



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  

---

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ  
Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

**RADIAČNÍ MIMOŘÁDNÉ UDÁLOSTI  
NA PRACOVÍŠTÍCH SE ZDROJI  
IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ**

**Radiation emergencies at Workplaces with  
Sources of ionizing Radiation**

Diplomová práce

Studijní program: Civilní nouzové plánování

Autor diplomové práce: Bc. Tomáš Novák

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Renata Havránková, Ph.D.

---

Kladno 2022

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novák** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **473916**  
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**  
Garantující katedra: **Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva**  
Studijní program: **Civilní nouzové plánování**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Radiační mimořádné události na pracovištích se zdroji ionizujícího záření**

Název diplomové práce anglicky:

**Radiation Emergencies at Workplaces with Sources of Ionizing Radiation**

Pokyny pro vypracování:

Předmětem diplomové práce bude historický přehled radiačních mimořádných událostí ve světě na pracovištích se zdroji ionizujícího záření jak průmyslových (mimo jaderné energetická zařízení), tak zdravotnických. V teoretické části budou definovány základní pojmy týkající se radiačních mimořádných událostí včetně legislativního rámce, dále budou popsány účinky ionizujícího záření na člověka a základní principy radiační ochrany. Praktická část diplomové práce se bude zabývat komparační analýzou a zhodnocením vybraných mimořádných radiačních událostí a příčinami jejich vzniku. Výstupem diplomové práce bude ucelený přehled radiačních mimořádných událostí, jejich dopadů a příčin vzniku.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČUPROVÁ, Julia, Martin FALK, Iva FALKOVÁ, et al., HAVRÁNKOVÁ, Renata, Klinická radiobiologie, ed. 1, Praha: Grada Publishing, 2020, ISBN 978-80-247-4098-0
- [2] PROUZA, Zdeněk a Jiří ŠVEC, Zásahy při radiační mimořádné události, V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008, ISBN 978-80-7385-046-3
- [3] OBODOVSKIJ, Il'ja Michajlovič, Radiation: fundamentals, applications, risks, and safety, Amsterdam: Elsevier, 2019, ISBN 978-0-444-63979-0

Jméno a příjmení vedoucí(ho) diplomové práce:

**Mgr. Renata Havránková, Ph.D.**

Jméno a příjmení konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **04.10.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2023**

doc. Mgr. Zdeněk Hon, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA  
děkan

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Radiační mimořádné události na pracovištích se zdroji ionizujícího záření vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů, které uvádím v seznamu bibliografických odkazů.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V doplňte dne 12.05.2022

.....  
Bc. Tomáš Novák

## **PODĚKOVÁNÍ**

Velké poděkování patří mé vedoucí práce Mgr. Renatě Havránkové, Ph.D. za trpělivost, odborné vedení a podporu v průběhu zpracování této práce. Také za velmi cenné rady a připomínky.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině, především mé ženě za neutuchající podporu a trpělivost, kterou projevila v době mých studií a v období zpracovávání této práce.

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá vytvořením historického přehledu o radiačních mimořádných událostech na pracovištích se zdroji ionizujícího záření. Jsou popsány radiační mimořádné události v průmyslu a zdravotnictví.

Teoretická část práce je zaměřena na historii využívání ionizujícího záření a nástin využívání zdrojů v současnosti. Dále jsou popsány účinky ionizujícího záření na člověka a vytvořen přehled vybraných radiačních mimořádných událostí.

Praktická část se zabývá hodnocením jednotlivých radiačních mimořádných událostí se zaměřením na příčiny vzniku a jejich důsledky. Dále je provedeno vyhodnocení nejčastějšího zdroje, který byl příčinou nehody. Hodnocení je provedeno pomocí komparační analýzy na základě veřejně přístupných dat o radiačních mimořádných událostech v průmyslu a zdravotnictví.

Výsledkem práce je souhrnný historický přehled radiačních mimořádných událostí. A vyhodnocení příčin a důsledků vzniku těchto událostí. Bylo zjištěno, že více jak polovina nehod je způsobena selháním lidského faktoru a nejčastějším zdrojem při radiačních mimořádných událostech je zdroj  $^{192}\text{Ir}$ . V diskusi jsou shrnuty výsledky výzkumu a je provedeno porovnání s ostatními autory.

### **Klíčová slova**

Mimořádná radiační událost; historický přehled; ionizující záření; pracoviště; průmysl, zdravotnictví; komparace.

## **ABSTRACT**

The work deals with the creation of a historical overview of radiation emergencies in workplaces with sources of ionizing radiation. Radiation emergencies in industry and healthcare are described.

The theoretical part of the work is focused on the history of the use of ionizing radiation and an outline of the use of resources today. Furthermore, the effects of ionizing radiation on humans are described and an overview of selected radiation emergencies is created.

The practical part deals with the evaluation of individual radiation emergencies with a focus on the causes and their consequences. Furthermore, an evaluation of the most common source that caused the accident is performed. The assessment is performed using a comparative analysis based on publicly available data on radiation emergencies in industry and healthcare.

The result of the work is a comprehensive historical overview of radiation emergencies. And evaluation of the causes and consequences of these events. It has been found that more than half of accidents are caused by human error, and the most common source in radiation emergencies is  $^{192}\text{Ir}$ . The discussion summarizes the results of the research and makes a comparison with other authors.

## **Keywords**

Emergency radiation event; historical overview; ionizing Radiation; Workplace; Industry, Healthcare; Comparison.

## Obsah

1	Úvod.....	9
2	Cíle práce a hypotézy .....	10
3	Přehled současného stavu.....	11
3.1	Historie využití zdrojů ionizujícího záření.....	11
3.2	Využívání ionizujícího záření v současnosti .....	23
3.3	Nejčastěji využívané zdroje ionizujícího záření v průmyslu a zdravotnictví.....	24
3.4	Účinky ionizujícího záření na člověka.....	25
3.4.1	Stochastické a deterministické účinky záření .....	27
3.4.2	Akutní nemoc z ozáření .....	28
3.4.3	Radiační poškození kůže.....	32
3.5	Principy radiační ochrany .....	32
3.6	Radiační mimořádné události.....	34
3.6.1	Vybrané radiační mimořádné události .....	35
3.6.2	Nehody v průmyslu.....	36
3.6.3	Nehody ve zdravotnictví .....	43
4	Metodika.....	49
4.1	Komparační analýza.....	49
4.2	Stanovení kritérií a cílů hodnocení .....	50
5	Výsledky.....	51
6	Diskuze .....	56
7	Závěr .....	70
8	Seznam použitých zkratk.....	71

9	Seznam použité literatury .....	72
10	Seznam použitých grafů .....	76
11	Seznam použitých tabulek.....	77



# 1 ÚVOD

Objevení ionizujícího záření odstartovalo využívání „zářící energie,“ která v sobě skrývá obrovský potenciál a zároveň neviditelné nebezpečí. Obě tyto skutečnosti fascinovaly lidstvo od samého prvopočátku, kdy byly objeveny paprsky X.

Nebezpečnost ionizujícího záření byla známa už velice brzy po jeho objevení. I přes tuto skutečnost si vyžádalo spoustu obětí, které nic netušící užívaly plnými doušky tuto zářivou energii od věcí denní potřeby až po léčebné kúry.

Jako mnoho dalších objevů přineslo ionizující záření lidstvu prospěch a zároveň bylo lidmi vojensky zneužito. Po svržení prvních atomových bomb na města Hirošimu a Nagasaki, lidstvo doslova oněmělo nad následky, které tato energie dokázala způsobit. Dodnes stojí v Hirošimě Atomový dóm, jako připomínka a varování před silou této energie.

Dnes je jaderná energie využívána v mnoha aplikacích, které přináší prospěch všem ať je to v lékařství, průmyslu, zemědělství, geologii nebo historii. Při dodržování všech pravidel se jedná o bezpečné užívání, navzdory tomu k nehodám dochází.

Práce bude koncipovaná jako historický přehled radiačních mimořádných událostí se zaměřením na definování nejčastějších příčin a důsledků těchto nehod. Motivací pro zpracování této práce bylo zjistit, jak vlastně častým jevem jsou tyto nehody a zároveň se zaměřit na okolnosti související s nehodami, které se staly.

## 2 CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY

Tato práce si klade za cíl vytvořit ucelený historický přehled radiačních mimořádných událostí. Budou hodnoceny radiační mimořádné události na pracovištích ve zdravotnictví a průmyslu, mimo jaderných zařízení. V práci budou popsány základní principy radiační ochrany a dále bude uveden popis biologických účinků ionizujícího záření na lidský organizmus. Praktická část bude řešit za pomoci komparační analýzy příčiny vzniku vybraných radiačních mimořádných událostí. Dále se bude zabývat identifikací nejčastějšího zdroje, který se při radiačních mimořádných událostech vyskytuje. Výstupem práce bude vyhodnocení příčin vzniku a dopadů radiačních mimořádných událostí.

Hypotéza: „Více než 50 % radiačních mimořádných událostí je způsobeno selháním lidského faktoru.“

„Více než 50 % radiačních mimořádných událostí souvisí se zdrojem <sup>192</sup>Ir.“

## 3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

### 3.1 Historie využití zdrojů ionizujícího záření

Po objevení paprsků X Wilhelmem Konrádem Röntgenem v roce 1895 a objevení přirozené radioaktivity A. Becqerelem v následujícím roce, nastal v uvozovkách zlatý věk pro fyziku a chemii. Tyto objevy nezůstaly osamocené a v krátké době po nich přišla Marie Sklodovská-Curie a Piere Curie s objevem polonia a radia [1, 2].

Díky objevům Röntgena a iniciativě Marie-Curie mohla být již za první světové války diagnostikována zranění vojáků pomocí pojízdných rentgenových jednotek. Tento rozvoj se samozřejmě nevyhnul ani českým zemím. Jako příklad bych uvedl prof. MUDr. Rudolfa Tomáše Jedličku, který již v roce 1897 vybudoval první rentgenový kabinet v hotelu u Černého koně a prováděl zde skiagrafická vyšetření jako první v Rakousku-Uhersku. Z důvodů ekonomických však toto zařízení sloužilo i pro pobavení hotelových hostů. Zde se ukazuje skutečnost, která je vždy společná pro všechny oblasti lidského poznání. Využívání nových technologií a produktů se stalo módou a proniká i do oblastí, kde se později neuplatní nebo je nadužívána. V případě vystavování se účinkům záření to platí dvojnásob [1].

Jedním z příkladů jsou rentgenové skiaskopy, které byly používány v prodejnách obuvi ke kontrole, jak vám boty „padnou“. Tyto přístroje byly v užívání ve 30.—50. letech 20. století, než se prokázaly jejich negativní zdravotní účinky [3].

Rentgenové záření se dostalo i na pole péče o pleť a krásu. Mnoho žen se nechalo v salónech TRICHO zbavit přebytečných chloupků na tváři i těle. Tato terapie se aplikovala asi 4 minuty jedenkrát týdně a trvala několik měsíců.

Pravidelné vystavování účinkům rentgenového záření samozřejmě zanechalo své následky. Ženám, které podstoupily tuto terapii, se začaly objevovat vrásky, vláknité skvrny a karcinomy, některé ženy skončily i se znetvořeným obličejem. V důsledku podobnosti s poškozením způsobeným po výbuchu atomové bomby se začaly označovat jako „The North American Hiroshima Maiden.“ Mnoho žen v důsledku ozáření také předčasně zemřelo. Je odhadováno, že v roce 1970 bylo toto ozáření zodpovědné za více, jak jednu třetinu výskytu rakoviny u žen [3].

Jako další příklad užívání rentgenového záření můžeme uvést skupinové ozařování dětských pacientů. Toto ozařování bylo prováděno v rámci hygienických opatření v boji s kožním onemocněním (dermatofytóza), které se nacházelo na pokožce hlavy. Onemocnění se vyskytovalo hojně v dětské populaci až do 60. let 20. století, kdy byl vynalezen lék griseofulvin. Výskyt tohoto onemocnění byl tak závažný, že pro děti trpící touto nemocí byly zřizovány zvláštní školy. To se však změnilo díky francouzskému dermatologovi Raimondu Sabouraudovi, který zjistil, že díky rentgenovému záření jde tuto nemoc nejen léčit, ale i trvale vyléčit. Rentgenové záření bylo tedy využíváno jako regulérní prostředek léčby tohoto onemocnění, vyjma USA, kde byl používán původní způsob léčby podáváním octanu thallného. Retrospektivními studiemi byly odhadnuty dávky na mozek dětí 1,4 Gy, na štítnou žlázu asi 60 mGy a na kraniální kostní dřeň asi 4 Gy. Odhaduje se, že tuto terapii podstoupilo přibližně 200 000 dětí po celém světě. Zároveň se jedná o největší cílené ozáření populace na světě [3].

Poté, co bylo objeveno radium, rozpoutala se doslova revoluce v jeho využívání. Stal se zářícím světlem, které mělo blahodárné účinky pro život, krásu a zdraví. Toto přesvědčení převládalo ale daleko předtím, než byly objeveny skutečné účinky tohoto prvku. V této pro něj příznivé době si našel

mnoho oblastí využití, ať už u předmětů běžného používání, tak v užívání pro zvýšení tělesného zdraví či kondice a byl předepisován prakticky na vše. V průmyslu byl využíván například pro ciferníky a ručičky hodinek, značení střelek kompasu, číselníky měřidel, tlačítek pro kliky dveří nebo světelné spínače a mířidla vojenských zbraní [3].

V průmyslovém použití je radium pro své luminiscenční vlastnosti v celku prakticky využitelné. O to více překvapuje jeho využívání v produktech pro lidskou spotřebu od injekcí, po aplikace a vkládání do těla. Již v dubnu 1914 vyšel ve vědeckém časopise Radium článek o intravenózních injekcích rozpustných solí radia určených k léčbě vysokého krevního tlaku, publikovaný Dr. Frederickem Proeschere. Tato léčba se ale nezakládala na žádném vědeckém základě. Dr. Proescher léčil jen 34 pacientů a z toho 16 jich trpělo artritidou. Dr. Proescher nebyl v tomto počínání osamocen. Jako další případ můžeme uvést Dr. C. Everetta Fielda, který působil v New Yorku a byl ředitelem Kanceláře Chemical Company tamtéž. Do konce dvacátých let publikoval v lékařských časopisech články o prospěšném užití radia. V roce 1926 publikoval článek, který pojednává o 12 letém období, kdy aplikoval 6 000 nitrožilních dávek léčebného Radia. Neexistují však žádné záznamy potvrzující prospěšnost této terapie a sledování dlouhodobých účinků [3].

V období 20. let 20. století bylo celkem běžné koupit si nápoje, tablety, masti, kosmetické krémy, vlasové přípravky, zubní pasty, špunty do uší, antikoncepci, chléb, čokoládové tyčinky nebo cigarety s obsahem radia. Výjimkou nebylo ani mýdlo či čistič rukou s obsahem tohoto prvku [3].

Ve Francii byl společností Tho-Radia prodáván beauty krém, který obsahoval 0,25 miliontiny gramu bromidu radia ve 100 gramech. Společnost tvrdila,

že tento krém odstraní vrásky z obličeje. Dále udávala, že složení krému je namícháno doktorem Alfrédem Curiem, ten ve skutečnosti, ale nikdy neexistoval. Ze všech produktů obsahující rádiu se však nejvíce ujaly pitné kúry [3].

Ve 30. letech 20. století byla velice moderní tzv. „fontána věčného rodinného zdraví,“ která obsahovala ve vodě rozpouštěné radium a byla doporučována k pravidelnému pití [4]. Tyto nádoby byly prodávány i v USA nebo Velké Británii [3].

Dalším produktem určeným k pití bylo tonikum Radithor, známé také jako „věčné slunce“. Tento přípravek byl hojně předepisován lékaři a praktiky. Výrobci deklarovali, že se jedná o tonikum s největší terapeutickou silou, kterou vůbec lidstvo zná. Doporučovali jeho užívání při léčbě chorob jako je anémie, artritida, cukrovka, vysoký krevní tlak, nervové stavy, obezita či dokonce sexuální problémy. V USA byl distribuován firmou Bailey Radium Laboratories se sídlem v New Jersey. Majitelem této společnosti byl William J. A. Bailey. Již v minulosti byl ale usvědčen z podvodů při obchodu s jinými údajně léčivými prostředky. Přesto v roce 1922 znovu zahájil svou podnikatelskou činnost a založil radiové laboratoře včetně Asociace radiových chemiků v New Yorku, kde začal výrobu radiových tablet Arium. Tyto tablety měly sloužit pro návrat štěstí a vzrušení do života ženatých lidí, jejichž vzájemná přitažlivost již zeslábla. Laboratoře Bailey Radium byly velice výnosným podnikem provozovaným mezi lety 1925–1931. Produkt Radithor byl distribuován v krabicích o 30 lahvičkách za cenu 30 dolarů. Obsah balení byl určen na jeden měsíc, každá lahvička obsahovala třikrát destilovanou vodu a alespoň 1 microcurie (37 000 Bq), z  $^{226}\text{Ra}$  a  $^{228}\text{Ra}$ . Společnost Bailey musela ukončit svou činnost v roce 1931 a to po osobním svědectví Ebenzera McBurneyho Byerse, který byl předsedou

AM Byers Co v Pittsburghu, jedné z největších světových železářských a ocelářských společností. Po zranění ruky mu bylo předepsáno pravidelné užívání Radithoru a po celé mládí byl nadšeným zastáncem jeho blahodárných účinků. Ve věku 51 let se však jeho zdravotní stav velice zhoršil a začal se doslova rozpadat. Od prosince 1927 užíval průměrně tři lahvičky Radithora denně po dobu 2 let. S pitím přestal v roce 1930, kdy mu začaly vypadávat zuby, a musela mu být chirurgicky odstraněna dolní a následně i horní čelist. Později se mu začaly objevovat léze na mozku a praskala mu lebka. Díky společenskému postavení Byerse bylo zahájeno vyšetřování Federální obchodní komisí ve společnosti Bailey Radium Laboratories. V roce 1932 Byeres zemřel, jako příčina smrti byla uvedena nekróza čelisti, absces mozku a dále následná anémie a pneumonie. Následné nálezy odhalily, že za dobu, co užíval Radithor, vypil přibližně 1 400 lahviček tohoto přípravku. Jeho tělo obsahovalo 2 738 kBq rádia. Při pozdější exhumaci, spojené s měřením se ukázalo, že spotřeboval přibližně 12 913 kBq  $^{226}\text{Ra}$  a 22 000 kBq  $^{228}\text{Ra}$ . Bailey Radium Laboratories byly zavřeny až v roce 1937. [3].

Jak již bylo shora popsáno, radium se využívalo také v průmyslu, v tomto konkrétním případě na označování ciferníků a ručiček hodinek. Sabin von Sochocky po emigraci z Evropy do USA vyvinul speciální barvu složenou z radia a sloučeniny fosforu, kterou natíral na ciferníky svých hodinek, aby v noci svítily. Po prodání první série založil v New Jersey společnost Radium Luminous Material Company (1915) a o dva roky později se ze společnosti stal US Radium Corporation. Světelný nátěr byl velice využitelný pro armádu a společnost se stala hlavním dodavatelem hodinek a ciferníků používaných vojáky za první světové války. Firma se postupně rozrůstala a mohla si již dovolit vlastní provoz na těžbu radia. Zároveň si vytvořila vlastní ateliéry pro malbu ciferníků. Jednalo se o velice snadnou práci a také dobře placenou. Na tuto práci byly najímány hlavně

mladé dívky a příležitostně zdravotně postižení lidé. Mezi lety 1917 až 1926 bylo najato celkem 4 000 zaměstnanců. Malování ciferníků se provádělo štětcí z velbloudí srsti, aby se vytvořila co nejtenčí špička. Štětec se před každým namočením do barvy vkládal mezi rty. Barva měla mírně nahořklou chuť, dívky byly ujištěny, že barva nemá žádné škodlivé účinky. Tento postup se během pracovní směny opakoval několikrát, přičemž bylo vždy pozřeno malé množství radia. Radium při perorálním požití je asi z 20 % vstřebáno střevy a většina je vyloučena stolicí, přibližně 5 % se vylučuje močí. Jakmile se radium dostane do krevního oběhu, má podobné vlastnosti jako vápník a vstřebává se do kostí. Kromě karcinogenních účinků působí radium v kostech ozařování krvevorných buněk a pro jejich velkou radiosenzitivitu dochází brzy k jejich vyčerpání. Následkem jsou různé druhy leukemie, lymfomů a aplastické anémie. Z počátku si dívky všimly, že jim ve tmě svítí rty, a nepřikládaly tomu žádný význam. Dokonce si malovaly zuby, nehty, knoflíky a prsteny, aby se v noci třpytily. V roce 1921 se již objevovaly první příznaky otrav radiem u pracovníků malířských dílen. Velmi častým jevem bylo vypadávání zubů až rozpad spodní čelisti. V úmrtních listech byly uváděny diagnózy jako například anemie, zákopová ústa, zápal plic a otrava fosforem. Též byly uváděny odkazy na syfilis jako součást úmyslného zkreslování a znevěrohodnění zaměstnanců za účelem odvedení pozornosti od skutečnosti, že otravy by mohly být způsobené radiem. Na sklonku roku 1922 vyšetřovalo ministerstvo práce případy nekrózy čelistí v továrně Orange v New Jersey s podezřením na otravy fosforem. Vyšetřováním bylo však zjištěno, že se jedná spíše o otravy radiem. Chronické nadužívání radia během pracovního procesu způsobovalo zaměstnancům obrovské zdravotní problémy – kostní nádory, ochromující deformity skeletu, bolestivé zubní kazy, gastrointestinální problémy, chronickou anemii a celkovou degradaci těla. Roku 1927 podala skupina dívek žalobu na společnost US Radium Corporation. Tyto dívky se později staly známými jako „Radium girls“. Výsledkem soudního jednání,



bylo navržení mimosoudního vyrovnání ve výši 10 000 dolarů plus 600 dolarů ročně na krytí léčebných výloh. Společnost US Radium Corporation však nikdy nepřevzala zodpovědnost za otravu těchto pracovníků a vyrovnání nevyplatila s odůvodněním, že nemohla dosáhnout spravedlivého soudu. Úspěchu bylo, ale nakonec dosaženo postupným vznikem průmyslových předpisů, týkajících se nemocí z povolání a odpovědnosti zaměstnavatelů za ně. Tento případ ovlivnil také pozdější bezpečnostní kulturu v projektu Manhattan [3].

Projektu Manhattan předcházelo ještě mnoho významných objevů jako například provedení první úspěšné štěpné reakce v roce 1938 týmem okolo profesora Hahna.

Na tento úspěch později navázal Enrico Fermi, který v roce 1942 sestavil na Chicagské univerzitě první reaktor a to včetně bezpečnostních prvků. Tento reaktor měl trojitě jištění regulačními tyčemi z cadmia, které bylo možné vsouvat do reaktoru jak horizontálně, tak vertikálně k řízení štěpné reakce. Vertikální tyč byla připravena pro případné nárazové zastavení reaktoru. V posledním případě byl Fermi připraven zalít reaktor koncentrovaným roztokem cadmia. [2, 4].

V té době již naplno probíhala 2. světová válka a začalo se uvažovat o využití jaderné energie také pro vojenské účely. A to byl hlavní impulz pro vznik projektu Manhattan, který řídil všestranně nadaný vědec Robert Jacob Openheimer mezi lety 1942–1945. Výsledkem tohoto projektu byla první jaderná plutoniová bomba, která vybuchla na pokusném polygonu Alamogordo v novém Mexiku 16. července 1945. Ve dnech 6. a 9. srpna 1945 byly svrženy bomby na Japonsko. V Hirošimě byla použita bomba s vysoce obohaceným uranem. Na Nagasaki byla svržena bomba plutoniová. Obě tyto akce

si vyžádaly 144 000 zemřelých, někteří umřeli ihned, ostatní na následky ozáření později. Openheimer cítil za tento čin osobní zodpovědnost a postavil se proti vývoji vodíkových bomb, díky tomuto postoji se stal nepohodlným a upadl v nemilost amerických oficiálních míst [5].

Takto významný projekt se samozřejmě neobešel bez nehod. Pro příklad jen několik z nich. Jednou z největších výzev projektu Manhattan bylo určení kritického množství ke spuštění štěpné reakce. Jednalo se o skutečně nebezpečnou činnost, neboť nebylo možno předvídat vývoj reakce až do doby, kdy k ní došlo.

Jednou z prvních obětí těchto pokusů byl 24letý fyzik Harry Daghlian, který patřil do týmu Otty Frische. Hlavním úkolem tohoto týmu bylo určení kritického množství materiálu ke spuštění štěpné reakce. Jádro z plutonia se za účelem určení tohoto množství skládalo ručně. Radioaktivita byla při skládání tohoto jádra poměrně bezpečná až do doby, kdy množství neutronů dosáhlo prahu a energie začala exponenciálně stoupat. V té době bylo nutné jádro oddělit, aby nedošlo k neřízené štěpné reakci. Dne 21. srpna 1945 prováděl Daghlian pokus postavit neutronový reflektor kolem jádra  $^{239}\text{Pu}$ , k tomu používal karbidové cihly o váze 4,4 kilogramu. Účelem tohoto pokusu mělo být potvrzení, že neutronový reflektor dokáže snížit množství plutonia pro spuštění řetězové reakce. Daghlian pokus ukončil, ale později se vrátil zpět do laboratoře, a pokračoval v pokusu sám, což bylo samozřejmě v rozporu s bezpečnostními předpisy. S radiačním monitorem namířeným proti jádru postavil 4 vrstvy cihel, tato činnost vyžadovala pevnou ruku. Po dokončení páté vrstvy se chystal k umístění další cihly na střed, v tom ho ale radiační monitor upozornil na skutečnost, že jádro se brzy stane nadkritickým. Při snaze odstranit poslední cihlu, došlo k pádu této cihly přímo na jádro. To způsobilo řetězovou reakci, Daghlian se ještě v zoufalství snažil

tuto reakci přerušit a cihlu srazil rukou s vědomím, že obdrží smrtelnou dávku záření. Poté musel jádro blok po bloku rozebrat, aby bylo bezpečné. Utrpěl popáleniny na ruce a obdržel vysokou dávku neutronového a gama záření. Byla to první radiační nehoda spojená s projektem Manhattan. Daghlian byl léčen lékařským týmem přímo v Los Alamos. Terapie byla ale spíše neúčinná a zaměřená hlavně na zmírnění příznaků akutní nemoci z ozáření. Lékaři neměli žádnou informaci o velikosti dávky, kterou Daghlian obdržel. Dne 15. září 1945, po 25 dnech zemřel. Jako příčina smrti byl uveden akutní radiační syndrom a selhání krvetvorných tkání kostní dřeně. Odhaduje se, že Harry Daghlian obdržel, dávku asi 5 Sv. V době nehody se v místnosti vyskytoval ještě vojín Robert Hemmerly, který seděl asi 4 metry od Daghliana a obdržel mnohem nižší dávku záření. Zemřel až 33 let po nehodě na akutní leukémii, v té době mu bylo 62 let [3].

K druhé nehodě došlo 9 měsíců po nehodě Hanrryho Daghliana během testu, který prováděl v té době nejzkušenější fyzik v projektu Louis Slotin. Odpoledne 21. května 1946, prováděl test kritičnosti na třetím jádře, které bylo vytvořeno pro atomovou bombu, nebylo však pro tento účel nikdy využito. Test měl sloužit jako demonstrace procesu uvedení jádra do kritického stavu. Slotin byl velice zručný a tento test s jádrem prováděl mnohokrát. Spustil polokulaté pěchovadlo z beryllia k jádru a zastavil se těsně před ním. Pěchovadlo vychytávalo neutrony, které emitovalo jádro plutonia. Slotin během pokusu držel pěchovadlo v levé ruce a dlouhý plochý šroubovák v ruce pravé, ten používal vždy jako klín, aby zůstaly obě hemisféry oddělené od sebe. Šroubovákem otáčel tak, aby se pěchovadlo opatrně spustilo do bodu kritického stavu. Tato nebezpečná operace byla nazývána „lechtání dračího ocasu“. Když Slotin pomalu otáčel šroubovákem, došlo k jeho sklouznutí a přiblížení pěchovadla a jádra. Slotin zkroutil zápěstí, aby mohl odhodit pěchovadlo, reakce už ale byla v chodu. Došlo k intenzivnímu modrému záblesku

a místností projela vlna tepla. Výpočty, které byly provedeny po havárii, se zjistilo, že proběhlá řetězová reakce byla milionkrát menší než u bomb svržených na Japonsko. Stále se ale jednalo o silné ozáření. Během testu se v místnosti nacházelo ještě dalších sedm lidí. Tři fyzici, student fyziky, inženýr, fotograf a dále vojín Patric Cleary jako strážce. Slotin se ihned po incidentu snažil určit polohu jednotlivých osob v místnosti. Vytvořil náčrt, ve kterém zaznamenal pozice osob směrem k jádru a pokusil se změřit pomocí detektoru záření aktivitu na nejbližších předmětech. To se mu však díky velké kontaminaci a ovlivnění přístroje elektromagnetickým impulsem nepodařilo. Všech osm mužů bylo převezeno k lékařské kontrole do Los Alamos. Nejvyšší dávku záření obdržel Slotin, který pracoval přímo nad jádrem. Jeho tělo absorbovalo vysokou dávku od neutronů a v podstatě posloužil jako stínění lidem stojícím za ním. Slotinův stav byl velmi vážný, už během převozu k lékařské prohlídce se u něj objevilo zvracení a to se opakovalo i v dalších hodinách po nehodě. Následující den se zdálo, jakoby se jeho stav zlepšil, vyjma jeho levé ruky, která byla v přímém kontaktu s jádrem. V několika následujících dnech se mu na levé ruce objevily puchýře voskově modré barvy, jeho pravá ruka, kde držel šroubovák, byla zasažena o mnoho méně. Pátý den po nehodě u Slotina došlo k prudkému poklesu bílých krvinek a jeho stav se velmi zhoršil, měl silné bolesti břicha a trpěl nevolností. Projevovaly se u něj poruchy srdeční činnosti a kolísání teplot. Sedmý den se nacházel ve stavu zmatenosti, měl promodralé rty, proto byl umístěn do kyslíkového stanu. Upadl do komatu a devět dní po nehodě zemřel. Bylo mu tehdy 35 let. Jako příčina úmrtí byl uveden akutní radiační syndrom. Odhadnutá dávka, kterou Louis Slotin obdržel, byla asi 21 Sv. Přehled dávek, které obdrželi ostatní účastníci experimentu, jsou uvedeny v tabulce (viz tab. 1) [3].

Tabulka 1 – Přehled dávek osob přítomných při nehodě 21. května 1946 [3]

Jméno	Věk	Funkce	Dávka záření	Následek
Louis Slotin	35	fyzik	10 Gy neutrony 1,14 Gy gama záření	zemřel na akutní nemoc z ozáření po 9 dnech
Alvin Graves	35	fyzik	1,66 Gy neutrony 0,26 Gy gama záření	zemřel na infarkt po 19 letech
Samuel Allan	26	student fyziky	neznámá	odmítl se účastnit navazujících studií, zemřel o 55 let později
Marion Cieslicki	23	fyzik	0,12 Gy neutrony 0,14 Gy gama záření	zemřel na akutní myelitickou leukémii po 19 letech
Reamer Schreiber	36	fyzik	0,09 Gy neutrony 0,03 Gy gama záření	zemřel přirozenými příčinami po 52 letech
Dwight Young	54	fotograf	0,51 Gy neutrony	zemřel na aplastickou anémii a bakteriální edokarditidu 29 let po nehodě
Teodore Perlman	23	inženýr	0,07 Gy neutrony 0,02 Gy gama záření	předpokládá se, že zemřel 42 let po nehodě, příčina úmrtí není známá
Patrik Cleary	21	ochranka	0,33 Gy neutrony 0,09 Gy gama záření	zabit v akci 4 roky po nehodě v Korejské válce

Jedním z dalších zajímavých incidentů byla nehoda, která se stala 23letému chemikovi Donaldu Mastickovi. Jednalo se o chemika, který manipuloval s v podstatě prvním vzorkem plutonia, které bylo přepraveno do Los Alamos. Dne 1. září 1944 byla Mastickovi doručena skleněná lahvička s 10 miligramy plutonia ve formě roztoku chloridu plutonia. Nikdo však v té době nevěděl, že v lahvičce z důvodu přepravy a skladování, dochází k nárůstu tlaku. Náhlé došlo k roztržení lahvičky a kapalné plutonium vytrysklo z lahvičky ven. Obsah byl vystříknut na stěnu, proti které Mastick právě stál, a odrazem mu část obsahu vnikla do úst a potřísnila mu obličej. Mastick pocítil kyselou pachutí v ústech a odebral se hned k vyšetření. Byla mu vypláchnuta ústa a vypumpován žaludek za účelem získat co největší množství spolknutého

materiálu. Jeho tvář byla důkladně dekontaminována, přesto jeho kůže zůstala kontaminována asi 1 mikrogramem plutonia. Úroveň vnitřní kontaminace byla odhadována asi na 10 mikrogramů. Po zotavení se opět vrátil ke své práci. Následně pracoval na výzkumu stanovení množství plutonia ve vzorcích moči, odkud přešel na práci na montáži a testování bomb, které byly později svrženy na Japonsko. Po 50 letech v roce 1995 při rozhovoru, který poskytl, prohlásil, že na sobě nikdy nepozoroval škodlivé účinky incidentu. Tato skutečnost byla pravděpodobně způsobena včasným zásahem a vypumpováním žaludku, kdy nedošlo k následnému průniku plutonia do krevního řečiště [3].

Další výzkumy se po druhé světové válce ubíraly různými směry. Na straně jedné prováděním testů jaderných zbraní v čele s USA, Ruskem, Francií a Velkou Británií. A na straně druhé využívání energie z jádra pro civilní, ale i vojenské účely. Padesátá léta jsou počátkem využívání jaderné energie pro komerční účely. První jaderná elektrárna ve městě Obninsk začala dodávat proud do el. sítě v roce 1954 a byla v provozu až do roku 2002 [1]. V USA byl spuštěn první komerční reaktor dodávající proud do sítě v roce 1957 [4]. Roku 1959 byla spuštěna na vodu první jaderná ponorka [5].

Vojenský výzkum se zaměřil hlavně na zkoumání účinků ionizujícího záření, ochrany proti tomuto záření a potřebám výzkumu v době studené války. V civilním využití si našlo ionizující záření místo hlavně v medicíně, fyzikálním výzkumu a jaderné energetice. S jadernou energetikou je také spjata několik nehod. Pro příklad jen ty nejznámější: Windscale (1957), Three Mile Island (1979) a Černobyl (1986). Právě nehoda v Černobyli vyvolala velké otázky k bezpečnosti využívání energie z jádra.

K velkým změnám v oblasti využívání zdrojů záření došlo po pádu železné opony. V důsledku razantních politických změn, již nebylo nutné provádět výzkum převážně zaměřený na prostředky umožňující totální zničení nepřítele a ochranu proti použití jaderných zbraní. Došlo k odtajnění mnoha výzkumů a zavedení využitelných aplikací do civilního použití.

Poslední a největší přehodnocení, týkající se využívání jaderné energetiky, proběhlo v roce 2011 po nehodě na jaderné elektrárně ve Fukušimě. Havárie měla za následek vyvolání globální diskuse o bezpečnosti a využívání jaderné energie. Mnoho evropských zemí v čele s Německem a Francií, začalo vážně uvažovat o zrušení provozů jaderných elektráren na svém území. I přes skutečnost, že globální postoj společnosti k jádru se po havárii ve Fukušimě změnil, prochází využívání jaderné energie svým dalším vývojem. Jsou plánovány malé reaktory pro výrobu elektrické energie v menším měřítku, než je tomu dnes. V plánu je také několik reaktorů plovoucích [4].

### **3.2 Využívání ionizujícího záření v současnosti**

Využívání zdrojů ionizujícího záření zasahuje dnes do mnoha oblastí lidské činnosti. Veřejně nejznámější je asi použití v jaderných technologiích, pro reaktory, radioizotopové zdroje a urychlovačem řízené transmutátory. Malé jaderné reaktory se také využívají v kosmickém výzkumu, jako pohonné jednotky družic [4].

Druhým oborem nejhojněji využívajícím ionizující záření je medicína – radiodiagnostika, nukleární medicína, radioterapie.

Mnoho aplikací nalezneme v průmyslu – měření vlhkosti, zkoumání složení a stavu materiálu, radiační datování, radiační konzervace, ozařování archiválií, desinfekce a ozařování medicínských prostředků, papírenský průmysl,

hladinoměry (např. pivovary). V zemědělství pro ničení mikrobů, plísní a zastavení nežádoucího klíčení. V oblasti bezpečnosti se můžeme setkat s bezpečnostními rentgeny na letištích nebo celními rentgeny [4].

V Geologickém výzkumu se využívá pro geofyzikální měření ve vrtech (karotáž) a k datování jednotlivých geologických vrstev. Pro hydrologii jsou zdroje ionizujícího záření cenné hlavně v možnosti využití stopovacích látek ke sledování toku v řekách a potrubích, případně kontrolu odpadních vod [4].

### **3.3 Nejčastěji využívané zdroje ionizujícího záření v průmyslu a zdravotnictví**

Aplikace jednotlivých zdrojů je vždy závislá na činnosti, ke které je chceme využít, a dle toho volíme vhodný zářič. Nezáleží pouze na druhu záření, ale také na vlastnostech materiálu. Pro měření tenkých materiálů jsou vhodné například beta zářiče  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  a  $^{204}\text{Tl}$ , zatímco pro látky s větší tloušťkou a hustotou se využívají gama zářiče  $^{60}\text{Co}$  a  $^{137}\text{Cs}$ . Alfa zářiče najdou využití například při analýze směsí binárních plynů, kdy dochází k ionizaci alfa zářením. Této vlastnosti využívají například požární hlásiče, které obsahují  $^{241}\text{Am}$  [6].

Nukleární medicína využívá zdroje ionizujícího záření pro použití v zobrazovacích a terapeutických aplikacích. Příprava těchto zdrojů se provádí na speciálních jaderných reaktorech nebo urychlovačích. Frekvence využití jednotlivých zdrojů se značně liší. Pro užití v zobrazovacích metodách se využívají například zdroje  $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{123}\text{I}$  a  $^{131}\text{I}$  (zobrazování/terapie) [8]. V terapeutických aplikacích se používají zdroje, jako jsou  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{152}\text{Sm}$ ,  $^{186}\text{Re}$  [8]. Nejčastěji používané zářiče a jejich využití je přehledně zobrazeno (viz tab. 2).



Tabulka 2 Nejčastěji používané zářiče [6, 7]

Druh záření	Zářič	Odvětví	Využití
Alfa	$^{241}\text{Am}$ , $^{241}\text{Am/Be}$ , $^{137}\text{Cs}$ ,	průmysl	požární hlásiče, karotáž
	$^{238}\text{Pu}$	průmysl	radioaktivní termoelektrické generátory
Beta	$^{35}\text{S}$ , $^{63}\text{Ni}$ , $^{85}\text{Kr}$ , $^{90}\text{Sr}$ + $^{90}\text{Y}$ a $^{204}\text{Tl}$	průmysl	měření popelnatosti, měření tloušťky
Gama	$^{60}\text{Co}$ a $^{137}\text{Cs}$ , $^{192}\text{Ir}$	průmysl	defektoskopie
		zdravotnictví	brachyterapie
	$^{60}\text{Co}$ a $^{137}\text{Cs}$ ,	průmysl	ozařovače pro sterilizaci, měřiče úrovní
		zdravotnictví	ozařovače krve, teleterapie

### 3.4 Účinky ionizujícího záření na člověka

Účinky ionizujícího záření na lidský organizmus jsou závislé na typu záření, době a velikosti dávky, které je organizmus vystaven. Souvisí také s úrovní zevní nebo vnitřní kontaminace. V mnoha případech dochází ke kombinaci vnějšího ozáření, povrchové a vnitřní kontaminaci. Tento děj nazýváme sdruženým radiačním poškozením. Účinky vnitřní kontaminace jsou vždy závislé na druhu radionuklidu, jeho poločasu rozpadu a biochemických funkcích a zároveň na cestě vstupu do organismu. Radionuklidy mohou vstoupit do těla inhalací, ingescí případně přes poraněnou kůži nebo sliznice [1]. Posledním rozhodujícím faktorem, určujícím míru poškození ionizujícím zářením, je rozdílná radiosenzitivita jednotlivých buněk, orgánů a soustav.

Nejvyšší citlivost vykazují buňky, které se rychle dělí, například buňky kostní dřeně, střevní epitel, lymfoidní orgány a slizniční epitely. Ozáření na takto citlivých buňkách se projeví velmi časně po ozáření z důvodu smrti velké části těchto buněk, zároveň ale dochází k jejich rychlé reparaci. U buněk s nižší radiosenzitivitou je to právě naopak, reparace probíhají velmi pomalu a často se mění v chronické poškození [1].

V mnoha ohledech je možné sledovat změny na buněčné úrovni díky proteinu p 53, který označujeme jako strážce genomu. Při radiacním poškození DNA dochází k fosforylaci a následnému zvýšení množství proteinu p53. Jeho přínosem je regulace buněčného dělení v případě nevratného poškození spuštění procesů vedoucích k apoptóze [1, 8].

Jestliže jsou biomolekuly ionizovány přímou cestou, jedná se o přímé účinky ionizujícího záření. Přímý účinek způsobuje narušení chemických vazeb v biomolekulách a působí přímo v místě zásahu.

U nepřímého účinku dochází k radiolýze vody a tím následně ke vzniku volných radikálů. Mezi tyto radikály, vzniklé po ionizaci patří  $H^\circ$ ,  $OH^\circ$ , vodíkový kationt  $H^+$ , ve vodném prostředí se přeměňuje na oxiniový kationt  $H_3O^+$ , hydroxylový anion  $OH^-$ , peroxid vodíku  $H_2O_2$  a hydratovaný elektron  $e_{aq}^-$ . Nepřímý účinek způsobuje chemické poškození, které je nejvíce nebezpečné v bezprostřední blízkosti biomolekul. V okysličeném prostředí dochází ke vzniku dalších radikálů jako například hydroperoxylový radikál  $HO_2^\circ$  a superoxidový anion-radikál  $O_2^\circ$ . Díky tomuto vzniká tzv. kyslíkový efekt, jehož účinky je možné využít v radioterapii při léčbě nádorů [1].

Nejpodstatnějším faktorem pro závažnost poškození biomolekul přímým nebo nepřímým účinkem je obecné pravidlo, že vždy záleží na typu ionizujícího záření. Záření typu gama a X s malou hustotou ionizace způsobuje nepřímý

účinek. Zatím co hustě ionizující záření (např. urychlené těžké ionty) způsobí účinek přímý.

### 3.4.1 Stochastické a deterministické účinky záření

**Stochastické účinky** je možné předpovědět v návaznosti na dávce ozáření, není však možné potvrdit, zda výskyt onemocnění je způsobený právě tímto ozářením. Důvodem je, že klinické případy vzniklé po ozáření, nejdou nijak odlišit od spontánně vzniklých. Mezi stochastické účinky patří genetické změny a nádorová onemocnění. S dávkou roste pravděpodobnost vzniku nádoru ne však intenzita nebo stupeň poškození. Pravděpodobnost poškození po malých dávkách ozáření je nižší než vznik spontánní rakoviny, která se v populaci pohybuje okolo 30 % [1, 2, 9].

**Deterministické účinky** (nově tkáňová reakce) záření nastávají až od tzv. „prahové dávky.“ K těmto účinkům dochází po úplné buněčné smrti a vyskytnou se u každého jedince po obdržení prahové dávky a mají charakteristické klinické projevy. Se zvyšující se dávkou roste klinická závažnost a dochází ke zkracování doby, po které dojde k projevům účinků nemoci z ozáření. Mezi deterministické účinky patří akutní nemoc z ozáření, akutní radiační dermatitida, poškození fertility, poškození plodu in utero a pozdní nenádorová poškození – chronická radiační dermatitida, radiační katarakta [1, 9].

Účinky záření můžeme dále dělit na časné, které jsou pouze deterministické. Pozdní, zde se mohou objevit jak účinky deterministické tak stochastické. Somatické s účinkem deterministickým a genetické, kde je účinek stochastický [1].

### 3.4.2 Akutní nemoc z ozáření

**Akutní nemoc z ozáření (ANO)** vzniká po celotělovém ozáření pronikavým druhem záření dávkou 0,7 až 1 Gy. Akutní nemoc z ozáření dělíme na dřeňovou, střevní, toxemickou a cerebrální formu. Projevy a prognóza radiačního poškození je závislá na dávce a době jejího působení (viz tab. 3).

*Tabulka 3 - Klinické formy a stupně závažnosti ANO vyvolané celkovým zevním relativně rovnoměrným ozářením [1]*

Dávka (Gy)	Klinická forma	Stupeň závažnosti	Prognóza	Mortalita (%)	Doba úmrtí
0,7–2	dřeňová	I (lehký)	zcela příznivá	0	-
2–4		II (střední)	relativně příznivá	5	40–60
4–6		III (těžký)	poměrně příznivá	50	30–40
6–10		IV (velmi těžký)		nepříznivá	95
10–20	střevní		zcela nepříznivá	100	8–16
20–50	toxemická (cévní)			100	4–7
nad 50	cerebrální			100	1–3

#### Dřeňová forma akutní nemoci z ozáření

Dřeňová (hematopoetická) forma ANO, prochází čtyřmi základními fázemi prodromální, latentní, manifestní a fází rekonvalescence. Vzniká po obdržení dávek záření vyšších než 0,7 Gy. V této formě je charakteristické poškození kostní dřeně způsobující infekční komplikace, krvácení a anemii.

V nižších dávkách má tato forma dobrou prognózu vyléčení, může však nastat i smrt a to po dávkách od 2 do 10 Gy.

**Prodromální fáze** se vyznačuje příznaky, jako jsou anorexie, nechutenství, zvracení, průjem, poruchy motility zažívacího traktu. Dále vykazuje projevy neuromotorické – únavnost, malátnost, apatie a neurovaskulární – zvýšené pocení, hypertermie, hypotenze, závratě, bolesti hlavy. Dochází také k příznakům na kůži a sliznicích – hyperemie, svědění, pálení. Všechny shora uvedené příznaky se vztahují až k dávce 8 Gy a více. Dávky mezi 1 až 2 Gy se projevují malátností a únavou, bolesti hlavy a průjem přichází okolo dávek 4 až 6 Gy. Mezi 6 až 8 Gy se dostavují závratě [1].

**Latentní fáze** se vyznačuje tím, že v průběhu této fáze dochází k úplnému nebo částečnému vymizení příznaků. Co se týká doby trvání, je přímo závislá na stupni radiačního poškození, a tomu také odpovídají příznaky. V případech lehké ANO je trvání latentní doby do 30 dní od ozáření, v některých případech i déle. Při středním poškození se tato fáze pohybuje v délce 15–30 dní, při těžkém poškození trvá 5–20 dní. Jedná-li se o velmi těžké poškození, přechází prodromální fáze do fáze manifestní a latentní fáze zde může úplně chybět [1].

**Manifestní fáze** se projevuje hemoragickým syndromem a infekčními onemocněními způsobenými kritickým podstavem leukocytů a trombocytů v periferní krvi. Počátek infekčního onemocnění má projevy v podobě výrazné slabosti, závratě, bolestí hlavy, hypertermie, zimnice a nadměrného pocení. Pacienti trpí tachykardií, poruchami spánku a nechutenstvím. Hemoragický syndrom způsobuje krevní výrony na sliznici dutiny ústní a v kůži, těžké případy se projevují také krvácením nosním a vnitřním, které může skončit až úmrtím pacienta [1]. Kromě shora uvedených komplikací dochází k radiační

endotoxikóze, astenii, kachexii, autoimunitním poruchám, radiační alopecii a encefalopatii. Hlavní příčinou úmrtí pacientů v této fázi bývá silné infekční onemocnění nebo vnitřní krvácení, v opačném případě dochází k regeneračním procesům, k obnově krevních buněk a ústupu manifestní fáze [1].

**Fáze rekonvalescence** je charakteristická úplným nebo částečným zlepšením zdravotního stavu. Dochází k obnově normálního stavu gastrointestinálního traktu, vrací se chuť k jídlu a teplota těla dosahuje normálních hodnot. Zvyšuje se tělesná hmotnost a ztrácí se náchylnost ke krvácení, dále dochází k obnově hematopoézy v periferní krvi. K úplné obnově biochemických hodnot krve dojde po 8 až 10 měsících po ozáření, z toho průměrná doba rekonvalescence trvá 3–6 měsíců. Navíc příznaky anemie přetrvávají u pacientů 5–6 měsíců. I přes fakt, že pacient prošel úplnou rekonvalescencí, mohou se objevovat pozdní účinky ozáření, které se neprojeví během manifestní fáze. Mezi takovéto pozdní následky patří např. šedý zákal, sklerotické změny, dystrofické procesy, onkologická onemocnění či zkrácení doby života [1].

### **Střevní forma akutní nemoci z ozáření**

Při dávkách vyšších než 10 Gy dochází ke vzniku střevní formy akutní nemoci z ozáření. Záření zde způsobí poškození sliznic tenkého střeva. Můžeme zde sledovat přechody fází stejně jako u dřeňové formy ANO. Prodromální fáze je provázena nauzeou (výskyt je četný a úporný), zvracením a pocitů celkové slabosti. Již z počátku je možné pozorovat projevy poškozených střev projevujících se silnými bolestmi břicha, nezkrotným průjmem, objevují se parézy žaludku nebo střev. Dále dochází ke snižování arteriálního tlaku, který může skončit až kolapsem. Zvyšuje se teplota těla až do febrilních hodnot. Tuto fázi také provázejí bolesti hlavy, kloubů a svalů. Tato fáze trvá 2–3 dny, v některých případech i déle. Po této fázi přichází krátkodobé zlepšení stavu, trvající do dvou dnů (latentní fáze). Nedojde,

ale zcela k vymezení příznaků onemocnění. Ve fázi manifestní dochází k převratnému zhoršení stavu. Teplota těla se pohybuje v hodnotách 39–40 °C, vrací se průjmy a ztrácí se chuť k jídlu. Z důvodu atonie žaludku se zhoršuje trávení a následně i resorpce živin ve střevech a nastává překotné snížení váhy. U pacientů dochází k úbytku leukocytů v periferní krvi, jsou dehydrovaní a trpí orofaryngeálním syndromem. Stav dále zhoršují střevní hemoragie a infekce. S poskytnutím specializované péče pacienti přežívají 14–18 dní. Ke smrti dochází z důvodu enteritidy, parézy a neprůchodnosti střev, poruch homeostázy, kardiovaskulárního selhání. V konečné fázi předchází ještě sopor a kóma [1].

### **Toxemická forma akutní nemoci z ozáření**

Toxemická forma se projevuje od expozice dávkami mezi 20–50 Gy. Příznaky této formy ANO jsou těžké hemodynamické poruchy, v některých pramenech bývá též označovaná jako cévní nebo kardiovaskulární forma akutní nemoci z ozáření. U této formy se vyskytují paréza zvýšená propustnost cév a následky celkové intoxikace způsobené rozkladem tkání. Toxemie se projevuje poruchami krevního oběhu mozku a jeho následným otokem. V důsledku poškozené hematoencefalické bariéry dochází k průniku tekutiny do mezibuněčných prostor a ta následně utlačuje nervové buňky. U pacientů se nasazuje pouze symptomatická léčba zaměřená na eliminaci algického syndromu a nápravy homeostatické disbalance. I přes nasazenou léčbu k úmrtí dochází mezi 4–7 dnem po ozáření následkem otoku mozku [1].

### **Cerebrální forma akutní nemoci z ozáření**

K cerebrálnímu poškození dochází při celotělovém ozáření dávkami vyššími než 50 Gy. Takto vysoká dávka způsobí přímé poškození nervových buněk a cév včetně likvordynamiky mozku. Dochází k poškození bioenergetických procesů a buněčných membrán. Všechna tato poškození dostávají pacienta

do těžkého stavu, který se projevuje úporným zvracením, průjmami, únavou a občasnou ztrátou vědomí v trvání 20–40 minut. Vědomí se může vrátit k normálnímu stavu, dochází ale k otoku mozku, a dále se vyskytují příznaky, jako jsou např. psychomotorický neklid, ataxie, dezorientace, hyperkineze. Dochází ke klonickým a tonickým křečím, poruchám dýchání, tonusu cév a kómatu. Ozáření způsobí paralýzu dechového centra a smrt nastává obvykle do 48 hodin [1].

### **3.4.3 Radiační poškození kůže**

Radiační poškození kůže se vyznačuje pozdním nástupem erytému v řádu hodin maximálně 2–3 dny po obdržení prahové dávky 3 Gy. Toto poškození má časné a pozdní projevy, radiační poškození kůže můžeme přirovnat k následkům po popálení, velmi často toto poškození zasahuje i hlubší vrstvy kůže případně svaly a cévy. Časné projevy radiační dermatitidy se týkají hlavně pokožky, vyznačují se prvotním erytémem. Po odeznění latentní fáze se objevuje suchá kůže, vlhká dermatitida, jizvení a nekróza. Vznik všech těchto projevů je samozřejmě odvislý od velikosti obdržené dávky.

Pozdní projevy zasahují škáru a podkožní vazivo a vyvíjejí se několik měsíců po ozáření. Mezi typické příznaky patří dermatofibroza, jizvení a nekróza kůže, známky atrofické a hypertrofické dermatitidy [1].

## **3.5 Principy radiační ochrany**

Hlavním cílem radiační ochrany je u zdůvodněných a optimalizovaných činností zabránit vzniku deterministických účinků a minimalizovat vznik stochastických účinků na úroveň přijatelnou pro jedince i společnost. Základním právním předpisem v oblasti radiační ochrany je zákon 263/2016 Sb., (atomový zákon) [10]. Jako hlavní garant pro kontrolu dodržování pravidel



radiační ochrany v České republice je Státní úřad pro jadernou bezpečnost. V radiační ochraně jsou uplatňovány čtyři hlavní principy.

### **Princip zdůvodnění**

*Každý, kdo využívá jadernou energii, nakládá s jadernou položkou nebo vykonává činnosti v rámci expozičních situací, je povinen provést vyhodnocení záměru vykonávat činnost a jejich očekávaných výsledků z hlediska přínosu pro společnost a jednotlivce. V rámci odůvodnění vzít v úvahu také postupy nevyužívající jadernou energii a ionizující záření, kterými lze dosáhnout srovnatelného výsledku.*

*Za odůvodněnou činnost se považuje pouze vykonávání činnosti, jejíž přínos pro společnost a jednotlivce převažuje nad rizikem, které při této činnosti nebo v jejím důsledku vzniká [11].*

### **Princip optimalizace ochrany před zářením**

*Každý, kdo využívá jadernou energii nebo vykonává činnosti v rámci expozičních situací, je povinen postupovat tak, aby riziko ohrožení fyzické osoby a životního prostředí bylo tak nízké, jakého lze rozumně dosáhnout při zohlednění současné úrovně vědy a techniky a všech hospodářských a společenských hledisek.*

*Optimalizace radiační ochrany je iterativní proces (opakovaný proces), který slouží k dosažení a udržení takové úrovně radiační ochrany, aby ozáření fyzické osoby a životního prostředí bylo tak nízké, jakého lze rozumně dosáhnout při uvážení všech hospodářských a společenských hledisek [11].*

### **Dávkové limity**

*Každý, kdo vykonává činnost v rámci plánované expoziční situace, je povinen omezit ozáření fyzické osoby tak, aby celkové ozáření způsobené kombinací ozáření z těchto činností bylo odůvodněné, optimalizované a nepřekračovalo v součtu limity ozáření [11].*

## Bezpečnost zdrojů

Spočívá v zabezpečení radionuklidového zdroje, tak aby byl chráněný před nepovoleným přístupem nebo použitím. Dále v provádění náležitého poučení pracovníků o jeho zabezpečení a realizaci ověřování znalostí. V kontrole zaměřené na prověření provozní stálosti a dlouhodobé stability zdroje. K udržování této stability se dosahuje sledováním, měřením a ověřováním o kterém se vedou záznamy [11].

### 3.6 Radiační mimořádné události

Definici radiační mimořádné události nalezneme v zákoně č. 263/2016 Sb., (atomový zákon), § 4. Radiační mimořádná událost je taková událost, „*kteřá vede nebo může vést k překročení limitu ozáření a vyžaduje opatření, která by zabránila jejich překročení nebo zhoršování situace z pohledu zajištění radiační ochrany*“. Rozlišujeme tři stupně radiační mimořádné události [10].

*Radiační mimořádná událost prvního stupně je zvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníky vykonávajícími práci v aktuální směně, při které radiační mimořádná událost vznikla* [10].

*Radiační nehoda je radiační mimořádná událost nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníky vykonávajícími práci v aktuální směně, při které radiační mimořádná událost vznikla nebo vznikla v důsledku nálezů, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje. Nevyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo* [10].

*Radiační havárie je radiační mimořádná událost nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníky vykonávajícími práci v aktuální směně, při které radiační mimořádná událost vznikla nebo vznikla v důsledku nálezů, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje a vyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo* [10].

Atomový zákon zavádí také termín „**Radiologická událost**“, kdy se jedná o událost při lékařském ozáření, které způsobí chybné ozáření pacienta [10].

Mimo atomového zákona se legislativně zabývá radiačními mimořádnými událostmi ještě vyhláška č. 359/2016 Sb., o podrobnostech zvládnutí radiačních mimořádných událostí a vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidových zdrojů.

### **3.6.1 Vybrané radiační mimořádné události**

Obecně k radiačním mimořádným událostem dochází z několika důvodů. Jedním z těchto důvodů je špatné zabezpečení zdroje ionizujícího záření, k dalším důvodům patří nedbalost nebo technická závada. U některých nehod se můžeme setkat i s neznalostí rizika a nebezpečí, případně s náhodnou expozicí [9].

K nehodám v průmyslu dochází většinou při ztrátě zdroje z důvodu mechanické závady, případně neodborné obsluhy či nedbalosti. Naproti tomu nehody ve zdravotnictví se týkají nejčastěji přezáření nebo podzáření pacienta, případně náhodné expozice obsluhy provádějící údržbu. Došlo i k několika nehodám způsobeným softwarovou chybou terapeutických zařízení [12].

Jednou z velkých nevýhod radiačních událostí je faktor času a skutečnost, že pokud nedojde k nehodě přímo ve zdravotnickém zařízení, jsou příznaky nemoci z ozáření a zdravotní obtíže přikládány jiným nemocem. Léčba je pak často zahájena s velkým zpožděním [9].

### 3.6.2 Nehody v průmyslu

#### Los Alamos (USA)

Tato nehoda se stala 30. prosince 1958, když zkušený chemický operátor Cecil Kelly pracoval na zařízení na čištění plutonia. Ve velké nádrži, kde se sloučeniny plutonia čistily a koncentrovaly rozpuštěním v chemickém roztoku, byla běžná koncentrace 0,1 gramu na litr, toho dne však byla koncentrace stokrát vyšší. Celkové množství plutonia v horních vrstvách roztoku bylo přibližně 3,3 kilogramu.

To je množství velice blízké kritické úrovni pro spuštění řetězové reakce. Po spuštění míchadla se v nádobě vytvořil výr a začala se zvyšovat koncentrace plutonia až ke kritickému množství. V pulzu, který nebyl delší než 200 mikrosekund, se uvolnil proud neutronů a gama záření. Kelly stál v té době na žebříku a díval se kontrolním okénkem do nádrže. Nádobu se otřásla a Kelly byl svržen na zem, v důsledku šoku vypnul a znovu zapnul míchadlo, přičemž opustil budovu. Další dva operátoři viděli jasný záblesk světla doprovázený tlumeným otřesem. Kellyho našli zmateného a křičícího „hořím“. V domnění, že došlo k chemické nehodě, vzali ho nejprve do sprchy. Na místo nehody dorazili pracovníci radiační kontroly a sestra. Kelly byl v šoku a prakticky v bezvědomí, už v té době měl růžovou kůži od radiačního popálení. Po převezení do nemocnice byl Kelly nejdříve zkontrolován na kontaminaci plutoniem, výsledek byl však negativní. V ten okamžik bylo hned jasné, co se vlastně stalo. Kelly se dostal do nemocnice už ve velice špatném stavu, trpěl poruchami vědomí, hyperventiloval a měl nízký krevní tlak, dále nepřetržitě zvracel. Jeho kůže měla červenofialovou barvu a měl modré rty. Tělo se mu nekontrolovaně třásl. V krvi, která mu byla odebrána 6 hodin po nehodě, se ukázalo totální vyčerpání bílých krvinek. Ještě horší byl výsledek

odběru kostní dřeně, jeho dřeň byla vodnatá s oteklými buňkami a postrádající normální funkčnost. Kelly zemřel 35 hodin po nehodě [3].

### **Brescii (Itálie)**

Dne 13. května 1975 v zařízení na ozařování obilovin došlo k ozáření pracovníka zdrojem  $^{60}\text{Co}$  o aktivitě 500 TBq, když se snažil dostat do ozařovny po pásu dopravníku. Příznaky, které se u něj projevíly (nevolnost, zvracení, bolest hlavy a erytém), byly přičítány vystavení účinkům pesticidů. Pracovník zemřel 13 dní po expozici. Jeho celotělová dávka byla určena na 12 Gy [12, 13].

### **Kramatorsk (Ukrajina)**

K této nehodě došlo ve městě Kramatorsk na Ukrajině. První impulz k nehodě se objevil již v 70. letech 20. století, kdy se v lomu Karanský ztratil zářič  $^{137}\text{Cs}$ , který byl součástí měřiče úrovně radiace. Zářič byl z lomu odvezen pravděpodobně se štěrkem, ze kterého byly později udělány panely na stavbu domu v Kramatorsku.

Dům byl postaven v roce 1980 a mezi lety 1980–1989 bydlely v bytě číslo 85 dvě rodiny. U první rodiny se u všech členů začaly objevovat zvláštní zdravotní problémy a později všichni z rodiny zemřeli na leukémii. Po nastěhování druhé rodiny se u nejstaršího syna začaly objevovat zdravotní problémy a roku 1987 za záhadných okolností zemřel. Jeho otec se snažil přijít na příčinu synova úmrtí a padlo podezření na radiaci. Celý byt této rodiny byl následně proměřen a nejvyšší úrovně radiace dosahovala stěna v dětském pokoji. Část stěny byla odstraněna a převezena na prozkoumání do ústavu pro jaderný výzkum, kde byla objevena kapsle se zářičem. Dávkový příkon ve stěně činil 18 Gy za rok [3].

### **San Salvador (Salvador)**

K vážné radiační nehodě došlo na průmyslovém ozařovači, který sloužil hlavně ke sterilizaci lékařských prostředků. V ozařovači byl použit  $^{60}\text{Co}$  o aktivitě 660 TBq. Ozařovač byl již starý a nebyly na něm prováděny revize ani opravy. Obsluha byla již navyklá na poruchový provoz a proto dne 5. února 1989, kdy došlo k zaseknutí zářiče v ozařovací poloze, a přístroj hlásil poruchu, nebyli pracovníci obsluhy nijak překvapeni. Obsluha odpojila ručně signalizační zařízení a pokusila se hlavicí s ozařovačem vrátit do správné polohy taktéž ručně. Při této činnosti obdrželi tři pracovníci lokální dávky na končetiny až 30 Gy. Po nehodě nebyla provedena kontrola ani revize přístroje a pokračovalo se v běžném ozařování. Šestý den po nehodě byl naměřen vyšší dávkový příkon v ozařovně. Na základě toho bylo provedeno šetření, které zjistilo uvolnění některých zářičů z ozařovací hlavy. Dále byl nalezen jeden zářič přímo v ozařovně a několik se jich našlo ve vodním bazénu, kam byly ukládány v době, kdy se neozařovalo. I přes veškerou péči jeden z pracovníků zemřel a dvěma musely být amputovány části končetin [1, 14].

### **Forbach (Francie)**

Dne 13. srpna 1991 došlo u tří pracovníků, kteří pracovali na opravě lineárního urychlovače k expozici záření. V době, kdy pracovníci prováděli opravu, byl vypnut pouze zdroj elektronů, napětí v urychlovači bylo ale stále spuštěné z důvodu úspory času. Zbytkový dávkový příkon byl v té době několik Gy za sekundu. Po objevení prvních příznaků popálení kůže byla příčina diagnostikována jako spálení od slunce. Až do hospitalizace, kdy došlo k vážnému zhoršení zdravotního stavu, nebyly příznaky nijak spojovány s touto expozicí. U nejhůře postiženého pracovníka byly provedeny opakované transplantace kožních štěpů Jeho zdravotní stav byl ale stále neuspokojivý, zemřel v roce 2007, celých 16 let po nehodě na hemoragický syndrom trávicího traktu. Příčná souvislost s touto nehodou je však stále otázkou. Výsledkem této

nehody bylo jedno úmrtí a dvě expozice záření odhadnutým na dávku 4 Gy [12, 13].

### **Nesviž (Bělorusko)**

Při opravách na přístroji, který sloužil ke sterilizaci lékařského vybavení, došlo k nehodě dne 26. října 1991. Z důvodu zaseknutí zdroje  $^{60}\text{Co}$  o aktivitě 28 PBq v dopravníku, vstoupil pracovník do ozařovny, aby tuto závadu odstranil. Obešel bezpečnostní systém a přístroj byl v té chvíli stále v chodu. V době expozice se pracovník nacházel asi 0,5 metru od zdroje. Svou chybu si uvědomil a z ozařovny odešel. Dávka, kterou obdržel, je odhadována na 12 až 16 Gy. I přes rozsáhlou lékařskou péči zemřel po 113 dnech na respirační komplikace [12, 13, 15].

### **Hanoj (Vietnam)**

Na fyzikálním institutu ve Vietnamu v roce 1992 si jeden vědecký pracovník přexponoval obě ruce při vkládání vzorků do lineárního urychlovače. Přestože, si byl vědom této náhodné expozice a nehodu nahlásil, jeho popáleniny byly spojeny s touto událostí až o dva týdny později, to už ale jeho stav byl vážný. Po čtyřech měsících byl převezen do Francie, kde v důsledku radiačního poškození bylo rozhodnuto o úplné amputaci pravé ruky a částečné amputaci ruky levé. Odhadované dávky na zápěstí a prsty se pohybují mezi 30–45 Gy [12, 16].

### **Gilian (Irán)**

Tato nehoda se stala v roce 1996 v Iránu. Během defektoskopické kontroly sváru potrubí na tepelné elektrárně, došlo z důvodu poruchy zámku k uvolnění zářiče  $^{192}\text{Ir}$  (aktivita 185 GBq) z vodící trubice a pádu zářiče do prostoru pod potrubím. Dělník, který dovážel izolační materiál na potrubí, si všiml lesklého předmětu pod potrubím. Předmět tedy zvedl a vložil do náprsní kapsy

své kombinézy. Nedlouho potom mu však zářič začal způsobovat nevolnost, závratě a zvracení. Vzhledem k tomu, že pracovník byl věřící člověk, považoval tyto projevy jako trest za krádež a zářič vrátil opět na místo, kde jej původně našel. V té době o ztrátě věděli již i pracovníci, kteří prováděli kontrolu potrubí. Zdroj byl nalezen a znovu zajištěn. Postižený pracovník byl po dvou dnech domácího léčení přijat do nemocnice v Teheránu a později převezen do Curie institutu v Paříži, kde podstoupil speciální léčbu. Dávky, které obdržel, byly později odhadnuty na 40 Gy v místě kontaktu se zářičem a celotělová dávka byla v rozsahu od 0,8 do 3,3 Gy. Nepřesnost tohoto odhadu spočívá ve skutečnosti, že se jednalo o parciální a silně heterogenní ozáření [9, 17].

### **Los Barrios (Španělsko)**

V květnu 1998 v továrně firmy Acerinox při přepracování starého železa došlo k roztavení zářiče  $^{137}\text{Cs}$ , který nebyl zachycen při kontrole monitorovacím zařízením. Po jeho roztavení se uvolnil do ovzduší radioaktivní mrak. Toto zvýšení radioaktivity nebylo v továrně nijak detekováno, k zachycení došlo až monitorovacími sítěmi Francie, Itálie, Švýcarska, Německa a Rakouska. Úroveň radiace dosahovala 1000krát vyšších hodnot oproti normálnímu stavu a to i v České republice. Následkem nehody bylo zamoření přepracovatelské továrny a dvou oceláren, kam byla tavenina následně odeslána. Při nehodě bylo šest pracovníků vystaveno nízké dávce radiace. Na základě laboratorních testů byla stanovena aktivita vyprodukovaného popela na hodnotu 640–1420 Bq/g. Pro srovnání norma Euroatomu určuje hodnotu 10 Bq/g, kdy se již jedná o množství ohrožující obyvatelstvo. Náklady na likvidaci této nehody, zahrnující dekontaminaci, uložení radioaktivního odpadu a ušlé zisky, byly vyčísleny na 26 mil. dolarů. Největší položku této částky tvořily hlavně ušlé zisky [1].



### **Yanango (Peru)**

Tato nehoda se stala v únoru 1999 v Yanangu v Peru při práci na opravě potrubí v hydroelektrárně. Hlavní příčinou této nehody byl zvýšený tlak majitele elektrárny na co nejrychlejší provedení prací a znovu uvedení elektrárny do provozu. Dále pak hrubé porušení bezpečnostních předpisů pracovníky firmy, která prováděla kontrolu svárů na potrubí. Po ukončení kontroly pracovníci nezkontrolovali, zda je zářič  $^{192}\text{Ir}$  (7,4 TBq) bezpečně ukryt a ten vypadl z defektoskopu. Zářič později našel svářeč, který si ho vložil do kapsy kalhot. Po 20 hodinách se podařilo zdroj najít a svářeč byl přijat do nemocnice. Odhadnutá dávka lokálního ozáření byla 100 Gy, dávka celotělová 1,2–1,5 Gy. Vzhledem k vysoké dávce lokálního ozáření mu musela být amputována dolní končetina [1, 18].

### **Mit-Halfa (Egypt)**

Na konci dubna 2000 došlo ke ztrátě čtyř zdrojů  $^{192}\text{Ir}$ , které byly součástí přístroje na kontrolu svárových spojů. Zaměstnanec, který ztrátu způsobil, se nejprve snažil zdroje najít, to se mu však nepodařilo. Ztrátu zdrojů ale nikam nenahlásil. Dne 5. května našel náhodně tyto zdroje Hasan Fadl a odnesl si je sebou domů do vesnice Mit-Halfa. V době, kdy Fadl donesl zdroje domů, měly aktivitu 1,17 TBq. K objevení zdrojů došlo až 26. června. Mezitím 5. června zemřel Fadlův devítiletý syn na nemoc z ozáření. Fadl zemřel 11 dní po něm. Manželka a další čtyři děti byly hospitalizovány v nemocnici s podobnými příznaky jako oba zemřelí. Na základě těchto skutečností se spustilo vyšetřování a zdroje byly nalezeny ve Fadlově domě. Odhadované dávky byly určeny u syna na 7,5 Gy a u otce na 5,5 Gy. Ostatní členové rodiny obdrželi dávky od 3 do 4 Gy. Asi 200 sousedů a rodinných přátel obdrželo dávky od 0,025 do 0,15 Gy [25].

### **Cochabamba (Bolívie)**

V roce 2002 v Cochabamba (Bolívie) po kontrole svárů plynového potrubí nebyl pracovníky provádějící firmy řádně zkontrolován zářič  $^{192}\text{Ir}$  (0,67 TBq), který zůstal ve vodící trubce. Pracovníci defektoskop s tímto zářičem převáželi 8 hodin v kufru běžného linkového autobusu, tam také zůstal i přes noc. Ráno byl převezen taxíkem zpět do firmy. Zde při jeho kontrole zjistili, že zdroj nebyl bezpečně ukryt v defektoskopu. Na základě dozimetrických rekonstrukcí byly dávky pro pracovníky firmy odhadnuty na méně než 200 mSv. Dávky obdržené cestujícími byly stanoveny na 50–190 mSv podle toho, kde seděli v autobuse [1, 19].

### **Nueva Aldea (Chile)**

Při kontrole potrubí v továrně na celulózu dne 14. prosince 2005 došlo k vypadnutí zdroje  $^{192}\text{Ir}$  z vodící trubice defektoskopu na plošinu lešení. Následující den po této události našel dělník na lešení předmět ve tvaru tužky. Společně s dalšími dvěma pracovníky, se snažili předmět identifikovat, to se jim však nepodařilo. Domluvili se tedy, že předmět odnesou do kanceláře vedoucího pracovníka, tam už zářič spustil radiační alarm na dozimetrickém přístroji. Všichni tři pracovníci utrpěli vážné radiační popáleniny kůže na místech kontaktu se zdrojem. U nálezce zdroje došly radiační popáleniny až do stádia nekrózy [20, 26].

### **Flerus (Belgie)**

V zařízení na ozařování zdravotnického materiálu došlo dne 11. března 2006 k náhodné expozici technika. Technik vstoupil do ozařovny z důvodu spuštění alarmu, který indikoval spuštění ozařovacího cyklu i přes skutečnost, že přístroj nebyl v provozu. Všiml si také otevřených dveří, zkontroloval tedy dle předpisů, že se v ozařovně nikdo nenachází a dveře zavřel. Po dobu 20 sekund, co se nacházel v ozařovně, byl exponován zářičem  $^{60}\text{Co}$  o aktivitě

30 PBq. Po objevení prvních příznaků, byly tyto přikládány alkoholovému večírku z předchozího dne. Po třech týdnech mu začaly vypadávat vlasy, a proto se rozhodl jít k lékaři. Ten již určil, že se jedná o nemoc z ozáření, a technik byl převezen do nemocnice ve Francii. Dávka, kterou obdržel, byla odhadována na více než 4 Gy. Projevila se hluboká aplazie a pacient byl léčen hematopoetickými růstovými faktory. Léčba byla úspěšná, jako primární příčina této nehody bylo určeno selhání hydraulického systému, který má za úkol zvedání a spouštění zdrojů do bezpečné a ozařovací polohy [12, 13].

### **Chilca (Peru)**

V roce 2012 došlo u tří pracovníků, kteří pracovali s defektoskopickým přístrojem, ve kterém byl zářič  $^{192}\text{Ir}$  o aktivitě 3,65 TBq, k vysokému ozáření prstů na ruku. K nehodě došlo v důsledku špatné kontroly přístroje, kdy se zářič nezasouval zpět do ochranného krytu. Tuto skutečnost odhalili pracovníci až na konci pracovní směny. Dávky na prsty mnohdy překročily hodnotu 50 Gy, což způsobilo radiační poškození až do stádia nekrózy a některé prsty musely být pracovníkům díky tomu amputovány [21, 26].

### **3.6.3 Nehody ve zdravotnictví**

#### **Colombus (USA)**

V průběhu let 1974–1976 bylo díky špatné kalibraci zářiče  $^{60}\text{Co}$  přezářeno 426 pacientů dávkami, které byly o 15–45 % vyšší, v závislosti na době, po kterou byli léčeni. U 183 pacientů, kteří ještě rok po léčbě žili, se objevilo poškození centrálního nervového systému a gastrointestinálního traktu [12].

### **Saintes (Francie)**

V roce 1981 došlo u tří operátorů při vkládání zdroje do nového radioterapeutického zařízení k nehodě se zdrojem  $^{60}\text{Co}$  o aktivitě 137 TBq. Při výměně zdroje došlo k jeho pádu na zem. Operátor, který měl 25 let praxe, zvedl zdroj rukou a umístil ho do bezpečné polohy. I další z operátorů obdržel vysoké dávky záření na obě ruce. Díky vysokým dávkám musely být dvěma operátorům amputovány obě ruce a třetímu operátorovi byly amputovány 3 prsty na pravé ruce [12, 13].

### **Kjeller (Norsko)**

Nehoda z roku 1982 se odehrála v norském Kjelleru. Zkušený pracovník vstoupil do ozařovací místnosti v době, kdy byl zdroj  $^{60}\text{Co}$  o aktivitě 2,4 PBq v ozařovací poloze. Odhadovaná dávka celotělového ozáření i přes skutečnost, že byla distribuována heterogenně, činila asi 20 Gy. Pracovník zemřel 13 dní po expozici na selhání ledvin a aplazii [12].

### **Goiânia (Brazílie)**

Nehoda v Goiânii (Brazílie) z roku 1987 se liší od ostatních nehod tím, že k ní nedošlo v souvislosti s provozem, ale jednalo se o opuštěný zdroj. V roce 1985 se soukromý radioterapeutický ústav přestěhoval ze staré budovy do nových prostor, ve staré budově bylo ponecháno teleterapeutické zařízení se zářičem  $^{137}\text{Cs}$  (práškový chlorid cesia) o aktivitě 50,9 TBq. Tuto skutečnost nebyla nahlášena a stará budova byla částečně zdemolována. V roce 1987 vnikly za účelem získání železného šrotu do objektu dvě osoby. Nalezly opuštěný přístroj a sejmuly z hlavice kryt včetně zdrojů cesia. Tento kryt poté odnesly domů a pokusily se ho rozebrat. Během této činnosti se jim podařilo porušit pouzdro zářiče. Několik úlomků zářiče o velikosti rýžových zrn si zloději ponechali fascinováni vyzařováním barevného světla zářiče a odnesli je domů. Rozbitý kryt byl prodán do šrotu. Pátý den potom, co se části zářiče

dostaly do několika rodin, se v těchto rodinách objevily zažívací potíže. Vzniklo podezření na souvislost s úlomkou zdroje a vzorky byly předány městské hygienické službě, která toto podezření potvrdila, a bylo zahájeno vyšetřování. Zpoždění, se kterým byl případ odhalen, způsobilo mimořádné škody. Následkem této nehody zemřeli čtyři lidé, u kterých byla odhadnuta dávka ozáření mezi 4,5–6 Gy. Dále bylo 249 lidí kontaminováno a 112 000 jich muselo být monitorováno. Z důvodu zamoření bylo letecky monitorováno 67 km<sup>2</sup>. U 159 domů v okolí nehody musela být provedena dozimetrická kontrola, 42 z nich bylo dekontaminováno a šest jich muselo být dokonce zbouráno. K uložení 35 000 m<sup>3</sup> kontaminovaného odpadu musel být vybudován speciální sklad k dlouhodobému uložení [1, 9].

## **USA**

Mezi lety 1987–1988 došlo k přezáření pacientů s rakovinou mozku. Příčinou nehody bylo neprovedení aktualizace řídicího softwaru po výměně zářiče <sup>60</sup>Co. V systému byla zavedená část softwaru, která se již nepoužívala pro novou jednotku. V září 1987 byl systém restartován a následkem toho se spustil i již nepoužívaný software. V důsledku této chyby bylo přezářeno 33 pacientů dávkami o 75 % vyššími. Během léčby nebo po jejím ukončení zemřelo 20 pacientů [12].

## **Soreq (Izrael)**

Nehoda z roku 1990 se odehrála tak, že pracovník vstoupil do ozařovací místnosti i přes protichůdnou výstrahu systému varování. Byl vystaven účinkům zdroje <sup>60</sup>Co o aktivitě 12,6 PBq a tím obdržel dávku v rozmezí 10 až 20 Gy. Přes veškerou lékařskou péči zemřel 36 dní po nehodě [12, 22].

### **Zaragoza (Španělsko)**

V roce 1990 došlo k přezáření 22 pacientů. Příčinou byla nesprávně odstraněná porucha, která následně způsobila změnu energie elektronů. Díky této skutečnosti byli pacienti po dobu 10 dnů ozařováni dávkami třikrát až sedmkrát vyššími. Předpokládá se, že tato nehoda si vyžádala 13 obětí [12].

### **Indiana (USA)**

V roce 1992 se u 82leté pacientky při brachyterapii, náhodně uvolnil zdroj  $^{192}\text{Ir}$  a zůstal v pacientce. Pacientka byla následně převezena zpět do pečovatelského domu a tam po čtyřech dnech zemřela. Kátér, který obsahoval ztracený zdroj, pečovatelka vyhodila jako lékařský odpad. Při jeho přepravě bylo exponováno nízkými dávkami přibližně 94 osob. Zdroj byl nalezen při náhodné kontrole ve firmě na likvidaci odpadu [12, 13].

### **San José (Costa Rica)**

Nehoda se udála v roce 1996 v nemocnici v San José (Costa Rica). Příčinou nehody bylo špatné stanovení dávkových příkonů pro pacienty při plánovaném ozařování. Po výměně zářiče  $^{60}\text{Co}$ , bylo během 9 měsíců přezářeno dávkami o 50–60 % vyššími 115 pacientů. V průběhu těchto 9 měsíců zemřelo 49 pacientů, z toho 17 pacientů prokazatelně na přezáření [1, 23].

### **Panama City (Panama)**

V roce 2000 v důsledku špatně nastavených stínících bloků na ozařovači a následné chybné konfiguraci softwaru plánovacího systému, došlo k chybnému výpočtu ozařovacích dávek a ozařovacích časů. Následkem tohoto bylo chybně ozářeno 28 pacientů a 5 z nich zemřelo v důsledku přezáření [1].

### **Bialystok (Polsko)**

Tato nehoda se stala v Polskem Bialystoku v roce 2001 při výpadku proudu na lineárním urychlovači. V důsledku toho bylo automaticky přerušeno ozařování. Po znovu zprovoznění bylo ozařování u pacienta dokončeno. Dále byli ozařováni ještě další čtyři pacienti, u dvou z nich se ale po provedené terapii objevilo palčivé svědění. Na základě tohoto zjištění byla provedena dozimetrická kontrola podmínek ozařování a ta ukázala vyšší hodnoty, než byly původně plánovány. Výsledkem kontroly bylo zjištění, že v důsledku výpadku proudu byla poškozena jedna elektronická součástka a monitorovací systém tudíž nepracoval správně [1, 24].

### **Lyon (Francie)**

V Lyonu v roce 2004 došlo u pacienta, kterému byl léčen nezhoubný nádor, k ozáření větší části těla, než bylo plánováno. Příčinou této nehody bylo špatné nastavení ozařovací jednotky. Několik měsíců po léčbě se u pacienta objevily symptomy, které byly přikládány přecitlivělostí na záření. Zdravotní komplikace spojené s těmito symptomy se neustále zhoršovaly a pacient v roce 2006 zemřel [12, 13].

### **Epinal (Francie)**

V průběhu let 2004–2005 bylo 23 pacientů léčených na rakovinu prostaty ozářeno dávkou o 20 % vyšší, než byla plánována. Příčinou této nehody byl špatný výpočet, chybná programová ergonomie a nedostatečně proškolený personál. Komplikace způsobené touto terapií byly zdravotnickým zařízením uznány až jeden rok po provedené léčbě. Výsledkem této nehody bylo jedno úmrtí a 13ti pacientům byly způsobeny invalidní komplikace [12].

### **Dakar (Senegal)**

Příběh této nehody se začíná v Dakaru a pokračuje v Abidjanu na Pobřeží slonoviny. V roce 2006 při převozu zařízení do Abidjanu byli ozáření čtyři pracovníci z radiografického zařízení zdrojem  $^{192}\text{Ir}$  z důvodu nezasunutí zářiče do bezpečné stíněné polohy. Tyto pracovníci obdrželi vysoké dávky záření a byli proto převezeni do Francie. Jeden z pracovníků trpěl aplazií a ostatní měli lokální radiační poranění. Vyšetřováním bylo zjištěno, že záření bylo vystaveno pravděpodobně větší množství lidí. Předpokládalo se ale, že dávky nebyly natolik vysoké, aby způsobily akutní účinky [12, 13].

### **Rades (Tunis)**

Při údržbě gamagrafického zařízení 28. března 2008 ve městě Rades došlo k ozáření jednoho pracovníka zdrojem  $^{192}\text{Ir}$  o aktivitě 3 TBq. Při vyjímání zdroje si uložil pružnou část do kapsy, ta ale obsahovala stále i zdroj. O měsíc později vykazovaly jeho ruce značné radiační poškození dávkou přibližně 30 Gy a dávka celotělová je odhadována na 2 Gy. Z tohoto důvodu byl převezen do Francie ke specializovanému ošetření [12, 13].



## 4 METODIKA

Pro zpracování teoretické části byly využity dostupné monografie, některé v českém jazyce a převážná část v jazyce anglickém. V práci jsou také využity materiály, které byly získány jako e-zdroje. Pro získávání těchto zdrojů byly využívány hlavně služby ústřední knihovny ČVUT a národní technické knihovny. Dále byly využívány materiály z internetu. Získávání relevantních materiálů bylo obtížné na vyhledávání a třídění.

K hodnocení příčin a následků radiačních mimořádných událostí bylo vybráno celkem 30 nehod. Hlavním kritériem pro výběr nehod bylo, zda se nehody staly ve zdravotnictví a v průmyslu. Nehody na jaderných zařízeních byly zcela vynechány, neboť nejsou předmětem této práce. Dalším kritériem bylo stanovení období, ve kterém se nehody staly. Pro hodnocení bylo vybráno období mezi roky 1950 až 2015. Dále již byly nehody vybírány náhodně, také s ohledem na dostupnost v literatuře, případně na internetu.

Jako podklad pro hodnocení byla využita literatura a zdroje z internetu většinou v anglickém jazyce. Literatury zabývající se touto tematikou v českém jazyce je velice málo, případně je již starší než deset let. Vybrané nehody byly hodnoceny komparační analýzou.

### 4.1 Komparační analýza

Komparační analýzu můžeme rozdělit do několika kroků. Hned zpočátku je třeba stanovit objekt komparace. Máme-li tento objekt stanovený, provedeme definování jednotlivých kroků. V prvním kroku je třeba stanovit, zda se budou komparovat jevy téže kategorie. Krok druhý je určený pro definici cíle, a dále pro určení shod a rozdílů mezi objekty komparace. Stanovením kritérií se chápe definování hledisek podle, kterých budeme děje a procesy srovnávat.

Obvyklým řešením je nalezení společných znaků, které vykazují nebanální charakter a slouží jako přínos pro vědecké poznání. Komparaci můžeme dělit na diachronní, která je vázaná na myšlenou časovou osu nebo synchronní, která je vázaná na konkrétní zpravidla krátký časový úsek. Diachronní komparace je obtížnější z důvodu, že pokrývá větší množství faktorů, které ovlivňují dějinnou dynamiku a je třeba je zvážit. Oproti tomu synchronní komparace je jednodušší, ale ponechává stranou řadu jevů, které je třeba posoudit, a představují specifikum komparační analýzy [27].

## **4.2 Stanovení kritérií a cílů hodnocení**

Pro hodnocení radiačních mimořádných událostí byla stanovena dvě základní kritéria k posouzení. Za první příčiny vzniku radiačních mimořádných událostí obecně a za druhé ve vztahu ke stanoveným hypotézám. Tedy selhání lidského faktoru a identifikace nejčastějšího zdroje ionizujícího záření. Cílem bylo potvrdit nebo vyvrátit hypotézy a provést komparaci příčin a důsledků radiačních mimořádných událostí.

Pro snadnější porovnání byla získaná data promítnuta do dvou přehledných tabulek a rozdělena na radiační mimořádné události v průmyslu a ve zdravotnictví. Do tabulek byl uveden rok a místo nehody, zdroj ionizujícího záření, příčina vzniku a následky nehody. Následné výstupy z tabulek týkající se příčin a důsledků nehod byly promítnuty do výsledných grafů. Poté byl ještě vypracován graf pro hodnocení zdrojů ionizujícího záření z pohledu výskytu. K potvrzení první hypotézy bylo nutné použít ještě jiný postup hodnocení. U nehod, kde byla zjištěna kombinace příčin, bylo provedeno posouzení vzniku, vlivem selhání lidského faktoru. Pro posouzení byla stanovena výzkumná otázka: „Bylo možné nehodě zásahem vlastníka zdroje, nebo obsluhy zabránit?“ Pokud byla odpověď ano, posuzovala se nehoda jako selhání lidského faktoru.

## 5 VÝSLEDKY

Na základě provedené analýzy byl vypracován souhrn radiačních mimořádných událostí v letech 1950–2015. Jednalo se o události, které se staly v průmyslu (viz tab. 4) a ve zdravotnictví (viz tab. 5).

Tabulka 4 - Nehody v průmyslu [1, 3, 12, 13, 18, 25, 26,]

Místo	Zdroj	Příčina	Následek
Los Alamos 1958	$^{239}\text{Pu}$	nadkritické množství	1 úmrtí
Brescii (Italie) 1975	$^{60}\text{Co}$	nezjištěna	1 úmrtí
Kramatorsk 1980-1989	$^{137}\text{Cs}$	ztráta ZIZ	4 úmrtí, zdravotní obtíže
San Salvador 1989	$^{192}\text{Ir}$	ekonom. důsledky, porušení bezpeč. opatření, technická závada	1 úmrtí, dva pracovníci zdravotní následky
Forbach (Francie) 1991	lineární urychlovač	porušení bezpeč. opatření	1 úmrtí (16 let po nehodě) 2 pracovníci zdrav. následky
Nesviž (Bělorusko) 1991	$^{60}\text{Co}$	porušení bezpeč. opatření, technická závada	1 úmrtí
Hanoj (Vietnam) 1992	lineární urychlovač	náhodná expozice, selhání lidského faktoru	zdravotní následky
Gilian 1996	$^{192}\text{Ir}$	ztráta ZIZ	zdravotní následky
Los Barrios (Španělsko) 1998	$^{137}\text{Cs}$	ztráta ZIZ, technická závada monitorovacího zařízení	6 pracovníků nízká dávka záření, zamoření slévárny a dvou oceláren, vysoké náklady na likvidaci
Yanango 1999	$^{192}\text{Ir}$	porušení bezpeč. předpisů, ztráta ZIZ	zdravotní následky
Mit-Halfa (Egypt) 2000	$^{192}\text{Ir}$	ztráta ZIZ	2 úmrtí, 5 členů rodiny nálezce zdravotní problémy, ozářeno cca 200 sousedů dávkami 0,025-0,15 Gy
Cochabamba 2002	$^{192}\text{Ir}$	porušení bezpeč. opatření	expozice pracovníků firmy méně než 200 mSv, cestujících v autobuse 50-190 mSv
Nueva Aldea (Chile) 2005	$^{192}\text{Ir}$	ztráta ZIZ	zdravotní následky 3 pracovníci, nálezce radiační popáleniny do stadia nekrózy
Flerus (Belgie), 2006	$^{60}\text{Co}$	náhodná expozice, technická závada	zdravotní následky, provedena úspěšná léčba
Chilca (Peru), 2012	$^{192}\text{Ir}$	porušení bezpeč. opatření	3 pracovníci zdravotní následky

Tabulka 5 - Nehody ve zdravotnictví [1, 3, 12, 13, 18, 25, 26,]

Místo	Zdroj	Příčina	Následek
Colombus (USA) 1974-1976	<sup>60</sup> Co	špatná kalibrace zářiče	přezářeno 426 pacientů, u přeživších 183 pacientů zdravotní následky
Saintes (Francie) 1981	<sup>60</sup> Co	selhání lidského faktoru	3 pracovníci zdravotní následky
Kjeller (Norsko) 1982	<sup>60</sup> Co	náhodná expozice	1 úmrtí
Goiânia 1987	<sup>137</sup> Cs	ztráta ZIZ, osiřelý zdroj	4 úmrtí, 249 lidí kontaminováno - 112 000 monitorováno, kontaminace 67 km <sup>2</sup> vysoké náklady na likvidaci
Soreq (Izrael) 1990	<sup>60</sup> Co	porušení bezpeč. předpisů	1 úmrtí
Zaragoza (Španělsko) 1990	nezjištěn	technická závada, nesprávná energie elektronů	přezáření 22 pacientů, z toho 13 úmrtí
USA 1987-1988	<sup>60</sup> Co	softwarová chyba	přezáření 33 pacientů, z toho 20 úmrtí
Indiana (USA) 1992	<sup>192</sup> Ir	ztráta ZIZ, po brychyterapii	1 úmrtí, 94 expozic nízkými dávkami
San José 1996	<sup>60</sup> Co	špatné stanovení dávkových příkonů	přezářeno 115, 49 zemřelo (17 prokazatelně na přezáření)
Panama City 2000	nezjištěn	technická závada, softwarová závada, chybný výpočet dávek a času	28 pacientů chybně ozářeno 5 z nich zemřelo
Bialystok 2001	lineární urychlovač	technická závada z důvodu výpadku proudu	2 pacienti zdravotní následky
Lyon (Francie) 2004	nezjištěn	špatné nastavení ozařovací jednotky	1 úmrtí
Epinal (Francie) 2004-2005	nezjištěn	špatný výpočet dávky, softwarová chyba, nedostatečně proškolený personál	přezáření 23 pacientů, 1 úmrtí, 13 zdravotních následků
Dakar 2006	<sup>192</sup> Ir	náhodná expozice v důsledku tech. závady	4 pracovníci vážné zdrav. následky, ozáření neznámého počtu osob nízkými dávkami
Tunis 2008	<sup>192</sup> Ir	selhání lidského faktoru	1 pracovník vážné zdravotní následky

Pro vyhodnocení příčin radiačních mimořádných událostí z pohledu výskytu v jednotlivých nehodách (viz tab. 4 a 5) byla získaná data převedena do výsledného grafu (viz graf 1). Data jsou členěna dle četnosti příčin v jednotlivých radiačních mimořádných událostech (dále RMU). V některých RMU došlo ke kombinaci příčin vzniku, proto výsledný součet příčin neodpovídá číslu 30 (počet hodnocených RMU).

Z grafu 1 vyplývá, že ve dvanácti případech, došlo k selhání lidského faktoru, v jedenácti případech k technické závadě. Za ztrátou zdroje ionizujícího záření stojí osm případů a sedm případů zavinilo porušení bezpečnostních opatření. Po čtyřech případech zavinil RMU špatný výpočet dávky a náhodná expozice. V jednom případě byla příčina nezjištěna a jedna příčina připadá na nadkritické množství.

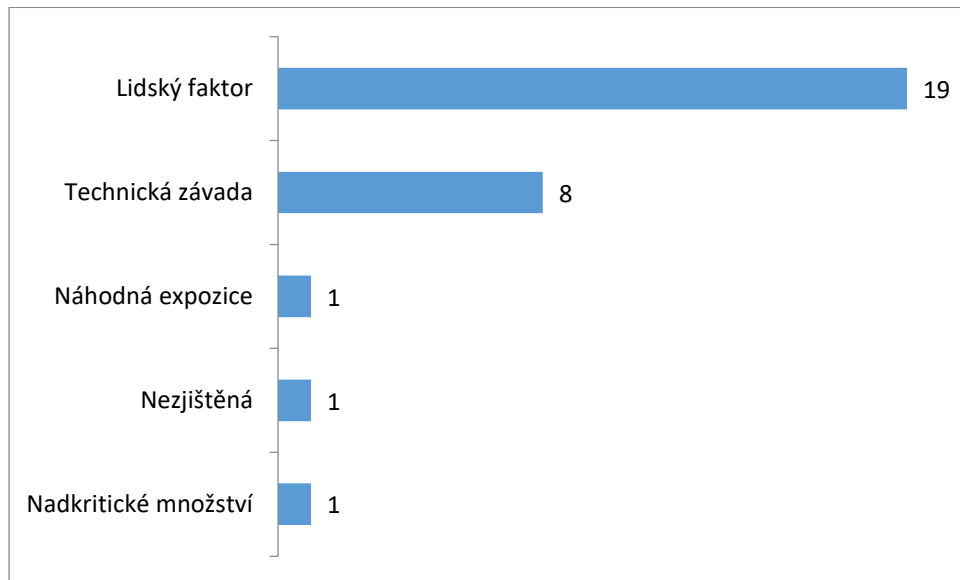
Graf 1 - Příčiny radiačních mimořádných událostí (vlastní zdroj)



Graf 2 zobrazuje výsledné hodnocení RMU z pohledu selhání lidského faktoru. V grafu jsou interpretovány hodnoty, které vznikly sloučením kombinovaných příčin a zároveň se mohou kvalifikovat jako selhání lidského faktoru. Pro tuto interpretaci byla stanovena jasná kritéria. Pod kategorií lidský faktor byly zařazeny všechny příčiny, které bylo možné ovlivnit (porušení bezpečnostních předpisů, špatný výpočet dávky, ...). Jako technické závady byly kvalifikovány

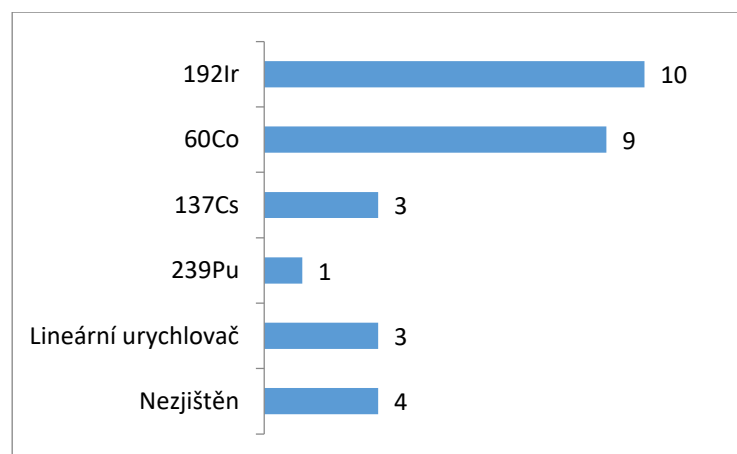
všechny příčiny technického směru bez zavinění obsluhy. Pro kategorii náhodná expozice, bylo stanoveno, že k ní došlo z náhodných příčin, které exponované osoby nemohly nijak ovlivnit.

Graf 2 – Příčiny RMU z důvodu selhání lidského faktoru (vlastní zdroj)



Posledním hodnocením, které bylo provedeno v rámci posouzení RMU z pohledu příčiny, bylo vyhodnocení vzniku RMU podle zdroje. Výsledky tohoto porovnání jsou v grafu 3.

Graf 3 - Vyhodnocení příčin z hlediska zdroje (vlastní zdroj)

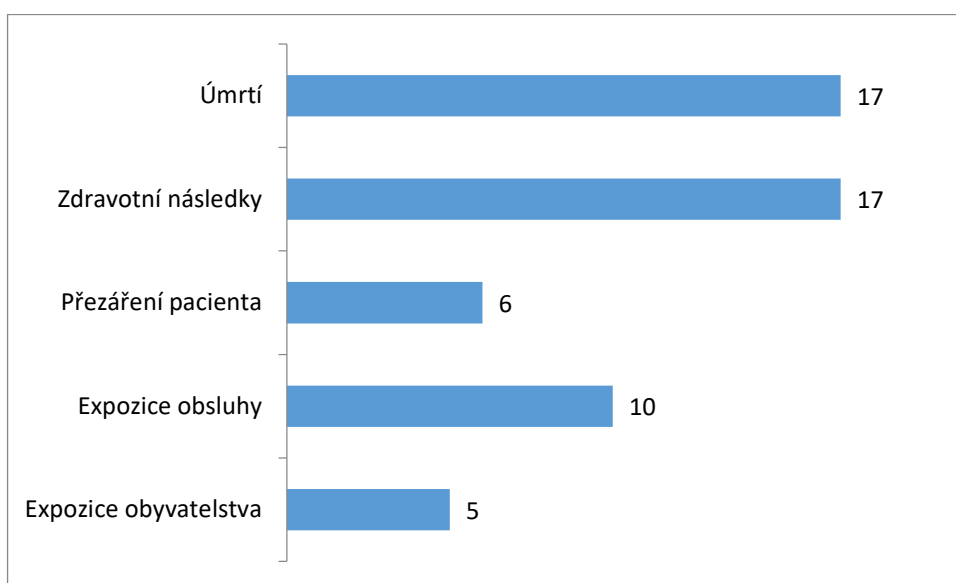


Porovnáním docházíme k výsledku, že nejčastějším zdrojem dle příčin je <sup>192</sup>Ir v deseti případech, na druhém místě je zdroj <sup>60</sup>Co a třetí místo připadá na <sup>137</sup>Cs.

Ve třech případech jsou příčiny RMU na straně lineárního urychlovače. Čtyři případy vychází pro nezjištěný zdroj. Jeden případ v hodnocených nehodách připadá na  $^{239}\text{Pu}$ .

V grafu 4 jsou shrnuty všechny důsledky RMU, jak vyplynulo z posouzení jednotlivých RMU. Hodnoty v grafu odpovídají frekvenci výskytů jednotlivých důsledků v posuzovaných RMU.

*Graf 4 - Důsledky radiačních mimořádných událostí (vlastní zdroj)*



Z výsledků v grafu 4 vyplývá následující, co se následků RMU týká, jsou úmrtí a zdravotní následky na stejné úrovni. Vysoká je i hodnota expozice obsluhy, přezáření pacienta a expozice obyvatelstva je na stejné úrovni.

## 6 DISKUZE

Práce se zabývala vytvořením historického přehledu radiačních mimořádných událostí a zkoumáním vlivů, které ovlivnily příčinu vzniku RMU. Byly hodnoceny důsledky, které tyto RMU měly, ať již na jednotlivce či skupiny osob. Radiační mimořádné události, nevznikají samy o sobě, v převážné většině z nich dochází ke kombinaci příčin vzniku RMU. Od technické poruchy, porušení bezpečnosti až po selhání lidského faktoru, výjimkou nejsou ani ekonomické faktory, případně pracovní podmínky. Důsledky RMU jsou spojeny se zdravotními následky, úmrtím, případně materiálními škodami.

V diplomové práci bylo hodnoceno 30 RMU. Tento počet byl vybrán za účelem snazšího hodnocení příčin a důsledků a je předpokladem k vytvoření uceleného výstupu, který neobsahuje extrémní hodnoty a velký objem dat. Objemné soubory dat se díky nesourodosti špatně třídí a vyhodnocují. Pro porovnávání takto rozsáhlých souborů je pak vhodnější např. multikriteriální analýza.

Tato práce neposkytuje vyčerpávající přehled radiačních mimořádných událostí. To ostatně nebylo ani jejím cílem z důvodu, že na počátku práce nebylo zcela jasné, k jakému množství RMU bude možné získat informace a posoudit je. V případě rozsáhlejšího rozpracování práce by bylo možné vytvořit například obsáhlý tabulkový přehled RMU. Zároveň by ale nebylo možné splnit cíle práce zaměřené na definování příčin a důsledků.

Výzkumem bylo zjištěno, že největší podíl následků při radiačních mimořádných událostech tvoří obyvatelstvo zasažené ionizujícím zářením při RMU způsobených ztrátou zdroje. Pro porovnání v posuzovaných RMU z 30 RMU v 8 případech došlo ke ztrátě zdroje, 7krát po činnostech souvisejících



s defektoskopií, zdravotnictvím a průmyslovou výrobou. V těchto sedmi případech si RMU vyžádala 7 lidských životů, zdravotní následky u 11 osob a asi 300 osob bylo exponováno nízkými dávkami záření.

V jednom případě se jednalo o opuštěný terapeutický zdroj (Goiânia). Případ ztráty zdroje v Goiânii [1, 9] je specifický v mnoha ohledech, ať již do počtu obětí, zasaženého obyvatelstva tak materiálních škod a rozsahu likvidačních prací. Důsledkem této RMU byly zmařeny 4 lidské životy, 249 osob bylo kontaminováno a 112 000 osob muselo být následně ještě monitorováno, obrovské území zůstalo zamořeno. Případ této RMU je opravdu extrémní a šlo mu jistě zabránit, neboť na začátku tohoto případu stojí špatné zabezpečení zdroje a na konci touha zpeněžení domnělého šrotu.

Ztráty opuštěných zdrojů jsou velice nebezpečné, je popsáno přibližně 25 RMU souvisejících se ztrátou zdroje ionizujícího záření [25]. Mohlo by se zdát, že ke ztrátám zdrojů dochází hlavně v rozvojových zemích, to však není pravdou. I když politická, ekonomická a celková společenská situace s péčí o zdroje velmi souvisí. Ke ztrátám došlo ale i v Evropě, Japonsku nebo například v USA [25]. V mnoha případech souvisí ztráty zdrojů s touhou získání a zpeněžení šrotu, jak tomu bylo i v případě v Goiânii.. Nebezpečnost těchto RMU spočívá převážně v tom, že zůstávají dlouho skryté a zdroj může nekontrolovaně putovat mezi množstvím lidí nebo v nejhorším případě je roztaven společně se šrotem, jak se to stalo v několika RMU [1]. Zároveň dochází k druhotné kontaminaci prostor, kam byl zdroj přemístěn, případně může dojít i ke kontaminaci rozsáhlého území. K těmto RMU dochází často díky neznalosti rizika a nevědomého počínání nálezců opuštěných zdrojů. Jde o nejčastější příčinu RMU mimo pracoviště.

Obecně za RMU spojenými se ztrátami zdrojů ionizujícího záření stojí lidský faktor. Velké množství RMU vzniká nedbalostí, příčinami jsou porušování bezpečnostních předpisů a zanedbávání kontrol. Většině popsaných RMU v této práci šlo zabránit (Gilian, Yanango, Cochabamba) [1, 9, 17, 18, 19].

Vyšší počet úmrtí je však spojen s radiologickými událostmi. V posuzovaných RMU došlo k úmrtí díky přezáření ve 299 případech. K těmto RMU dochází z různých příčin. Nejčastějšími příčinami byly dle výzkumu špatná kalibrace zářiče, softwarová chyba, špatný výpočet dávky nebo technická závada. K dalším častým příčinám těchto RMU se řadí nedostatečně proškolený personál, záměna pacienta, ozařování chybné části těla, chybný čas ozařování. Najdeme zde také jeden společný znak, typický pro všechny radiační RMU, který zásadně ovlivňuje vzniklé následky, a tím je čas. Opět platí, že často uplyne mnoho času mezi prvním nehodovým dějem a chvílí, kdy dojde k odhalení RMU. V hodnocených RMU se jednalo o časové úseky od několika dní až po měsíce, či roky [12].

V práci nejsou uvedeny žádné RMU vzniklé z důvodu podzáření [12]. Ne snad proto, že by k nim nedocházelo, ale jejich interpretace je velice obtížná. Prezentovat příčiny u těchto radiologických událostí by nebyl problém. Vznikají v podstatě ze stejných příčin jako RMU, kdy došlo k přezáření. Za většinou těchto RMU stojí buď selhání lidského faktoru, nebo technická závada. S interpretací důsledků už je to ale horší. Ve většině pramenů jsou důsledky nejednoznačné nebo nejsou zmíněny vůbec. V pramenech použitých pro tuto práci jsem našel tento druh RMU jen v jednom případě (Stoke-Upon-Trent, Velká Británie 1982-91) [12].

Při hodnocení RMU dochází i k případům, kdy je možné z pramenů poměrně snadno zjistit důsledek. Příčina však již není popsána, jak tomu bylo při RMU v Brescii (Itálie) [12, 13]., kde jsem uvedl, že příčina nebyla zjištěna. Pracovník se snažil přes pásový dopravník dostat do haly, kde se ozařovaly obilniny a došlo k jeho expozici. V tomto případě a v některých případech náhodných expozic, by při vyhodnocování těchto RMU mohlo dojít k subjektivnímu hodnocení příčin. Tomuto jsem se snažil v práci vyhnout. Proto jsem vždy i příčiny náhodných expozic řešil z pohledu, zda k expozici došlo ze zcela náhodných příčin, které exponovaná osoba nemohla nijak ovlivnit. Pokud je ovlivnit mohla, či mohla tušit nebezpečí ozáření při prováděné činnosti, pak jsem hodnotil RMU v kategorii jiných příčin, například selhání lidského faktoru.

Podobný postoj jsem musel zaujmout také v případě RMU v Los Alamos [3], kdy bylo jako příčina určeno nadkritické množství. Ani v tomto případě nebyla prokázána skutečnost, že by RMU způsobil pracovník, který se později stal její obětí. Neprovedl jsem tedy subjektivní hodnocení, že RMU byla způsobena selháním lidského faktoru, proto jsem ji zařadil pod prokázanou příčinu nadkritického množství.

Porovnáme-li RMU ve zdravotnictví a průmyslu dojdeme k těmto zjištěním. V průmyslu je nejčastější příčinou ztráta zdroje v hodnocených RMU k ní došlo celkem v šesti případech. Z toho dva, co se týká důsledků, jsou nezávislé (Kramatorsk, Los Barrios – roztavení zdroje ve slévárně). V obou případech oběti neměly žádný podíl na ztrátě nebo přemístění zdroje. Jejich expozice nastala díky dvěma technickým závadám, kdy zdroj nebyl zachycen monitorovacími zařízeními.

Další nejčastější příčinou je technická závada. V kombinaci s ostatními příčinami, se selhání lidského faktoru podílí na 47 % RMU. Z pohledu důsledků se v průmyslových RMU nejčastěji vyskytují akutní radiační syndrom a radiační popáleniny. Propagace těchto účinků ionizujícího záření vede v mnoha případech k úmrtí, u radiačních popálenin nastávají zdravotní následky, případně až amputace prstů nebo končetin.

Zhodnotíme-li RMU ve zdravotnictví, které byly uvedeny v této práci. Vychází nám jako nejčastější příčina technická závada, ke které došlo v šesti z patnácti případů. Ve dvou případech došlo, také ke ztrátě zdroje (Indiana – brachyterapie, Goiânia – osiřelý zdroj). Kombinace příčin společně se selháním lidského faktoru se podílí na asi 53 % RMU ve zdravotnictví.

Jako nejčastější důsledek při RMU ve zdravotnictví vychází přezáření. Ve srovnání s průmyslem, trvají nehodové děje ve zdravotnictví podstatně delší dobu (Colombus 1974–76, USA 1987–88 – několik měsíců, Epinal 2004–2005) [12]. To způsobuje i velké rozdíly v případě důsledků ovlivňujících život a zdraví osob vystavených RMU. Proto porovnání těchto dvou oborů z pohledu důsledků není zcela možné.

Hodnocení příčin vzniku RMU bylo také zaměřeno na zjištění zdroje ionizujícího záření, který se nejčastěji vyskytuje v jednotlivých RMU. Jako tento zdroj byl identifikován  $^{192}\text{Ir}$ , který se vyskytoval v 10 případech z 30 hodnocených RMU. Z toho vyplývá, že stojí za jednou třetinou RMU. Tato skutečnost nebyla překvapivým zjištěním, neboť je často využívaným zdrojem ve zdravotnictví i průmyslu. Porovnáme-li podíl tohoto zdroje na RUMU oborově, vyskytl se v 7 RMU průmyslových a 3 ve zdravotnictví. Při podrobnějším prozkoumání příčin bylo zjištěno, že v polovině případů se jednalo o ztrátu zdroje (4x defektoskopie, 1x po

brachyterapii). Za druhou polovinou bylo v jednom případě kombinace příčin porušení bezpečnostních opatření a technická závada, ostatní čtyři souvisely s údržbou a přepravou ozařovače.

Druhým nejčastějším zdrojem byl  $^{60}\text{Co}$ , ten se podílel na 9 RMU. Počet devíti RMU ani v tomto případě není neočekávatelným zjištěním, protože se jedná o využívaný zdroj hlavně pro ozařovače. Ve třech případech se jednalo o RMU v průmyslu a šest případů vzniklo ve zdravotnictví. Průmyslové RMU byly rozloženy do jednotlivých příčin, v jednom případě se jednalo o nezjištěnou příčinu, dále o náhodnou expozici a poslední případ byl způsobený porušením bezpečnostních opatření. V RMU ve zdravotnictví byl zdroj součástí ozařovače a RMU můžeme z pohledu důsledků rozdělit na přezáření pacientů a ozáření obsluhy při údržbě.

Třetím zdrojem bylo  $^{137}\text{Cs}$ . I v tomto případě se využívání zdroje dělí mezi průmysl a zdravotnictví. V hodnocených RMU se tento zdroj vyskytl celkem třikrát. Ve dvou případech byl aktérem nezaviněných RMU z pohledu účastníků (Kramatorsk, Los Barrios). Oba případy připadají na ztrátu zdroje, zde byly okolnosti jiné, než při běžných ztrátách zdrojů. V prvním případě se ztracený zdroj přimíchal do štěrku, ze kterého byl později ulit panel pro stavbu panelového domu v ukrajinském městě Kramatorsk [3]. Druhá ztrátaje spojena s technickou závadou na monitorovacím zařízení ve slévárně. Tyto RMU si vyžádaly 4 úmrtí a zdravotní následky u jedné osoby v případě Kramatorsku, 6 náhodných expozic pracovníků slévárny a zamoření dvou oceláren. Případ roztavení zdroje ve slévárně si také vyžádal náklady na likvidaci důsledků RMU. Poslední RMU je ztráta opuštěného zdroje v Goiânii. RMU, ve kterých figuruje cesium, mívají velice vážné následky z důvodu jeho chemických a fyzikálních vlastností. Proto je třeba obzvláště tyto

zdroje mít pod kontrolou, jak v době jejich aktivního využívání, tak obzvláště v době, kdy jsou vyřazovány [28].

Ve třech případech vyšel jako zdroj lineární urychlovač. Opět je soubor rozložen mezi zdravotnictví a průmysl. RMU se staly ve dvou případech v průmyslu a v jednom ve zdravotnictví. V obou případech průmyslu se jednalo o vědecký výzkum. Příklad ve zdravotnictví se týkal terapeutického ozařovače, který díky výpadku proudu přestal správně pracovat, a došlo k přezáření dvou pacientů.

Čtyři případy připadají na nezjištěný zdroj, došlo k nim pouze ve zdravotnictví a důsledkem těchto RMU bylo několik úmrtí a přezáření pacientů. Jako příčiny můžeme určit technickou závadu a selhání lidského faktoru.

V případě RMU s  $^{239}\text{Pu}$  se jednalo o případ z Los Alamos, kdy došlo při čištění plutonia ke štěpné reakci díky nadkritickému množství. Pracovník zemřel účinkem záření v důsledku štěpné reakce, prokazatelně u něj nedošlo ke kontaminaci plutoniem [3].

Co se týká celkového shrnutí následků RMU, došlo při nich k 317 úmrtím. Ve 226 případech došlo ke zdravotním následkům. O přezáření se jednalo v 366 případech. Expozice obsluhy se týkala 21 pracovníků. Během RMU proběhlo nejméně 300 expozičních obyvatelstva. Toto číslo není úplné, neboť v případě RMU v Dakaru a Cochabambě, počet dalších exponovaných osob není znám.

Při hodnocení radiačních mimořádných událostí je třeba dávat data o RMU vždy do kontextu. RMU jsou totiž mnohem méně časté v porovnání s daty provedených výkonů radiodiagnostiky a radioterapie. Tím pádem je zcela dodržen princip zdůvodnění, kdy prospěch zcela převyšuje

riziko. Shora uvedené důsledky radiačních RMU jsou shrnuty za období 54 let. V porovnání s celosvětovou statistikou z roku 2007, kdy bylo provedeno 3,1 miliardy vyšetření pomocí rentgenového záření a 37 milionů diagnostických vyšetření metodami nukleární medicíny [29], jsou počty RMU v podstatě zanedbatelné.

Podobnou výzkumnou prací se zabýval tým v USA. Tématem bylo vytvoření přehledu hlášených RMU s přeexponováním v letech 1980–2013 [30]. Výzkumný článek byl publikován v roce 2015. Pro hodnocení si tým vybral publikace IAEA, US NRC, UNSCEAR, REAC/TS. Následně bylo vytvořeno porovnání mezi jednotlivými obory a zeměmi, kde k RMU došlo. Z výsledků této práce vyplývá několik zajímavých poznatků a analogií. V oborovém porovnání vzniklo nejvíce RMU v průmyslu v období 1980–1989 a tyto RMU souvisely hlavně se ztrátami zdrojů. V dalších obdobích měly RMU v průmyslu však tendenci klesající. Dlouhodobý pokles během hodnoceného období zaznamenaly i RMU způsobené opuštěnými zdroji. Obrácený vývoj byl sledován pro obor zdravotnictví. Zde měl počet RMU naopak stoupající tendenci. Hlavním důvodem je kontinuita na počet provedených úkonů a v důsledku této činnosti i logicky se zvyšující počet RMU. Zajímavými hodnotami v hodnoceném období (1980–2013) je expozice osob. Největší podíl expozic je u pacientů, na druhém místě je expozice pracovníků a třetí místo obsazuje expozice obyvatelstva. Nacházejí se zde ale dvě výjimky, první v období 1980–1989, kdy expozice pracovníků společně s obyvatelstvem převyšovala počet expozic hodnocených u samostatné kategorie RMU pracovníků. V druhém období mezi roky 2010–2013 se nevyskytuje žádná expozice obyvatelstva, pouze pacientů a pracovníků. Podle typu ozáření těla, se vyskytovaly hodnoty v tomto pořadí, jako první bylo lokální poškození kůže, druhé v pořadí lokální poškození kůže v kombinaci s celotělovou expozicí, třetí pak byla lokální expozice orgánů

a poslední lokální expozice kůže spojená s lokální expozicí orgánů. Poslední porovnání bylo provedeno v rámci kontinentů, dle nejčastější příčiny řazené podle oborů a příčin. Nejvyšší počet RMU ve zdravotnictví připadalo na Severní Ameriku, Evropu a Jižní Ameriku. Afrika a jižní Asie vykazovaly nejčastější příčinu vzniku RMU v rámci opuštěných zdrojů. Vystavení průmyslovým zdrojům bylo pak nejvyšší v severní a střední Asii. Výzkum je dobře propracovaný, i když nebyl použit jako pramen pro tuto práci z důvodu, že jsou v něm přímo prezentovány výsledky. A cílem této práce byla komparační analýza, kdy k porovnání a analýze mimořádných událostí bylo třeba znát i souvislosti a podrobnosti hodnocených RMU. A teprve na základě těchto skutečností bylo provedeno vyhodnocení příčin a důsledků. Pozitivním zjištěním bylo, že provedený výzkum potvrzuje zjištěné výsledky v této práci. Obě práce se například shodují v závěru týkajícího se množství obětí a zdravotních následků ve zdravotnictví, kdy oběti a následky v radiačních RMU, které proběhly v průmyslu, jsou se zdravotnictvím naprosto nesrovnatelné.

Další souhrnnou prací, která byla využita při zpracování této práce. Byl článek Jeana Claude Nenota [12]. Práce shrnuje RMU za období 60 let a uvádí odhad RMU asi na 600, které měly dopad v rámci významného ozáření na 6 000 osob, což zahrnuje přibližně 70 radiačních RMU, při kterých došlo k jednomu nebo více úmrtím. Za většinou byl akutní radiační syndrom cca 200 případů.

Nesejtová [31] ve své práci zmiňuje studie Thortona a spol. [32], které se zabývaly analýzou příčin radiologických událostí a z výsledků vychází, že v 60 % případů, kdy dojde k RMU nebo pochybení, je toto způsobeno chybou personálu. Tento výsledek v podstatě koresponduje s touto prací, kdy u hodnocených RMU ve zdravotnictví, bylo 53 % způsobeno selháním



lidského faktoru. Zajímavým údajem bylo také zjištění, že chyba záměny pacienta se objevuje v 16 % případů.

Jedním poměrně velkým problémem při zpracování této práce bylo získávání zdrojů. Během vyhledávání v českém jazyce se našlo velice málo zdrojů, ze kterých by bylo možné čerpat. V oblasti radičních mimořádných událostí se dá říci, že takových zdrojů bylo k dispozici jen málo, případně jsou starší než 10 let a více.

Velkým štěstím bylo, že k této tématice vyšlo v poslední době několik kvalitních zdrojů v anglickém jazyce. O co méně jich bylo do počtu, o to byly kvalitnější a obsáhlejší. Během vyhledávání zdrojů jsem se také často setkal s kvalitním zdrojem, nevýhodou ale bylo, že se tyto zdroje zabývaly hlavně jadernou bezpečností. Případně byly koncipovány jen v teoretické rovině bez zaměření se na konkrétní radiční RMU. Jednalo se o publikace zaměřené na bezpečnost, nastavení a zvyšování kvality a dlouhodobé udržení, včetně doporučení MAAE nebo IRPA. Úplně jiné byly publikace vydávané MAAE, týkaly se jednotlivých RMU a byly obsáhle, kvalitně zpracovány. Tyto zdroje, pokud se k nim podařilo získat přístup, byly využity jen podpůrně. A jejich studium bylo prováděno spíše pro získání přehledu. To mělo opodstatněný důvod, že k těmto RMU bylo mnoho materiálu, a byl k němu i snadný přístup. Stejná situace byla i s RMU na jaderných zařízeních. Všeobecně bylo mnoho materiálů s touto tematikou, od knihoven, monografií, šedé literatury až po internetové zdroje. Při získávání zdrojů, bylo třídění zaměřeno na vyhledávání hlavně souhrnných přehledů mimořádných radičních událostí [12, 13, 28, 33, 34]. Tyto podklady byly všechny v anglickém jazyce. Jako vyhledávací hesla se nejvíce osvědčili slova radiation accident nebo event. Internet samozřejmě nabízel i materiály, které nebylo třeba třídit, neboť se zabývaly přímo RMU. Problémem

však bylo dohledání zbytku dokumentu, a to se dost často nepodařilo. Následkem toho se tyto dokumenty stávaly bezcennými, protože je nebylo možno nijak odcitovat. Pro zpracování práce s touto tematikou byla cenným zdrojem databáze Jonstone, kde se nachází přehled RMU všeho druhu.

Obodovskiy v kapitole radiační události [25] odkazuje na tuto databázi radiačních událostí zpracovaných Robertem Jonstonem [13]. Obodovskiy ho považuje za použitelný relevantní zdroj. Zároveň, ale upozorňuje na relevantnost zdrojů, které jsou dostupné ohledně RMU. U poskytovaných dat často docházelo k zamlčování, utajování atd. V podobném duchu se ve své práci vyjádřil i Nenot [12], který uvádí, že některé RMU byly buď z vojenských, nebo politických důvodů zatajeny případně zkresleny. Podobný poznatek přináší i výzkumná práce [30], kde byly pečlivě vybírány zdroje a kriticky posuzovaná jejich relevantnost a použitelnost.

Tato skutečnost byla potvrzena i během zpracování této práce při studiu pramenů radiačních RMU. Při porovnání různých zdrojů se lišily i informace o jednotlivých RMU. A nejednalo se vždy jen o velikost dávek, či jednotky. Mnohdy byly i samotné RMU popisovány v jednom pramenu jinak, než ve dvou ostatních.

K prevenci vzniku radiačních mimořádných událostí je možno přistoupit z mnoha úhlů. Jedním z hlavních a nejlevnějších opatření, je správné režimové nakládání se zdroji ionizujícího záření. Dalším opatřením je v případě školení personálu, využívat poznatky o vzniklých radiačních RMU v minulosti, případně vyhodnocovat v rámci funkčního systému poučení ze skoronehod, aby k těmto již nedocházelo. Vhodné je též řídit se doporučeními vydávanými MAAE a IRPA.

Obecně platí, že v rámci prevence a zvýšení bezpečnosti by měly být nastaveny systémy bezpečnosti do hloubky, aby nebylo možné při selhání lidského faktoru nebo vzniku jedné technické závady způsobit RMU [28].

Nastavením systému bezpečnosti do hloubky je myšleno, vytvořit takovou kombinaci bezpečnostních prvků, aby bylo riziko radiační nehody sníženo na nejnižší možnou mez, které lze dosáhnout. K realizaci tohoto systému se využívá blokování, křížové kontroly, zábran, elektronického zabezpečení.

Pro průmyslovou defektoskopii platí, že bezpečnostní pravidla by měla být nastavená takovým způsobem, aby náležitě poučený pracovník byl schopen zabránit nehodě, případně snížit následky vzniklé nehodou. Měl by mít také povědomí jak taková opatření provést. Defektoskopie se většinou účastní pouze dva pracovníci a bezpečnost je v podstatě přenesena na tyto pracovníky. Předpokládá se, že po ukončení prací zkontrolují defektoskop pomocí měřicího přístroje, aby ověřili, že zdroj se nachází v bezpečné stíněné poloze. Z výše uvedených příčin víme, že tento postup je opomíjen a jeho neprovedení způsobilo několik nehod [28].

Pro zabezpečení v průmyslovém ozařování je třeba nastavit blokovací systémy takovým způsobem, aby nedocházelo k náhodným expozicím obsluhy. V této oblasti v rámci prevence je nutné provádění pravidelného školení se zaměřením na vzniklé nehody a současně obsluhy vyškolit pro situace, kdy dojde k domnělé chybě zabezpečovacího systému pro bezpečné potvrzení či vyvrácení chybového hlášení a tím vyloučit zkratovitě jednání. [28].

Vzhledem ke skutečnosti, že radiologických výkonů bude stále přibývat je pravděpodobné, že se budou objevovat v této oblasti i nehody. Záleží, ale na přístupu obsluhy, lékařských fyziků a lékařů, zda bude těchto nehod přibývat nebo budou mít spíše klesající tendenci. Předcházet vzniku

radiologických událostí je možné například zavedením komplexního systému kvality pro kontrolu pracovišť, zvýšením celkové kultury bezpečnosti, přijmutím opatření pro nakládání se zdroji (včetně povinností daných zákonem či vyhláškou), vyškolením obsluhy a personálu pro zvládání nehodových situací dle připraveného scénáře.

Podmínkou je nastavení všech parametrů bezpečnosti na takovou úroveň, aby bylo možné na základě poučení z nehod vyloučit všechny opakující se příčiny, jako jsou přezáření a záměna pacienta, selhání personálu, špatný ozařovací plán, softwarové chyby, technické problémy způsobené špatnou, případně žádnou údržbou. Další podmínkou je vyloučit nehodové stavy pravidelným měřením, k ověření správné funkce přístrojů. Zaměřit se na kvalitní komunikaci při plánování jednotlivých terapií. Zároveň dosáhnout nastavení bezpečnostních opatření a postupů na udržitelné úrovni, s přiměřenými náklady a dostatečným personálním obsazením. V personální oblasti provádět pravidelné vzdělávání a školení personálu. Tyto vzdělávací aktivity přizpůsobovat aktuálnímu vývoji v oboru [28].

Pro diagnostiku se bude vývoj ubírat k co nejnižší radiační zátěži pacienta, a lékaři budou tím hlavním faktorem, který tuto zátěž bude ovlivňovat. Tohoto lze dosáhnout jen pravidelným systematickým vzděláváním lékařského personálu, kterému budou známy všechny výhody a zároveň limitace diagnostiky a nukleární medicíny. V současné době bude však ještě po nějakou dobu nutné vyžívat radiofarmaka typu  $^{99m}\text{Tc}$  v klasické nukleární medicíně (SPECT vyšetření) nebo  $^{18}\text{F}$  v pozitronovém zobrazování (PET vyšetření). Je pravděpodobné, že vyšetření a terapií bude stále přibývat. Snahou v dlouhodobém vývoji je ale radiační zátěž co nejvíce snížit a to jak u pacientů, tak u obsluhy. K dosažení tohoto cíle již dnes přispívá

technologický vývoj v oblasti přístrojů a zajímavou myšlenkou je přechod na využívání alfa zářičů pro terapii [29].

Radiační mimořádné události se i přes fakt, že mají někdy zcela fatální následky, stávají učebnicí, která tvoří půdu pro mnoho nových poznatků. Například v oblasti léčby zdravotních následků bývají často prvotním impulsem pro úpravy a zdokonalení bezpečnostních předpisů a postupů. Mají také vliv na technologický rozvoj v oblasti zabezpečení zdrojů a zvýšení bezpečnosti. V neposlední řadě tvoří podklad pro nové postupy jejich zvládnání a likvidaci následků.

Na začátku práce byli stanoveny dvě hypotézy. První hypotézou zněla: „Více než 50 % radiačních mimořádných událostí je způsobeno selháním lidského faktoru.“ A druhou stanovenou hypotézou bylo: „Více než 50 % radiačních mimořádných událostí souvisí se zdrojem <sup>192</sup>Ir.“

Celkovým vyhodnocením příčin radiačních mimořádných událostí byla potvrzena hypotéza, že za většinou RMU stojí selhání lidského faktoru. A to v 53% hodnocených RMU. Byla však vyvrácena hypotéza, že více než 50 % RMU souvisí se zdrojem <sup>192</sup>Ir. Výzkum zjistil, že zdroj <sup>192</sup>Ir se vyskytuje pouze v jedné třetině nehod ze 30 hodnocených. Jedná se tedy pouze o 30% výskyt.

## 7 ZÁVĚR

Účelem práce bylo vytvořit ucelený historický přehled radiačních mimořádných událostí. Z dostupných materiálů byl vytvořen výběr radiačních mimořádných událostí za období padesáti čtyř let. Práce si kladla za cíl, analyzovat příčiny a důsledky nehod, které se udály v minulosti. Tento cíl byl splněn a výsledky práce prezentují nejčastější příčiny a důsledky posuzovaných nehod.

Výzkumem se podařilo potvrdit, že selhání lidského faktoru v případě radiačních mimořádných událostí hraje podstatnou roli. Na základě tohoto výsledku byla potvrzena první hypotéza. Dále bylo identifikováno  $^{192}\text{Ir}$  jako nejčastější zdroj ionizujícího záření v RMU. Neměl, ale více jak 50% podíl na RMU. Proto byla nepotvrzena druhá hypotéza. Jako přínos této práce vidím možnost čerpat poučení z chyb, které byly důvodem vzniku nehod. A na základě těchto poznatků činit opatření v oblasti bezpečnosti a prevence.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ZIZ – Zdroj ionizujícího záření

RMU – Radiační mimořádná událost

MAAE/IAEA – Mezinárodní agentura pro atomovou energii

IRPA – Mezinárodní asociace radiační ochrany

UNSCEAR – Vědecký výbor OSN pro účinky atomového záření

US NRC – Jaderná regulační komise USA

REAC/TS – Středisko radiační nouzové pomoci/školící středisko

PET – Pozitronová emisní tomografie

SPECT – Tomografická scintigrafie (Single Photon Emission Computed Tomography)

## 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. HAVRÁNKOVÁ, Renata, ed. *Klinická radiobiologie*. Praha: Grada Publishing, 2020. ISBN 978-80-247-4098-0.
2. KRIVIT, Steven B., Jay H. LEHR a Thomas B. KINGERY. *Nuclear energy encyclopedia: science, technology, and applications: science, technology, and applications*. Hoboken: Wiley, 2011.
3. PERKINS, Alan. *Life and Death Rays* [online]. CRC Press, 2021 [cit. 2022-04-25]. ISBN 9781003028246. Dostupné z: doi:10.1201/9781003028246
4. Přednáška Ing. DRÁBOVÁ Dana, *Jaderné technologie – přínosy a rizika*. SAVIO (2015). [online]. <https://www.youtube.com/watch?v=TeRz3D31Jn8>
5. ŠTOLL, Ivan. *Dějiny fyziky*. Praha: Prometheus, 2009. ISBN 978-80-7196-375-2.
6. ŠVEC, Jiří. *Radioaktivita a ionizující záření: Doplnující učební text pro předměty Bakalářská fyzika, Aplikovaná fyzika, Ochrana před zářením*. Ostrava 2005: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, roku 2005, 2005. ISBN ISBN: 80-86634-62-0.
7. ŠÍN, Robin. *Medicína katastrof*. Praha: Galén, [2017]. ISBN 978-80-7492-295-4.
8. České vysoké učení technické v Praze FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ. *Základy radiobiologie a možná zneužití radiačních a biologických agens.: studijní opora*. Kladno, 2016
9. PROUZA, Zdeněk a Jiří ŠVEC. *Zásahy při radiační mimořádné události*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-046-3.



10. ČESKO. § 4 odst. 1 písm. a) zákona č. 263/2016 Sb., atomový zákon - znění od 1. 2. 2022. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 7. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-263#p4-1-a>
11. ČEZ a. s. *Radiační ochrana pro vybrané pracovníky: SPECIALIZACE: VVZ, VZ, SL*. Brno, 2020.
12. NÉNOT, Jean-Claude. Radiation accidents over the last 60 years. *Journal of Radiological Protection* [online]. 2009, **29**(3), 301-320 [cit. 2022-03-15]. ISSN 0952-4746. Dostupné z: doi:10.1088/0952-4746/29/3/R01
13. *Database of radiological incidents and related events--Johnston's Archive: Radiation accidents and other events causing radiation casualties--tabulated data* [online]. 2012 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/radaccidents.html>
14. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *The Radiological accident in San Salvador*, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (1990). ISBN 92-0-129090-X.
15. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *The Radiological Accident at the Irradiation Facility in Nesvizh*, Non-serial Publications , IAEA, Vienna (1996). ISBN 92-0-101396-5
16. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *An Electron Accelerator Accident in Hanoi, Viet Nam*, Non-serial Publications , IAEA, Vienna (1996). ISBN 92-0-100496-6
17. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *The Radiological Accident in Gilan*, Non-serial Publications , IAEA, Vienna (2002). ISBN 92-0-110502-9
18. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *The Radiological Accident in Yanango*, Non-serial Publications , IAEA, Vienna (2000). ISBN 92-0-101500-3
19. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *The Radiological Accident in Cochabamba*, Non-serial Publications , IAEA, Vienna (2004). ISBN 92-0-107604-5

20. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Nueva Aldea, Non-serial Publications , IAEA, Vienna (2009). ISBN 978-92-0-103009-2
21. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Chilca, Non-serial Publications , IAEA, Vienna (2018). ISBN 978-92-0-101817-5
22. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Soreq, Non-serial Publications , IAEA, Vienna (1993). ISBN 92-0-101693-X
23. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Accidental Overexposure of Radiotherapy Patients in San José, Costa Rica, Non-serial Publications , IAEA, Vienna (1998). ISBN 92-0-102098-8
24. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Accidental Overexposure of Radiotherapy Patients in Bialystok, Non-serial Publications , IAEA, Vienna (2004). ISBN 92-0-114203-X
25. OBODOVSKIJ, Il'ja Michajlovič, Radiation: fundamentals, applications, risks, and safety, Amsterdam: Elsevier, 2019, ISBN 978-0-444-63979-0
26. Aldebaran bulettin. *Radiační mimořádné události část I.* [Online]. [Citace: 20. dubna 2022.] [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2020\\_34\\_rmu.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2020_34_rmu.php)
27. DVOŘÁK, Tomáš a Tomáš BOROVSÝ. *Úvod do studia dějepisu.* Brno: Masarykova univerzita, 2014. ISBN 978-80-210-7012-7.
28. Ortiz, P., Oresegun, M., & Wheatley, J. (2000). *Keynote on lessons from major radiation accidents.* IRPA-10 Proceedings of the 10th international congress of the International Radiation Protection Association on harmonization of radiation, human life and the ecosystem, (p. 1v). Japan: Japan Health Physics Society.
29. KUBINYI, Jozef, Jozef SABOL a Andrej VONDRÁK. *Principy radiační ochrany v nukleární medicíně a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami.* Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0168-9.

30. COEYTAUX, Karen, Eric BEY, Doran CHRISTENSEN, Erik S. GLASSMAN, Becky MURDOCK, Christelle DOUCET a David O. CARPENTER. Reported Radiation Overexposure Accidents Worldwide, 1980-2013: A Systematic Review. *PLOS ONE* [online]. 2015, **10**(3) [cit. 2022-05-02]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0118709
31. NESEJTOVÁ, Šárka. *Radiační mimořádné události a radiologické události v radiodiagnostice*. Kladno, 2018. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce Mgr. Petr Pech.
32. HORNTON, Raymond H., Jeremy MIRANSKY, Aileen R. KILLEN, Stephen B. SOLOMON a Lynn A. BRODY. Analysis and Prioritization of Near-Miss Adverse Events in a Radiology Department. *American Journal of Roentgenology* [online]. 2011, **196**(5), 1120-1124 [cit. 2022-05-08]. ISSN 0361-803X. Dostupné z: doi:10.2214/AJR.10.5373
33. ICRP, 2000. Prevention of Accidents to Patients Undergoing Radiation Therapy. ICRP Publication 86. Ann. ICRP 30 (3).
34. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Planning the Medical Response to Radiological Accidents, Safety Reports Series No. 4, IAEA, Vienna (1998)
35. Radiobiologie. *Stochastické účinky*. [Online] 2017. [Citace: 23. února 2022.] Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/7-kapitola/75/751.html.23>
36. PICKOVER, Clifford A. *Kniha o fyzice: od velkého třesku ke kvantovému znovuzrození: 250 milníků v dějinách fyziky*. Přeložil Ivan ŠTOLL. Praha: Argo, 2015. Zip (Argo: Dokořán): Dokořán). ISBN 978-80-257-1658-8.

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ

Graf 1 - Příčiny radiačních mimořádných událostí (vlastní zdroj).....	53
Graf 2 - Příčiny nehod z důvodu selhání lidského faktoru (vlastní zdroj).....	54
Graf 3 - Vyhodnocení příčin z hlediska zdroje (vlastní zdroj).....	54
Graf 4 - Důsledky radiačních mimořádných událostí (vlastní zdroj).....	55

## 11 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1 — Přehled dávek osob přítomných při nehodě 21. května 1946 [3].	21
Tabulka 2 Nejčastěji používané zářiče [6, 7] .....	25
Tabulka 3 - Klinické formy a stupně závažnosti ANO vyvolané celkovým zevním relativně rovnoměrným ozářením [1] .....	28
Tabulka 4 - Nehody v průmyslu [1, 3, 12, 13, 18, 25, 26,].....	51
Tabulka 5 - Nehody ve zdravotnictví [1, 3, 12, 13, 18, 25, 26,] .....	52