

SUJB - Státní úřad pro jadernou bezpečnost

SÚJB / Úvod / Radiační ochrana / Oznamení a informace / Stručný přehled biologických účinků záření

Stručný přehled biologických účinků záření

Biologické a lékařské poznatky o účincích ionizujícího záření jsou získávány již od počátku tohoto století a v současné době jsou sice rozsáhlé, ale dosud ne úplné. Zahrnují pozorování klinická, experimentální a především skupinová šetření, která jsou nezbytná pro průkaz zvýšené frekvence těch onemocnění, která jsou klinicky neodlišitelná od onemocnění spontánních (např. rakovina).

Biologické a lékařské poznatky o účincích ionizujícího záření jsou získávány již od počátku tohoto století a v současné době jsou sice rozsáhlé, ale dosud ne úplné. Zahrnují pozorování klinická, experimentální a především skupinová šetření, která jsou nezbytná pro průkaz zvýšené frekvence těch onemocnění, která jsou klinicky neodlišitelná od onemocnění spontánních (např. rakovina).

Různé změny, vyvolané ionizujícím zářením u člověka nemají stejný dosah pro jeho zdravotní stav. Praxe radiační ochrany však vyžaduje jednoznačná kritéria, zaměřená na prevenci závažných důsledků ozáření. Stanovení těchto kritérií se musí opírat o třídění biologických poznatků tak, aby bylo možné kvantitativní hodnocení rizika z ozáření člověka a lidské populace.

Znalost biologických účinků záření je důležitá pro stanovení principů a kritérií radiační ochrany z nichž je dále odvozen systém limitování dávek u pracujících a obyvatelstva. Znalost biologických účinků záření je dále základem pro poskytování léčebné péče při poškození zářením. Jednoznačnou orientaci v této oblasti vyžaduje poskytování první pomoci při nehodě na pracovišti.

Účinky záření na živou hmotu

Působení záření na živou hmotu se nejprve řídí obecnými zákony platnými i pro látky neživé. Dochází k ionizaci a excitaci, přičemž je absorbována energie. Na tento fyzikální proces navazuje řada dějů, podmíněných složitou organizací živé hmoty. Bylo zjištěno, že množství energie ionizujícího záření, potřebné např. k usmrcení jedince, je neobyčejně malé v porovnání s jinými druhy energie a tento nesoulad byl jedním z podnětů k vypracování různých teorií o účincích záření na živou hmotu.

Účinky záření na buňku a tkáň

Pro pochopení účinku záření na buňku je třeba si zopakovat některé základní skutečnosti z biologie: nové buňky vznikají buněčným dělením, které známe ve dvou formách. Nejčastější je dělení *mitotické* (nepřímé), méně časté je dělení *amitotické* (přímé), které probíhá jako jednoduché zaškrčení jádra i těla buněčného. Dělení nepřímé, mitosa, je komplikovaný dělicí pochod, charakterizovaný v mikroskopickém obraze hlavně nápadnými změnami jaderné hmoty buňky - tzv. chromatinu, který se dočasně změní v podkovovitě zahnuté tyčinky - chromozomy. Ty se po podélném rozštěpení a vstoupení do příslušných polovin původní buňky opět změní v chromatinová zrna a hrudky, (chromozomů má člověk v jádře buňky 46). Vytvoří se tak dvě nová dceřiná jádra a cytoplasma původní buňky se rozdělí na dvě buněčná těla.

Vedle těchto základních forem dělení existuje ještě zvláštní druh *dělení pohlavních buněk* (meiosa), při kterém se počet chromozomů redukuje na polovinu a jejich kompletního počtu je opět dosaženo až po splynutí mužské a ženské zárodečné buňky.

Účinky záření na buňku můžeme rozdělit do dvou skupin:

1. Smrt buňky (buněčná deplece): Buňka může být usmrcena již v *klidovém období*, *interfázi* (což je interval mezi dvěma buněčnými děleními, mitozami). Tento účinek však předpokládá povšechnou denaturaci buněčných složek, tedy relativně vysokou dávku záření. Významnějším typem buněčné smrti je zánik vázaný na mitozu, na buněčné dělení. Poškození buňky se neprojeví okamžitě, ale tím, že buňka není schopna se dále dělit. Tato tzv. mitotická smrt buňky se pozoruje při menších dávkách, které nestačí na vyvolání smrti v interfázi. Odtud lze odvodit, že smrtící účinek záření na buňky se nejnáze projeví ve tkáních, ve kterých probíhá rychlé buněčné dělení (krvetvorné orgány, výstelka střeva, vyvíjející se zárodek).
2. Změna tzv. cytogenetické informace: Druhým typem buněčných poruch jsou změny, které bezprostředně nenarušují průběh *buněčného dělení*. Jedná se o změny v genetické informaci buňky, která je uložena v jejím jádře, ve zmíněných chromozomech, které nesou zakódované vlastnosti v tzv. genech. Záření vyvolává změny - *mutace*, které mohou být podle jednoho dělení bodové, genové a chromozómové, podmíněné hrubší poruchou. Podle jiného dělení se odlišují mutace *gametické* (týkající se zárodečných žláz, propagují se do dalších generací), které jsou odpovědné za genetické účinky záření a mutace *somatické*, které se týkají ostatních orgánů a tkání a důsledky se projevují u jejich nositele, v ozářené tkáni. Mají vztah ke vzniku rakoviny.

Lidský organismus je funkční celek jednotlivých tkání a orgánů, které nemají stejnou citlivost k ozáření, tzv. radiosensitivitu. Při stejné absorbované dávce se v různých tkáních projeví rozdílné biologické účinky. Obecně platí, že zvláště vysokou radiosensitivitu vykazují tkáně, v nichž probíhá rychlé buněčné dělení. Vysvětluje se to tím, že mitotická smrt buňky je převládajícím typem buněčné smrti v důsledku ionizujícího záření.

Vedle radiosensitivity z hlediska destrukce tkáně, vázané na buněčnou smrt, lze rozlišit i různou vnímavost orgánů a tkání k vyvolávání cytogenetického efektu, což se projevuje různou vnímavostí na vznik nádorů.

Konečný výsledek působení ionizujícího záření na buňku a tkáně není určen pouze uvedenými mechanismy, ale je spoluurčován uplatněním obnovných *reparačních* mechanismů. Lze odlišit tzv. časnou reparaci, to znamená obnovu schopnosti dalšího dělení na úrovni postižené buňky (trvá několik hodin) a proliferaci, která vychází ze zachovalé dělivé schopnosti přeživších buněk (trvá dny až týdny). Omezený význam má sekundární neboli atypická reparace, která spočívá v náhradě ztracené tkáně funkčním pojivem.

Pro příznivý, stimulační účinek záření není podle závěrů Mezinárodní komise pro radiologickou ochranu (MKRO) dokladů. Jedná se zřejmě o průvodní nález v průběhu reparačních dějů. Někteří autoři však uvádějí, že zejména řídké ionizující záření může v oblasti velmi nízkých dávek stimulovat chromozómové reparace a vést k pozitivnímu účinku. Tento jev se nazývá *hormeze*.

Uvedené mechanismy reparace se uplatní při rozboru účinků záření vázaných na buněčnou smrt, je-li dávka podávána *frakcionovaně* nebo *protrahovaně*.

Účinky záření v tomto případě budou po stejné dávce, rozdělené do několika frakcí nebo realizované v delším časovém období, menší, než účinky téže dávky, aplikované jednorázově. Pro ty účinky záření, které jsou vázány na změnu cytogenetické informace (nádory, genetické změny), výše popsaný vliv rozdělené dávky na celkový účinek neplatí.

Další charakteristikou, určující celkový účinek záření, je prostorové rozložení dávky. Zcela rozdílnou biologickou odezvu má ozáření lokální, kdy jsou postiženy jen určité tkáně. (Stíněním částí těla se uchová určitá část tzv. kmenových buněk, ze kterých může vzejít regenerace tkáně).

Zvláštním případem nerovnoměrného ozáření je kontaminace radioaktivními látkami, ať již zevní, či vnitřní (tj. vdechnutím, požitím či poraněnou kůží). Příkladem *vnitřní kontaminace* radioaktivními látkami může být vdechování radioaktivního jódu při nehodě jaderného zařízení. Pro prevenci případného poškození štítné žlázy (snížení její funkce, nebo vznik benigních či maligních nádorů) se používá stabilní jod, který ve štítné žláze zablokuje kumulaci radioaktivního jódu.

Rozhodnutí o podání tablet je však důsledně vázáno na informaci o masivním úniku radioaktivního jódu. Indikací k podání (k zahájení preventivní profylaxe) je až určitá předem stanovená hodnota odvrácené dávky ve žláze (100 mSv). Pro tento účel je v ČR registrovaný Jodid draselný 65 VULM (4tbl. v balení), držitel registrace SÚKL Hameln rds a.s., Modra, SR. U dospělých je nutné použít jednorázově dávku 130 mg (tj. 2 tbl. 65 mg Jodidu draselného), a to co nejdříve, nejlépe do 1 hodiny po inhalaci.

Vztah dávky a účinku

Z hlediska vztahu dávky a účinku je třeba rozlišovat dva základní typy účinků:

Deterministické účinky: Jde o účinky, k nimž dochází v důsledku smrti části ozářené buněčné populace, jejich závažnost vzrůstá s dávkou od určitého dávkového prahu (pod ním se účinek neprojeví) a mají charakteristický klinický obraz. Do této skupiny patří např. akutní nemoc z ozáření nebo radiační zánět kůže. Pro typickou existenci dávkového prahu bývají označovány též jako účinky nestochastické:

- např. akutní nemoc z ozáření,
- intenzita projevů stoupá s dávkou (např. A,B),
- existence dávkového prahu,
- patogeneze: smrt buňky, deplece buněk.

Stochastické účinky: Jsou to účinky vyvolané již zmíněnými mutacemi (změnami v genetické informaci buňky) a předpokládá se pro ně bezprahový, lineární vztah mezi dávkou a účinkem. Závislost těchto účinků na dávce má statistický charakter, a proto pro ně bylo zavedeno označení účinky stochastické (pravděpodobné, náhodné). Velikost dávky záření nemění závažnost projevu jednotlivce, ale v populaci mění frekvenci přídatné četnosti zhoubných novotvarů a dědičných poškození. S dávkou tedy vzrůstá pro jednotlivce pravděpodobnost poškození. Klinický obraz těchto účinků není typický, neodlišuje se od "spontánně" vzniklých případů:

- zhoubné nádory,
- genetické změny,
- pravděpodobnost výskytu stoupá s dávkou,
- klinicky neodlišitelné od případů "spontánních",
- patogeneze: mutace.

Účinky záření na lidský organismus

Přehled hlavních typů účinků záření u člověka jsou shrnuty v následující tabulce.

Časné	Pozdní		
Somatické			Genetické
<ul style="list-style-type: none"> • akutní nemoc z ozáření • akutní lokální změny 	<ul style="list-style-type: none"> • nenádorová pozdní poškození • chronická radiodermatitis 	<ul style="list-style-type: none"> • zhoubné nádory 	<ul style="list-style-type: none"> • genetické účinky u potomstva

<ul style="list-style-type: none"> • akutní radiodermatitida • poškození fertility 	<ul style="list-style-type: none"> • zákal oční čočky 		
poškození vývoje plodu			
nestochastické		stochastické	

Účinky záření na lidský organismus tedy jsou:

- Akutní nemoc z ozáření,
- Akutní lokální změny,
- Poškození vyvíjejícího se plodu v těle matky,
- Nenádorová pozdní poškození,
- Zhoubné nádory,
- Genetické změny.

První dvě skupiny představují účinky časně, které se klinicky projeví v krátkém čase po ozáření většími jednorázovými dávkami, třetí skupina - poškození vyvíjejícího se plodu - je z hlediska matky také časným účinkem, z hlediska plodu již může jít i o účinek pozdní.

O pozdní účinky se jedná i u dalších třech skupin poškození. Podle vztahu dávky a účinku jsou pak první čtyři skupiny zahrnovány mezi účinky nestochastické, zhoubné nádory a genetické změny mezi účinky stochastické. (Pokud jde o poškození vyvíjejícího se plodu, nejedná se o čistý účinek nestochastický a bude o něm pojednáno samostatně).

Před výkladem o jednotlivých skupinách biologických účinků záření je třeba uvést, že průměrné roční efektivní dávky u pracovníků většiny profesí, užívajících zdroje záření, jsou v současné době nižší než 1/10 nejdříve přípustných limitů, které jsou bezpečně stanoveny pod prahem vzniku nestochastických účinků. Ochrana před zářením za kontrolovatelných podmínek je tudíž ochranou před stochastickými účinky, tj. před zhoubnými nádory a dědičnými poškozeními. Možnost vzniku nestochastických účinků v důsledku práce se zdroji ionizujícího záření je spojena pouze s překročením limitních hodnot při nehodách.

Akutní nemoc z ozáření

Akutní nemoc z ozáření (akutní postradiační syndrom) se rozvíjí po jednorázovém ozáření celého těla nebo jeho větší části dávkou asi od 1 Gy výše. V závislosti na stupni ozáření převládají v klinickém obraze příznaky od poškození krve tvořících orgánů a trávicího ústrojí až k poškození centrálního nervového systému.

Krevní (hematologický) typ akutní nemoci z ozáření vzniká po celotělovém ozáření dávkou si od 1 Gy do 6 Gy. Jeho průběh lze rozdělit do několika období. V prvním dni po ozáření vystupují všeobecné neurčité příznaky (nevolnost, skleslost), které doprovází zvracení. Tyto projevy jsou důsledkem poruch regulačních (nervových a humorálních) systémů. Následuje období latence (1 - 2 týdny), které je v podstatě bez příznaků. Vlastní onemocnění je charakterizováno zejména projevy mikrobiálního rozsevu (sepsy) a krvácením. Postižený má teploty, trpí krvácením z dásní a do kůže, ubývá na váze pro nechutenství a průjem, může mít zvrhovatělá ložiska na sliznicích. V krevním obraze je výrazný pokles bílých krvinek (především lymfocytů). Klesá i počet krevních destiček a červených krvinek. V závislosti na dávce nastupují po šesti až osmi týdnech známky uzdravování. Ze zachovalých ostrůvků krevní

dřeně dochází dělením a zráním kmenových buněk k doplňování chybějících krvinek v krevním oběhu. Je-li dávka záření vyšší, mezi 6 Gy až 10 Gy, je celý průběh bouřlivější, nevolnost a zvracení se objevují za několik málo hodin po ozáření, období latence je kratší, průběh vlastního onemocnění je velmi těžký a vede k smrti kolem 20. - 30. dne, pokud nebyla včas zajištěna intenzivní individuální léčba.

Při dávkách záření kolem 10 Gy a vyšších jsou časné příznaky značně vystupňované a závažné obtíže vystoupí už 4. až 6. den po ozáření, tj. dříve než se objeví příznaky krevní. Tato tzv. *střevní forma* akutní nemoci z ozáření (gastrointestinální) je charakterizována krvavými průjmy, poruchou hospodaření tekutinami a minerálními látkami. Může dojít i ke komplikacím, bezprostředně ohrožujícím život, jako je střevní proděravění nebo střevní zástava. Tyto projevy mají příčinu v odumření buněk střevní výstelky, jejichž odolnost vůči ozáření je poněkud vyšší než citlivost kmenových buněk krvetvorby, ale doba jejich života (rychlost obměny) je kratší (4 - 6 dnů). Zánikem výstelky střevní dojde k obnažení vnitřního povrchu střeva a k dalším uvedeným komplikacím. Přežije-li postižený 7 - 10 dnů, projeví se v plné míře i příznaky poškození krvetvorných orgánů.

Po dávkách v úrovni několika desítek Gy proběhne akutní nemoc z ozáření pod obrazem *nervové formy*. Bezprostředně po ozáření se dostaví psychická desorientace a zmatenost, porucha koordinace pohybů, křeče a konečně hluboké bezvědomí. Smrt nastane do několika hodin nebo dnů.

Závažnost průběhu akutního onemocnění z ozáření a vyhlídky na přežití jsou příznivě ovlivněny stíněním určitých částí těla. Z hlediska krvetvorby je důležité zachování ostrůvků krvetvorné kostní dřeně.

Akutní lokální změny

Z lokálních účinků je třeba věnovat největší pozornost kůži, která je při každém zevním ozáření vstupním polem svazku záření.

Stupeň poškození kůže je závislý na dávce, druhu záření, velikosti ozářeného pole a na lokalizaci.

Práh poškození se pohybuje od cca 3 Gy výše (pro rtg záření). Několik hodin po ozáření (do 2 - 3 dnů) se objevuje tzv. *časný erytém* (časné zarudnutí kůže), který do 24 hodin mizí. Pak nastane období klidu, trvajícím 10 - 15 dnů. Vlastní odezva na ozáření je tzv. *pozdní erytém* (pozdní zarudnutí) při kterém dochází ke zduření kůže a bolestivosti. To je obraz akutní radiační dermatitidy prvního stupně. Při dávce kolem 3 Gy dochází i k *epilaci* (ztrátě ochlupení), která po dávce asi 6 Gy může být trvalá. Nejvýraznější bývá tam, kde se vlas či chlup rychle obnovuje (vlasatá část hlavy, vousy).

Po ozáření vyššími dávkami, zpravidla nad 10 Gy vzniká radiační dermatitis druhého stupně. Pokožka se odděluje od pojivového podkladu tekutinou, vystupující z cév a vznikají *puchýře*. Jejich odlučováním a infekcí ložiska se stav dále komplikuje. V příznivějším případě nastává po 2 - 4 týdnech obnova pokožky z okrajů defektu. Pokud dojde k těžšímu poškození cév, vyživujících tkáň, dochází k jejímu odumření a vzniku *vředu* (radiační dermatitis třetího stupně). Vřed se velmi špatně hojí a i po zhojení je další osud postiženého okrsku kůže nejistý. Nová pokožka je tenká a špatně odolává zátěži (mechanické, termické) i infekci. Rozvojem degenerativních změn může i po letech vzniknout tzv. *pozdní vřed* vyžadující chirurgický zákrok.

Dalším významným lokálním poškozením může být *postižení fertility* (plodnosti) po ozáření pohlavních žláz. Odpověď na ozáření pohlavních orgánů je u muže a ženy různá. U muže dochází již po dávce 0,25 Gy k přechodnému snížení počtu spermií, ke sterilitě dochází až po dávkách 3 - 8 Gy s tím, že se plodnost může nejednou obnovit. U žen vzniká trvalá sterilita po dávce kolem 3 Gy (v závislosti na věku ženy). Rozdíly jsou zde proto, že vajíčka, která ubývají z vaječníků během jednotlivých měsíčních cyklů ženy nejsou nahrazována, zatímco ve varlatech je zásoba spermií během dospělého věku průběžně doplňována. U žen mohou být postiženy i

sekundární pohlavní znaky, protože produkci ženských pohlavních hormonů obstarávají rychle se dělící buňky v okolí dozrávajícího vajíčka, zatímco u mužů relativně odolné buňky nepřísluší k zárodečné tkáni.

Z dalších časných účinků je možno jmenovat radiační zánět plic nebo radiační zánět nosohltanu po jednorázovém ozáření hrudníku nebo hlavy (práh kolem 5 Gy).

Nenádorová pozdní poškození

Vznikají v průběhu let za podmínek protražované expozice a jsou charakterizovány dávkovým prahem, který je vysoký vzhledem k časovému rozložení dávky, umožňujícím uplatnění reparačních projevů. Do této skupiny patří především *chronický zánět kůže a zákal oční čočky*.

Chronický zánět kůže byl zjišťován zejména u lékařů-rentgenologů, kteří prováděli rtg vyšetření bez dokonalé ochrany před zářením. Projevoval se zejména suchostí kůže, jejím praskáním a křehkostí, lomivostí a podélným rýhováním nehtů.

Zákal oční čočky může po dlouhé době latence vzniknout podle posledních údajů již po jednorázové dávce kolem 1,0 Gy, při protražované expozici se práh zvyšuje.

Zhoubné nádory

Zhoubné nádory jsou nejzávažnější pozdní somatické účinky ionizujícího záření. Společným rysem představ o vzniku rakoviny je vícesložkový charakter tohoto onemocnění. Jednou složkou je existence buněk, nesoucích modifikovanou (mutovanou) informaci a přenášejících tuto atypii na své potomstvo (genomická nestabilita, vznik geneticky nestabilního fenotypu), druhou složkou vzniku nádoru je soubor podmínek, které působí proti tendenci eliminovat atypické buňky nebo potlačit jejich růst. Je známa řada činitelů, působících v jedné nebo druhé jmenované fázi děje. Jsou to viry, dehtové karcinogeny aj. Ve druhé fázi se uplatňují zejména změny v produkci hormonů nebo oslabení imunitní obrany organismu. Ionizující záření může podle současných poznatků působit na různých stupních procesu vývoje rakoviny. Představa, že zhoubné nádory jsou vyvolávány i malými dávkami ionizujícího záření, je odvozena z řady pozorování, mezi nimiž má zvláštní význam studie přeživších obětí atomových útoků v Hirošimě a Nagasaki, pozorování pacientů léčených v Anglii rtg zářením pro onemocnění páteře a rozbor příčin smrti amerických radiologů exponovaných v letech 1900 - 1950.

Jak bylo uvedeno již v kapitole o účincích záření na buňku a tkáň, jsou jednotlivé tkáně a orgány různě vnímavé na vznik nádorů po ozáření. Mezi nejvnmavější patří kostní dřeň, žaludek, tlusté střevo a plíce, nově i mléčná žláza u žen. Číslo, které charakterizuje celoživotní riziko úmrtí na zářením vyvolanou rakovinu (zahrnuje různou radiosenzitivitu, ale i léčitelnost jednotlivých nádorů) se jmenuje koeficient rizika. Celkový koeficient rizika úmrtí na zářením vyvolané zhoubné nádory byl stanoven pro pracovníky 4,1 · 10⁻² Sv⁻¹ (tzn., že ze 100 pracovníků ozářených efektivní dávkou 1 Sv bude pravděpodobně u 4 osob příčinou smrti zhoubný nádor.) Koeficient rizika smrti pro celkovou populaci je vyšší – 5,5 · 10⁻² Sv⁻¹, neboť jsou zde zahrnuty i děti, které jsou radiosenzitivnější. Je třeba poznamenat, že populační riziko smrti na rakovinu je cca 25%, na rakovinu tedy zemře prakticky každý čtvrtý člověk bez „přídatného“ ozáření. Dále je třeba poznamenat, že se jedná o odhad celoživotního rizika při malých dávkových příkonech řídce ionizujícího záření, přičemž pro děti jsou tyto koeficienty pravděpodobně cca 2 - 3 krát vyšší, pro dospělé nad 50 let 5 - 10 krát nižší (což se netýká některých typů leukemií).

Důležitou charakteristikou je časový průběh výskytu zhoubných nádorů po ozáření. Po ozáření nevznikne nádor bezprostředně, ale až po několikaletém období latence, která je např. u leukemie 5 - 20 let, u nádorů plic 10 - 40 let.

Uvedené koeficienty rizika stanovila ve svém doporučení č. 103 z roku 2007 Mezinárodní komise pro radiologickou

ochranu (ICRP).

Genetické změny

Významnou skupinou pozdních účinků záření je postižení potomstva ozářených osob. Podkladem genetických změn je, jak již dříve uvedeno, mutace, tj. změna v genetické informaci buňky. Za dědičné účinky je odpovědná tzv. gametická mutace, což je mutace v jádře zárodečných buněk (vajíčka, spermie) pohlavních žláz. Genetický účinek záření spočívá ve zvýšené frekvenci mutací v porovnání s mutacemi vznikajícími spontánně. Mutovaný gen je schopen reprodukce při dělení buňky, a tak je mutace předávána do dalších generací. Základ budoucího jedince, vzniklý splynutím mužské a ženské zárodečné buňky, může v důsledku své nepříznivé genetické skladby velmi časně zaniknout, tj. v období před nebo krátce po vnoření se do děložní sliznice matky. Tento typ poškození se projeví jako neúspěšné oplození. V jiném případě dojde k vývoji zárodka, ale těhotenství končí potratem, předčasným porodem, úmrtím novorozence brzy po porodu nebo porodem dítěte s hrubou vrozenou vadou. Je třeba poznamenat, že podíl všech genetických vlivů na samovolné potratovosti činí 20 - 25%. Jiným příkladem následků jsou geneticky podmíněné vývojové vady jako je např. Downova nemoc, genetický podklad může mít i změna poměru pohlaví v populaci apod. Geneticky podmíněné a tudíž i zářením zasažitelné jsou i některé komplexní biologické charakteristiky, jako je fyzická síla, inteligence, motorická hbitost apod.

Z uvedeného výčtu různých projevů změny genetické informace je patrné, že mutace mohou ovlivnit vyhlídky na přežití a další uplatnění nových jedinců. Odhaduje se, že mutovaný gen setrvává v populaci asi 40 generací.

Kvantitativní odhady vztahů mezi dávkou a účinkem se u genetických účinků opírají téměř výlučně o experimentální údaje. Koeficient rizika genetických účinků byl nově pro celkovou populaci odhadnut na 0,2 .10⁻² Sv⁻¹, pro kojence a děti s očekávanou plnou reprodukční schopností je však riziko několikrát vyšší než je uvedená hodnota. Pro starší věkové skupiny naopak riziko klesá k nule v souladu s poklesem reprodukční schopnosti. Při posuzování vlivu ionizujícího záření na geneticky podmíněné nepříznivé rysy u potomstva je třeba zvážit, že v normální (neozářené) populaci je spontánní výskyt geneticky podmíněných odchylek cca 5 - 10 na 100 živě narozených dětí.

Vliv záření na vývoj plodu

Možnost účinku záření na zárodek závisí na době ozáření vzhledem k době, uplynulé od doby početí. Soudí se, že v prvních třech týdnech po početí, kdy je počet buněk zárodka malý a buňky nejsou ještě specializované, projeví se poškození těchto buněk nejčastěji neschopností implantace nebo zánikem oplozeného vajíčka, nikoli deterministickými nebo stochastickými účinky.

Největší radiosenzitivitu vykazuje plod *mezi třetím a osmým týdnem* po početí. (období tzv. embryogeneze), kdy je relativně vysoké riziko vzniku malformací orgánu, který je v té době právě ve vývoji. Tyto účinky jsou deterministické povahy a mají u člověka práh, odhadovaný na základě pokusů na zvířatech na 0,1 Gy.

Mezi osmým a dvacátým pátým týdnem po početí je zárodek citlivý na vyvolání mentální retardace. Práh pro tento účinek se udává minimálně 0,2 Gy.

Od *čtvrtého týdne* po početí může být plod citlivý na vyvolání zhoubných nádorů ozářením, které se manifestují v dětství nebo v dospělosti. O míře rizika se soudí, že je obdobná jako u dětí v první dekádě života, tedy cca 2 - 3 krát vyšší než u dospělých.

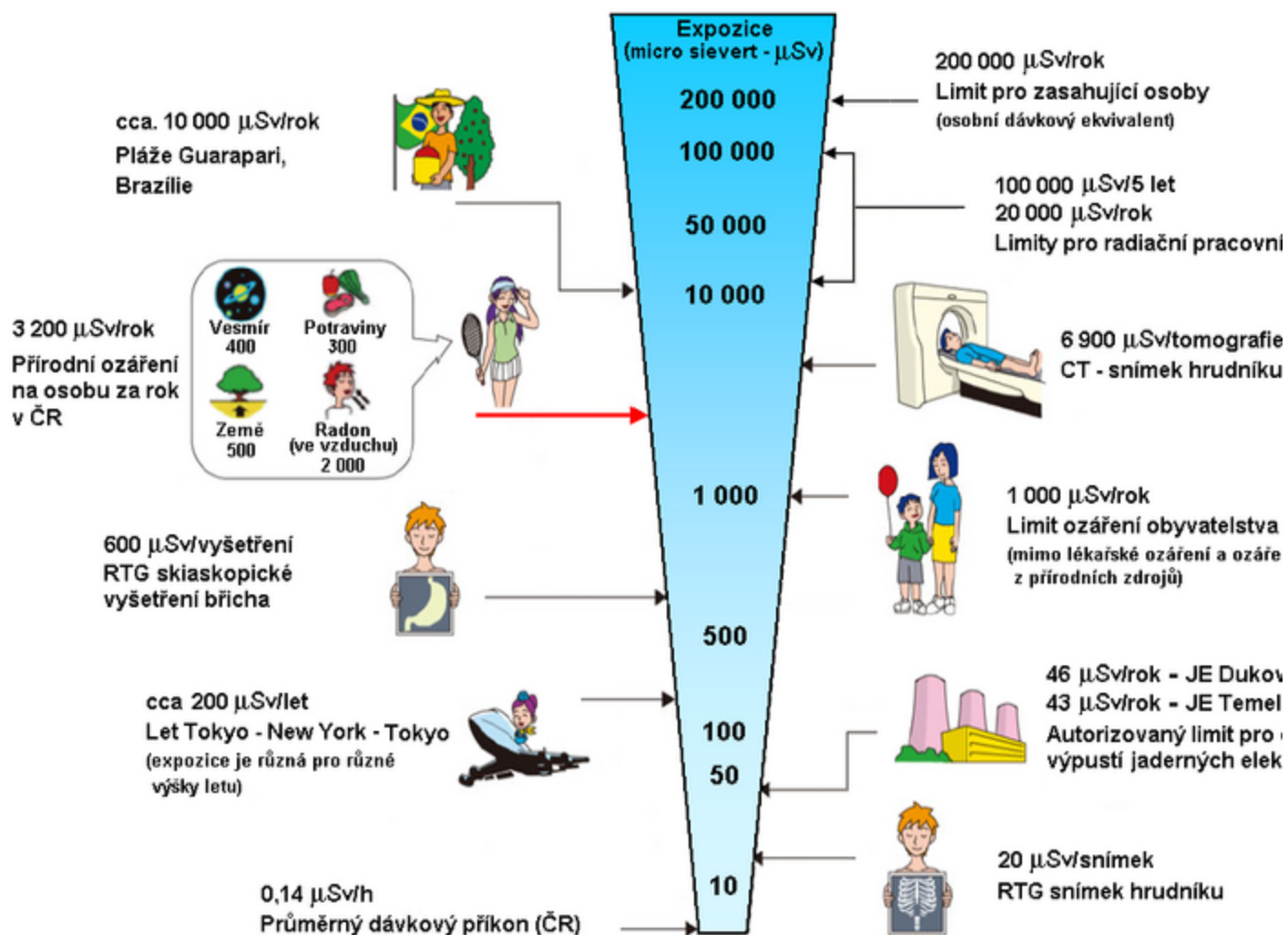
Závěr

Jak bylo v textu uvedeno, k nestochastickým projevům poškození ionizujícím zářením může dojít pouze při hrubém poškození zásad radiacní ochrany, protože roční nejvýše přípustné dávky byly stanoveny tak, aby nebylo dosaženo

prahových hodnot nestochastických poškození ani za celou dobu pracovního života jednotlivce.

Příklady některých expozic ionizujícímu záření včetně limitů platných v ČR

Je
100



Senovážné náměstí 9 . Praha 1

221 624 111

Fax: 222 220 917

ID datové schránky - me7aazb

Tyto webové stránky využívají pouze tzv. technické cookies, jež jsou nezbytné pro provoz těchto stránek. K ukládání těchto cookies do počítače není třeba souhlas návštěvníka webu.