manipulujících v blízkosti rentgenového prasku 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 proporcionální 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)¹.

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 ne-

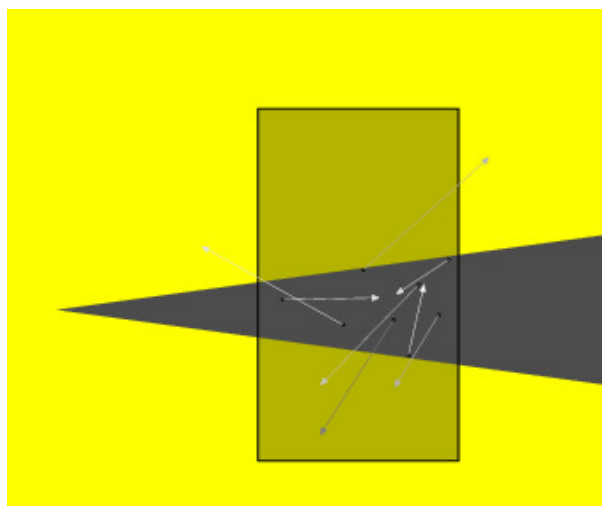
¹ Dlužno říci, že archeologové brzy přestali jásat, protože zjistili, že mnohé exponáty, vystavované jako pravé, jsou ve skutečnosti padělky a naopak – tato metoda např. rehabilitovala nálezy z Glozelu, které odborníci vesměs jednotně prohlašovali za „typické padělky“.

bezpečných intenzit záření, je nutno dozimetrii vždy doplnit měřicí technikou, pracující 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 skrz¹. 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 úbytku². 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). 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.

¹ Tudíž s hmotou těla neinteragují a jejich energie není součástí obdržené dávky.

² Proto pro ně platí totéž, co o neutronech.



Obrázek 3.2.1 Schématické znázornění Comptonova jevu

V souvislosti s interakcí záření s hmotou je nutné zmínit Comptonův jev¹. Při interakci záření a hmoty vzniká sekundární záření, které je zčásti pohlceno v okolní hmotě, zčásti z ozařované hmoty vyletí ven. Ta energie, kterou toto záření vynese, se nestává součástí dávky. Problém je, že toto záření může vylétnout i mimo prostor primárního paprsku (ať už se týká o léčebné ozařování nebo diagnostiku) a dostává se i do těch částí těla, které jsou přitom zakryty (třeba gonády). Tento jev plyne ze základních fyzikálních principů a lze ho tudíž omezit jen co největším zúžením primárního paprsku.

¹ Prof. Compton byl jedním z otců US jaderné bomby a byl i účastníkem spuštění „stavebnicového“ jaderného reaktoru na stadionu university v Chicagu, v němž se pod vedením prof. Fermiho podařilo poprvé na světě vyvolat řízenou štěpnou reakci 2. 12. 1942 (začátek „atomového věku“. Reaktor byl skládán z kostek grafitu, uranu a oxidu uraničitého, jako velká dětská stavebnice.

3.3 Jednotky

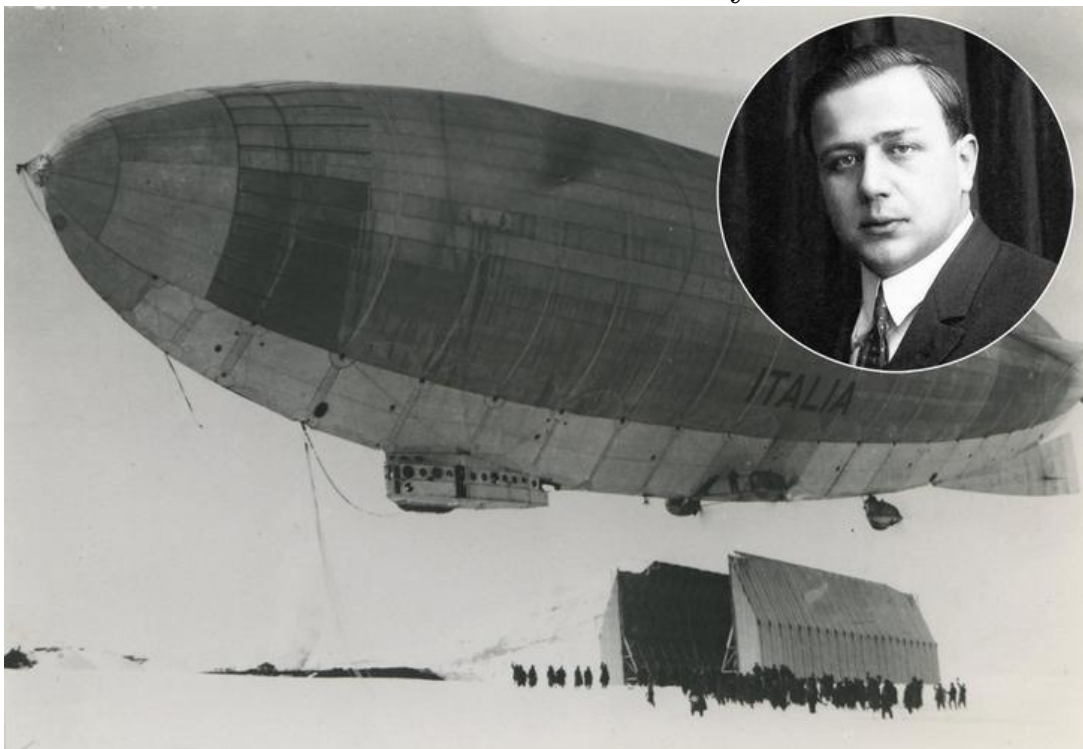
Záření předává ozařované hmotě energii. Tuto energii nazýváme **dávka** a vyjadřujeme ji jednotkou Gray (Gy) (představuje jeden joule předaný kilogramu ozařované hmoty). Může se (podle druhu záření) výrazně lišit od množství záření, které na ozařovaný objekt sice dopadne, ale projde skrz bez interakce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

Starší jednotkou záření je rentgen. Ten je definován pouze pro vzduch (jako dávka, která vyrobí v m^3 vzduchu náboj jednoho coulombu. Na ostatní typy hmoty existovaly převodníky „rentgenového ekvivalentu“. Výhodou této dávky je velmi snadné měření. V podstatě jen sledování času vybíjení elektroskopu¹ ve vzduchu, o známém tlaku, teplotě a relativní vlhkosti.

¹ Asi znáte ze středoškolské fyziky.



Obrázek 3.3.1 Průběh dopadu vzducholodi Italia na led a odtržení kabiny



Obrázek 3.3.2 Vzducholod' Italia a František Běhounek

Proto po katastrofě vzducholodi Italia 25. 5. 1928 severně od Špicberk mohl tehdy mladý radiolog František Běhounek improvizovanými prostředky získat sérii měření radioaktivity polární atmosféry na volném moři, nezátíženou vyzařováním z půdy ostrovů, která velmi významně přispěla k jeho odborné kariéře a byla jediným vědeckým výsledkem nešťastné expedice.

3.4 Biologický účinek ionizujícího záření

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 tkáně 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.

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. (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 zatím nepodařilo zorganizovat.) 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.

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). Vrozené vady se mohou projevat 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). Horní mez stochastických účinků je dána nástupem nestochastických účinků. Pod touto mezí byla experimentálně prokázána lineární závislost mezi dávkou (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 přídavného ozařování může fluktuovat v dosti rozsáhlém rozmezí.

U některých organismů (jednobuněční, 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. 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 propočet 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 ozáření populace.

3.5 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.



Obrázek 3.5.1 Rozdělení zdrojů radiační zátěže pro běžnou populaci

Pro naprostou většinu (přes 90 procent) profesionálně exponovaných osob platí, že nepřekročí roční dávkový limit pro neprofesionální populaci a zbylí, vyjma raritní události typu nehod nepřekročí vyšší limit pro profesionály.

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. Ra-

don může ostřelováním částicemi α vyvolat v buňkách epitelii 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;¹ 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, v nichž je sice obsažena (v porovnání 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

¹ Radon se ale může vyskytovat i v jiných dolech než na uranovou rudu, častěji v rudných a ve vyvěřelých horninách.

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 $10000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), jejíž rizikovost je srovnávána s celoživotním kouřením několika cigaret denně.

Opatření ke snížení radonu jsou dvojitá. 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, 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, po-

kud tam není ještě nějaký jeho další zdroj. 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 jílu, 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 vzduchu již není z tohoto zdroje významně ovlivňována. Problémem je použití takovéto škváry a popílku 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 tvárníc, 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 (jako ochrana před gama zářením z uranové rudy).

Pro srovnání: Limity radonu pro ovzduší v uranových dolech jsou ve stovkách $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ v závislosti na režimu pobytu pracovníků v dané prostoře.

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 ohřívač) 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 dvojí metodikou: Extrémně vysoké koncentrace radonu, jaké se nacházejí např. v půdním vzduchu, nad hladinou ve starých studnách, v silně zamořených sklepních prostorech apod. jsou měřeny sledováním záblesků při dopadech jednotlivých částic alfa záření na vhodný luiminifor. 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 radonu.

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 dodržení 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 (či map na internetu). V uvedených lokalitách mohou být nakuulovány 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.

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 nahrazováno 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.¹

¹ V posledních letech též použití čidel pro digitální obraz, která jsou citlivější než klasický film.

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

V případě rentgenování by měl být pacient v místnosti s rentgenem sám. Není-li to možné (malé děti, mentálně nekompetentní pacienti), je s ním u přístroje doprovod (člen rodiny nebo pracovník pracoviště, které ho na vyšetření v rámci zdravotnického zařízení poslalo), aby se stálou přítomností pracovníků RTG pracoviště u takovýchto pacientů nepřekročila jejich povolená roční dávka.¹

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. Zbytky roztoků, potřísněné jednorázové injekční stříkačky, tampony apod., ale i např. moč pacientů jsou uskladňovány v tzv. vymíracích komorách nebo boxech. Využívá se skutečnosti, že pro podobná vyšetření jsou užívány

¹ Je tedy velmi neslušné poslat s takovýmto pacientem gravidní sestru.

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 odpadem ze zdravotnických zařízení.

Odpad s dlouhožijícími radionuklidy musí být separován a ukládán na úložiště takového odpadu.

3.6 Problematika radiofobie

Smyslová nezjistitelnost 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 Černobylu. Uvedené zkušenosti běžné populace vytvořily živnou půdu pro apriorní odmítání jakéhokoli úředního dementi.

Smyslová nezjistitelnost ionizujícího záření může vést k hazardnímu jednání stejně tak dobře jako k nesmyslného nadhodnocení rizika s ním spojeného.

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 „dobrovolnících“. Pod vedením maršála Žukova byla na Sibiři svržena na divizi Rudí armády, zakopanou v obranném postavení jaderná bomba k testování jejích účinků na techniku, koně i lidi. V USA bylo do některých černošských sirotčinců dodáváno mléko s obsahem radioaktivního stroncia a byl po ulicích některých měst rozprašován prach z materiálu, vzniklého při pokusných jaderných explozích.

První možnost demonstruje případ pracovníka při defektoskopii gama zářením, jehož zdrojem byl váleček radioaktivního kobaltu. Po vypadnutí toho válečku ven z hlavice jej pracovník bleskově vrátil zpět, aby v následujících týdnech přišel o všechny prsty na dané ruce a oslepl na přivrácené oko. Kdyby byl kov rozžhavený do červeného žáru, nesahal by na něj, a přitom, kdyby sáhl, by vzniklé poškození bylo menší.

Druhou demonstruje případ pracovnice, která si nedopatřením injikovala do ruky roztok technecia (čistý α zářič). Protože událost byla hlášena jako nehoda s radioaktivním materiálem nastaly zbytečné prodlevy sháněním specializované sanitky apod. Kdyby jela MHD, nikoho by neohrozila, protože α částice z těla jednoduše nemohou vyletět ven skrze epidermis.

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 nošení hodinek se světélkujícími ručičkami¹, 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 takovéto 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. U této skupiny pacientů je

¹ Dnes už spíš historická rarita.

tedy nutno dohlížet na to, aby jejich exkrementy byly buď sbírány do speciálních nádob, s nimiž se dále nakládá jako s radioaktivním odpadem o nízké aktivitě a krátké životnosti, popř. aby chodili na speciální WC, kde je stejný problém řešen separovaným odváděním a dlouhodobým procházením fekálií vymíracími komorami.

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 techniky¹ 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 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 pasívní chlazení. Tyto kontejnery musejí být bezpečně uloženy

¹ Podle některých konvencí je útok na civilní jaderné zařízení s následným únikem radiace považován za útok jaderný se všemi odpovídajícími následky průtočnicka.

na dobu řádově desetitisíců let, což představuje hlavní problém radioaktivního odpadu, protože lidstvo jednoduše nemá s tak dlouhým skladováním čehokoli žádné praktické zkušenosti¹. A 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 střeženo². 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 výnos z výroby energie vzdáleným potomkům.

Na druhé straně ovšem obsahuje vyhořelé palivo doslova pokladnici vzácných prvků a vzácných izotopů některých běžných prvků, takže lze považovat za vysoce pravděpodobné jeho sekundární využití k jejich získávání. Nacházejí se zde i např. lanthanoidy, jejichž monopolním dodavatelem ve světovém měřítku je tč. Čína (s nezanedbatelným dopadem na možnost kritiky režimu v této zemi)³

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.

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

² Což je, bohužel pořád ze strany úřadů, bojujících s místními samosprávami o umístění jaderného úložiště, ignorováno. Okolí tohoto zařízení bude muset mít režim srovnatelný s režimem v pohraničním pásmu u železné opony za dob socialismu.

³ Aneb, jak by mohlo využívání jaderného odpadu souviset s podporou čínských disidentů...

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) pořád ještě obvyklá.