



IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

ÚČINKY a ZDROJE

Co je ionizující záření
Co nám může způsobovat
Kde se s ním můžeme setkat

Program OSN pro ochranu životního prostředí





PRÁVNÍ VÝHRADY VYDAVATELE

Tato publikace je do značné části založena na výsledcích práce Vědeckého výboru OSN pro účinky atomového záření, který je dceřinou institucí Valného shromáždění OSN. Jako sekretariát této publikace působil Program OSN pro ochranu životního prostředí. Přitom tato publikace nereprezentuje nutně stanoviska Vědeckého výboru Programu OSN pro ochranu životního prostředí.

Použitá označení a prezentace dat v této publikaci neznamenaají prosazování jakéhokoliv stanoviska Programu OSN pro ochranu životního prostředí ve vztahu k právnímu statutu jakéhokoliv státu, území, města, areálu nebo jejich představitelů nebo ve vztahu k vymezení jejich hranic či zájmových pásem.

Tuto publikaci je dovoleno reprodukovat vcelku či v jejích částech pro vzdělávací nebo neziskové účely bez zvláštního souhlasu majitele copyright za předpokladu uvedení zdroje. Program OSN pro ochranu životního prostředí bude vděčen za poskytnutí výtisku každé publikace, která použije tento podklad jako zdroj.

Tuto publikaci nelze použít k prodeji ani pro jiné komerční účely bez předběžného písemného schválení Programem OSN pro ochranu životního prostředí.

Program OSN pro ochranu životního prostředí podporuje celosvětově i ve svých vlastních aktivitách akce směřující ke zdravému životnímu prostředí. Originální publikace je tištěna na recyklovaném stoprocentně bezchlorovém papíru. Distribuční politika UNEP usiluje o snižování uhlíkové stopy.

Kategorizace: Radiation: effects and sources, United Nations Environment Programme, 2016

ISBN: 978-92-807-3600-7

Job No.: DEW/2036/NA

Copyright © Program OSN pro ochranu životního prostředí, 2016

Vytištěno v Česká republika



IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

ÚČINKY a ZDROJE

Co je ionizující záření
Co nám může způsobovat
Kde se s ním můžeme setkat

Program OSN pro ochranu životního prostředí



PODĚKOVÁNÍ

Tato publikace je z velké části založena na výsledcích práce Vědeckého výboru OSN pro účinky atomového záření, který je dceřinou institucí Valného shromáždění OSN a na publikaci Programu OSN pro ochranu životního prostředí „ *Radiation: doses, effects, risks*, původně vydané v r. 1985 a 1991 Geoffrey Lean.

Technická redakce: Malcolm Crick a Ferid Shannoun

Příprava textu: Susan Cohen-Unger a Ayhan Evrensel

Grafika a úprava: Alexandra Diesner-Kuepfer

A dále přispěli k této publikaci svými příspěvky a komentáři:

Laura Anderson, John Cooper, Susan Cueto-Habersack, Emilie van Deventer, Gillian Hirth, David Kinley, Vladislav Klener, Kristine Leysen, Kateřina Navrátilová-Rovenská, Jaya Mohan, Wolfgang-Ulrich Müller, María Pérez, Shin Saigusa, Bertrand Thériault, Hiroshi Yasuda, a Anthony Wrixon.

Tato publikace byla původně vydána v angličtině. Překlad do češtiny byl připraven Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (Česká republika). V případě nejasností je rozhodující anglický text.

PŘEDMLUVA

Hirošima, Nagasaki, Three Mile Island, Černobyl a Fukušima: tato jména přispěla ke strachu veřejnosti z ozáření jak při použití jaderných zbraní, tak i z havárií jaderných elektráren. Ve skutečnosti jsou lidé denně mnohem více vystaveni ozáření z mnoha jiných zdrojů, včetně atmosférických a pozemních a také z používání ionizujícího záření v lékařství a průmyslu.



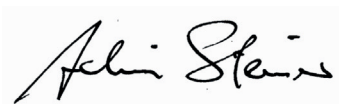
V r. 1955 vyvolaly obavy veřejnosti zkoušky jaderných zbraní s možnými důsledky atomového záření přítomného v ovzduší, vodě a potravě. Jako odezvu na tuto situaci ustavilo Valné shromáždění OSN Vědecký výbor OSN o účincích atomového záření (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation — UNSCEAR), aby soustřeďoval a vyhodnocoval informace o úrovních ionizujícího záření a jeho účincích. První zpráva Výboru soustředila vědecké podklady pro vyjednávání o Smlouvě o částečném zákazu zkoušek jaderných zbraní v r. 1963, která zakázala testy jaderných zbraní v atmosféře. Od té doby Výbor pokračuje v přípravě a vydávání odborně náročných zpráv o radiační expozici, které zahrnují i zprávy o vyhodnocení havárií jaderných elektráren v Černobylu a Fukušimě. Výbor tedy soustavně vykonává činnost, která má vysokou hodnotu jak pro vědecká společenství, tak i pro politická rozhodování.

Informace o zdrojích záření a jeho účincích, které publikuje vědecká komunita, jsou zaměřeny spíše technicky, a jsou tedy pro širokou veřejnost nesnadno srozumitelné. Lidé jsou tedy často spíše zmateni než informováni. Převažuje strach a řada nedorozumění, která se rodí a klíčí po řadu desítek let. Tato publikace se pokouší o vypořádání s tímto problémem tím, že detailně popisuje nejvýznamnější a co nejnovější informace z Výboru o druzích ionizujícího záření, jeho zdrojích a účincích na člověka i na životní prostředí a zpřístupňuje je běžnému čtenáři.

Dnes sekretariát UNSCEAR působí pod záštitou Programu OSN pro ochranu životního prostředí (United Nations Environment Programme — UNEP), který pomáhá jednotlivým zemím uplatňovat přístupy a praktiky prospěšné pro ochranu životního prostředí. Úsilí pomáhat veřejnosti v porozumění ionizujícímu záření a jeho vlivu na život na naší planetě odpovídá klíčovému mandátu UNEP.



Jsem rád, že mohu blahopřát všem těm, kteří přispěli k přípravě této publikace i všem členům UNSCEAR a jeho národním delegátům, kteří tak pilně pracovali během uplynulého šedesátiletí na těchto citlivých tématech.



Achim Steiner
výkonný ředitel UNEP a
náměstek Generálního sekretáře OSN





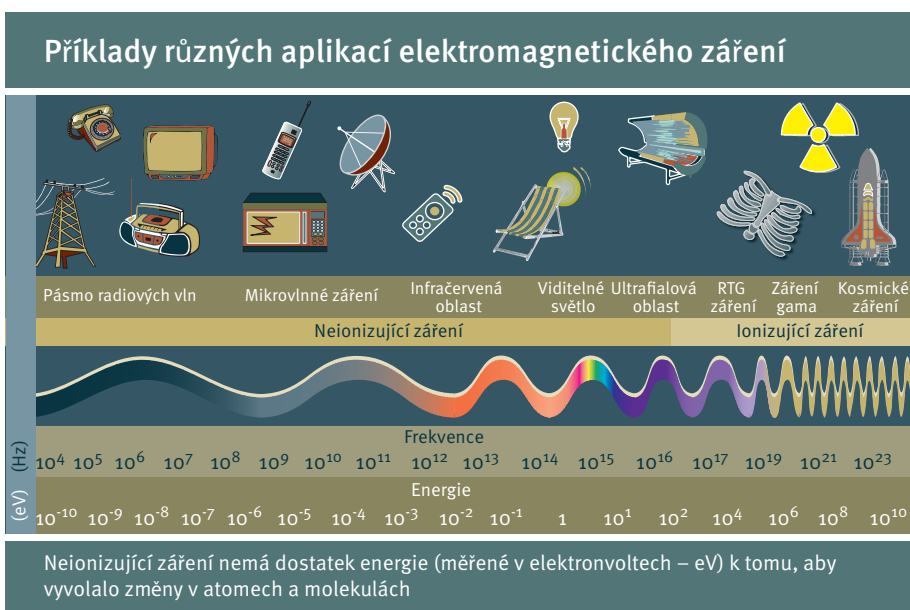
OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 1 |
| 1. CO JE IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ | 3 |
| 1.1. Trochu historie | 3 |
| 1.2. Některá základní data | 4 |
| Radioaktivní přeměna a poločasy | 6 |
| Jednotky záření | 7 |
| 1.3. Pronikavost ionizujícího záření | 9 |
| 2. CO NÁM ZÁŘENÍ MŮŽE ZPŮSOBOVAT | 11 |
| 2.1. Účinky na člověka | 13 |
| Časné zdravotní účinky | 14 |
| Pozdní zdravotní účinky | 15 |
| Účinky na potomstvo | 18 |
| 2.2. Účinky na živočichy a rostliny | 22 |
| 2.3. Vztah mezi dávkou záření a účinkem | 24 |
| 3. KDE SE MŮŽEME SE ZÁŘENÍM SETKAT | 27 |
| 3.1. Přírodní zdroje záření | 28 |
| Kosmické záření | 28 |
| Pozemní zdroje | 29 |
| Zdroje v potravinách a nápojích | 32 |
| 3.2. Umělé zdroje záření | 32 |
| Lékařské zdroje záření | 33 |
| Jaderné zbraně | 37 |
| Jaderné reaktory | 39 |
| Průmyslové a jiné aplikace | 48 |
| 3.3. Průměrné radiační expozice obyvatel a pracovníků | 54 |



ÚVOD

Dříve než začneme svůj výklad, je třeba osvětlit rozdíl mezi ionizujícím a neionizujícím zářením. **Ionizující záření** má dostatek energie k tomu, aby uvolňovalo elektrony z atomů, čímž zanechává atomy elektricky nabitě, zatímco **neionizující záření**, jako jsou rádiové vlny, viditelné světlo nebo ultrafialové záření, takovou schopnost nemá. Tato publikace se týká radiační expozice z přírodních i umělých zdrojů. Slovo **záření** v celé této publikaci se vztahuje výlučně jen k ionizujícímu záření.



Dnes toho známe o zdrojích a účincích expozice záření zřejmě více než o jiných škodlivinách a vědecké společenství soustavně tyto poznatky aktualizuje a analyzuje. Většina lidí má povědomí o využívání záření v jaderné energetice nebo o jeho lékařských aplikacích. Sotva jsou však běžně známa mnohá další užití různých jaderných technologií v průmyslu, zemědělství, stavebnictví, výzkumu a v dalších odvětvích. Mnohý čtenář, který čte o tomto tématu poprvé, bývá překvapen, že zdroje záření způsobující lidem největší expozici nepřitahují nutně také jejich největší pozornost. Ve skutečnosti je největší expozice způsobována přírodními zdroji, které jsou odjakživa přítomny v životním prostředí, a největším přispěvatelem k ní je celosvětově existující využívání záření v lékařství. Vedle toho každodenní zkušenosti z využívání letecké dopravy a z přebývání v nevhodně izolovaných budovách



v některých částech světa poukazují na další možné nezanedbatelné příspěvky k expozici lidí.

Tato publikace představuje pokus Programu OSN pro ochranu životního prostředí (UNEP) a sekretariátu Vědeckého výboru OSN o účincích atomového záření (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation — UNSCEAR) poskytnout pomoc pro zvýšení povědomí a prohloubení znalostí o zdrojích, úrovních a účincích expozice ionizujícímu záření. V r. 1955 se podařilo soustředit vedoucí vědecké osobnosti z 27 členských států OSN a Valné shromáždění OSN ustavilo výbor UNSCEAR, aby hodnotil v celosvětovém rozsahu radiační expozice, jejich účinky a rizika. Tento výbor však nestanoví, ba ani nedoporučuje jmenovitě žádné standardy/normy ochrany. Nicméně zpracovává a poskytuje vědecké informace, které umožňují národním řídicím orgánům i jiným uskupením dále postupovat směrem k regulačním opatřením. Vědecké výsledky získané UNSCEAR v uplynulých šesti dekadách jsou hlavním zdrojem informací pro tuto publikaci.



1. CO JE IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Abychom mohli mluvit o úrovních ionizujícího záření, o jeho účincích a rizicích, musíme se nejprve věnovat určitým základním vědeckým poznatkům oboru. Jak radioaktivita, tak i záření jí produkované, byly přítomny na Zemi mnohem dříve, než se na ní objevil život. Ve skutečnosti byly radioaktivní látky a jejich záření přítomny v kosmickém prostoru od jeho vzniku a byly materiálem vyskytujícím se na naší planetě při jejím vytváření. Ale lidstvo objevilo tento základní, univerzální fenomén až v posledních letech 19. století a stále se ještě učí novým cestám jeho využívání.

1.1. Trochu historie

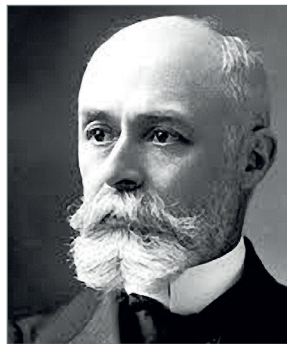
V r. 1895 **Wilhelm Conrad Roentgen**, objevil záření, které nazval X-paprsky a které mohlo být použito k pohledu do lidského těla. Tento objev byl předzvěstí lékařského využívání záření, které se od té doby široce rozšiřovalo. Roentgenovi byla v r. 1901 udělena první Nobelova cena za fyziku jako příznání jeho mimořádného přínosu lidstvu. Jeden rok po Roentgenovu objevu položil náhodně francouzský vědec, **Henri Becquerel**, několik fotografických desek do zásuvky, kde byly úlomky minerálu obsahujícího uran. Když je potom vyvolal, zjistil s překvapením, že byly vystaveny ozáření. Tento jev nazval radioaktivitou, která se projevuje tím, že energie se z atomu uvolňuje spontánně. Radioaktivita je dnes měřena v jednotkách zvaných becquerel (Bq) po Henrim Becquerelovi. Brzy potom mladá chemička **Marie Skłodowska-Curie**, ve výzkumech pokračovala a byla první, která přispěla k rozšíření pojmu radioaktivita. V r. 1898 ona a její manžel **Pierre Curie** objevili, že uran vydává záření, které se tajemně přeměňuje v jiné prvky, z nichž jeden nazvali polonium po rodné zemi manželky a jiný nazvali radium, tedy „zářící“ prvek. Marie Curie obdržela v r. 1903 spolu s Pierrem Curie a Henri



Wilhelm C. Roentgen (1845–1923)



Marie Curie (1867–1934)



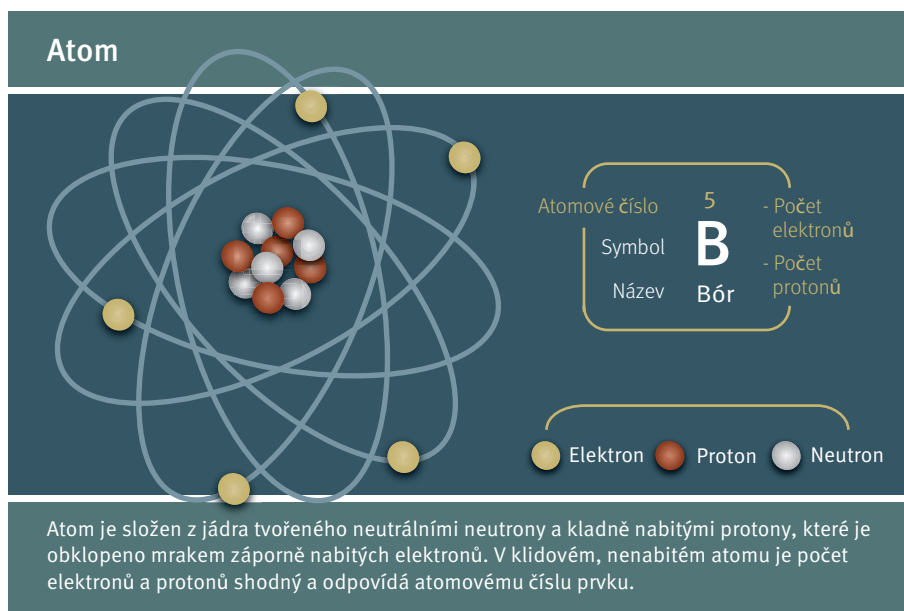
Henri Becquerel (1852–1908)

Becquerelem Nobelovu cenu v oboru fyziky. Byla první ženou, která byla takto vyznamenána, znovu pak obdržela Nobelovu cenu v r. 1911 za své objevy v oboru radiační chemie.

1.2. Některá základní data

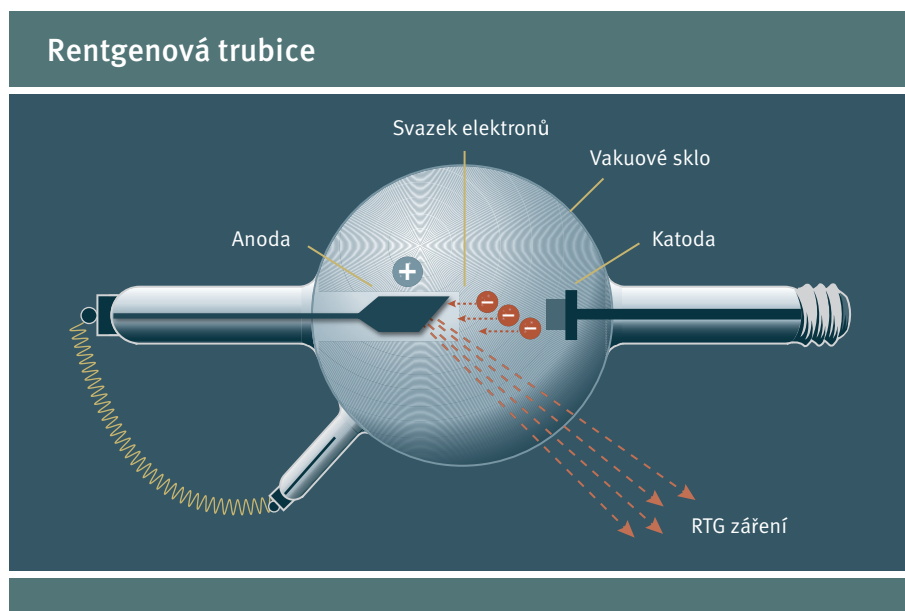
Vědci zkoumají, jak porozumět *atomu* a zejména jeho struktuře. Víme, že atomy mají maličké pozitivně nabitě jádro obklopené mrakem záporně nabitých *elektronů*. Jádro představuje svou velikostí jen asi sto tisícinu celého atomu, je ale tak hutné, že odpovídá prakticky úhrnné hmotě atomu.

Jádro je obecně shlukem částic, *protonů* a *neutronů*, které jsou těsně semknuty. Protony mají kladný náboj. Neutrony žádný elektrický náboj nemají. Chemické prvky jsou určovány počtem svých protonů a neutronů v jádře (např. bor má atom s 5 protony, atom uranu má 92 protonů). Prvky se shodným počtem protonů, ale rozličným počtem neutronů se nazývají *izotopy* (např. uran-235 a uran-238 se liší rozdílem tří neutronů v jádře). Atom jako celek nemá normálně ani negativní ani pozitivní náboj, protože má stejný počet negativně nabitých elektronů jako pozitivně nabitých protonů.



Některé atomy jsou přirozeně stabilní jiné nestabilní. Atomy s nestabilním jádrem, které se spontánně přeměňují a uvolňují energii v podobě záření, se nazývají **radionuklidy**. Tato energie působí na jiné atomy a ionizuje je. **Ionizace** je proces, při kterém atom získá kladný nebo záporný náboj v důsledku ztráty nebo získání elektronu. Ionizující záření nese takovou energii, že může odtrhnout elektrony z jejich oběžné dráhy a vytvářet nabité atomy zvané **ionty**. Vyzáření seskupení dvou protonů a dvou neutronů je podstatou **přeměny alfa**, vyzáření elektronů je označeno jako **přeměna beta**. Často nestabilní nuklid nese takové množství energie, že emise částic nestačí k jeho stabilizaci. Vydává potom mocný „výstřel“ energie ve formě elektromagnetického vlnění, tedy fotonů, což je podstata **záření gama**.

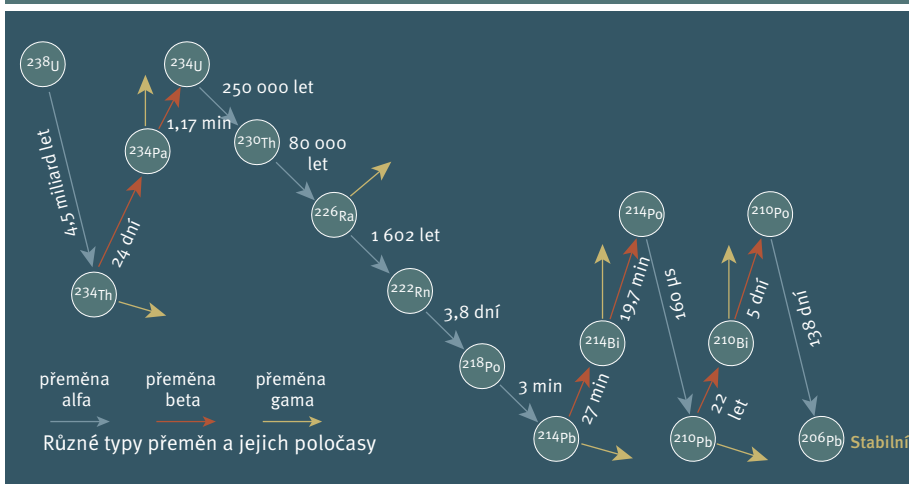
Záření X je také elektromagnetické záření jako záření gama, ale energie jeho fotonů je nižší. Ve skleněné vakuované trubici se tvoří spektrum X, když elektronový svazek produkovaný **katodou** zasahuje terčový materiál zvaný **anoda**. Spektrum X je určováno materiálem anody a energií elektronů v urychleném svazku. X-záření může být generováno uměle kdykoliv je toho třeba, což je velmi výhodné v průmyslových a lékařských aplikacích.



Radioaktivní přeměna a poločasy

I když nestabilita je vlastní všem radionuklidům, přece některé jsou více nestabilní než jiné. Např. částice v jádře atomu uranu-238 (s 92 protony a 136 neutrony) sotva drží pohromadě. Občas shluk dvou protonů a dvou neutronů se odtrhne a opustí atom jako alfa částice, čímž přemění uran 238 v thorium-234 (s 90 protony a 144 neutrony v jádře). Ale thorium-234 je rovněž nestabilní, přeměňuje se však jiným procesem. Vysílá vysoce energetické elektrony jako částice beta, a mění tak jeden z neutronů v proton. Vzniká tak atom protaktinia-234 s 91 protony a 143 neutrony v jádře. To je však opět nestabilní a brzy se stává uranem-234. Tento proces pokračuje, atom jakoby postupně „opelichával“ až z něj zbývá atom olova-206 s 82 protony a 124 neutrony, který pak zůstává stabilní. Existují mnohé jiné sekvence podobných transformací, neboli *radioaktivních přeměn*.

Uran radiová rozpadová řada

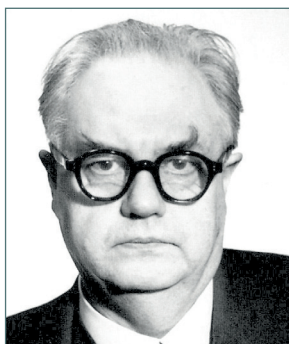


Doba, za kterou se kterékoliv množství nějakého nestabilního prvku přemění na polovinu, se nazývá *poločas přeměny*. Za jeden poločas se z milionu atomů v průměru 500 000 přemění na něco jiného. V průběhu dalšího poločasu se přemění dalších 250 000 atomů a tak to pokračuje, dokud se celé původní množství nepřemění (nerozpadne). Po době 10 poločasů zbyde z původního milionu jen asi jeden tisíc atomů (tj. okolo 0,1 %). Ve výše uvedeném příkladu by trvalo jen něco málo přes minutu, aby se polovina atomů protaktinia-234 přeměnila na uran-234. Na rozdíl od toho by bylo

potřebí čtyři a půl miliardy let (4 500 000 000), aby se polovina původního množství uranu-238 přeměnila na svůj dceřiný produkt thorium-234. Tím se vysvětluje, že se kolem nás přirozeně vyskytuje pouze relativně málo radionuklidů.

Jednotky záření

Dnes víme, že energie záření může poškozovat živou tkáň a že množství energie předané živé hmotě se vyjadřuje ve veličině **dávka**. Dávka záření může být způsobována kterýmkoliv radionuklidem, nebo řadou radionuklidů, které buď zůstávají mimo objem těla, nebo ho ozařují zevnitř, např. po jejich vdechnutí či požití. Dávkové veličiny jsou vyjadřovány různými způsoby v závislosti na tom, jaký objem těla a které jeho části byly ozářeny, zda byl ozářen jedinec nebo větší skupina osob, a to ve vztahu k trvání expozice (např. akutní ozáření).



Harold Gray (1905–1965)
Rolf Sievert (1896–1966)

Množství zářivé energie pohlcené v jednom kilogramu tkáně se nazývá **absorbovaná dávka** a je vyjádřena v jednotkách gray (Gy) podle jména anglického fyzika a pionýra radiobiologie **Harold Gray**. Ale tato veličina nevystihuje úplnou představu o významu ozáření, protože tatáž dávka alfa záření vyvolá mnohem větší poškození než stejná dávka od beta částic či gama záření. Pro srovnání významu absorbovaných dávek od různých typů záření je třeba dávku vážit vzhledem k jejímu potenciálu způsobit stejný typ a míru biologické škody. Takto vážená dávka se nazývá **ekvivalentní dávka**, která se hodnotí v jednotkách zvaných sievert (Sv) pojmenovaných podle švédského vědce **Rolf Sievert**. Jeden sievert je 1 000 milisievertů, podobně jako jeden litr vody je 1 000 mililitrů a jeden metr je 1 000 milimetrů.

Je třeba dále uvážit, že některé části těla jsou zranitelnější než jiné. Např. stejná ekvivalentní dávka vyvolá spíše rakovinu plic než rakovinu jater. Předmětem zvláštní pozornosti jsou potom reprodukční orgány ve vztahu k riziku dědičných následků. Aby bylo možno

porovnat dávky, kdy jsou ozářeny různé tkáně a orgány, jsou ekvivalentní dávky váženy také ve vztahu k rozdílným částem těla. Výsledkem tohoto vážení podle vnímavosti jednotlivých tkání a orgánů je veličina zvaná **efektivní dávka**, která se také vyjadřuje v jednotkách sievert (Sv). Přitom efektivní dávka je ukazatelem pravděpodobnosti vzniku nádorů či genetických změn po ozařování malými dávkami, a není tedy určena k posuzování následků ozáření dávkami vyššími.

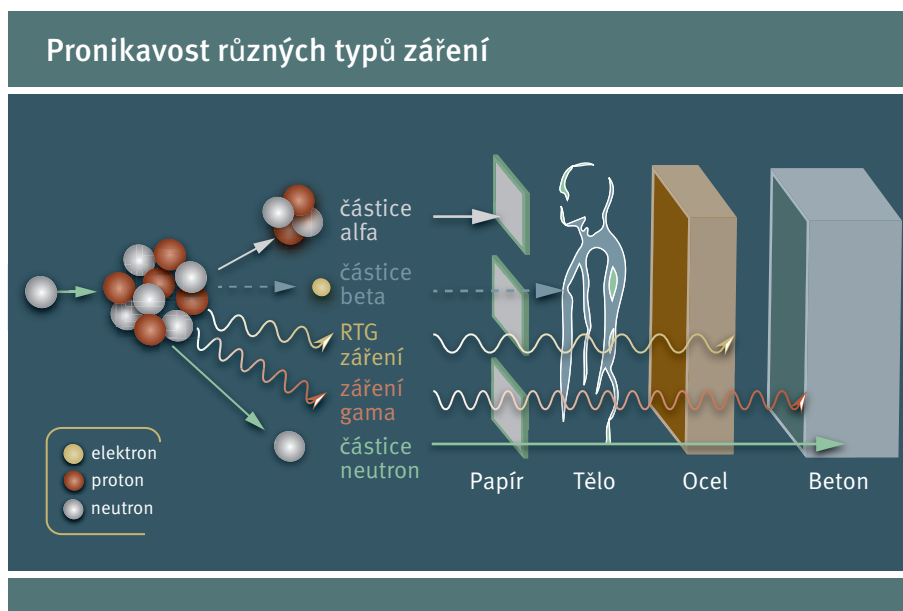
Tento komplexní systém radiačních veličin je nutné pochopit v jejich vzájemné vazbě. To potom umožňuje odborníkům radiační ochrany individuální dávky soustavně zaznamenávat a vzájemně porovnávat, což je mimořádně důležité pro pracovníky se zdroji záření či vůbec všech, kteří mohou být **profesně ozářeni**.

| Veličiny záření | |
|---------------------------|--|
| Fyzikální veličiny | |
| Aktivita | Počet jaderných přeměn za jednotku času. Měří se jako počet přeměn za sekundu a vyjadřuje se v jednotkách becquerel (Bq). |
| Absorbovaná dávka | Množství energie deponované zářením v jednotce hmotnosti látky. Jednotkou je jeden gray (Gy), což je joule na kilogram. |
| Odvozené veličiny | |
| Ekvivalentní dávka | Je to absorbovaná dávka násobená radiačním faktorem (w_R), který zohledňuje skutečnost, že různé typy záření způsobují při stejné absorbované dávce různou míru poškození. Vyjadřuje se v sievertech (Sv), což jsou jouly na kilogram. |
| Efektivní dávka | Je to ekvivalentní dávka násobená tkáňovým faktorem (w_T), který zohledňuje rozdílnou míru vnímavosti různých orgánů a tkání na vyvolání poškození toutéž ekvivalentní dávkou. Vyjadřuje se v sievertech (Sv), což jsou jouly na kilogram. |
| Kolektivní dávka | Součet všech efektivních dávek členů dané populace nebo dané skupiny lidí. Vyjadřuje se v jednotkách man-sievert (man Sv). |

Dosud bylo pojednáno jen o dávkách jednotlivcům. Sečteme-li dohromady všechny individuální efektivní dávky, dospějeme k výsledku, kterým je *kolektivní efektivní dávka* nebo prostě *kolektivní dávka*, a ta se vyjadřuje v man-sievertch (man Sv). Např. roční kolektivní dávka celosvětové populace je více než 19 milionů man Sv, což odpovídá roční průměrné dávce 3 mSv na jednotlivce.

1.3. Pronikavost ionizujícího záření

Stručně řečeno, záření může mít podobu toku částic (což zahrnuje částice alfa, beta a neutrony) nebo elektromagnetického vlnění (gama a X záření), obojí s rozdílnými hodnotami energie. Různé druhy vysílané energie a typy částic mají různou pronikavost látkou, a proto mají i rozdílné účinky na živou hmotu. Protože alfa částice mají dva pozitivně nabitě protony a dva neutrony, jsou mezi částicemi nositeli největšího náboje. S tímto větším nábojem je spojena také vyšší míra interakce s okolními atomy. Větší interakce vede k rychlé ztrátě energie částic, čímž se zmenšuje pronikavost alfa záření. Alfa záření může být zadrženo např. listem papíru. Beta částice, které jsou tvořeny negativně nabitými elektrony, nesou menší náboj, a tak pronikají v živé tkáni do hloubky jednoho až dvou centimetrů. Gama záření a X záření (např. rentgenové) jsou mimořádně pronikavá a procházejí vším, co je méně hutné než silná ocelová deska. Uměle produkované neutrony jsou vysílány nestabilním jádrem a vedou ke štěpení atomu nebo k jaderné





fúzi. Neutrony se vyskytují také v přírodě jako složky kosmického záření. Protože neutrony jsou částice elektricky neutrální, mají při průstupu látkou nebo živou tkání velmi vysokou pronikavost.





2. CO NÁM ZÁŘENÍ MŮŽE ZPŮSOBOVAT

Než budeme detailně pojednávat o účincích záření, měli bychom si připomenout pionýry radiologických věd, o nichž je zmínka výše v textu. Brzy po svém objevu učinil **Henri Becquerel** osobně neblahou zkušenost s možnými účinky záření na živé tkáně. Ampulka s radiem, kterou si uložil do kapsy, způsobila poškození přilehlého okrsku kůže.

Wilhelm Conrad Roentgen, který v r. 1898 objevil X-paprsky, zemřel na rakovinu střeva v r. 1923. **Marie Curie**, která také byla vystavena záření po celý svůj pracovní život, zemřela v r. 1934 na krevní onemocnění.

Uvádí se, že do konce padesátých let minulého století zemřelo v důsledku expozice záření nejméně 359 „ranných“ radiačních pracovníků (zejména lékařů a jiných badatelů), kteří si nebyli vědomi nutnosti ochrany.

Není překvapením, že ti, kteří se zabývali lékařskou aplikací ionizujícího záření, se také jako první věnovali vytváření doporučení k radiační ochraně pracovníků. V r. 1928 byl v rámci konání druhého mezinárodního kongresu radiologů ve Stockholmu zřízen Mezinárodní výbor ochrany před paprsky X a radiem a jeho prvním předsedou byl zvolen **Rolf Sievert**. Po druhé světové válce — s uvážením nových způsobů využívání záření také v nelékařských oborech — byl výbor rekonstruován a přejmenován na Mezinárodní komisi pro radiologickou ochranu (ICRP). Později, mezi lety 1958 až 1960, tedy v době mimořádných obav z genetických účinků jaderných zkoušek, působil Rolf Sievert jako čtvrtý předseda UNSCEAR.

S rostoucím vědomím rizika spojeného s radiační expozicí se stalo dvacáté století svědkem intenzivního výzkumu účinků záření na člověka a životní prostředí. Nejdůležitějším vyhodnocením populačních skupin vystavených ozáření je studie přibližně 86 500 osob přeživších atomové bombardování v Hirošimě a Nagasaki v r. 1945 (odtud anglické označení *the survivors of the atomic bombing* — **osoby přeživší atomové bombardování**). Další spolehlivá data pocházejí z poznatků zjištěných u lékařsky ozářených pacientů a u pracovníků po havarijním ozáření (např. v jaderné elektrárně Černobyl), a také z laboratorních pokusů na zvířatech a z buněčných studií.

Zdroje informací o účincích záření



UNSCEAR vyhodnocuje co nejdůkladněji vědecké informace o účincích ozáření lidí a složek životního prostředí a zjišťuje, jaké účinky mohou být spojeny s ozářením na různých úrovních.

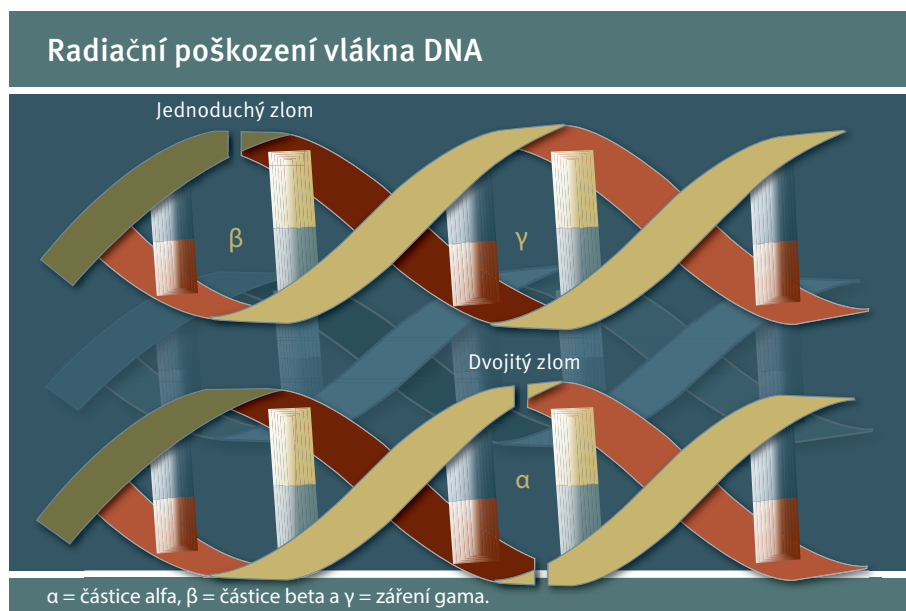
Jak už uvedeno výše, biologický význam radiační expozice závisí na dávce záření (tj. množství energie deponované ve tkáni), jeho typu a době, po kterou záření působilo. V tomto hodnocení UNSCEAR běžně užívá termínu **malá dávka** pro oblast pod 100 mGy a **velmi malá dávka** pro oblast pod 10 mGy.

Pásma dávek podle UNSCEAR

| | | |
|---------------------|----------------------|--|
| Vysoké dávky | Více než ~ 1 Gy | Těžké radiační nehody (např. hasiči v Černobylu) |
| Střední pásmo dávek | ~ 100 mGy až ~ 1 Gy | Pracovníci provádějící sanační práce v Černobylu |
| Nízké dávky | ~10 mGy až ~ 100 mGy | Vícefázová počítačová tomografie (CT) |
| Velmi nízké dávky | Méně než ~ 10 m Gy | Běžné rentgenové snímky (tj. bez použití CT) |

2.1. Účinky na člověka

Více než sto let radiologického bádání od objevení ionizujícího záření přineslo nesčetné informace o biologických mechanismech, jimiž záření působí na zdraví. Je známo, že záření vyvolává projevy na úrovni buněčné působící zánik buněk nebo buňky modifikuje zpravidla přímým účinkem na vlákna deoxyribonukleové kyseliny (DNA) v chromosomech. Je-li počet poškozených nebo usmrcených buněk dosti veliký, poškodí se orgány nebo dokonce nastane smrt ozářeného subjektu. Také může vzniknout jiný typ poškození DNA, které buňku neusmrtí. Takové poškození se obvykle zcela opraví, ale pokud k opravě nedojde, pak výsledná změna — známá jako **mutace buňky** — projeví své důsledky v následných buněčných děleních a v závěru může vést k rakovině. Když se takové poškození týká buněk přenášejících genetickou informaci potomkům, může být jeho důsledkem dědičné poškození. Informace o biologických mechanismech a o dědičných následcích se často získávají z laboratorních pokusů.



Na základě skutečnosti, že doba od ozáření k chorobným projevům je v závislosti na jejich typu nesterjná, definují se zdravotní účinky radiační expozice buď jako časné, nebo jako pozdní. Většinou se časné zdravotní projevy rozpoznávají zjišťováním klinických příznaků u jednotlivců, naproti tomu pozdní účinky - jako je rakovina - prostřednictvím **epidemiologických studií** spočívajících ve zjišťování chorobných projevů v populaci. Zvláštní pozornost je dále věnována zdravotním účinkům radiační expozice u dětí a u embryí/plodů a také dědičným projevům.

Časné zdravotní účinky

Časné zdravotní účinky jsou vyvolávány rozsáhlým poškozením/smrtí buněk. Příkladem jsou kožní popáleniny, ztráta vlasů/ochlupení a zhoršení plodnosti. Tyto účinky jsou charakteristické vysokým dávkovým prahem, který musel být překročen krátkou dobu před chorobným projevem. Intenzita účinku vzrůstá při překročení prahu se stoupající dávkou.

Jednorázové dávky větší než 50 Gy poškodí centrální nervový systém tak závažně, že smrt nastane během několika dnů. Při akutních dávkách i nižších než 8 Gy se rozvíjejí příznaky nemoci z ozáření známé také jako **akutní radiační syndrom**, který se může projevovat pocitem nevolnosti, zvracením, průjmy, střevními křečemi, sliněním, dehydratací, únavou, apatií, letargií, pocením, horečkou, bolestmi hlavy a poklesem krevního tlaku. Označení akutní se vztahuje ke zdravotním projevům a lékařským problémům, které se týkají bezprostředního období po expozici, na rozdíl od těch, kde důsledky se projevují až po delším období. Postižení mohou zemřít v průběhu prvního a druhého týdne pouze z důvodu hrubého poškození a selhání funkce žaludku a střevního traktu. Menší dávky nevyvolají takové gastrointestinální poškození, ale vedou k úmrtí v průběhu měsíců zpravidla pro poškození kostní dřeně. Po ještě menších dávkách se časově odsouvá nástup chorobných projevů a vyvolané účinky jsou mírnější. Asi polovina z těch, kteří obdrželi dávku 2 Gy, jsou postiženi zvracením asi tři hodiny po ozáření, ale takové příznaky se vzácně objeví i při dávkách pod 1 Gy.

Ozáření vysokými dávkami při nehodách v lékařství

Radioterapie využívá k ozařování pacientů vysoké dávky. Proto je nezbytná prevence nehodových situací vedoucích k akutním poškozením.





Na štěstí v případě, když červená kostní dřev a další složky krvetvorného systému jsou zasaženy dávkami menšími než 1 Gy, uplatní se jejich pozoruhodná regenerační kapacita a dojde k úplnému uzdravení — ovšem přetrvává vyšší riziko rozvoje leukémie v dalších letech. Pokud je zasažena jen část těla, zůstává nepoškozeno dostatečné množství aktivní kostní dřev, aby nahradilo její jinde utrpěné ztráty. Pokusy na zvířatech napovídají, že pokud alespoň desetina celkové aktivní kostní dřev zůstává nepoškozena, je naděje na přežití skoro sto procentní.

Skutečnost, že záření může přímo poškodit buněčnou DNA, je využívána v záměrné likvidaci maligních buněk zářením při léčbě nádorů, tedy v **radioterapii**. Celkové množství záření aplikovaného v radioterapii záleží na typu a vývojové fázi nádoru, který má být léčen. Typické dávky, které se aplikují u lokalizovaných nádorů orgánů a tkání (angl. solid tumors), činí v cílovém orgánu 20–80 Gy. Tato dávka aplikovaná jednorázově by pacienta ohrozila. Proto v zájmu neškodného průběhu léčby se dávky záření aplikují v časově rozložených frakcích obnášejících maximálně 2 Gy. Tato frakcionace dovoluje, aby se buňky normální tkáně regenerovaly, zatímco nádorové buňky jsou usmrcené, protože se u nich méně uplatňují nápravné buněčné procesy.

Pozdní zdravotní účinky

K pozdním zdravotním účinkům dochází dlouhou dobu po expozici. Lze říci, že k nejvíce časově posunutým účinkům patří účinky stochastické, pro něž platí, že na obdržených dávkách záření závisí pravděpodobnost jejich výskytu. Soudí se, že jsou způsobovány modifikacemi genetického materiálu buňky v důsledku její radiační expozice. Příkladem pozdních účinků jsou lokalizované nádory či leukémie postihující ozářené osoby nebo genetické projevy postihující potomky ozářených osob. Se stoupající dávkou se v populaci zjišťuje stoupající četnost jejich výskytu, zatímco intenzita projevů není ovlivněna.

Epidemiologické studie mají pro poznávání pozdních účinků radiační expozice velký význam. Tyto studie používají statistické metody, aby mohly porovnat výskyt zdravotních projevů (např. nádorů) v exponované a neexponované populaci. Je-li v exponované populaci zjištěn jejich zvýšený výskyt, může to být důsledkem radiační expozice.

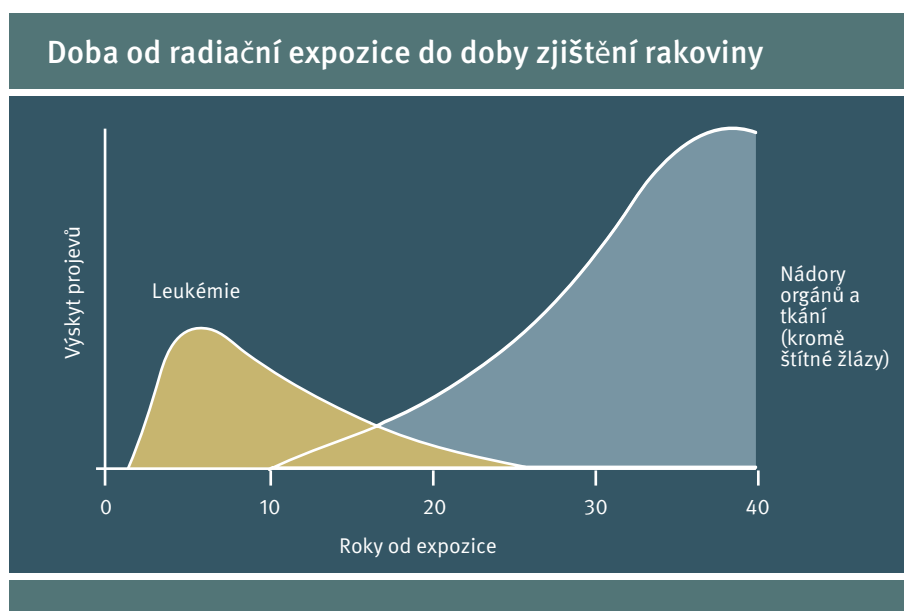
Nejdůležitější dlouhodobá sledování populací vystavených ozáření jsou epidemiologické studie u osob přeživších atomové bombardování. Jsou nejobsáhlejšími studiemi vůbec vzhledem k tomu, že zahrnují velké skupiny

lidí v podstatě reprezentující normální populaci, která obdržela široké spektrum dávek postihujících více méně rovnoměrně celé tělo. Také odhady dávek jsou u těchto lidí celkem dobře známy. Do současné doby tato studie odhalila několik set rakovin navíc ve srovnání s nádory, jejichž výskyt by se byl býval očekával u neozářených lidí. Protože mnoho z přeživších obětí atomového bombardování ještě žije, studie pokračují v zájmu úplného zhodnocení důsledků.

Rakovina

Rakovina je zodpovědná přibližně za 20 procent všech úmrtí a je druhou nejčastější příčinou smrti hned za kardiovaskulárními chorobami. V běžné populaci se očekává, že bez vlivu záření by bylo onemocnění rakovinou zjišťováno během života asi u čtyř osob z desíti. V posledních letech se u mužů zjišťuje nejčastěji rakovina plic, prostaty, tlustého střeva, žaludku a jater a u žen nejčastěji rakovina prsu, tlustého střeva, plic, děložního čípku a žaludku.

Vznik a rozvoj nádorů je složitý proces a má několik stupňů. Iniciační událost proběhne s největší pravděpodobností jen v jediné buňce, tím se nastartuje celý proces, ovšem zřejmě je zapotřebí dalších kroků, než se buňka přemění v buňku zhoubnou a vznikne nádor. Rakovina se může projevit i dlouho po prvotním poškození buněk, až uplyne doba latence.





Pravděpodobnost výskytu nádorů po ozáření je velkým problémem a může být kvantitativně hodnocena jen pro skupinu lidí exponovaných dávkou dostatečně velikou, aby vedla k takovému zvýšení počtu nádorů, které by překonalo statistické a jiné nejistoty. Přitom reálný podíl záření mezi faktory vyvolávajícími rakovinu zůstává neobjasněný.

Leukémie, rakoviny štítné žlázy a nádory kostí se nejdříve mohou projevit už za několik let po radiační expozici, zatímco většina ostatních rakovin se projeví nejdříve za deset let, někdy až za několik desetiletí po expozici. Přitom žádný jednotlivý typ nádorů není typickým projevem vlivu ozáření, takže je nemožné odlišit zářením vyvolané nádory od těch, které jsou vyvolány působením mnoha jiných možných činitelů. Nicméně je důležité stanovit pravděpodobnost vyvolání rakoviny určitými dávkami záření, aby se získal pevný vědecký základ pro ustanovení expozičních limitů.

Základem poznatků o vztazích mezi výskytem nádorů a radiační expozicí jsou studie osob ozářených v rámci lékařských úkonů, osob exponovaných při práci a především osob přeživších atomové bombardování, jak je uvedeno výše. Tyto studie se týkají velkých skupin lidí, kteří byli ozáření na mnoha částech těla a kteří pak byli sledováni po rozumně dlouhou dobu. Některé studie však mají velká omezení a nedostatky, zejména pro věkovou distribuci neodpovídající normální populaci a skutečnosti, že někteří ze sledovaných byli už dříve nemocní a byli ozářováni při léčbě rakoviny.

Ještě důležitější je okolnost, že téměř všechna data jsou založena na studiích osob, jejichž tkáň obdržely docela vysoké dávky, jeden či více grayů, buď jednorázově, nebo během krátkého období. Existuje jen málo informací o účincích v pásmu dávek, kterým jsou vystaveni běžně radiační pracovníci. Prakticky nejsou žádné přímé informace o následcích expozic, jimž je rutinně vystaveno obyvatelstvo. Je třeba dalších studií, které by sledovaly velké počty lidí po dlouhou dobu, ale i tak se tyto studie nakonec mohou ukázat jako nedostatečné k tomu, aby prokázaly významný vzestup výskytu nádorů oproti běžnému (spontánnímu) výskytu.

UNSCEAR prováděl obsáhlé přehledy o výskytu nádorů v populacích exponovaných záření a dospěl k odhadu, že přídatné riziko úmrtí na rakovinu v důsledku ozáření v oblasti dávek nad 100 mSv činí asi 3 až 5 případů na sto osob ozářených dávkou 1 Sv (3 až 5 %).



Jiné zdravotní účinky

Vysoké dávky záření na srdeční krajinu zvyšují pravděpodobnost kardiovaskulárních onemocnění (např. infarktu). K takovým expozicím může dojít při radioterapii, avšak současné léčebné techniky již způsobují na srdce nižší dávky záření. Dosud však neexistuje vědecký důkaz, že expozice malým dávkám záření způsobuje kardiovaskulární onemocnění.

UNSCEAR také zjistil, že u pracovníků na záchranných opatřeních v Černobylu je patrný zvýšený výskyt zákalu oční čočky, zřejmě způsobený vysokými dávkami záření. UNSCEAR také sledoval účinky záření na imunitní systém člověka, a to jak u přeživších obětí atomových útoků, tak i u záchránců v černobylské elektrárně a u pacientů po radioterapii. Účinky záření na imunitní systém se zjišťují změnami počtu buněk určitých typů v tkáních, např. v periferní krvi, a různými funkčními testy. Vysoké dávky potlačují imunitní systém zejména prostřednictvím poškození lymfocytů. Jejich pokles se běžně pokládá za časný indikátor k odhadu dávky po akutním ozáření.

Účinky na potomstvo

Pokud se ozářením poškodí zárodečné buňky, spermie nebo vajíčko, může to způsobit dědičné účinky u potomstva. Vedle toho záření může přímo poškodit zárodek nebo plod již během jeho vývoje v děloze. Je důležité rozlišovat od sebe radiační expozici dospělých, dětí a zárodků/plodů. UNSCEAR provedl obsáhlé přehledy zdravotních účinků v těchto skupinách, tedy včetně účinků dědičných.

Účinky na děti

Zdravotní účinky u lidí závisejí na řadě fyzikálních faktorů. Dopad radiační expozice u dětí a dospělých je rozdílný už pro jejich anatomické a fyziologické odlišnosti. Protože tělo dětí je útlejší a je méně chráněno stínícím efektem zevnějších vrstev tkání, dávka realizovaná ve vnitřních orgánech bude při dané zevní expozici vyšší. Děti jsou nižší postavy než dospělí, takže mohou obdržet vyšší dávky z radionuklidů deponovaných na zemi.

Pokud jde o ozáření z vnitřní depozice radionuklidů, v důsledku malých rozměrů dítěte a menších vzájemných vzdáleností orgánů, ozařují radionuklidy koncentrované v nějakém orgánu sousedící orgány více, než je tomu u dospělých. Uplatňují se také další na věku závislé podmínky

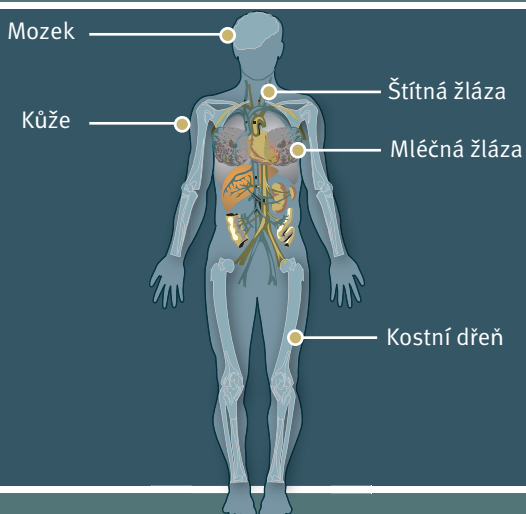


týkající se metabolismu a fyziologie, které vedou k významným rozdílům při výpočtu dávek pro různý věk. Některé radionuklidy mají zvláštní význam při vnitřním ozáření dětí. Havárie, při nichž uniká do prostředí radioaktivní jód-131, mohou být významným zdrojem expozice štítné žlázy. Pro daný příjem tohoto radionuklidu je dávka ve štítné žláze kojenců asi devětkrát vyšší než u dospělých. Studie v Černobylu potvrdily souvislost mezi jodem-131, který se koncentruje ve štítné žláze, a rakovinou tohoto orgánu.

Epidemiologické studie také ukázaly, že mladí lidé — pod 20 let věku — jsou při stejné radiační expozici asi dvakrát více náchylní k rozvoji leukémie než dospělí. Ještě vnímavější jsou děti pod deset let věku; některé další studie naznačují, že toto zvýšení je oproti dospělým asi troj — až čtyřnásobné. Jiné studie ukázaly, že dívky pod dvacet let jsou asi dvakrát vnímavější na rakovinu prsu než ženy dospělé. Děti jsou tedy více ohroženy po ozáření onemocnět rakovinou než dospělí, ovšem to se může u nich projevit také až později v životě, když dosáhnou věku, kdy takový nádor bývá obvykle zjišťován.

UNSCEAR soustředil vědecký materiál dokládající, že podmínky vzniku rakoviny u dětí jsou proměnlivější než u dospělých a záleží zde na typu nádoru i věku a pohlaví dítěte. Termín *radiosenzitivita* ve vztahu k indukci rakoviny znamená frekvenci výskytu nádorů (počet případů v čase) vyvolaných ozářením.

Orgány dětí nejvnímavější na vyvolání nádoru ozářením



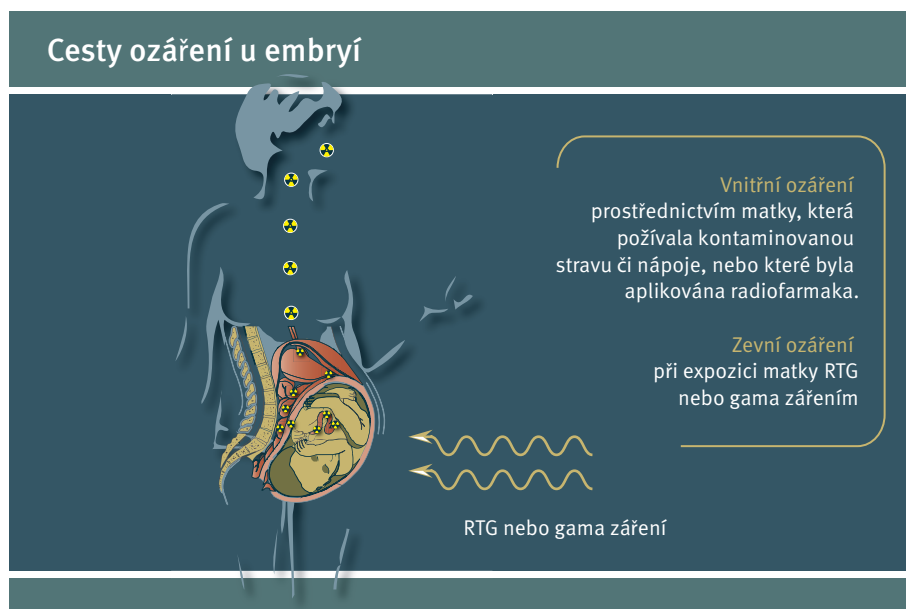
Děti exponované záření ve věku do 20 let mají dvojnásobnou pravděpodobnost vzniku a rozvoje zhoubného **nádoru mozku**. Podobná závislost byla zjištěna u dívek exponovaných záření do věku 20 let ve vztahu k **nádoru mléčné žlázy**.

Rozdíly v časných zdravotních účincích po velkých dávkách (jako např. v radioterapii) jsou různorodé a mohou se vysvětlit interakcemi mezi různými tkáněmi a biologickými mechanismy. Některé účinky jsou u dětí výraznější než u dospělých (např. poškození mozku, zákaly oční čočky či uzly ve štítné žláze). A také se vyskytují opačné případy, kdy dětské tkáně jsou odolnější (např. plíce, vaječníky).

Účinky na nenarozené dítě

Embryo či plod mohou být exponovány v důsledku kontaminace potravy či nápojů matky radionuklidy (vnitřní expozice), anebo přímo zevním ozáření. Jelikož plod je v děloze chráněn, je ozáření plodu pro většinu radičních situací zpravidla menší než ozáření matky. Avšak protože embryo a plod jsou zvláště citlivé k ozáření, mohou být následky expozice výrazné, a to i při dávkách nižších, než jsou ty, které by mohly bezprostředně postihnout matku. K takovým následkům patří zpoždování ve vývoji, malformace, zhoršená funkce mozku i rakovina.

Vývoj savců v děloze lze přibližně rozdělit na tři období. Je známo, že záření může zabít embryo v děloze v prvním stadiu, které trvá od početí do zanoření oplozeného vajíčka do děložní sliznice. To se odehrává v prvních dvou týdnech. Je velmi obtížné zkoumat, co se v tomto stadiu děje, nicméně informace z pokusů na zvířatech ukazují, že při překročení určité prahové dávky je účinek na časný zárodek fatální.





Hlavní nebezpečí během další fáze vývoje člověka v období od druhého do osmého týdne spočívá v tom, že záření může vést k malformaci (znetvoření) rostoucích orgánů, popřípadě i způsobit uhynutí plodu v době kolem porodu. Pokusy na zvířatech ukázaly, že jednotlivé orgány (oko, mozek, kostra) jsou zejména citlivé na vznik malformace, když jsou ozářeny jejich tkáňové základy v časném období své výstavby.

Poškození centrálního nervového systému je největší po osmém týdnu těhotenství, kdy začíná třetí, a to poslední jeho fáze. V porozumění účinkům záření na plod byl učiněn velký pokrok. Jedním z výsledků je zjištění, že ve skupině 1 600 žen těhotných v době atomového bombardování a ozářených dávkou více než 1 Gy se u 30 jim narozených dětí vyskytla mimořádně závažná porucha intelektuálních schopností.

Existuje určitý rozpor v otázce, zda ozáření embrya či plodu může způsobit rakovinu později po narození. V pokusech na zvířatech se nepodařilo prokázat žádnou takovou souvislost. UNSCEAR se pokoušel o stanovení celkového rizika řady radiačních účinků u nenarozených dětí — smrti, malformací, mentálního zaostávání a rakoviny. Bylo vypočítáno, že mezi 1 000 živě narozenými dětmi ozářenými v děloze jednou setinou graye mohou být takto postiženi pravděpodobně 2 jedinci — ve srovnání se 6 % (60 jedinců), u nichž se projeví stejné postižení spontánně.

Dědičné účinky

Záření může modifikovat buňky přenášející genetickou informaci potomkům, což může vést k dědičným poškozením. Studie takových dědičných poruch jsou obtížné, neboť je velmi málo informací o tom, jaké genetické důsledky postihují lidi v důsledku radiační expozice. To je zčásti způsobeno tím, že pořízení úplného přehledu dědičných účinků by vyžadovalo sledování po mnoho generací, a zčásti tím, že tyto účinky – podobně jako rakovina radiačního původu – se nedají odlišit od těch, které se vyskytují běžně v populaci z jiných příčin.

Mnoho těžce postižených embryí a plodů nepřežije. Bylo zjištěno, že asi polovina spontánních potratů má abnormální genetický profil. I když se postižení dočkají porodu, platí, že děti s genetickými poruchami umírají před pátým rokem života asi pětkrát častěji než normální děti.

Dědičné poruchy spadají do dvou hlavních kategorií: chromosomové aberace zahrnující změny v počtu či struktuře chromosomů a vlastní



genové mutace. Ty se mohou přenášet do dalších generací, ale to neplatí pro všechny případy.

Studie ve skupině dětí, jejichž rodiče přežili atomové bombardování, neprokázaly pozorovatelné dědičné účinky. To neznamená, že nedošlo k nějaké újmě. Pouze lze konstatovat, že nepříliš velká radiační expozice nevyvolala v relativně velké populaci pozorovatelný vliv. Na druhé straně experimentální studie na rostlinách i zvířatech ozářených vysokými dávkami zřetelně prokázaly, že ozáření může vyvolávat genetické účinky. Je nepravděpodobné, že by člověk měl být výjimkou.

UNSCEAR soustředil své hodnocení pouze na závažné genetické účinky a dospěl k odhadu, že celkové genetické riziko činí asi 0,3 až 0,5 % na jeden Gy, což činí méně než desetinu odhadu rizika úmrtí na nádor v první generaci populace zasažené ozářením.

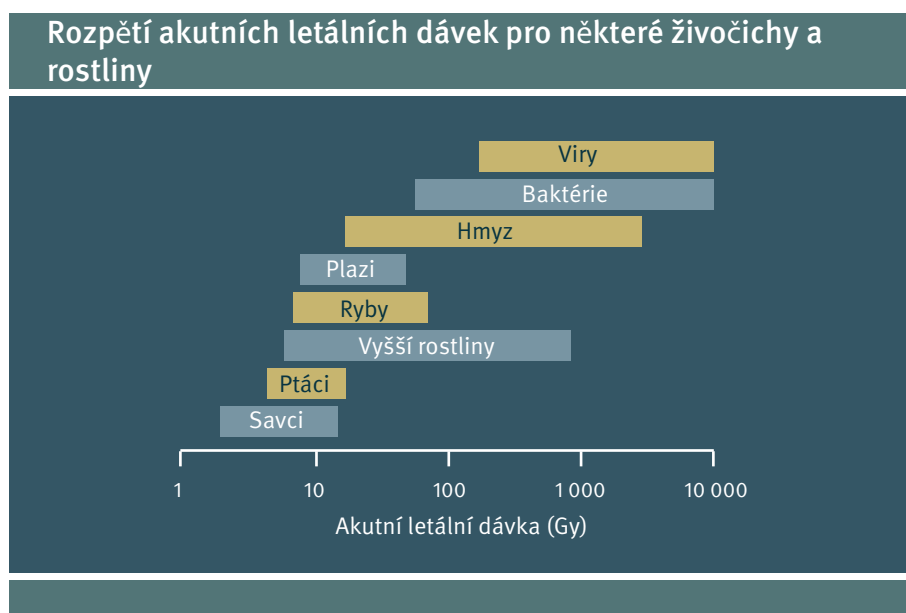
2.2. Účinky na živočichy a rostliny

Účinky radiační expozice na živočichy a rostliny jsou nyní více středem pozornosti, než tomu bývalo dříve. Převažoval názor, že když život člověka je náležitě chráněn, jsou tím podobně chráněni rostliny i živočichové. UNSCEAR vyhodnotil účinky radiační expozice na rostlinstvo a živočichy a dospěl k závěru, že teoretická dávka v rozpětí 1–10 Gy by pravděpodobně nevyvolala účinky v populaci živočichů a rostlin a že individuální odezvy na ozáření kolísají (savci jsou ze všech živočichů nejvnímavější). K účinkům, které se zdají být významné na úrovni populací, patří plodnost, úmrtnost a vyvolání mutací. **Změny plodnosti**, jako je počet potomků, jsou citlivějšími indikátory účinků záření než úmrtnost.

Letálními dávkami se rozumí takové, které usmrcují 50 % exponovaných jedinců. Pro rostliny ozářené v relativně krátkém čase (**akutní ozáření**) se uvádí letální dávka v rozmezí 10–1000 Gy. Větší rostliny jsou obecně více radiosensitivní než malé. U malých savců tyto dávky činí 6–10 Gy, u větších okolo 2,5 Gy. Některý hmyz, bakterie a viry přežívají dávky i nad 1 000 Gy.

Hlavním zdrojem informací jsou pozorování získaná z ozáření živočichů a rostlin v oblastech okolo Černobylu po tamní katastrofě. UNSCEAR vyhodnocoval cesty ozáření, kterými bylo životní prostředí exponováno, a vyvinul nové přístupy k odhadu potenciálních důsledků takové expozice.

Nedávno se UNSCEAR zabýval hodnocením dávek a příslušných účinků po havárii jaderné elektrárny ve Fukušimě-Daiichi a dospěl k závěru, že expozice byly celkem příliš nízké, než aby vedly k pozorovatelným účinkům. Přitom změny v biomarkerech, které jsou ukazateli určité choroby nebo fyziologického stavu organismu — zejména u savců — nelze vyloučit, ale jejich význam pro integritu populace těchto organismů zůstává nejasný.



Je důležité poznamenat, že ochranná a nápravná opatření prováděná v zájmu snížení expozice lidí mají také významný širší dopad. Mohou např. ovlivnit ekologické výrobky a služby, zdroje potřebné v zemědělství, lesním hospodářství, rybářství a turistice a v neposlední řadě i prostředky pro aktivity duchovní, kulturní a rekreační.

2.3. Vztah mezi dávkou záření a účinkem

Když chtěl UNSCEAR souhrnně charakterizovat a zobecňovat vztah mezi dávkou záření a zdravotními účinky, zdůraznil důležitost rozlišení mezi pozorováními skutečně už vzniklých zdravotních účinků v exponovaných populacích a teoretickými předpověďmi možných budoucích účinků. V obou případech je nutné vzít v úvahu všechny nejistoty a nepřesnosti, ať už v měření záření, statistických úvahách nebo jiných podmínkách.

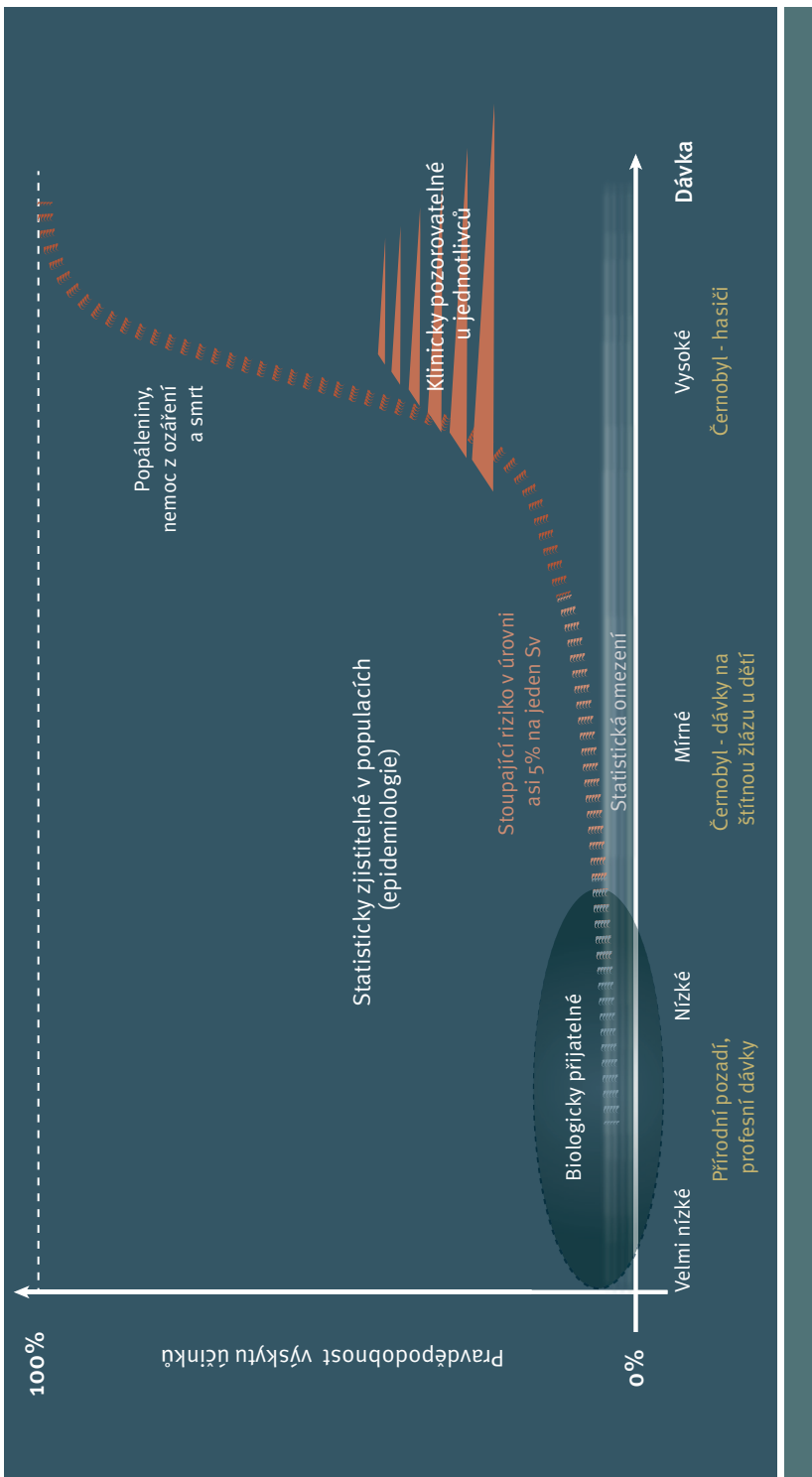
Při současném stavu vědomostí mohou být zdravotní účinky ozáření v případě časných projevů (např. kožní popáleniny) spolehlivě přisouzeny záření jen tehdy, pokud se vyskytnou u jednotlivců ozářených vysokou dávkou nad 1 Gy. Takové dávky mohou nastat při radiačních nehodách, jak tomu bylo u zachránářů během havárie v Černobylu nebo u pacientů chybně ozářených při pochybeních v radioterapii.

V epidemiologických metodách je možné připsat vlivu ozáření zvýšený výskyt pozdních účinků (např. nádorů) v populaci vystavené mírnému stupni dávek záření jen tehdy, je-li pozorované zvýšení natolik významné, aby mohly být překonány všechny nejistoty. Přitom platí, že v současné době nejsou k dispozici žádné biomarkery, které by mohly rozlišit, zda konkrétní zjištěný nádor je nebo není vyvolán ozářením.

Když dávka záření byla nízká nebo velmi nízká — což je spíše charakteristické při ozáření lidí v přírodním prostředí nebo při práci — změny ve výskytu pozdních účinků na zdraví se nedají potvrdit v důsledku statistických či jiných nejistot. Přitom takové účinky nemohou být zcela vyloučeny.

Pokud jde o hodnocení zdravotních důsledků v budoucnosti, existuje celkem shoda, jak tyto odhady v pásmu vysokých a mírných dávek provádět. Ovšem pro nízké a velmi nízké dávky je nutné ke stanovení pravděpodobnosti výskytu chorobných změn zavést určité předpoklady a matematické modely, ale i tak se dospěje jen k výsledkům velmi nejistým. V důsledku toho UNSCEAR nedoporučil používat v těchto případech pro v hodnocení budoucích zdravotních následků nebo úmrtí takové modely jako např. hodnocení pozdních následků po Černobylu nebo nehodě ve Fukušimě-Daiichi. Takový postup je nepřijatelný. Přesto pro účely srovnávání ve veřejném zdravotnictví nebo v radiační ochraně může být provádění takových výpočtů užitečné, ovšem za předpokladu, že se vezmou v úvahu všechny nejistoty a zdůrazní se omezená platnost takových postupů.

Vztah mezi dávkou záření a zdravotními následky

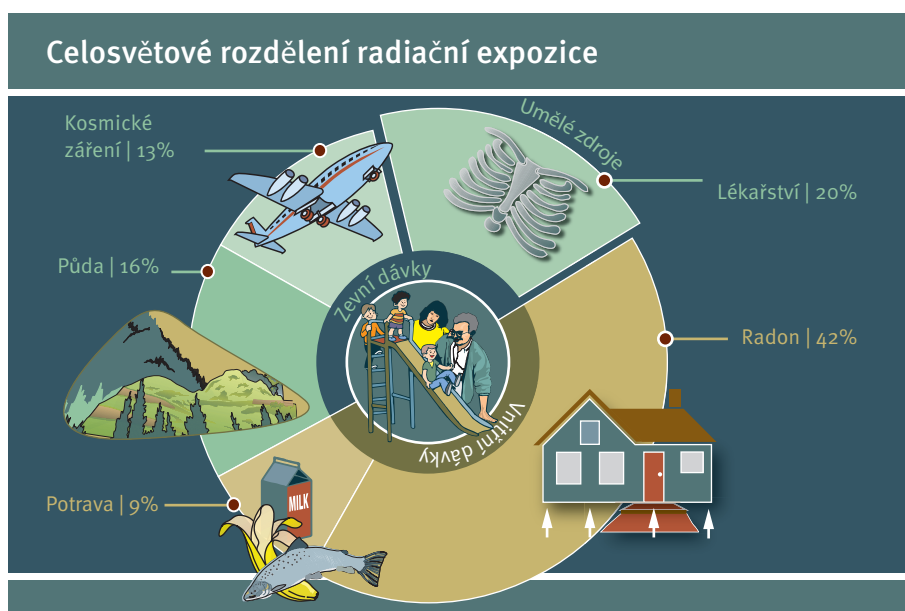




3. KDE SE MŮŽEME SE ZÁŘENÍM SETKAT

Všichni jsme neustále ozařováni z různých zdrojů. Všechny živočišné a rostlinné druhy na Zemi vždy existovaly a vyvíjely se v prostředí, kde byly vystaveny záření z přírodního pozadí. Později — vlastně od počátku uplynulého století — lidé a jiné organismy byli exponováni také umělým zdrojům. Přes 80 % naší expozice je přírodního původu a jen 20 % připadá na umělé zdroje — zejména z aplikace záření v lékařství. Radiační expozice je v této publikaci kategorizována podle zdrojů a se zaměřením na ozáření týkající se obyvatelstva. Pro regulační účely (např. radiační ochranu) je radiační expozice pojednána pro různé skupiny lidí. V této souvislosti jsou uvedeny další informace o pacientech — exponovaných v rámci aplikace záření v lékařství — a o lidech exponovaných při práci.

Jiná cesta kategorizace expozic vychází ze způsobu jak — tj. jakou cestou — jsme ozařováni. Radioaktivní látky a záření v prostředí nás může ozařovat — *zevně* (externě), z vnějších zdrojů. Nebo můžeme radioaktivní látky požívat v potravě nebo nápojích, či je vstřebávat kůží nebo otevřenými poraněními, a ty nás potom ozařují zevnitř — *vnitřně* (interně). Z celosvětového pohledu jsou dávky ze zevního a vnitřního záření přibližně v rovnováze.

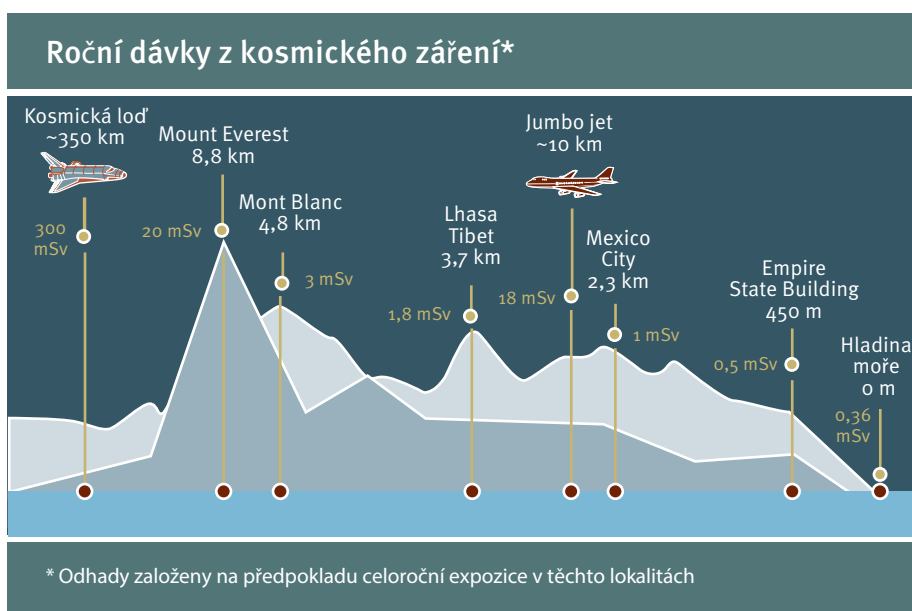


3.1. Přírodní zdroje záření

Od vzniku Země je její prostředí vystaveno záření jak z kosmického prostoru, tak i z radioaktivního materiálu obsaženého v zemské kůře a v zemském jádru. Neexistuje možnost, jak se vyhnout expozici z přírodních zdrojů, které ve skutečnosti způsobují největší podíl expozice obyvatel tohoto světa. Celosvětový průměr efektivní dávky na hlavu činí přibližně 2,4 mSv a kolísá v rozmezí od 1 až do více než 10 mSv v závislosti na tom, kde lidé žijí. V budovách se může z podloží (z půdy) hromadit specifický radioaktivní plyn zvaný radon, a i samotný stavební materiál může obsahovat radionuklidy, které zvyšují radiační expozici. I když tyto zdroje jsou přírodní povahy, naše expozice může být modifikována vlastní volbou, kde žijeme, kde bydlíme, co jíme a pijeme.

Kosmické záření

Kosmické záření je významný přírodní zdroj zevního ozáření. Většina tohoto záření pochází z hlubin kosmického prostoru, část tohoto záření se uvolňuje ze slunce v průběhu jeho erupcí. Toto záření ozařuje Zemi přímo a vlivem interakcí se složkami atmosféry vytváří různé druhy záření či radioaktivního materiálu. Je převládajícím zdrojem záření v zevním prostoru. Protože zemská atmosféra a její magnetické pole značně snižují intenzitu kosmického záření, jsou některé části Země ozářeny více než jiné. Kosmické záření se vychyluje magnetickým polem severního a





jižního pólu, proto jsou mu polární oblasti vystaveny více než rovníkové pásmo.

Úroveň expozice dále stoupá s nadmořskou výškou, a to v důsledku toho, že vrstva vzduchu, která zde působí jako stínění, se s nadmořskou výškou zeslabuje. A tak lidé žijící na úrovni hladiny moře jsou v průměru vystaveni efektivní dávce 0,3 mSv ročně, což představuje přibližně 10–15 % jejich celkové dávky z přírodních zdrojů. Lidé žijící ve výšce 2 000 m nad mořem dostávají několikanásobek této dávky. Cestující v letadlech mohou být exponováni ještě vyšším dávkám z kosmického záření v závislosti na výšce a trvání letu. Např. při běžné letové výšce může průměrná efektivní dávka za dobu letu 10 hodin činit 0,03–0,08 mSv. Jinými slovy cesta New York-Paříž a zpět způsobí dávku okolo 0,05 mSv. To přibližně odpovídá efektivní dávce, kterou by pacient obdržel z běžného rentgenového snímku hrudníku. I když odhad efektivní dávky jednotlivého pasažéra při jednom letu je nízký, kolektivní dávka může být vysoká vzhledem k celosvětově velmi vysokému počtu pasažérů a letů.

EXPOZICE PRACOVNÍKŮ

Dávky z kosmického záření jsou významné pro osoby, které tráví v letadle delší dobu, jako jsou piloti a stewardi, jejichž průměrné roční dávky činí 2–3 mSv. Dávky byly také sledovány v řadě kosmických misí. Zjištěné dávky se pohybovaly v rozmezí 2–27 mSv v závislosti na aktuální aktivitě Slunce. Ovšem kosmonaut obdrží během čtyřměsíčního pobytu na Mezinárodní kosmické stanici, která obléhá Zemi ve výšce 350 km, efektivní dávku okolo 100 mSv.

Pozemní zdroje

Půda

Cokoliv se vyskytuje na povrchu nebo uvnitř Země obsahuje tzv. primordiální radionuklidy. Tyto radionuklidy s extrémně dlouhým poločasem přeměny nacházející se v půdě — jako jsou draslík-40, uran-238 a thorium-232 — spolu s radionuklidy vznikajícími jejich přeměnou, jako jsou radium-226 a radon-222, vysílaly své záření dříve, než se Země v současné podobě vytvořila. UNSCEAR počítal, že celosvětově je každý člověk takto ozářen v průměru efektivní dávkou kolem 0,48 mSv, což představuje souhrnnou zevní expozici z pozemních zdrojů.



Zevní expozice se významně liší od místa k místu. Studie ve Francii, Německu, Itálii, Japonsku a USA ukazují, že okolo 95% jejich populace žije v oblastech, kde průměrná roční dávka ze zevního prostředí kolísá mezi 0,3 až 0,6 mSv. Ovšem v některých lokalitách těchto zemí mohou lidé obdržet dávky vyšší než 1 mSv ročně. Na světě však existují jiné lokality, kde radiační expozice z terestriálních zdrojů je ještě vyšší. Např. na jihozápadním pobřeží Kerala v Indii se nachází 55 kilometrů dlouhé území, hustě zalidněné, kde lidé jsou vystaveni v průměru roční dávce 3,8 mSv. Je známo, že jiná území s vysokými hodnotami dávek z pozemních zdrojů se vyskytují v Brazílii, Číně, Iránu, na Madagaskaru a v Nigérii.

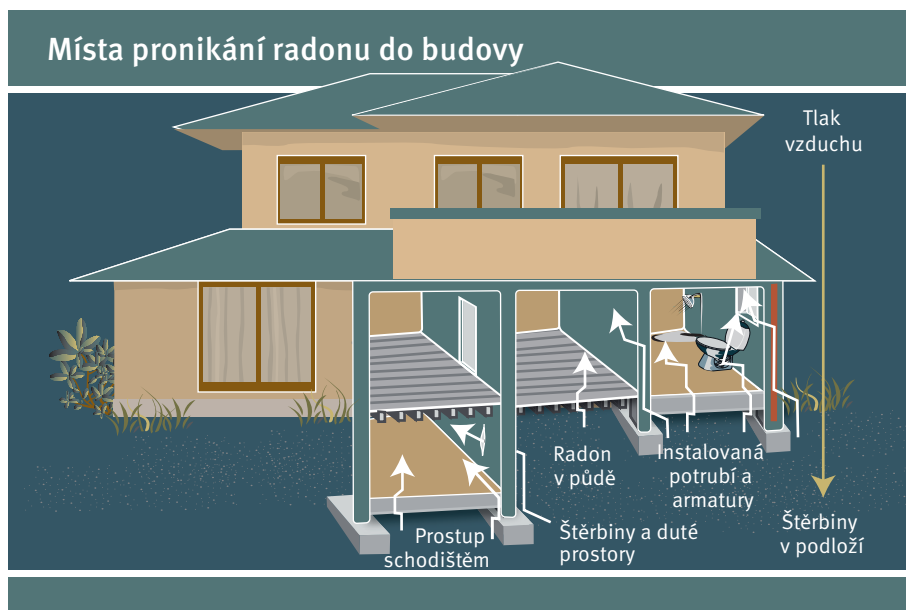
Radon

Radon-222 je radionuklid, který jako plyn běžně uniká z půdy. Je produktem rozpadové řady uranu-238 přítomného v horninách a půdách Země. Po vdechnutí jsou některé krátkodobé rozpadové produkty radonu — zejména polonium-218 a -214 — zachycovány v plicích a jimi uvolňované alfa částice ozařují buňky výstelky dýchacích cest. Radon je tedy základní příčinou vzniku plicní rakoviny u osob vystavených ve zvýšené míře inhalaci radonu, a to jak u kuřáků, tak i nekuřáků. Kuřáci jsou ovšem zranitelnější z důvodu interakce mezi kouřením a expozicí radonu.

Radon je přítomen všude v atmosféře, může pronikat do budov jejich sklepními a schodištními prostory, a tak v obytných místnostech může narůstat jeho koncentrace — tj. aktivita definovaná jako počet radioaktivních přeměn za jednotku času v jednotkovém objemu. Zejména když jsou budovy vytápěny a teplý vzduch v budově stoupá do horních pater, kde uniká okny a štěrbinami, vzniká v dolních patrech a suterénních prostorách podtlak. To má za následek „aktivní nasávání“ radonu z podloží štěrbinami a netěsnostmi (např. kolem vstupů přívodů z inženýrských sítí) do sklepních prostor.

Celosvětový průměr koncentrace radonu v budovách činí asi 50 Bq/m³. Ovšem tento průměr v sobě skrývá velkou variabilitu hodnot od místa k místu. Národní průměry objemové aktivity radonu v obydlích (indoor radon) široce kolísají od hodnot nedosahujících ani 10 Bq/m³ na Kypru, v Egyptě a na Kubě, k hodnotám vyšším než 100 Bq/m³ v České republice, Finsku a Lucembursku. V některých zemích jako v Kanadě, Švédsku a Švýcarsku se vyskytují domy s koncentracemi radonu mezi 1 000 až 10 000 Bq/m³. Ovšem podíl domů s takto vysokými koncentracemi je nízký. Mezi faktory, které jsou příčinou této variability, lze uvést místní geologické podmínky, propustnost půdy, použitý stavební materiál a způsob větrání budov.

Klíčovým faktorem je zejména větrání, které závisí na aktuálním klimatu. V budovách, které jsou dobře větrány, jak je tomu v tropickém pásmu, je



nepravděpodobné, že by mohlo dojít k významné kumulaci radonu. V mírném nebo studeném pásmu, kde prostory bývají méně větrány, mohou koncentrace radonu stoupat významně. Proto je třeba při navrhování energeticky úsporných budov zohlednit případné důsledky omezeného větrání. V řadě zemí se realizují rozsáhlé monitorovací programy, které se stávají podkladem pro zavádění opatření snižující koncentrace radonu v budovách.

Koncentrace radonu ve vodě je obvykle velice nízká, ale některé zdroje — např. hlubinné vrty v Helsinkách ve Finsku, Hot Springs v Arkansasu, USA — mají koncentrace velmi vysoké. Radon ve vodě může přispět ke zvýšení koncentrace radonu ve vzduchu a to zejména v koupelně při sprchování. UNSCEAR však dospěl k závěru, že průměrná roční dávka z radonu požitého v pitné vodě je malá ve srovnání s příjmem vdechováním. UNSCEAR také dospěl k odhadu, že průměrná celková roční dávka z radonu 1,3 mSv představuje asi polovinu dávky, kterou obyvatelstvo dostává z přírodních zdrojů.



EXPOZICE PRACOVNÍKŮ

Na některých pracovištích inhalace plynného radonu je převládající složkou radiační expozice pracovníků. Radon je hlavním zdrojem radiační expozice pracovníků v podzemí dolů všech typů. Průměrná roční efektivní dávka u horníka v uhelném dole činí přibližně 2,4 mSv, u ostatních horníků okolo 3 mSv. V souhrnu všech pracovníků jaderného průmyslu činí odhad průměrné roční efektivní dávky na hlavu 1 mSv, na čemž se podílí nejvíce expozice radonu v uranovém hornictví.

Zdroje v potravinách a nápojích

Potraviny a nápoje obsahují některé primordiální a některé jiné radionuklidy převážně z přírodních zdrojů. Radionuklidy mohou přecházet do rostlin a odtud do živočišných organismů z hornin a minerálů přítomných v půdě a vodě. Dávky takto způsobované velice kolísají v závislosti na koncentraci radionuklidů v potravinách a vodě a na místních výživových návycích.

Např. u ryba měkkýšů je relativně vysoká hladina olova-210 a polonia-210, a tak lidé, kteří jedí ve velké míře mořskou potravu, obdrží větší dávky než obecná populace. Srovnatelně zvýšené dávky z potravin se týkají i obyvatel severských území, kde se konzumuje velké množství sobího masa. Sobi v arktických krajinách mají v těle relativně vysoké koncentrace polonia-210, které se kumuluje v lišejnících, které sobi spásají. Podle odhadu UNSCEAR představují celosvětově průměrné efektivní dávky z potravin a nápojů asi 0,3 mSv, zejména pro obsah draslíku-40 a prvků rozpadové řady uranu-238 a thoria-232.

Vedle radionuklidů z přírodních zdrojů mohou potraviny obsahovat také radionuklidy ze zdrojů umělých. Ovšem dávkový příspěvek z autorizovaných výpustí těchto radionuklidů je obvykle velmi malý.

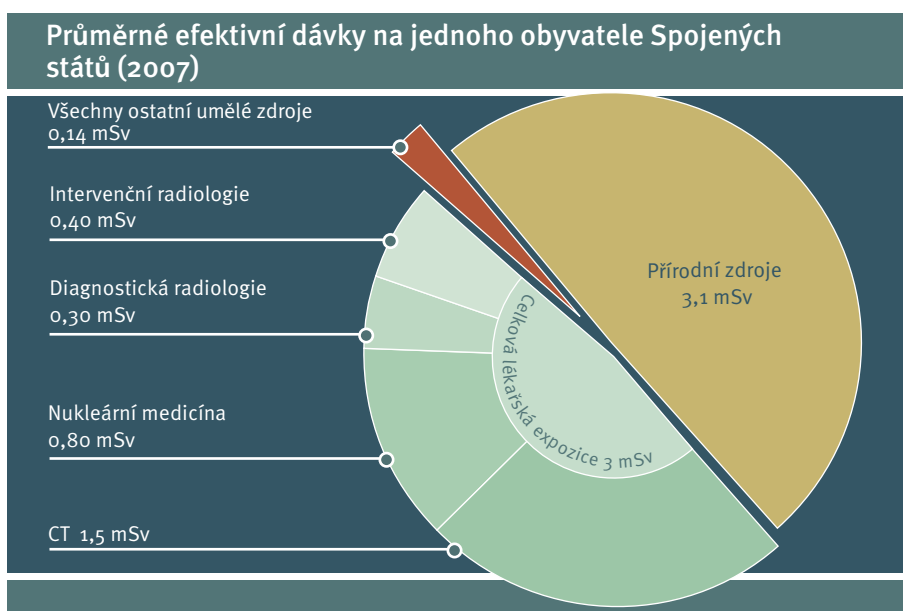
3.2. Umělé zdroje záření

Používání zdrojů záření se významně rozšířilo v posledních desetiletích, kdy se vědci naučili využívat energii atomu pro široké spectrum použití od vojenských aplikací k lékařským (např. léčení nádorů), a dále od výroby elektrické energie k aplikacím v domácnostech (např. požární detektory). Tyto a jiné umělé zdroje znamenají pro jedince i globální populaci další přídatnou expozici k dávce z přírodních zdrojů.

Individuální dávky u umělých zdrojů záření mají velké rozpětí. Většina lidí dostává relativně malé dávky z těchto zdrojů, ale jsou i jedinci, kteří obdrží několikanásobek průměru. Umělé zdroje jsou většinou vlivem opatření radiační ochrany pod dobrou kontrolou.

Lékařské zdroje záření

Využívání ionizujícího záření v lékařství k diagnóze a léčbě určitých nemocí má tak významné postavení, že je nyní daleko největším umělým zdrojem ozáření ve světě. V průměru odpovídá za 98 % ozáření ze všech umělých zdrojů, a po přírodních zdrojích je druhým největším přispívatelem k celosvětové expozici populace, z níž představuje přibližně 20 %. Většina lékařských expozic se uskutečňuje v industrializovaných zemích, kde je k dispozici více prostředků na lékařskou péči, a radiologická zařízení jsou využívána ve větším rozsahu. V některých zemích to dokonce vedlo k ročním průměrným dávkám z lékařských zdrojů srovnatelným s dávkami z přírodního pozadí.



Existují podstatné a zřetelné rozdíly mezi lékařskou expozicí a většinou ostatních expozic. Lékařská expozice postihuje typicky jen určitou část těla, zatímco ostatní expozice jsou často celotělové. Navíc věkové rozdělení



pacientů tenduje k vyššímu věku, než je průměr celé populace. Vedle toho dávky způsobované lékařskými expozicemi je třeba velmi opatrně porovnávat s expozicemi z jiných zdrojů, uváží-li se, že pacienti mají z lékařských výkonů přímý prospěch.

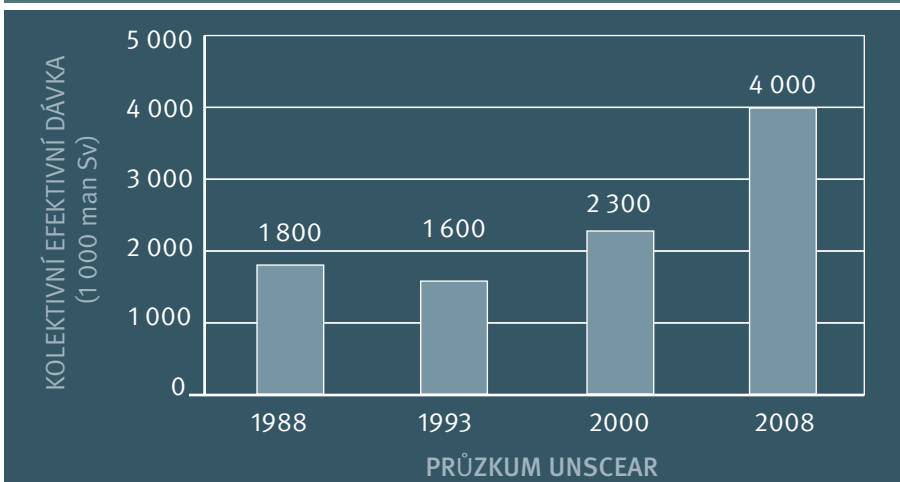
Rozvoj urbanizace společně s postupným zlepšováním životních podmínek nevyhnutelně znamená i lepší přístup mnoha lidí ke zdravotní péči. V důsledku toho dávky obyvatelstva z lékařských expozic celosvětově stále narůstají. UNSCEAR pravidelně soustřeďuje informace o diagnostických a léčebných procedurách. Podle tohoto přehledu se v období let 1997–2007 provádělo na celém světě ročně okolo 3,6 miliard lékařských radiologických výkonů, což při porovnání s počtem 2,5 miliardy ročních výkonů v předchozím období 1991–1996 znamená nárůst téměř o 50 %.

Hlavní kategorie lékařské praxe, které používají zdrojů záření, jsou rentgenová diagnostika (včetně intervenčních výkonů), nukleární medicína a radioterapie. Ostatní způsoby použití, které nepatří k těm, které UNSCEAR pravidelně vyhodnocuje, zahrnují vyhledávací zdravotní programy (screening) a účast dobrovolníků v lékařských, biomedicínských, diagnostických a terapeutických programech.

Diagnostická radiologie spočívá v analýze obrazů získaných s použitím X-záření, jako je prostá radiografie (např. snímek hrudníku či zubů), skiaskopie (s kontrastní látkou) nebo počítačová tomografie (CT). Zobrazovací metody užívající neionizující záření, jako je ultrazvuk nebo tomografie pomocí magnetické resonance, UNSCEAR nehodnotí. **Intervenční radiologie** používá co nejméně invazivních výkonů za jejich průběžného sledování, a to k diagnostice nebo léčbě onemocnění (např. k zavádění cévního katetru).

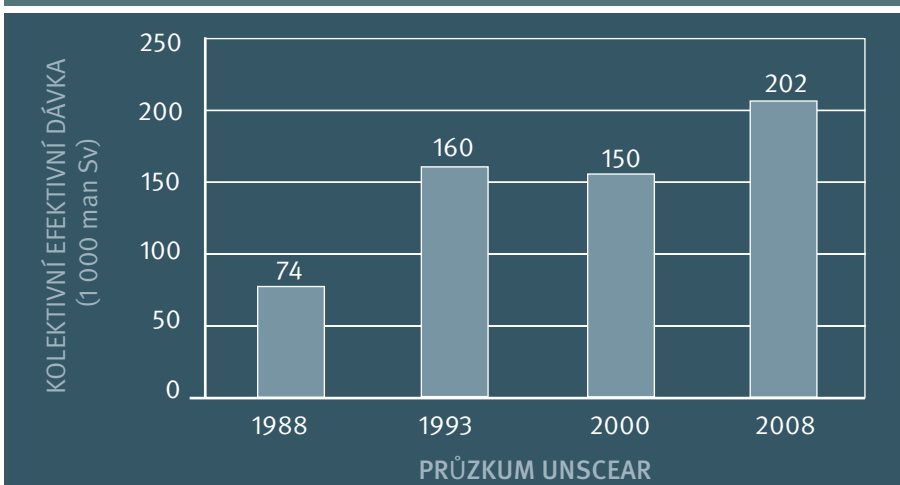
V důsledku širokého využívání CT spojeného s významnou dávkou na jedno vyšetření se celosvětová průměrná efektivní dávka spojená s diagnostickými radiologickými výkony téměř zdvojnásobila z hodnoty 0,35 mSv v roce 1988 na 0,62 mSv v roce 2007. Podle posledního UNSCEAR přehledu odpovídá CT skenování za 43 % celosvětové kolektivní dávky z radiologických procedur. Tato hodnota se ovšem mění od místa k místu. Asi dvě třetiny ze všech radiologických výkonů se realizuje v 25% světové populace žijící v průmyslových zemích. U zbývajících 75 % světové populace se roční počet radiologických výkonů v podstatě nemění, včetně prostých zubních rentgenových snímků.

Celosvětová expozice obyvatelstva z lékařské radiologie (1988–2008)



Nukleární medicína spočívá v zavádění *otevřených zářičů* (tj. rozpustných, a tedy neuzavřených, nezapouzdřených) do těla, nejčastěji za účelem získání obrazu informujícího o struktuře nebo funkci orgánu, méně často za účelem léčby určitých nemocí, jako je např. zvýšená funkce nebo rakovina štítné žlázy. Zpravidla je radionuklid upraven tak, aby mohl být podán jako

Celosvětová expozice z nukleární medicíny (1988–2008)





radiofarmakum do žíly nebo orálně. Radiofarmakum potom putuje v těle a ukládá se do tkání a orgánů podle své fyzikální a chemické charakteristiky. Záření vysílané radionuklidem uvnitř těla se analyzuje, aby se získala diagnostická zobrazení, nebo se využívá jeho schopnosti léčit.

Počet diagnostických vyšetření stoupl v celém světě z přibližně 24 milionů v roce 1988 na 33 milionů v roce 2007. To se odrazilo ve výrazném zvýšení roční kolektivní efektivní dávky ze 74 000 na 202 000 man Sv. Počty terapeutických aplikací v moderní nukleární medicíně rovněž rostou. Každoročně je na celém světě léčeno přibližně 0,9 milionů pacientů. A opět i použití nukleární medicíny ve světě je značně nerovnoměrné, 90 % vyšetření je provedeno v rozvinutých průmyslových zemích.

Radioterapie využívá záření k léčbě různých nemocí, zejména rakovin, ale někdy i nezhoubných nádorů. Zevní radioterapií (**teleterapií**) se rozumí léčba pacienta s použitím zdroje záření, který je umístěn mimo tělo pacienta. K tomu se používá zařízení obsahující vysoce radioaktivní zdroj (obvykle kobalt-60), nebo vysokonapěťové přístroje (např. lineární urychlovač) vysílající svazek záření. Existuje také způsob léčby spočívající v krátkodobém přiložení nebo i trvalém umístění kovových radionuklidových zářičů nebo uzavřených radionuklidových zářičů na chorobné ložisko (**brachyterapie**).

V celosvětovém měřítku bylo v období 1997–2007 radioterapeuticky léčeno ročně odhadem 5,1 milionů pacientů, což je výrazný nárůst oproti roku 1988, kdy odhad byl 4,3 miliony pacientů. Ze zmíněných 5,1 milionů pacientů bylo 4,7 milionů léčeno teleterapií a 0,4 milionů brachyterapií. Obyvatelstvo v průmyslových zemích (25 % celosvětové populace) se podílelo na všech teleterapeutických vyšetřeních na světě 70 % a na brachyterapeutických 40 %.

EXPOZICE PRACOVNÍKŮ

Protože celkový počet lékařských radiologických výkonů v posledních dekadách významně stoupl, týká se obdobný nárůst i počtu zdravotnických pracovníků v riziku záření. Jejich počet se odhaduje na 7 milionů a odhad průměrné roční efektivní dávky se odhaduje na 0,5 mSv na hlavu. V intervenční radiologii a nukleární medicíně může být personál vystaven dávkám vyšším, než odpovídá průměru.





Nehody při lékařském použití zdrojů záření

Některé lékařské aplikace záření (např. radioterapie, intervenční radiologie a nukleární medicína) jsou spojeny s vysokými dávkami pacientovi. Pokud je dávka aplikována nesprávně/chybně, může dojít k vážnému poškození zdraví pacienta, nebo i k jeho smrti. Toto riziko se týká nejen pacientů, ale také lékařů a ostatního personálu v blízkosti zdrojů. Nejčastější příčinou těchto selhání je lidský faktor, pochybení člověka. Jako příklady je možno uvést chybnou dávku jako důsledek nesprávného plánování léčby, nesprávné zacházení s přístroji, chybné ozáření jiného orgánu nebo v krajním případě i ozáření jiného pacienta.

I když závažné nehody v radioterapii jsou vzácné, bylo jich zaznamenáno něco přes stovku. UNSCEAR podrobil od r. 1967 rozboru 29 ohlášených událostí, jejichž výsledkem bylo 43 úmrtí a 613 zdravotních poškození. Je ovšem pravděpodobné, že některá úmrtí a řada poškození nebyla ohlášena.

Závažné následky mohou způsobovat nejen nadexpozice, ale i nedostatečné expozice, a to v situaci, kdy pacient určený k léčbě život ohrožující nemoci obdrží nedostatečnou dávku. K udržení vysokého a průběžného standardu běžné praxe a k minimalizaci rizika takových nehod může přispět program zajišťování kvality (quality assurance programme).

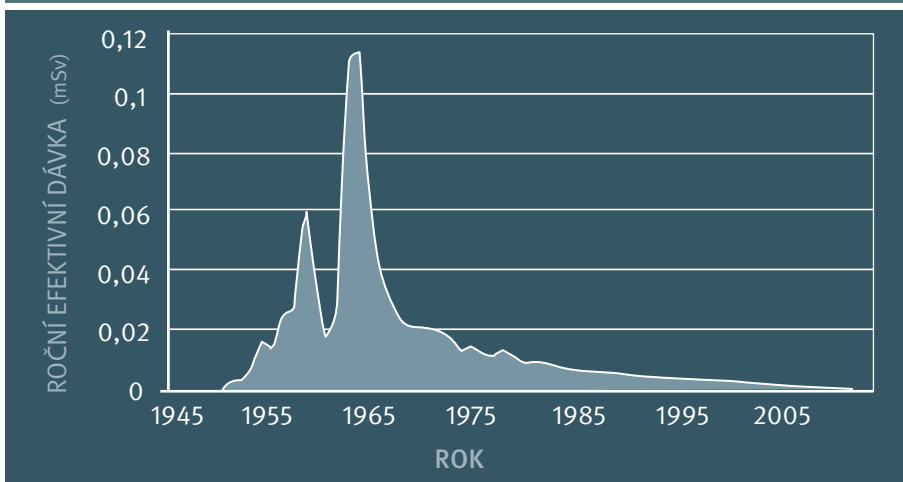
Jaderné zbraně

V r. 1945 v poslední fázi druhé světové války byly svrženy na japonská města dvě atomové bomby, dne 6. 8. na Hirošimu a dne 9. 8. na Nagasaki. Výbuchy těchto bomb zabily přibližně 130 000 lidí. Tyto události zůstávají jedinými případy válečného použití jaderných zbraní v historii. Po r. 1945 byla řada jaderných výbuchů testována v atmosféře, zejména na severní polokouli. Neaktivnější období testování spadá do dekády 1952 až 1962. Celkem bylo provedeno přes 500 testů, s celkovým ekvivalentem trinitrotoluenu 430 megatun, poslední z nich v r. 1980. Lidé na celém světě byli v důsledku atmosférického spadu z těchto testů exponováni záření. Odezvou na obavy z radiační expozice lidí a životního prostředí byl v r. 1955 ustaven UNSCEAR.

Odhad průměrných ročních efektivních dávek způsobených globálním spadem z testování jaderných zbraní v atmosféře byl nejvyšší v r. 1963 a činil 0,11 mSv, poté postupně klesal k dnešní hodnotě okolo 0,005 mSv. Tato expozice bude nadále klesat velmi pomalu, protože většina podílu z této expozice se dnes připisuje uhlíku-14, radioizotopu s dlouhým poločasem.



Celosvětové průměrné dávky na jednotlivce způsobené spadem z jaderných testů



Až 50 % celkového spadu způsobeného testy na povrchu Země se ukládalo lokálně v okruhu okolo 50 km kolem místa testu. Lidé žijící blízko testovacích ploch byli tak exponováni především lokálnímu spadu. Přitom vlivem toho, že se testy prováděly v relativně odlehlých oblastech, byly zasažené místní populace nevelké a nepřispěly tak významnou měrou ke globální kolektivní dávce. Nicméně lidé žijící v převládajícím směru větru od testovacích základen obdrželi mnohem vyšší dávky, než odpovídá průměru.

První zpráva UNSCEAR v r. 1958 položila vědecké podklady, na jejichž základě byla projednávána *Smlouva o částečném zákazu pokusů jaderných zbraní v atmosféře, vesmíru a pod vodou*. Po podpisu této smlouvy v r. 1963 bylo každoročně prováděno až do r. 1990 okolo 50 podzemních testů za rok. Ještě i poté se několik takových testů uskutečnilo. Většina těchto testů měla mnohem menší jadernou výtěžnost než testy v atmosféře a radioaktivní částice byly obvykle zachyceny v podzemí, pokud nedošlo k úniku radioaktivních plynů do atmosféry. Přestože tyto testy produkovaly velké množství radioaktivního odpadu, neočekává se, že by jím bylo exponováno obyvatelstvo. Odpad zůstává v hlubokém podzemí a namnoze se roztavil spolu s původní horninou.

Existují však obavy z možného opětovného využívání oblastí jaderných testů (např. jako pastviště pro dobytek nebo jako orná půda), protože některá z těchto území se začínají osídlovat. Dávky z radioaktivních residuí na





některých místech, např. ve vymezených oblastech testovacích ploch v Semipalatinsku v dnešním Kazachstánu, mohou být značné, zatímco jinde jako na atolech Muruora a Fangataufa ve Francouzské Polynésii by se dávky případným přistěhovalcům nezvýšily více, než odpovídá zlomku přírodního pozadí. A pro některé další lokality, jako jsou Marshallovy ostrovy a Maralinga, kde některé ze svých testů prováděly USA a Velká Británie, by expozice zde žijícího obyvatelstva závisela na stravovacích návycích a způsobu života.

Jaderné reaktory

Když jsou některé izotopy uranu nebo plutonia zasaženy neutrony, jejich jádro se rozštěpí na dvě malá jádra procesem nazývaným jaderné štěpení, přitom se uvolní energie a dva nebo více neutronů. Uvolněné neutrony mohou také zasáhnout jiná jádra uranu či plutonia, rozštěpit je, uvolnit další neutrony, které opět mohou zasáhnout více jader. To je podstata řetězové reakce. Tyto izotopy jsou normálně využívány jako palivo jaderných reaktorů, kde je řetězová reakce pod kontrolou a lze ji zastavit, pokud by začala probíhat příliš rychle.

Energie uvolněná štěpením v jaderných reaktorech může být v jaderných elektrárnách využívána k výrobě elektřiny. Existují ovšem také výzkumné reaktory pro testování jaderného paliva a různých druhů materiálů, pro výzkumné práce v jaderné fyzice, biologii nebo pro výrobu radionuklidů používaných v medicíně a průmyslu. I když existují rozdíly mezi energetickými a výzkumnými reaktory, oba typy jsou závislé na technologických procesech, jako je těžba uranu a ukládání radioaktivního odpadu, což obojí vytváří předpoklady pro expozici pracovníků i obyvatelstva.

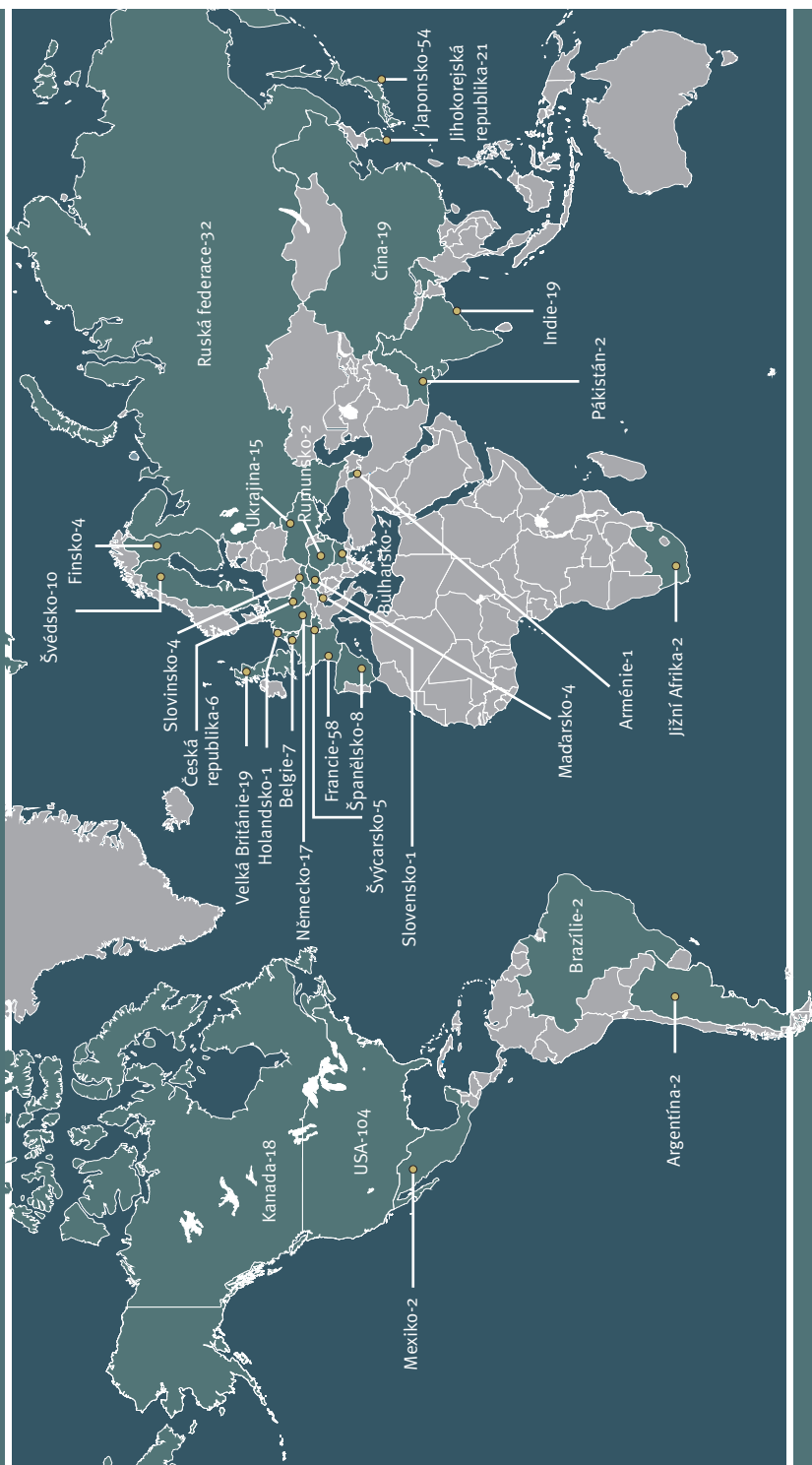
Jaderné elektrárny

První komerční jaderná elektrárna na průmyslové úrovni byla vybudována v r. 1956 v Calder Hall ve Spojeném království a od té doby se výroba elektrické energie v jaderných elektrárnách nesmírně rozšířila. I když vzrůstá počet vyřazování starších zařízení, výroba elektrické energie z jaderných zdrojů neustále stoupá. Koncem roku 2010 bylo ve 29 zemích v provozu 440 reaktorů v jaderných elektrárnách produkujících okolo 10 % celosvětové výroby energie. Vedle toho v 56 zemích bylo v provozu 240 výzkumných reaktorů.

I když výroba elektřiny na principu využití jaderné energie je často pokládána za kontroverzní, přispívá při normálním provozu jen malou měrou ke globální radiační expozici. Kromě toho úrovně radiační expozice značně kolísají podle typu zařízení, rozdílů v jeho umístění a mění se v průběhu času.



Jaderné elektrárny na světě (2010)





Celkové expoziční úrovně v důsledku normálních výpustí mají klesající tendenci, i když se elektrický výkon elektráren zvyšuje. Je to způsobeno zčásti inovacemi technologie, a zčásti i přísnějšími opatřeními v radiační ochraně. Výpustě z jaderných zařízení vedou běžně u obyvatelstva k velmi nízkým dávkám záření. Roční kolektivní dávka populacím kolem jaderných elektráren se odhaduje na 75 manSv. Tedy jednotlivec žijící v sousedství jaderné elektrárny je exponován průměrné roční efektivní dávkou 0,0001 mSv.

Hlavní složkou radiační expozice z jaderné energetiky je těžba radioaktivních surovin. Těžba a úprava uranové rudy produkuje významná množství residuí v hlušině, která obsahuje zvýšený obsah přírodních radionuklidů. Do r. 2003 dosáhla celková světová produkce uranu hmotnosti okolo dvou milionů tun, přičemž zbytkové odvaly činily více než dvě miliardy tun. Současné odvaly hlušiny jsou dobře ošetřeny, ale existuje mnoho starých opuštěných ploch, z nichž jen některé se dočkaly rekultivace. Podle odhadu výboru UNSCEAR činí běžná roční kolektivní dávka u obyvatelstva v okolí dolů, úpraven rudy a odvalů hlušiny přibližně 50-60 man Sv.

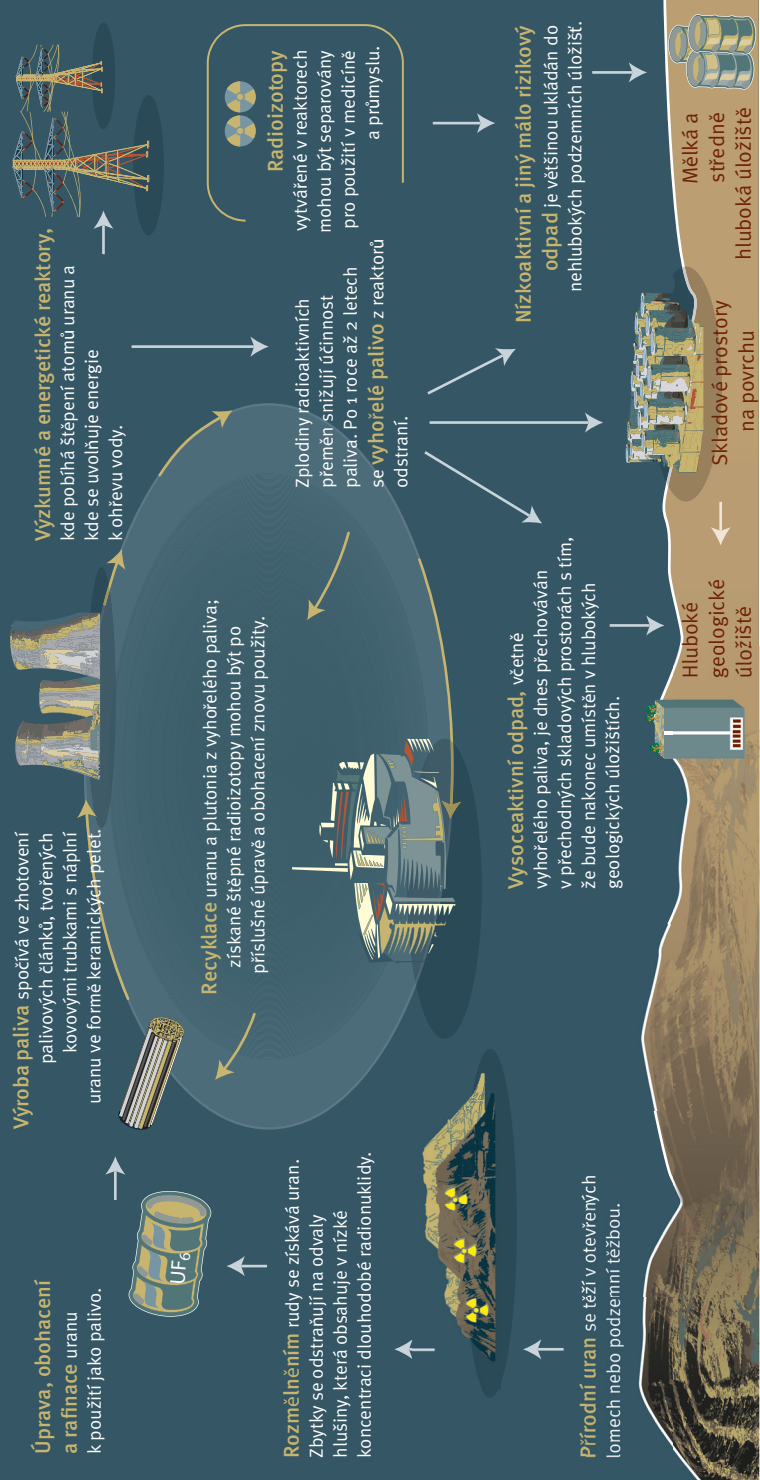
Vyhořelé palivo z reaktorů může být recyklováno k získání uranu a plutonia k dalšímu využití (reprocessing). Většina vyhořelého paliva se dnes uchovává v přechodných skladech (meziskladech), a do dnešní doby byla recyklována jen asi jedna třetina z celkového množství dosud vytvořeného vyhořelého paliva. Roční kolektivní dávka způsobená recyklací se odhaduje na 20–30 man Sv.

Nízkoaktivní odpady a některé další odpady na hranici rizikovosti se ukládají do podzemních úložišť, dříve byl takový odpad někdy ukládán v moři. Jak vysokoaktivní odpad z recyklace, tak i vyhořelé palivo (pokud nebylo recyklováno) jsou skladovány, ale nakonec je čeká také nějaký způsob zneškodnění. Správné nakládání s odpady by nemělo vést ke zvýšené expozici populace, dokonce ani v daleké budoucnosti.

EXPOZICE PRACOVNÍKŮ

V jaderném průmyslu tvoří hlavní příspěvek k expozici pracovníků inhalační expozice plynnému radonu v uranových dolech. Další běžnou výrobní fází pro získání kovového uranu je úprava radioaktivních rud a vlastní extrakce a separace kovu, který obsahuje vysoké koncentrace radionuklidů. Průměrná roční efektivní dávka na jednoho pracovníka v jaderném průmyslu se postupně od sedmdesátých let snižuje z dřívějších 4,4 mSv na současný 1 mSv. Tento vývoj je dán výrazným poklesem těžby uranu a pokročilými technologiemi těžby a větrání v dolech.

Hlavní procesy v jaderném průmyslu





Havárie v jaderných zařízeních

Úrovně expozic během normálního provozu civilních zařízení jaderného průmyslu jsou velmi nízké. Došlo však také k závažným nehodám, haváriím, kterým se dostalo mimořádné pozornosti a které UNSCEAR posoudil a vyhodnotil. Příkladem mohou být: nehoda výzkumného reaktoru ve Vinči v dřívější Jugoslavii v r. 1958, únik radioaktivních látek z jaderné elektrárny Three Mile Island v USA v r. 1979 a nehoda v zařízení na přepracování jaderného paliva v Tokai-Mura v Japonsku v r. 1999.

Těžké radiační nehody v jaderných zařízeních mezi roky 1945 a 2007 způsobily u 34 pracovníků úmrtí nebo těžká poranění a sedm nehod vedlo i k úniku radioaktivního materiálu a měřitelné expozici populace. K dalším těžkým nehodám došlo také v zařízeních zaměřených na výrobu jaderných zbraní. Nepočítaje nehodu v Černobyli v r. 1986 a ve Fukušimě-Daiichi v r. 2011, jimž bude ještě věnována zvláštní pozornost, zavinily nehody jaderného průmyslu 29 úmrtí a 68 vážných radiačních poškození vyžadujících lékařskou péči.

Nejvážnější nehoda v civilních zařízeních před Černobylem se udála na elektrárně Three Mile Island dne 28. března 1979. Řetěz událostí vedl k částečnému tavení paliva reaktoru. Při nehodě se uvolnilo velké množství štěpných produktů a radionuklidů z porušeného paliva reaktoru do ochranné obálky (kontejnmentu), ale jenom relativně malé množství se dostalo také do okolí. Výsledná expozice obyvatelstva byla velmi malá.

Havárie v jaderné elektrárně Černobyl

Nehoda v jaderné elektrárně Černobyl dne 26. dubna 1986 byla nejenom nejzávažnější v historii civilních jaderných zařízení, ale také nejvýznamnější, pokud jde o ozáření široké populace. Kolektivní dávka z této havárie byla mnohonásobně vyšší než souhrnná celková kolektivní dávka ze všech ostatních radiačních nehod.

Dva pracovníci zahynuli bezprostředně v důsledku konvenčního úrazu, u 134 se postupně rozvinul akutní postradiační syndrom, který byl pro 28 z nich fatální. Pro přeživší účastníky nehody byly hlavními zdravotními problémy poškození kůže a později rozvoj zákalu oční čočky. Kromě záchranářů se na likvidaci následků havárie postupně podílelo několik set tisíc osob. Mimo zřejmého zvýšení výskytu leukémie a zákalů oční čočky u osob ozářených vysokými dávkami v letech 1986 a 1987 nelze dosud v této skupině prokazatelně doložit jiná zdravotní poškození způsobená ozářením.



Havárie způsobila největší nekontrolovaný radioaktivní únik do životního prostředí dosud pozorovaný v civilním sektoru. Po dobu asi 10 dnů unikala do atmosféry velká množství radioaktivních látek. Radioaktivní mrak vytvořený nehodou se rozptýlil po celé severní polokouli a vedl k depozici ohromného množství radioaktivního materiálu na rozsáhlých územích bývalého Sovětského svazu a v jiných částech Evropy. Kontaminoval půdu a vodu zejména v Bělorusku, Ruské federaci a na Ukrajině a způsobil sociální a hospodářský rozvrat velkých skupin obyvatelstva.

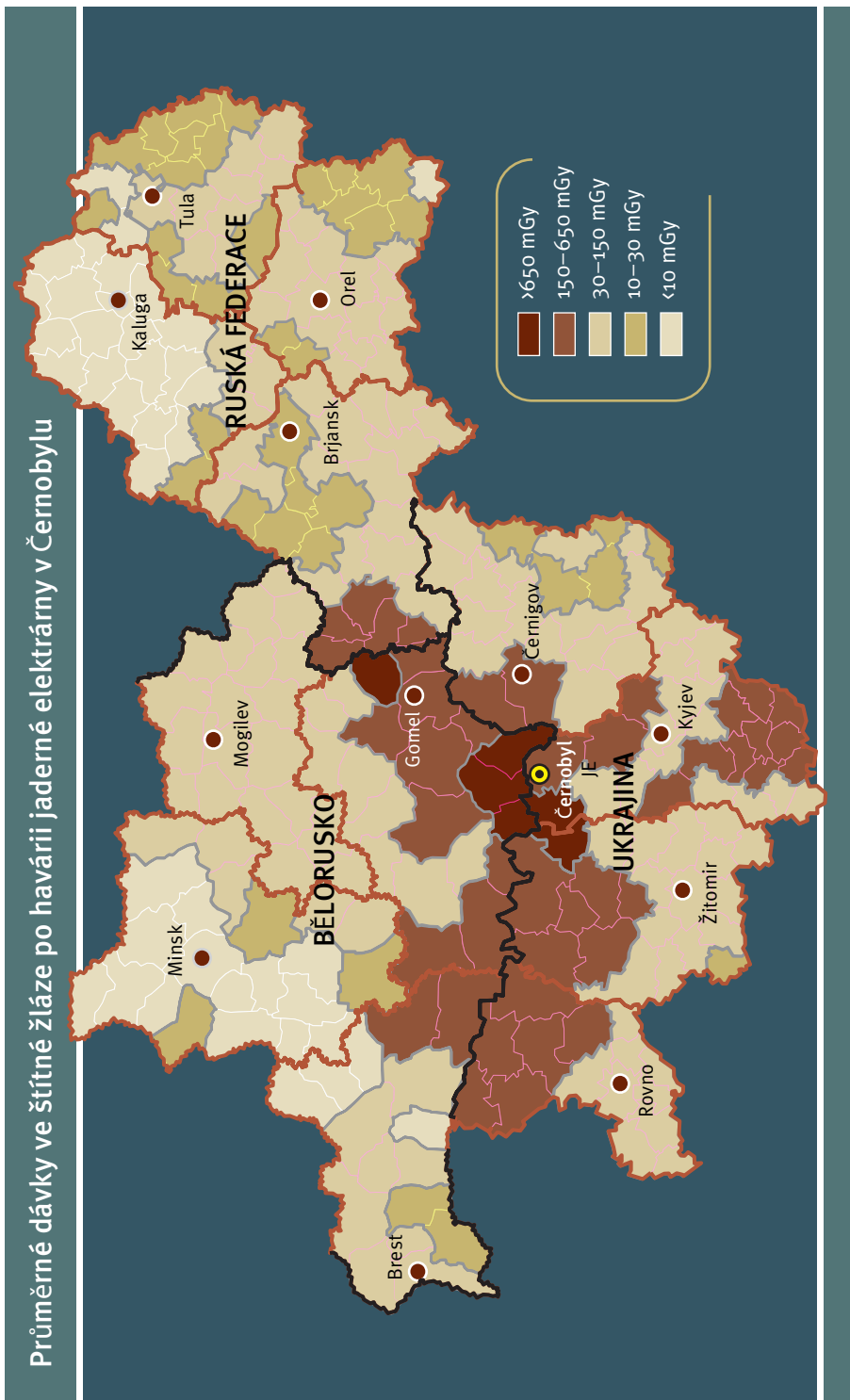
Kontaminace čerstvého mléka krátkodobým jódem-131 (s poločasem 8 dní) a nedostatek okamžitých opatření vedl na územích dřívějšího Sovětského svazu k velmi vysokým dávkám ve štítné žláze. A tak se od počátku devadesátých let zvýšil výskyt rakoviny štítné žlázy u dětí v Bělorusku, na Ukrajině a v pěti nejvíce postižených okresech Ruské federace. V období mezi léty 1991-2005 se zjistilo více než 6000 takových případů, z nichž šest dětí zemřelo.

Populace jako celek byla exponována záření po delší dobu, a to jak zevně z radioaktivního spadu na půdu, tak i vnitřně z požívání kontaminované potravy, a to zejména vlivem cézia-137 (s poločasem 30 let). Přitom, i když průměrné individuální efektivní dávky byly relativně nízké, tak výsledná průměrná individuální efektivní dávka za období 1986-2005 činila v kontaminovaných oblastech Běloruska, Ukrajiny a Ruské federace 9 mSv. Tato expozice pravděpodobně nezpůsobí zřetelné zdravotní účinky v obecné populaci. Nicméně těžký rozvrat vyvolaný nehodou měl závažné sociální a hospodářské důsledky a způsobil velkou psychickou nepohodu u obyvatel zasažených území.

UNSCEAR popsal a vyhodnotil radiologické důsledky havárie v několika svých zprávách. Mezinárodní společenství věnovalo neuvěřitelné úsilí posouzení rozsahu havárie a jejich jednotlivých charakteristik jak vcelku, tak i v různých oblastech zájmu s cílem prohloubit porozumění radiologickým a jiným jejím následkům a asistovat při jejich nápravě.

Závěrem lze na podkladě studií provedených od r. 1986 konstatovat, že jednotlivci, kteří byli v dětském věku exponováni jódem-131, účastníci záchranných operací a ti, kteří se zúčastnili likvidace následků havárie a obdrželi vysoké dávky záření, jsou vystaveni zvýšenému riziku účinků vyvolaných ozářením. Přitom většina obyvatel těchto oblastí byla exponována nízkým dávkám záření, které jsou srovnatelné s roční úrovní ozářením z přírodního pozadí, nebo jsou jen jejím malým násobkem.

Průměrné dávky ve štítné žláze po havárii jaderné elektrárny v Černobylu



Havárie v jaderné elektrárně Fukušima-Daiichi

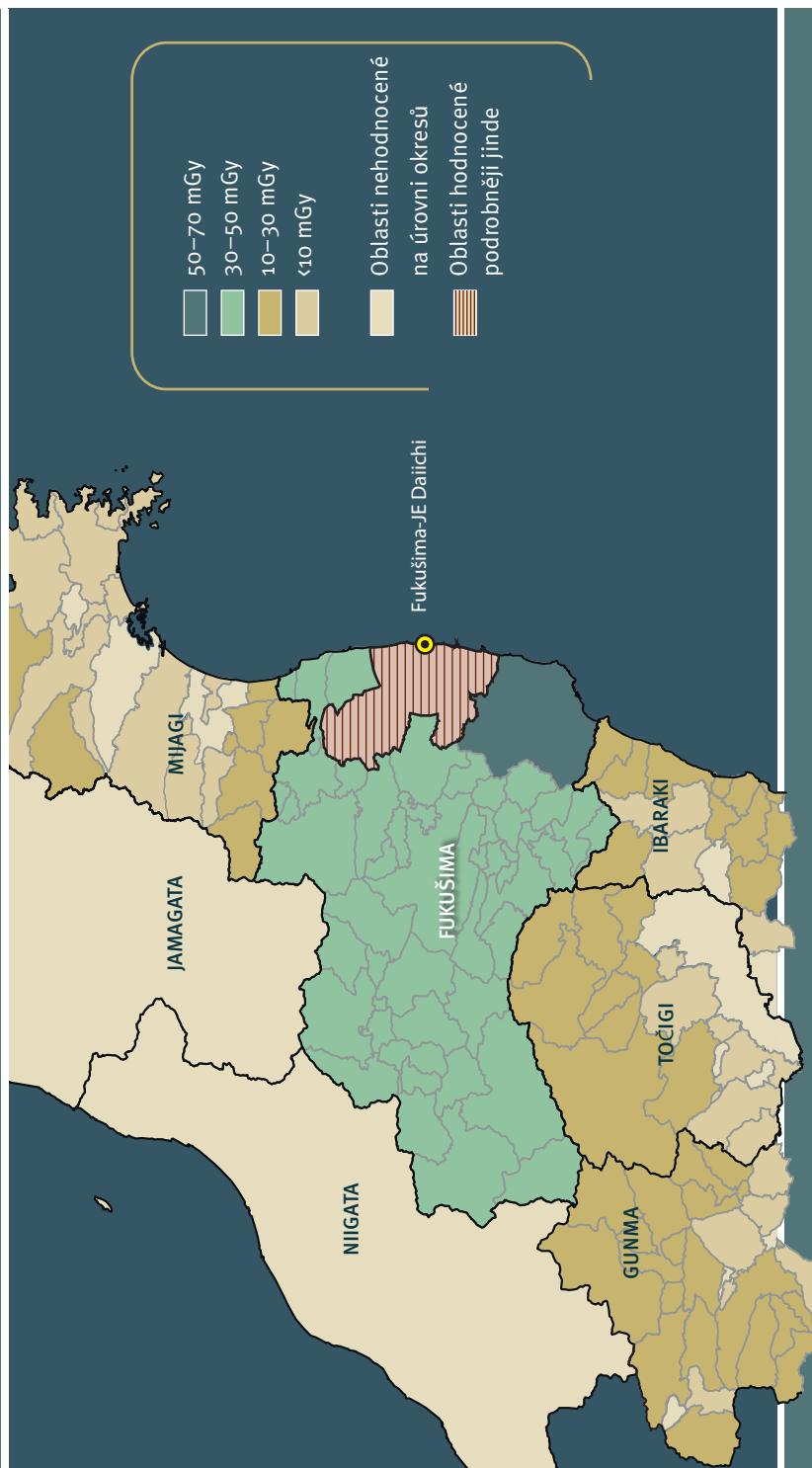
Při velkém zemětřesení ve východním Japonsku dne 11. března 2011 dosahujícím 9. stupně a vlivem následného tsunami, které postihlo východní pobřeží severního Japonska, byla těžce zasažena i jaderná elektrárna Fukušima-Daiichi a došlo k úniku radioaktivních látek do okolí. Asi 85 000 obyvatel bydlících v okruhu 20 km od elektrárny a některých přilehlých územích bylo v rámci preventivních opatření ve dnech 11. až 15. března evakuováno. Přitom obyvatelé žijící 20-30 km od elektrárny byli vyzváni k úkrytu ve vlastních domech. Později, v dubnu 2011, byla doporučena evakuace dalších 10 000 lidí, žijících severozápadně od elektrárny z důvodu zvýšených hodnot radionuklidů ze spadu na půdu. Tyto evakuace významně snížily hladinu expozice, ke které by jinak v zasažených územích došlo. Přechodně byl omezen také konzum některých potravin a požívání vody s cílem omezit vnitřní radiační expozici obyvatel. V rámci organizování opatření na elektrárně bezprostředně po nehodě byli exponováni někteří operátoři a členové zásahových jednotek.

UNSCEAR provedl odhady dávek záření a jejich účinků na zdraví a životní prostředí. Na nápravných opatřeních a navazujících aktivitách v areálu elektrárny se během prvních 18 měsíců po nehodě podílelo okolo 25 000 pracovníků. Průměrná efektivní dávka na jednoho pracovníka činila za tuto dobu asi 12 mSv. Přitom u 6 pracovníků přesáhla kumulovaná dávka 250 mSv. Nejvyšší zaznamenaná celková dávka činila u jednoho pracovníka 680 mSv, která byla způsobena z 90 % vnitřním ozářením. Dvanáct pracovníků obdrželo vysokou dávku ve štítné žláze v rozmezí 2 až 12 Gy. Žádné úmrtí způsobené ozářením ani žádná akutní nemoc z ozáření se u pracovníků ozářených v souvislosti s nehodou nezjistily.

Průměrné efektivní dávky dospělých v evakuovaných oblastech prefektury Fukušima se pro období prvního roku po nehodě odhadují v rozmezí 1-10 mSv. Efektivní dávky pro kojence ve stáří jednoho roku se odhadují přibližně na dvojnásobek. Pro ty části prefektury Fukušima, které nebyly evakuovány, a po prefektury sousední byly tyto dávky nižší.

Odhady horní hranice průměrných dávek ve štítné žláze, především z jódu-131, činily u dospělých 35 mGy, u kojenců do jednoho roku 80 mGy. Pro srovnání lze uvést běžné dávky z přírodního pozadí, které jsou typicky v řádu 1 mGy a podílí se na nich především zevní ozáření z přírodních radionuklidů. UNSCEAR předpokládá teoretickou možnost, že by se rakoviny štítné žlázy mohly později vyskytnout ve skupině nejvíce ozářených dětí.

Průměrné dávky ve štítné žláze dětí po havárii v jaderné elektrárně Fukušima-Daiichi





Přítom rakovina štítné žlázy je u dětí vzácným onemocněním, takže nelze očekávat statisticky zjiřitelné účinky ani v této skupině.

Při srovnávání havárie ve Fukušimě s havárií v Černobyli je namístě uvážit rozdíly v typu reaktoru, v podmínkách, za nichž k nehodě došlo, v odlišných charakteristikách uvolněných radionuklidů a jejich rozptýlení, a také rozdíly v přijatých opatřeních. V obou případech byla do okolí uvolněna velká množství jódu-131 a cesia-137, dvou nejvýznamnějších radionuklidů podílejících se na expozici lidí po havárii jaderných reaktorů. Při nehodě ve Fukušimě činil únik jódu-131 asi 10 procent a cesia-137 asi 20 procent hodnot odhadovaných pro havárii v Černobyli.

Průmyslové a jiné aplikace

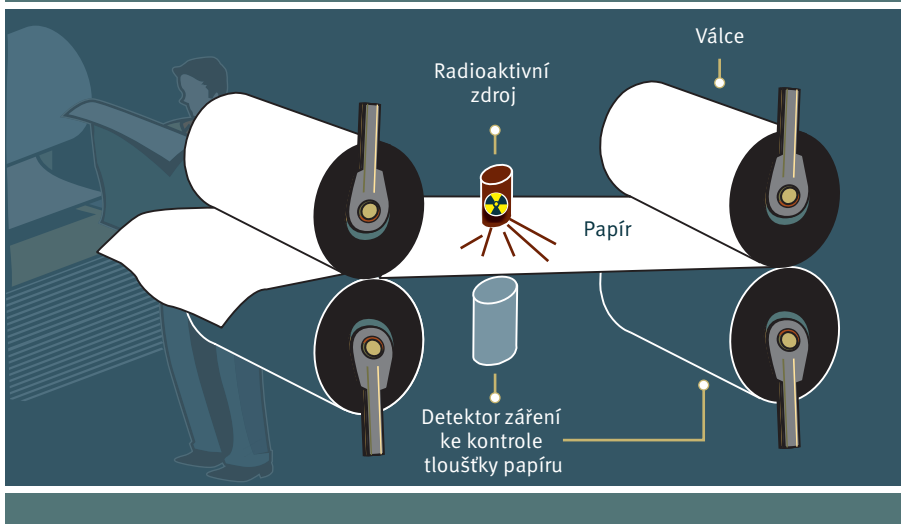
Zdroje ionizujícího se využívají v širokém spektru průmyslových aplikací. Patří sem průmyslové ozařování zaměřené na sterilizaci zdravotnických přípravků a farmaceutických výrobků, udržování kvality potravin, a to ve snaze vymýtiti zamoření hmyzem; defektoskopická radiografie zkoumá kvalitu svárů kovových dílů; alfa a beta zářiče se užívají ve světélkujících materiálech v zaměřovacích přístrojích a jako zdroje orientačního osvětlení východů apod.; radioaktivní zdroje nebo miniaturní rentgenové přístroje se používají při geologických vrtech při průzkumu těžby minerálů, ropy, zemního plynu; radioaktivní zdroje se používají v průmyslu v zařízeních na měření tloušťky, vlhkosti, hutnosti a hladin; jiné uzavřené radioaktivní zářiče se používají ve výzkumu.

I když jsou tyto aplikace velice rozšířené, výroba radionuklidů pro jejich použití v průmyslu a lékařské praxi způsobuje jen velmi nízké expozice široké veřejnosti. Ovšem v případě nehod může dojít ke kontaminaci lokalizovaných ploch a vysoké expozici přítomných osob.

EXPOZICE PRACOVNÍKŮ

Počet pracovníků přicházejících do styku s průmyslovými zdroji činil v první dekádě tohoto století asi jeden milion s průměrnou roční efektivní dávkou na pracovníka asi 0,3 mSv.

Měřidla tloušťky využívající záření



Radioaktivní materiály přírodního původu

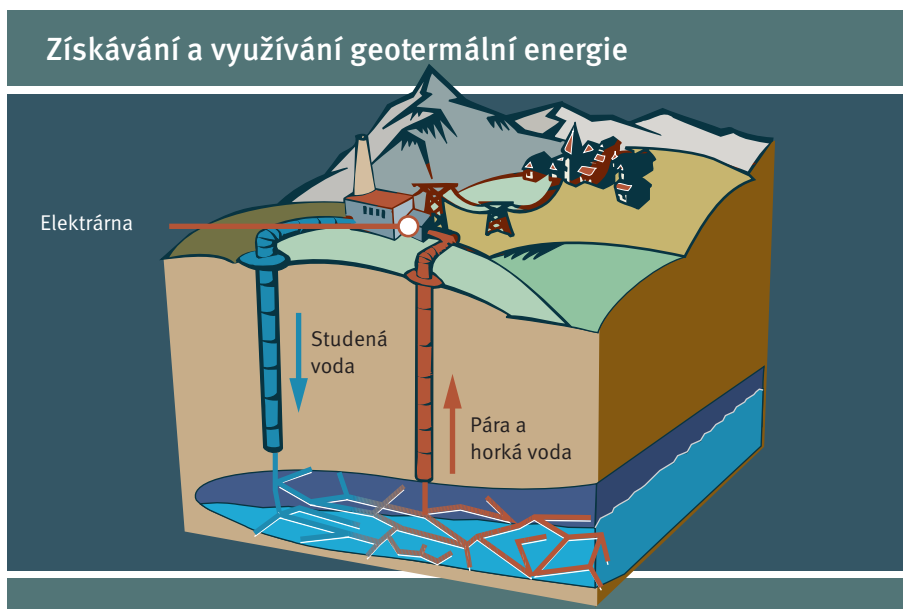
Ve světě existuje celá řada pracovišť a zařízení, které nemají vztah k jaderné energetice, ale mohou způsobovat expozici lidí pro zvýšené koncentrace radioaktivních materiálů přírodního původu (*naturally occurring radioactive material — NORM*) v jejich průmyslových produktech, vedlejších produktech či odpadech. Nejvýznamnější z těchto zařízení se týkají těžby a zpracování nerostů.

Aktivity spojené se získáváním a dalším zpracováním rud mohou také vést ke zvýšení úrovně NORM. Tyto aktivity se týkají těžby a úpravy uranových rud; těžby a hutnictví kovů; výroby fosfátů; těžby a spalování uhlí pro elektrárenský průmysl; vrtů pro těžbu ropy a zemního plynu; průmyslových prací se vzácnými zeminami a oxidem uranu, zirkoniem; keramického průmyslu; jiných použití přírodních radionuklidů (typicky vybraných izotopů radia a thoria).

Např. uhlí obsahuje stopy primordiálních radionuklidů. Spalování uvolňuje tyto radionuklidy do životního prostředí, a tak touto cestou expozuje lidi. To podle odhadů znamená, že na každý gigawatt-rok elektrické energie vyrobené na Zemi uhelnými elektrárnami vzroste celosvětová kolektivní dávka přibližně o 20 man Sv za rok. Navíc také elektrárenský popílek (produkovaný jako zbytek po spálení uhlí) se využívá při zemních úpravách a stavbě komunikací. Pokud se použije ve stavebních materiálech pro výstavbu, způsobuje radiační expozici jak zevním ozářením, tak i inhalací radonu. A dále

ukládání popílku na skládky může zvyšovat hladinu radiační expozice okolo takové skládky.

Využívání geotermální energie je dalším zdrojem expozice obyvatelstva. Budují se podzemní rezervoáry páry a horké vody, aby zásobovaly budovy elektřinou nebo teplem. Odhady emisí z používání této technologie v Itálii a Spojených státech ukazují, že se tak produkuje okolo 10 % kolektivní dávky připadající na jeden gigawatt-rok vyrobený uhelnými elektrárnami. Geotermální energie tvoří v současné době jen malý příspěvek k celosvětové produkci energie, a tedy i k radiační expozici.



Řada dalších lidských činností může lidi exponovat NORM, např. kaly z čistíren vod užívané v zemědělství. Ovšem expozice veřejnosti z této činnosti je velice nízká, odhaduje se v řádu menším než několik tisícín mSv ročně.

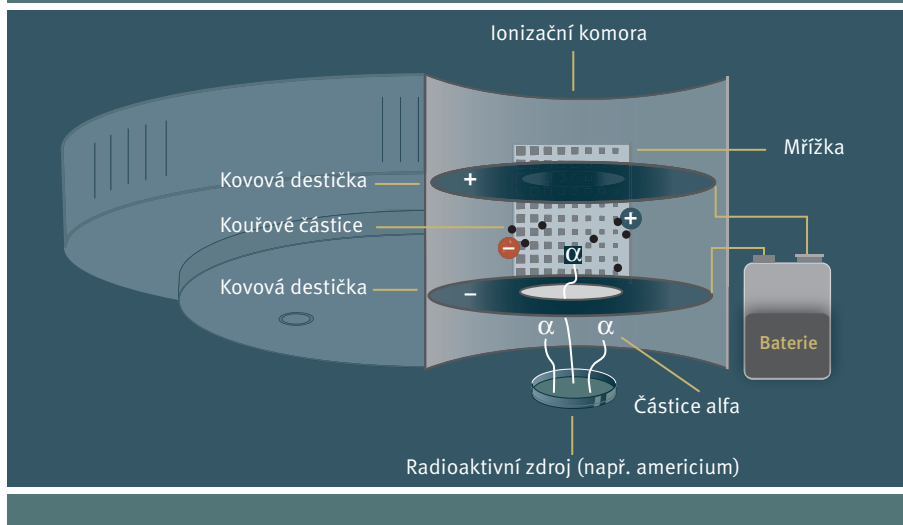
Vedlejším produktem obohacování uranu je ochuzený uran, který je méně radioaktivní než uran přírodní. Ochuzený uran je po řadu let využíván pro civilní i vojenské účely. Díky své vysoké hustotě je výhodný pro odstínění záření nebo jako vyvažovací zátěž v letadlech. Vojenské použití ochuzeného uranu v projektilích protitankových zbraní, zejména pro jeho vysokou průraznost, vyvolává obavy ze zbytkové kontaminace. S výjimkou specifických scénářů — např. dlouhodobého kontaktu — jsou radiační

expozice z ochuzeného uranu extrémně nízké. Ve skutečnosti je jeho chemická toxicita mnohem rizikovějším faktorem.

Předměty běžné potřeby

Celá řada předmětů pořizovaných pro každodenní použití obsahuje malá množství radionuklidů záměrně přidávaných při výrobě pro své chemické nebo radioaktivní vlastnosti. Historicky nejvýznamnějším radionuklidem bylo z tohoto pohledu radium-226 užívané pro své uplatnění v světélkujících (luminiscentních) materiálech používaných v běžných výrobcích. Tato praxe skončila před několika desítkami let, když bylo radium nahrazeno promethiem-147 a vodíkem-3 (tritium), které jsou méně radio-toxické. Přesto při nošení náramkových hodinek obsahujících sloučeniny tritia může docházet k jeho úniku, neboť je velmi těkavé. Tritium ale emituje jenom velmi slabé částice beta, které nemohou prostoupit pokožkou a mohou ozářit člověka jenom když proniknou do těla.

Požární hlásič využívající ionizující záření



Některé moderní požární hlásiče se sestávají z ionizačních komor s malými fóliemi americia-241, které produkuje alfa částice a vytváří tak stálý proud iontů. Okolní vzduch má volný přístup k citlivým částem detektoru, a když do detektoru vstoupí kouř, proud iontů je přerušen a spustí se poplach. Radioaktivita zdrojů americia je v těchto detektorech velmi nízká. Americium se přeměňuje s dlouhým poločasem okolo 432 let. To znamená, že detektor po době své životnosti — asi 10 let — zachovává v podstatě



svou původní aktivitu. Pokud zůstává americium uvnitř zařízení, expozice je zanedbatelná. I když přítomnost americia je zjistitelná citlivým přístrojem, expozice bývá extrémně nízká. Osoba stojící 2 metry od detektoru po dobu osmi hodin denně by odbržela odhadem za rok dávku nižší než 0,0001 mSv.

Nehody v průmyslu

Nehody při průmyslovém využívání zdrojů záření jsou častější než nehody v jaderných elektrárnách. Přesto normálně nevzbudí mnoho pozornosti, i když mohou způsobovat významné radiační expozice jak pracovníkům, tak jednotlivcům z obyvatelstva.

Mezi roky 1945-2007 bylo zaznamenáno okolo 80 nehod v průmyslových provozech používajících zdroje záření, urychlovače nebo rentgenové přístroje. Při těchto nehodách přišlo o život devět lidí a 120 pracovníků utrpělo radiační poškození. Tato poškození postihla obvykle pokožku rukou a musela být často řešena amputací končetiny. UNSCEAR se domnívá, že některé nehody vedoucí k poškození zdraví nebo úmrtí v průmyslových zařízeních nebyly hlášeny.

Nehody v průmyslu mají různé příčiny a důsledky. Jako příklad jsou uvedeny dvě z nich. V r. 1978 v Louisianě ve Spojených státech jeden pracovník při defektoskopii na lodi utrpěl radiační poškození levé ruky při práci se zdrojem iridia-192 o aktivitě 3,7 TBq. Asi po třech týdnech kůže ruky zarudla a zduřela, pak se objevily puchýře, které se hojily 5-8 týdnů. Po dalších šesti měsících však ukazovák levé ruky musel být zčásti amputován. Druhý případ se stal v r. 1990 v Šanghaji v Číně, kdy sedm pracovníků bylo ozářeno zdrojem kobaltu-60 v důsledku nevyhovujících bezpečnostních opatření v provozovně. Jeden z nich ozářený dávkou okolo 12 Gy zemřel 25. den po expozici. Další s dávkou odhadnutou na 12 Gy zemřel 90. den po expozici. Ostatních pět pracovníků s dávkami v rozmezí 2 až 5 Gy bylo lékařsky ošetřeno a uzdravilo se.

Opuštěné zdroje

V rozmezí 1966 a 2007 bylo 31 nehod způsobeno ztracenými, ukradenými nebo opuštěnými zdroji, jimž se souhrnně říká opuštěné zdroje (orphan sources). Je známo, že tyto zdroje způsobily úmrtí 42 lidí, a to dospělých i dětí. Mimo to došlo i k akutní nemoci z ozáření, vážným lokálním poškozením, vnitřní kontaminaci a psychologickým problémům vyžadujícím lékařskou péči o stovky osob. Šest nehod souviselo s opuštěnými zdroji užívanými v radioterapii.

Není přesně známo, kolik opuštěných zdrojů se na světě vyskytuje, ale jejich počet se odhaduje na tisíce. Dozorný orgán USA (Nuclear Regulatory Commission) podal zprávu o tom, že v rozmezí let 1996-2008 se ztratilo takřka 1 500 radioaktivních zdrojů, z čehož více než polovinu se nikdy nepodařilo najít. Ve studii Evropské unie se odhaduje, že v rozsahu její působnosti se ročně ztratí až 70 zdrojů z běžné kontroly. Většina těchto zdrojů neznamená sice mimořádné radiační riziko, nicméně nehody jimi způsobené zůstávají hlavním problémem opuštěných zdrojů.

Uzavřené zářiče nebo jejich pouzdra mohou být atraktivní pro lidi, kteří sbírají a prodávají kovový odpad, neboť jim připadá, že by mohlo jít o výrobky z cenného kovu a navíc na některých z nich ani není varovný

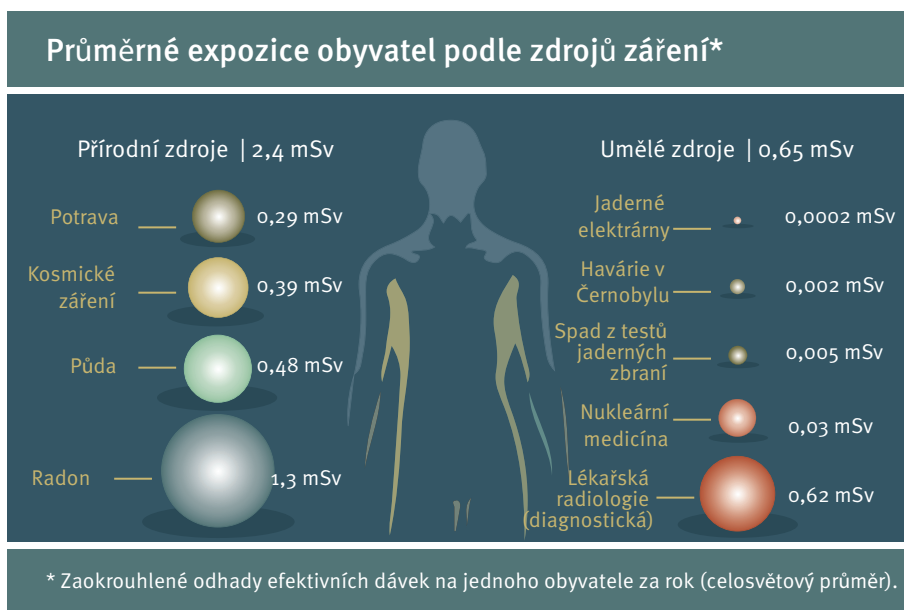
| Celosvětové vyhodnocení vážných radiačních nehod* | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|
| Typ nehody | 1945–1965 | 1966–1986 | 1987–2007 |
| Nehody v jaderných zařízeních | 19 | 12 | 4 |
| Nehody v průmyslových provozech | 2 | 50 | 28 |
| Nehody s opuštěnými zdroji | 3 | 15 | 16 |
| Nehody při výuce/výzkumu | 2 | 16 | 4 |
| Nehody ve zdravotnictví | Neznámé | 18 | 14 |

* Založeno na nehodách, o kterých byla podána oficiální zpráva, nebo které byly publikovány. Lze se domnívat, že počet neohlášených nehod, zejména ve zdravotnictví je mnohem vyšší.

radiační symbol. Případy nebezpečných sběratelů šrotu nebo dokonce náhodných občanů, kteří se zapletou do manipulací s takovými nálezy, vedou k vážným poškozením zdraví a v některých případech i k úmrtí, jak se stalo v Goianii v Brazílii v r. 1987. Na počátku řetězu událostí byla krádež opuštěného teleterapeutického přístroje s vysoceaktivním (50,9 TBq) zdrojem cesia-137. Nálezce pak porušil kovové opouzdrnění a radionuklid se uvolnil ve formě prášku. V příštích dvou týdnech se rozpustný prášek chloridu cesia rozptýlil v prostoru sběrný kovů a v okolních domech. Mnoho lidí trpělo zdravotními obtížemi a kožními chorobnými změnami, 110 000 lidí bylo monitorováno pro radioaktivní kontaminaci, řada z nich byla vnitřně kontaminována cesiem-137. Při této nehodě zemřeli čtyři lidé, mezi nimi jedno dítě.

3.3. Průměrné radiační expozice obyvatel a pracovníků

Z celkového pohledu je patrné, že v radiační expozici obyvatel dominuje ozáření z přírodních zdrojů. UNSCEAR odhaduje průměrnou roční efektivní dávku jednotlivce na přibližně 3 mSv. V průměru obnáší dávka z přírodních zdrojů asi 2,4 mSv. Z toho dvě třetiny připadají na radioaktivní látky ve vzduchu, který dýcháme, v potravě, kterou jíme, a ve vodě, kterou pijeme. Hlavním zdrojem expozice z umělých zdrojů je používání zdrojů záření v lékařství s jeho příspěvkem k individuální průměrné roční efektivní dávce 0,62 mSv. Lékařská radiační expozice kolísá podle území, státu a systému zdravotní péče. UNSCEAR odhadl průměrnou roční efektivní dávku z lékařských aplikací pro průmyslové země na 1,9 mSv a pro ostatní země na 0,32 mSv. Tyto hodnoty mohou ovšem uvnitř těchto skupin dále kolísat (např. v USA činí 3 mSv, v Keni 0,05 mSv).



Pokud jde o expozici pracovníků, pozornost se od devadesátých let soustředovala k umělým zdrojům záření. Dnes ovšem víme, že velké množství pracovníků je exponováno přírodním zdrojům záření, zejména v těžbařském průmyslu. U určitých povolání v sektoru důlní těžby převládá v profesionální expozici inhalace radonu. Ačkoliv uvolňování radonu v podzemních uranových dolech představuje podstatný podíl profesionální expozice, přece jen roční průměrné efektivní dávky na jednoho pracovníka klesly v jaderném průmyslu z hodnoty 4,4 mSv v letech sedmdesátých na

současnou hodnotu 1 mSv. Nicméně roční průměrná efektivní dávka na jednoho horníka v uhelném dole je 2,4 mSv a u ostatních horníků 3 mSv.

Současný odhad celosvětového počtu monitorovaných pracovníků je asi 23 milionů, z nichž asi 10 milionů je exponováno umělým zdrojům. Tři čtvrtiny pracovníků exponovaných umělým zdrojům pracují ve zdravotnictví, kde roční efektivní dávka na pracovníka činí asi 0,5 mSv. Vyhodnocení trendů průměrné roční efektivní dávky na pracovníka ukazuje vzestup v expozici přírodním zdrojům, zejména na účet důlních prací, a pokles expozice umělým zdrojům, zejména úspěšným uplatňováním opatření v radiační ochraně.

| Trendy v celosvětové expozici radiačních pracovníků (mSv)* | | | | |
|---|------|------|------|------|
| Zdroje | 1970 | 1980 | 1990 | 2000 |
| Přírodní zdroje | | | | |
| Posádky letadel | — | 3,0 | 3,0 | 3,0 |
| Těžba uhlí | — | 0,9 | 0,7 | 2,4 |
| Těžba jiných surovin** | — | 1,0 | 2,7 | 3,0 |
| Různé | — | 6,0 | 4,8 | 4,8 |
| Celkem | — | 1,7 | 1,8 | 2,9 |
| Umělé zdroje | | | | |
| Lékařské použití záření | 0,8 | 0,6 | 0,3 | 0,5 |
| Jaderný průmysl | 4,4 | 3,7 | 1,8 | 1,0 |
| Ostatní průmysl | 1,6 | 1,4 | 0,5 | 0,3 |
| Různé | 1,1 | 0,6 | 0,2 | 0,1 |
| Celkem | 1,7 | 1,4 | 0,6 | 0,5 |
| * Odhady průměrné roční efektivní dávky na jednoho pracovníka za rok, ** Uranový průmysl je zahrnut do jaderného průmyslu, | | | | |



PUBLIKACE UNSCEAR

Od zahájení svého působení vydal Výbor OSN pro účinky atomového záření (United Nations Committee on the Effects of Atomic Radiation — UNSCEAR) více než 25 zpráv s více než 100 přílohami (anexy), které mají vysokou vážnost jako základní prameny reprezentativního hodnocení zaměřeného na radiační expozici z testů jaderných zbraní a jaderné energetiky, z lékařského používání zdrojů záření a na radiační expozici pracovníků z přírodních i umělých zdrojů. UNSCEAR vyhodnocuje také detailní studie o rakovině a dědičných chorobách vyvolaných ozářením a posuzuje radiologické důsledky nehod na zdraví a životní prostředí. Zprávy UNSCEAR a jejich vědecké přílohy jsou vydávány jako prodejné publikace OSN (unp.un.org) nebo jako volně přístupné soubory k elektronickému stažení (unscear.org) aby se umožnilo jejich šíření ku prospěchu členských států OSN, vědecké komunity a veřejnosti.

Děkujeme za všechny odezvy a komentáře k této publikaci:

UNSCEAR secretariat
Vienna International Centre
P.O. Box 500
1400 Vienna, Austria
E-mail: unscear@unscear.org