

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Zdravotně sociální fakulta



Nejvýznamnější radionuklidy při havárii jaderné elektrárny, zkušenosti z Černobylu

Diplomová práce

Vypracovala: Bc. Magdaléna Horáková

Vedoucí práce: Prof. MUDr. Pavel Kuna, DrSc.

Rok 2007

The most considerable of radionuclides at the accident of the nuclear power station, the experience of Chernobyl

Energy is very important for human life. It may be produced by different ways. One of such ways is the production of electrical energy in nuclear power stations in equipment called nuclear reactors. Nevertheless, because of very complicated technology, the nuclear power plant represents also hazards of accidents and breakdowns, which may have significant impact on health of population and living environment, namely for the reason of escape of large volume of radionuclides to living environment. A nuclear reactor is a source of about 300 of different radionuclides, which escape to environment at an accident and irradiate the population living in neighborhood of the power plant.

At the nuclear power plant accident, the radionuclides with very short half-life come to environment, they decay the period from several second to several months. On the other sides come to environment radionuclides with long half-life. Their radionuclides occur in surrounding of the power plant for hundreds of years before they decay totally.

Immediately after a nuclear power plant accident, radioiodine represents the most severe health hazard for population. Because it is a radionuclide with short half-life, it causes the danger during first months after the accident. Its health hazard lies in the fact, that it gets to food chains and irradiates a man, who consumed contaminated water and food. Radiocaesium and radiostrontium are the next important radionuclides. They have long half-lives, it means that will decay after hundred years after the accident and they endanger population a long time after the accident yet.

A lot of accidents exists in the history of nuclear energetics, nevertheless, the largest breakdown is the Chernobyl accident, when $1,4 \cdot 10^{19}$ Bq of radionuclides escaped to living environment, especially radioiodine, radiocaesium and radiostrontium. Perhaps everybody in the world knows the word Chernobyl today. It was a certain milestone in nuclear energetics, when all people realized that at operation of nuclear power plant especially the preventive and safety measures must be observed to prevent such significant accidents in future.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Nejvýznamnější radionuklidy při havárii jaderné elektrárny, zkušenosti z Černobylu“ vypracovala samostatně a použila jen pramenů, které cituji a uvádím v příložené bibliografii.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním diplomové práce, a to v nezkrácené podobě fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích dne 28. května 2007

Bc. Magdaléna Horáková

Chtěla bych mnohokrát poděkovat svému vedoucímu práce panu prof. MUDr. Pavlu Kunovi, DrSc. za cenné rady a poskytnuté materiály k mé diplomové práci, které mi velmi pomohli při zpracování daného tématu.

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD | 7 |
| I. SOUČASNÝ STAV | 8 |
| 1. ZÁKLADNÍ POJMY | 8 |
| 2. JADERNÁ ENERGETIKA V SOUČASNOSTI Z POHLEDU RADIONUKLIDŮ | 11 |
| 2.1 PRINCIP JADERNÉ ELEKTRÁRNY | 12 |
| 2.2 ZDROJE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ | 14 |
| 2.2.1 Radionuklidy vypouštěné do ovzduší | 15 |
| 2.2.2 Radionuklidy vypouštěné do vodotečí | 17 |
| 2.3 BEZPEČNOST JADERNÉ ELEKTRÁRNY | 17 |
| 2.3.1 Zajištění integrity ochranných bariér jako součást ochrany do hloubky | 18 |
| 2.4 JADERNÉ HAVÁRIE A NEHODY | 20 |
| 3. VÝZNAMNÉ RADIONUKLIDY PŘI HAVÁRII JADERNÉ ELEKTRÁRNY | 27 |
| 3.1 KONTAMINACE RADIONUKLIDY | 29 |
| 3.2 CESTY VSTUPU RADIOAKTIVNÍCH LÁTEK | 31 |
| 3.2.1 Inhalační kontaminace radioaktivních látek | 31 |
| 3.2.2 Kontaminace zažívacími cestami | 32 |
| 3.2.3 Vstup neporušenou a poraněnou kůží | 34 |
| 3.2.4 Kombinovaná radiační poškození (mixty) | 34 |
| 3.3 RADIOAKTIVNÍ JÓD ¹³¹I | 35 |
| 3.4 RADIOAKTIVNÍ CÉSIUM ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs | 37 |
| 3.5 RADIOAKTIVNÍ STRONCIUM ⁸⁹Sr, ⁹⁰Sr | 38 |
| 3.6 DALŠÍ VÝZNAMNÉ RADIONUKLIDY | 39 |
| 3.6.1 Radioaktivní uran ²³⁸ U, ²³⁹ U, ²³⁵ U | 39 |
| 3.6.2 Radioaktivní plutonium ²³⁹ Pu | 39 |
| 3.6.3 Radioaktivní tritium ³ H | 40 |
| 3.6.4 Radioaktivní kobalt ⁶⁰ Co | 41 |
| 3.6.5 Radioaktivní americium ²⁴¹ Am | 41 |
| 3.6.6 Radioaktivní cer ¹⁴⁴ Ce | 41 |
| II. CÍL PRÁCE A HYPOTÉZA | 43 |
| III. METODIKA | 43 |
| IV. VÝSLEDKY | 44 |
| 4. JADERNÁ HAVÁRIE ČERNOBYL | 44 |
| 4.1. ŠÍŘENÍ RADIOAKTIVNÍCH LÁTEK Z HAVAROVANÉHO REAKTORU | 46 |
| 4.2 RADIOAKTIVNÍ KONTAMINACE BĚLORUSKA | 53 |
| 4.2.1 Radioaktivní kontaminace radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu | 53 |
| 4.2.3 Kontaminace jódem ¹³¹ I | 54 |
| 4.2.4 Kontaminace cesiem ¹³⁷ Cs | 55 |
| 4.2.5 Kontaminace stronciem ⁹⁰ Sr | 58 |
| 4.3 DOPADY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ PO HAVÁRII V ČERNOBYLU | 60 |
| 4.3.1 Kontaminace půdy | 62 |
| 4.3.2 Kontaminace lesů | 68 |

| | | |
|----------------------------|--|------------|
| 4.3.3 | Kontaminace vodních soustav | 70 |
| 4.4 | ZDRAVOTNÍ NÁSLEDKY U POPULACE PO HAVÁRII | 74 |
| 4.5 | ČASOVÝ PRŮBĚH NÁSLEDKŮ JADERNÉ HAVÁRIE V ČERNOBYLU | 75 |
| 4.5.1 | Okamžité následky | 75 |
| 4.5.2 | Krátkodobé dopady po havárii | 77 |
| 4.5.3 | Dlouhodobé dopady po havárii | 78 |
| 4.6 | ZDRAVOTNÍ DOPADY ČERNOBYLSKÉ HAVÁRIE | 80 |
| 4.6.1 | Rakovina štítné žlázy | 82 |
| 4.6.2 | Výskyt maligních tumorů u likvidátorů | 84 |
| 4.6.3 | Výskyt hematoblastózy u populace regionů Gomelu a Mogileva | 86 |
| 4.6.4 | Rakovina prsu u ženské populace | 88 |
| 4.6.5 | Výskyt zákalů (kataraktu) | 90 |
| 4.6.6 | Nemoci oběhového systému | 91 |
| 4.6.7 | Genetické dopady | 91 |
| 4.7 | SITUACE V ČESKOSLOVENSKU PO HAVÁRII V ČERNOBYLU | 94 |
| V. DISKUSE | | 104 |
| VI. ZÁVĚR | | 111 |
| VII. LITERATURA | | 112 |
| VIII. KLÍČOVÁ SLOVA | | 114 |
| IX. PŘÍLOHY | | 8 |

ÚVOD

Radionuklidy jsou nestabilní prvky, které podléhají neustálé přeměně v jiný prvek. Při této přeměně dochází k uvolnění energie v podobě ionizujícího záření. Radionuklidy můžeme rozdělit na přírodní a umělé. Přírodní radionuklidy existují na Zemi jako součást zemské kůry. Naproti tomu radionuklidy umělé jsou vytvořeny člověkem v jaderných reaktorech. Jaderný reaktor je zařízení, kde dochází k řízené řetězové štěpné reakci a je hlavní součástí jaderné elektrárny.

Jaderný reaktor obsahuje velké množství různých radionuklidů. Při havárii jaderné elektrárny dochází k uvolnění směsi radionuklidů z reaktoru do prostředí, což může mít důsledky na zdraví obyvatelstva, personálu elektrárny a na životní prostředí. V důsledku takového uvolnění radionuklidů z jaderného reaktoru se mění riziko možného poškození zdraví s časem po havárii.

V této diplomové práci se budu tedy zabývat rizikem radionuklidů, které se uvolní při havárii jaderné elektrárny. I když se v historii jaderné energetiky stala řada nehod v jaderných elektrárnách, např. nehoda v Three Mile Island (USA, 1979), Windscale (Anglie, 1957), ale také v Československu v Jaslovských Bohunicích (1977) apod., budu svoji práci zaměřovat především na Černobylskou havárii, jakožto největší jadernou havárii s vysokým únikem radionuklidů do životního prostředí. Do životního prostředí uniklo celkem $1,4 \cdot 10^{19}$ Bq a za nejdůležitější radionuklidy z hlediska ozáření obyvatelstva jsou považovány ^{131}I a ^{137}Cs .

I. SOUČASNÝ STAV

1. Základní pojmy

Radioaktivita – samovolná přeměna atomových jader spojená s emisí ionizujícího záření.

Aktivita – počet radioaktivních přeměn radionuklidu za jednotku času, množství radionuklidu v nějaké látce se podle potřeby vyjadřuje hmotnostní aktivitou, objemovou aktivitou nebo plošnou aktivitou na povrchu země či předmětu.

Becquerel – jednotka pro aktivitu v soustavě SI, jeden becquerel (Bq) se rovná jedné přeměně za sekundu ($1 \cdot s^{-1}$), dřívější jednotka aktivity curie (Ci) je rovna $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq, hmotnostní aktivita se měří v Bq na kilogram (Bq/kg), objemová Bq/m³ a plošná Bq/m².

Nuklid – název pro atomy, které mají stejný počet neutronů i protonů.

Radionuklid – radioaktivní nuklid, jehož jádra nejsou stálá a vysílají záření beta (elektrony), gama (fotony elektromagnetického záření), alfa (jádra helia), tím se přeměňují na jiný nuklid.

Izotop – izotopy jsou atomy jednoho prvku lišící se nukleonovým číslem, tzn., že mají v jádře stejný počet protonů, ale různý počet neutronů.

Radioizotop – nestabilní, samovolně se přeměňující izotop chemického prvku za vyzáření energie v podobě ionizujícího záření,

radioizotopy dělíme na:

- **přirozené** – existují na Zemi bez působení člověka jako součást zemské kůry (⁴⁰K) nebo vznikají působením kosmického záření (kosmogenní, ¹⁴C, ³H)
- **umělé** – vznikají činností člověka (v jaderných reaktorech ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ¹³¹I)

Poločas rozpadu ($T_{1/2}$) – počet radioaktivních přeměn za jednotku času, kdy se radionuklid přeměňuje na jiný nuklid a z původního počtu radioaktivních jader zůstává právě polovina.

Biologický poločas – časový interval, za který klesne počet inkorporovaných prvků v organismu na polovinu, čili se vyloučí polovina přijatého radionuklidu.

Fyzikální poločas – je doba, za níž dojde k přeměně poloviny atomů určitého radioaktivního prvku.

Efektivní poločas – je doba, za kterou klesne celková aktivita radionuklidu vpraveného do organismu v důsledku radioaktivní přeměny a v důsledku biologického vylučování právě na polovinu.

Dávka – množství energie předané určité látce ionizujícím zářením v objemu s jednotkovou hmotností, míra účinku ionizujícího záření.

Gray – jednotka pro dávku ionizujícího záření v soustavě SI, jeden gray (Gy) je roven jednomu joulu připadajícímu na kilogram ($J \cdot kg^{-1}$).

Dávkový příkon – měří se v grayích za sekundu ($Gy \cdot s^{-1}$), dávka za určitý čas.

Efektivní dávka - celkové zdravotní riziko způsobené jakoukoliv kombinací záření. Efektivní dávka vysvětluje jak absorbovanou energii, tak typ záření a náchylnost různých orgánů a tkání k rozvoji závažného karcinomu vyvolaného zářením nebo genetického postižení.

Sievert - jednotkou efektivní dávky je sievert (Sv). Jeden sievert je značně vysoká dávka, proto se k popisu normální expozice používá milisievert (mSv).

Kolektivní efektivní dávka – je míra celospolečenské újmy na zdraví způsobené ozářením, součet dané veličiny pro všechno obyvatelstvo nebo jeho skupinu.

Zevní ozáření – ozáření lidského těla způsobené zdrojem ionizujícího záření zevně.

Vnitřní ozáření – ozáření lidského těla způsobené radionuklidy přijatými do organismu vdechováním vzduchu nebo požíváním potravy a vody, jeho mírou je aktivita radionuklidu, která vstoupila do těla, tzv. příjem radionuklidu, od něj se odvozuje tzv. úvazek

dávkového ekvivalentu, což je dávkový ekvivalent, který člověk obdrží od radionuklidu během doby jeho pobytu v těle, pro jednotlivé radionuklidy jsou roční limity různé, podle toho, jak velký úvazek dávkového ekvivalentu odpovídá jednotce aktivity přijatého radionuklidu.

Základní limity ozáření – limity se vztahují na součet efektivních dávek ze zevního ozáření ve specifikovaném období a na úvazek z vnitřního ozáření v témže období. V souladu s vyhláškou č. 307/2002 Sb. o požadavcích na zajištění radiační ochrany je součástí povolovacího procesu provozu jaderného zařízení schválení limitů a podmínek bezpečného provozu. Tyto základní limity jsou uvedeny v tabulce 1 (22).

Tab.1: Základní limity dle vyhlášky č.307/2002 Sb. o radiační ochraně (22)

| | Limity pro pracovníky | Obecné limity |
|------------------------------------|---|--|
| Efektivní dávka | 100 mSv za 5 let 1) Max. 50 mSv za rok | 5 mSv za 5 let 1) Max. 1 mSv za rok |
| Roční ekvivalentní dávka | | |
| Oční čočka | 150 mSv | 15 mSv |
| Kůže (průměr v 1 cm ²) | 500 mSv | 50 mSv |
| Ruce, nohy | 500 mSv | |

1) za 5 po sobě následujících let

Stochastické účinky – jsou takové, u nichž s dávkou roste míra účinku. Jakékoliv ozáření má tedy nenulovou pravděpodobnost vzniku. Příklad: nádory indukované ozářením a genetické změny projevující se v následné generaci u dětí ozářených rodičů (6).

Deterministické účinky – jsou takové, kdy účinek roste s růstem obdržené dávky záření. Tyto účinky lze vyloučit, nebude – li překročena určitá prahová hodnota. Např. akutní nemoc z ozáření nebo radiační poškození kůže (6).

Akutní nemoc z ozáření (ANO) – je charakterizována jako poškození organismu jednorázovou dávkou ionizujícího záření vyšší než 0,7 Gy. ANO zahrnuje tři základní formy, jejichž výskyt je závislý na absorbované dávce ionizujícího záření. Jsou to dřeňový syndrom (dávka 0,7 – 10 Gy), gastrointestinální (dávka 10 – 100 Gy) a nejhorší forma neurovaskulární syndrom (dávka 100 Gy a více) (6).

2. Jaderná energetika v současnosti z pohledu radionuklidů

Jaderná energie je energie, kterou je možno získat z řízených jaderných reakcí a označení pro oblast technologie zabývající se jejím využitím. Pro mírové účely se v současnosti průmyslově využívá řízené štěpné reakce uranu nebo plutonia. Nejvýznamnějším využitím jaderné energie je výroba elektrické energie v jaderných elektrárnách (17).

Ve světě je nyní v provozu 443 jaderných bloků ve 30 státech s celkovým instalovaným výkonem 369 588 MWe. Mezi ně patří i šest bloků v České republice. A to čtyři bloky v JE Dukovany a dva bloky v JE Temelín. Jejich celkový instalovaný výkon představuje 3 760 MWe. Dalších 28 nových bloků je v současné době ve výstavbě. V loňském roce byly uvedeny do provozu dva bloky v Japonsku, po jednom v Jižní Korei, Ukrajině a Indii. Naopak odstaven byl jeden blok v Německu a Švédsku. V některých zemích, např. ve Francii či v Belgii, se jaderná energetika podílí na celkové výrobě elektrické energie více než 60 %. V EU je v provozu 148 jaderných bloků ve 13 zemích. V roce 2004 vyrobily členské země EU 34 % veškeré elektřiny v jaderných elektrárnách (1).

2.1 Princip jaderné elektrárny

Jaderná elektrárna je zařízení, sloužící k přeměně vazebné energie jader těžkých prvků na elektrickou energii. Skládá se obvykle z jaderného reaktoru, parní turbíny s elektrickým generátorem a z mnoha dalších pomocných provozů. V principu se jedná o parní elektrárnu, ve které se energie získaná jaderným reaktorem používá k výrobě páry v parogenerátoru. Tato pára pohání parní turbíny. Dnes průmyslově nejrozšířenější jsou tepelné reaktory (16).

Srdcem jaderné elektrárny je jaderný reaktor. Jde o zařízení, v němž probíhá řízená štěpná řetězová reakce. Impulsem pro štěpení jádra atomu je interakce jádra s neutronem. Při štěpení jádra uranu, které se stalo základem jaderné energetiky, se vždy uvolní i dva až tři neutrony; ty pak mohou narazit do dalších jader uranu a vyvolat další štěpení. Vzniká řetězová štěpná reakce jádra, kterou může obsluha elektrárny řídit zachycením přebytečných neutronů (16).

K hlavním komponentům, které umožňují provoz reaktoru, patří aktivní zóna s palivem, moderátor, absorbátor a chladivo (16).

Aktivní zóna dnešních energetických reaktorů představuje soubor uranových palivových článků uspořádaných konstrukčně v prostoru tak, aby umožňovaly průběh řízení štěpné řetězové reakce a současně odvod uvolněné tepelné energie. V aktivní zóně reaktoru je uloženo jaderné palivo. Jaderné palivo je ve tvaru válečků (pelet). Ty jsou uloženy v palivových proutcích sdružených do palivových souborů (kazet). Energetický obsah jedné pelety (v reaktoru jsou jich řádově desítky milionů) nahradí 1,6 t hnědého uhlí. Tato energie se z pelety získává v průběhu 4 let. Palivové proutky jsou chráněny povlakem ze speciální slitiny, nejčastěji na bázi zirkonia. Tento povlak zaručuje předání tepla z paliva chladivu a zároveň nepropustí radioaktivní štěpné produkty.

Štěpící materiál vyžaduje neustálé ochlazování tak, aby nedošlo k roztavení povlaku jaderného proutku, úniku štěpných produktů a aby byla zajištěna bezpečnost reaktoru. To zajišťuje chladivo, které odvádí teplo tam, kde ho lze využít. Jako chladivo se

nejlépe osvědčuje obyčejná voda, těžká voda, oxid uhličitý, helium, sodík a některé soli nebo slitiny.

K nastartování reaktoru se používá vnější neutronový zdroj. Pravděpodobnost, že při svém letu neutron rozštěpí jádro izotopu ^{235}U je malá, spíše se při srážce s ním jen odrazí, aniž by předal část své velké energie. Je třeba ho zpomalit. Látkou, která neutrony zpomaluje, je tzv. moderátor. Moderátorem bývá u reaktoru, kde štěpení obstarávají pomalé neutrony, nejčastěji voda, ale také grafit nebo těžká voda. U reaktorů, které pracují na bázi rychlých neutronů, moderátor chybí.

Živelnému štěpení zabraňuje tzv. absorbátor, který zachycuje přebytečné neutrony. Absorbátor se do aktivní zóny vkládá také ve formě tyčí, podobně jako palivo. Výkon reaktoru se reguluje výškou vytažení nebo zasunutí kazet do aktivní zóny.

Při konstrukci jaderné elektrárny je kladen hlavní důraz na bezpečnost reaktoru. Pro případ okamžitého zastavení reaktoru jsou připraveny havarijní tyče. V nich bývá mnohem vyšší koncentrace absorbátoru než v tyčích regulačních. Havarijní tyče jsou vysunuty nad aktivní zónu, kde je drží elektromagnety. V případě nebezpečí havárie elektrárny havarijní signál vypne elektromagnety a tyče spadnou do aktivní zóny reaktoru a štěpnou reakci zastaví (16).

Reaktor je v podstatě veliká nádoba, nebo soustava nádob, která musí odolávat vysokým tlakům, teplotám a intenzivnímu toku neutronů.

Většina jaderných elektráren je dvouokruhová. Jaderné elektrárny typu VVER, pracující v ČR, se skládají ze dvou uzavřených okruhů: primárního (jaderného) a sekundárního (nejaderného). V primárním okruhu koluje voda, která chladí reaktor. Trubky primárního okruhu procházejí výměníkem, tzv. parogenerátorem, kde ohřívají vodu sekundárního okruhu. Tepelná energie vznikající v reaktoru se tedy pomocí primární vody předává vodě okruhu sekundárního. V reaktoru a v celém primárním okruhu je poměrně vysoký tlak, který zabraňuje vodě ve varu a vzniku páry. Ta proto vzniká až v sekundárním okruhu, kde umožňuje přeměnu tepelné energie na energii pohybovou a elektrickou. K tomu slouží turbosoustrojí, tj. turbína poháněná sytou parou a generátor,

který využívá pohybovou energii vyvinutou turbínou. Pára, jejíž tlak i teplota poklesly, je z turbíny odváděna do kondenzátorů, kde se po ochlazení sráží (kondenzuje) na vodu; ta je vracena zpět do parogenerátoru, čímž se sekundární okruh uzavírá. Chlazení v kondenzátorech, v nichž se páře odebírání již nevyužitelná energie, zajišťuje tzv. třetí chladicí okruh jaderné elektrárny. U jaderných elektráren v ČR jsou jeho nejvýznamnější součástí chladicí věže. Zde se voda ochlazuje odparem (6).

2.2 Zdroje ionizujícího záření v jaderné elektrárně

Při výrobě energie jaderným reaktorem vznikají radionuklidy – štěpením v palivu vznikají štěpné produkty, aktivací neutrony vznikají aktivační produkty v palivu samém, v pokrytí paliva, v konstrukčním materiálu i v chladiči primárního okruhu. Do chladiči primárního okruhu se dostávají radionuklidy různými cestami – aktivací chladiči samotného, difuzí štěpných produktů netěsnostmi v palivu a korozi konstrukčního materiálu a pokrytí článků. Všechny reaktory mají systémy pro záchyt radionuklidů v plynné nebo kapalné formě. Obsah radionuklidů v primárním okruhu se kontinuálně nebo diskontinuálně měří a je jedním z ukazatelů podléhajícím kontrole. Složení radionuklidů v primárním okruhu vypovídá zejména o možných netěsnostech paliva, netěsnosti jsou signalizovány převážně radioizotopy jódu (5).

Obsah radionuklidů – štěpných produktů v reaktoru se nazývá *inventář reaktoru* a ten je závislý na typu reaktoru, typu paliva a jeho stupni vyhoření. Inventář kteréhokoliv ze štěpných produktů lze pro daný typ paliva a reaktoru vypočítat pro kterýkoli čas, po němž daný reaktor pracuje (stupeň vyhoření paliva). Ve vyhořelém palivu, chlazeném nejdříve v bazénu vyhořelého paliva, se pak stávají dominantní dlouhodobé radionuklidy. K celkovému inventáři aktivity radionuklidů přispívají i aktivační produkty, jejichž aktivita i složení závisí na složení konstrukčního materiálu a chladicího média v primárním okruhu. Inventář štěpných produktů je samozřejmě mnohem vyšší než inventáře aktivačních produktů, ovšem s přihlédnutím k původu vzniku aktivačních produktů tyto produkty v kapalných i vzdušných výpustech obvykle převažují (5).

Obecně jsou do ovzduší vypouštěny štěpné produkty ve formě vzácných plynů (izotopy kryptonu a xenonu), dále některé aktivační produkty ve formě plynů (^{14}C , ^{16}N , ^{35}S , ^{41}Ar , ^{75}Se , ^{76}As), tritium, radioizotopy jódu v plynných formách a ve formě aerosolu, aerosolových formách štěpné a aktivační produkty a ve velmi malých aktivitách i transurany. Při běžném dělení vypouštěných radionuklidů na aktivační a štěpné je třeba brát v úvahu i takové radionuklidy, které jsou produktem obou procesů jako např. ^{134}Cs , které vzniká aktivací ^{133}Cs , které je konečným produktem řady ^{133}In vzniklé štěpením. Rovněž vznik transuranů v palivu je poněkud složitější, obvykle jde o záchyt neutronu a následnou radioaktivní přeměnu (5).

Do hydrosféry je vypouštěno zejména tritium, dále pak aktivační a případně i štěpné produkty (5).

2.2.1 Radionuklidy vypouštěné do ovzduší

Do ovzduší jsou především vypouštěny radioaktivní vzácné plyny, vzniklé štěpením. Existuje nejméně 9 radioizotopů kryptonu a 11 radioizotopů xenonu. Většina z nich má velmi krátký poločas přeměny (sekundy až minuty) a stačí se rozpadnout dříve než mohou difundovat z paliva ven. Část radioaktivních vzácných plynů se difúzí dostane mezi palivo a jeho pokrytí, kde tvoří tlak. Pokud se v palivu objeví netěsnost, vzácné plyny se dostávají do chladiwa primárního okruhu. Uvolňování plynů z primárního okruhu u typu tlakovodních reaktorů probíhá kontinuálně kvůli kontrole chemického složení a čištění vody. Tyto plynné výpusti jsou pak vedeny přes filtry a zpožďovací linky, takže aktivity výpustí ve ventilačním komíně se značně sníží o aktivitu krátkodobých radionuklidů. (5).

Významnou část výpustí plynných u některých jaderných elektráren tvoří ^{41}Ar , který vzniká reakcí na stabilním ^{40}Ar , který je obsažen normálně ve vzduchu. Do primárního okruhu se dostává zejména jako nečistota dusíku, používaného pro tlakovodní vody. Reakcí vzniká ^{16}N (poločas rozpadu 7s), který je významný zejména z hlediska externího ozáření pracovníků přímo v jaderné elektrárně (5).

Tritium (^3H) vzniká ternárním štěpením jaderného paliva a neutronovou aktivací boru v primárním okruhu, v některých typech jaderných elektráren též aktivací lithia. V tlakovodních reaktorech je dominantní tvorba tritia z aktivace bóru, který se používá pro kontrolu reaktivity, ve varných reaktorech je bor přítomen v kontrolních tyčích a v reaktorech chlazených plynem je to obvykle přítomností lithia jako nečistoty grafitu. Nejvyšší produkci tritia způsobuje ternární štěpení, to se však děje v palivu a jen malá část se netěsnostmi v pokrytí dostane z paliva do primárního okruhu, předpokládá se, že je to kolem 1%. Nejvýznamnější část tritia, posuzováno z hlediska ochrany před zářením, vzniká u tlakovodních reaktorů aktivací bóru v primárním okruhu. U reaktorů HWR vzniká tritium aktivací deuteria a výpustí tritia do prostředí jsou, na rozdíl od ostatních typů, vážným problémem (5).

Radioizotop uhlíku ^{14}C vzniká u lehkovodních i těžkovodních reaktorů reakcí na jádrech ^{17}O , přítomného v oxidech v palivu na jádrech ^{17}O přítomného v moderátoru. Dále ^{14}C vzniká reakcí na jádrech ^{14}N , přítomném v palivu jako nečistota i na ^{14}N v primárním okruhu. Dalším zdrojem ^{14}C je ternární štěpení.

Radioizotopy jódu vznikají v procesu štěpení. Výtěžek je téměř nezávislý na tom, zda jde o uranové nebo plutoniové palivo. Z hlediska ochrany před zářením jsou významné ^{129}I ($T_{1/2}=1,6 \cdot 10^7\text{r}$), ^{131}I ($T_{1/2}=8,04\text{d}$), ^{132}I ($T_{1/2}=2,3\text{h}$), ^{133}I ($T_{1/2}=21\text{ h}$), ^{134}I ($T_{1/2}=53\text{min.}$) a ^{135}I ($T_{1/2}=6,6\text{h}$), které se ve výpustích vyskytují v plynných formách a ve formě aerosolu. Kromě ^{129}I mají všechny tyto radioizotopy relativně krátké poločasy přeměny, jejich aktivity ve výpustích závisí na počtu netěsností v palivových člancích a na rychlosti úniku chladiva z primárního okruhu a jsou významné zejména z hlediska ozáření personálu jaderné elektrárny. Pro ozáření obyvatelstva v okolí je významný zejména ^{131}I , protože při případném úniku do prostředí se může dostat do potravinového řetězce. ^{129}I je vypouštěn ve velmi malém množství a přispívá do tzv. globální kolektivní dávky (5).

Ve formě aerosolu se vyskytují radionuklidy, které vznikly přímo jako produkt štěpení nebo rozpadem vzácných plynů vzniklých štěpením. Další radionuklidy vznikají

aktivací materiálů přítomných v primárním okruhu buď jako příměs nebo uvolněných korozi konstrukčních materiálů. Aerosoly se utváří při únicích netěsnostmi primárního okruhu. Vzduch, odváděný ventilačními systémy z prostor, kde se radioaktivní aerosoly tvoří, je kontinuálně čištěn mocnými filtračními systémy, v nichž je velká část aerosolů, zejména o větších rozměrech, zachycena. Výpusti aerosolů jsou obecně velmi nízké a radionuklidové složení je unikátní pro každou jednotlivou elektrárnu. V jaderných elektrárnách bývají obvykle nacházeny tyto radionuklidy: ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{76}As , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{124}Sb , ^{125}Sb , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{181}Hf , ^{182}Ta . Výčet samozřejmě není úplný, v pracovním prostředí se mohou vyskytnout i aerosoly radionuklidů s krátkým poločasem přeměny, které se ve výpustech do prostředí již neuplatní (5).

2.2.2 Radionuklidy vypouštěné do vodotečí

Zdroje radionuklidů, které se dostávají do kapalných výpustí jsou, výjma tritia, principiálně stejné jako zdroje radionuklidů, vypouštěných do ovzduší. Tritium je vypouštěno do vodotečí řízeně v aktivitách, odpovídajících předpisům (tzv. limity a podmínky). Objemové aktivity pro přípustné vypouštění tritia v definovaném časovém období, obvykle za 1 rok, se odvozují z optimalizačních studií.

Data o radionuklidovém složení výpustí z jaderných elektráren i celkové vypouštěné aktivity jednotlivých radionuklidů za definované časové období bývají obvykle uvedeny ve zprávách o radiační situaci, vydávaných těmito elektrárnami pravidelně (5).

2.3 Bezpečnost jaderné elektrárny

Jaderná bezpečnost jaderného zařízení jako stav a schopnost jaderného zařízení a osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo nedovolenému úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezovat následky nehod (23).

Potenciální riziko jaderných elektráren spočívá v možnosti ztráty kontroly nad řízením štěpné řetězové reakce a v množství radioaktivních látek nahromaděných v aktivní zóně reaktoru během jeho provozu, zejména v souvislosti s jejich možnou disperzí do životního prostředí v důsledku nedovoleného úniku (5).

2.3.1 Zajištění integrity ochranných bariér jako součást ochrany do hloubky

Izolaci radioaktivních látek obsažených v aktivní zóně energetického reaktoru a zamezení jejich úniku do životního prostředí zajišťuje systém čtyř ochranných technických bariér, jimiž jsou: palivová matrice, pokrytí paliva, primární okruh reaktoru a systém ochranné obálky. Integrita těchto bariér je základním předpokladem bezpečnosti jaderné elektrárny.

Pro komplex technických a organizačních opatření zaměřených na prevenci jejich porušení se v oboru jaderné bezpečnosti vžil mezinárodní název „defence in depth“, neboli ochrana do hloubky. Ochrana do hloubky je strukturovaná do pěti odstupňovaných úrovní. Dojde – li k selhání jedné úrovně, přechází ochranné funkce na další úroveň (5).

- **1. úroveň** – cílem ochranných opatření je prevence selhání provozních systémů, tj. prevence výskytu abnormálního provozu
- **2. úroveň** – dojde-li k selhání 1. úrovně vyvstává přirozená nutnost zajistit potřebnou kontrolu nad vznikem abnormálního provozu
- **3. úroveň** – cílem je zvládnutí málo pravděpodobných nehod, jejichž scénář může být předpokládán, v projektu jsou připravena potřebná technická opatření, aby následky takových stavů byly udrženy v mezích standardní ochrany pracovníků a obyvatelstva. V těchto případech má tato úroveň zajistit dostatečné chlazení aktivní zóny, zatím předejít nepřijatelnému přehřátí paliva, ztrátě integrity jeho povlaku a následnému tavení aktivní zóny. Dnešní tlakovodní energetické reaktory jsou pro tyto případy vybaveny tzv. systémem havarijního chlazení.

- **4. úroveň** – předpokládá, že za určitých velmi málo pravděpodobných okolností mohou nastat případy, kdy opatření prvních tří úrovní nezabrání poškození aktivní zóny, a klade si proto za cíl zabránit úniku štěpných radioaktivních produktů do životního prostředí. Komponenty primárního okruhu se za tím účelem umísťují do hermetických prostorů ochranné obálky představované u moderních jaderných elektráren kontejnmentem. Opatření této úrovně mají současně chránit ochranou obálku před jejím porušením, neboť ochranná obálka představuje poslední bariéru proti případnému úniku radioaktivních látek do životního prostředí. Ochranná obálka je dimenzována s dostatečnou rezervou tak, aby si zachovala svou integritu i v podmínkách, kdy se veškerá tepelná a tlaková energie primárního chladiva okruhu uvolní do jejího vnitřního prostoru. Pro účinné snížení tlaku parovzdušné směsi uvnitř ochranné obálky po havárii se ztrátou chladiva je v prostoru obálky umístěn vícenásobně zálohovaný sprchový systém. Sprchování tohoto prostoru způsobuje kondenzaci páry a přispívá k vymývání a usazování uvolněných radioaktivních produktů uvnitř ochranné obálky. Jiným příkladem čtvrté úrovně jsou rekombinátory vodíku umístěné ve vnitřním prostoru ochranné obálky, jež mají včasným spalováním vodíku vznikajícího radiolýzou vody a chemickými reakcemi roztaveného paliva s chladivem zabránit vzniku zápalné koncentrace vodíku, a tím i jeho možné explozi.
- **5. úroveň** – bezpečnostní opatření představují tzv. vnitřní a vnější havarijní plány, které mají ochránit pracovníky a okolní obyvatelstvo v případech, kdy všechna předchozí opatření selhala, tj. kdy došlo k vážnému poškození aktivní zóny reaktoru a následné ztrátě integrity ochranné obálky (5).

2.4 Jaderné havárie a nehody

Jako každá lidská činnost i používání zdrojů ionizujícího záření je spojeno s možností vzniku nehod i havárií. Je jen málo oblastí lidské činnosti, kde byla zároveň s rozvojem aplikací věnována taková pozornost zajištění jejich bezpečnosti z hlediska ochrany zdraví, jako je používání zdrojů ionizujícího záření. Přesto však nelze absolutně vyloučit, že k neplánovanému ozáření lidí dojde. Likvidace radiačních nehod i havárií vyžaduje velmi rychlé operativní rozhodování vedoucí k realizaci opatření na ochranu zdraví pracovníků a obyvatel a opatření na ochranu majetku.

Neplánované ozáření či rozptyl radioaktivních látek je mimořádnou situací, vznikající najednou překvapivými a nepředpokládanými mechanismy a končící velmi různorodými následky. Základní rozdělení mimořádných situací je rozdělení na radiační nehody a radiační havárie.

- **Radiační nehodou** rozumíme událost, která má za následek nepřipustné uvolnění radioaktivních látek nebo ionizujícího záření nebo nepřístupné ozáření osob (23).
- Jako **radiační havárii** označujeme radiační nehodu, která vyžaduje opatření na ochranu obyvatelstva a životního prostředí (23).

Pokud nebereme v úvahu jadernou pumu, je nejmohutnějším zdrojem ionizujícího záření jaderný reaktor. Současně je zařízením obsahujícím největší množství různých radionuklidů.

Vznik závažné havárie s únikem radionuklidů do životního prostředí může mít mnoho příčin. Ať už se jedná o úplné selhání bezpečnostních opatření a jistících technických prvků, dále hazardní způsob řízení prací v objektu, úplné selhání lidského faktoru, a to jak obsluhy tak i řídicích pracovníků. Vněobjektovými příčinami havárie může být zemětřesení, pád letadla na objekt, záměrná teroristická akce nebo cílená válečná akce.

Existují 3 stupně radiačních událost (21):

- **Mimořádná událost 1. stupně** má lokální charakter, radiační událost je ohraničena na dané pracoviště a je řešena v rámci obsluhy zařízení. Při vzniku tohoto druhu události nedochází k uvolnění radioaktivních látek do životního prostředí.
- **Mimořádná událost 2. stupně** je definována únikem radioaktivních látek do životního prostředí bez nutnosti uplatňovat významná opatření pro ochranu obyvatel.
- **Mimořádná událost 3. stupně** vede k takovému uvolnění radioaktivních látek do životního prostředí, že je nutné uplatnit ochranná opatření pro ochranu obyvatel podle havarijního plánu daného okresu. Tento stupeň událostí je radiační havárií.

Poruchy na jaderných zařízeních jsou klasifikovány stupnicí **INES (The International Nuclear Event Scale – mezinárodní stupnice jaderných událostí)**, kterou zavedla Mezinárodní agentura pro atomovou energii, podle závažnosti takto (2):

Poruchy (incidents)

0 - Událost pod stupnicí (zero level event below scale)

- situace, při kterých nejsou překročeny provozní limity a podmínky a které jsou bezpečně zvládnuty vhodnými postupy

1 - Odchylka (anomaly)

- Funkční nebo provozní odchylky od ústředně povolených limitů. Nepředstavují riziko, ale odhalují nedostatky bezpečnostních opatření. Mohou být způsobeny selháním zařízení, chybou obsluhy nebo nevhodným provozním postupem.

2 - Porucha (incident)

- Technické poruchy nebo odchylky, které neovlivňují bezpečnost elektrárny přímo nebo bezprostředně, ale mohou vést k následnému přehodnocení bezpečnostních opatření.

Příklad:

- Mihama (Japonsko) 1991

3 - Vážná porucha (serious incident)

- Únik radioaktivity mimo elektrárnu nad povolené limity. Následkem je individuální dávka pro nejzasaženější skupinu obyvatel v okolí elektrárny řádově desetiny milisievertů (tj. zlomky limitů povolených pro veřejnost). Vně elektrárny nejsou nutná žádná zvláštní opatření.
- Vysoká úroveň radioaktivity nebo zamoření uvnitř elektrárny z důvodů selhání zařízení nebo provozních poruch. Personál je nadměrně ozářen (jednotlivé dávky překračují limit 50 mSv).

Příklad:

- Vandellos (Španělsko) 1989

Havárie (accidents)

4 - Havárie s účinky v jaderném zařízení (accident mainly in installation)

- Malý únik radioaktivity mimo elektrárnu, jehož následkem je individuální ochrana.
- Potřeba havarijních opatření mimo elektrárnu nepravděpodobná, s výjimkou kontroly potravy.
- Aktivní zóna reaktoru je částečně poškozena tavením nebo mechanicky. Ozáření pracovníků elektrárny může vést k okamžitým zdravotním následkům (řádově sieverty).

Příklad:

- Jaslovské Bohunice (Československo) 1977

5 - Havárie s účinky na okolí (accident with off-site risks)

- Únik radioaktivních štěpných produktů (100 až 10 000TBq jodu ^{131}I nebo jiných, podobně biologicky významných radioizotopů) mimo elektrárnu.
- Částečné zavedení opatření podle místních havarijních plánů (např. evakuace a ukrytí), aby se omezila pravděpodobnost zdravotních následků.
- Velká část aktivní zóny je poškozena tavením nebo mechanicky.

Příklad:

- Windscale (VB) 1957
- Three Mile Island (USA) 1979

6 - Závažná havárie (serious accident)

- Únik radioaktivních štěpných produktů (100 až 10 000 TBq jodu ¹³¹ nebo jiných, podobně biologicky významných radioizotopů) mimo elektrárnu.
- K omezení zdravotních následků je nutné úplné použití místních havarijních plánů.

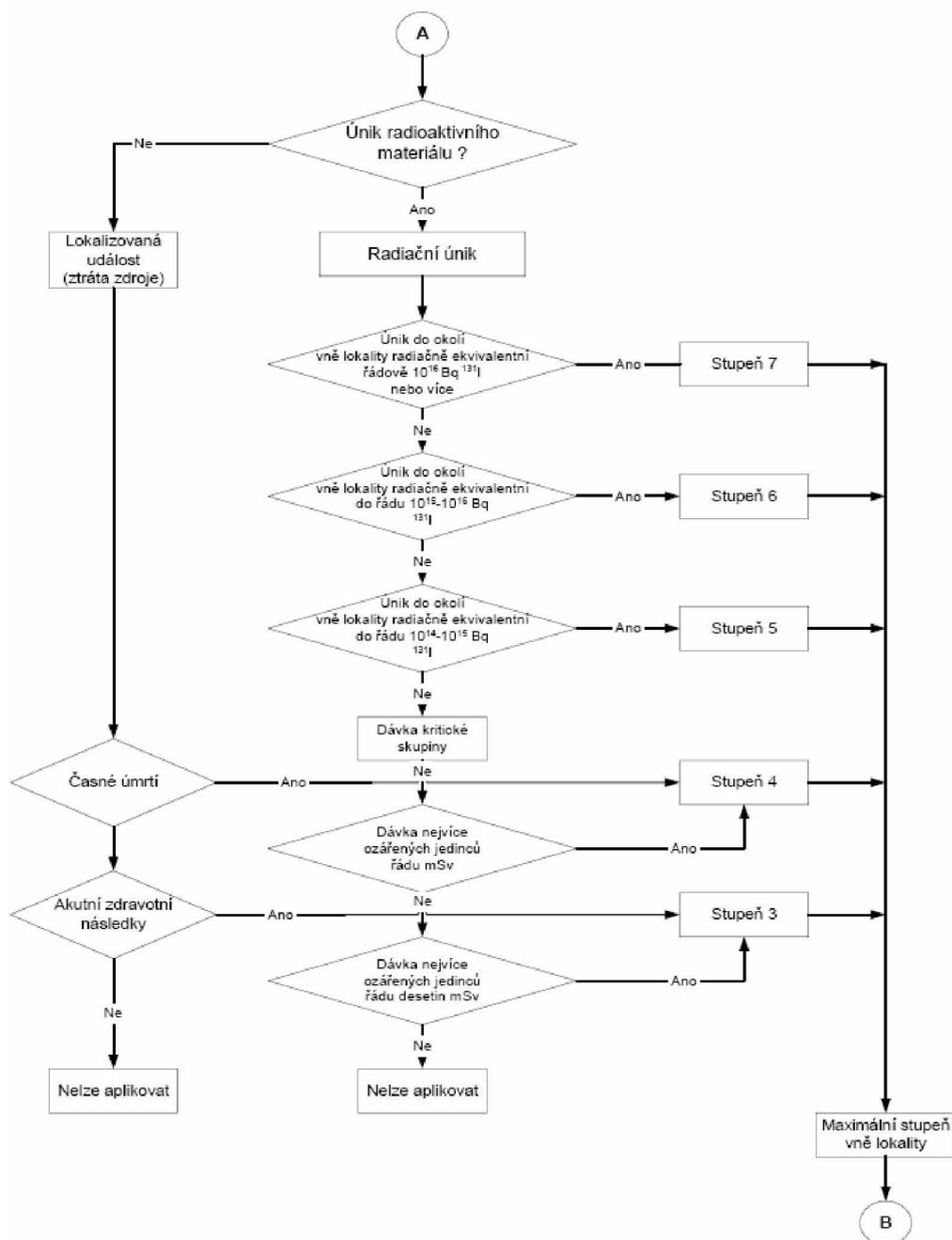
7 - Velká havárie (major accident)

- Únik velkého množství radioaktivních látek z aktivní zóny reaktoru mimo elektrárnu (řádově více než 10 000 TBq jodu ¹³¹ nebo jiných, podobně biologicky významných radioizotopů).
- Možnost okamžitých zdravotních následků. Pozdní zdravotní následky se mohou objevit na velkém území, přesahujícím plochu elektrárny a jejího okolí.
- Dlouhodobé následky pro životní prostředí.

Příklad:

- **Černobyl (SSSR) 1986**

Obr.1: Postup klasifikace dle INES (10)



Fáze radiační havárie

Průběh radiační havárie se často dělí do tří fází: předúnikové, únikové a poúnikové. Předúniková fáze může trvat od několika hodin do několika dnů, trvání únikové fáze se pohybuje v rozmezí hodin až dnů, poúnikové fáze se pohybuje v časovém rozmezí týdny až roky v závislosti na typu úniku. Ochranná opatření přijímána za účelem odvrácení ozáření se dělí na preventivní, neodkladná a následná, zhruba odpovídají jednotlivým fázím havárie. V časných fázích havárie převládá ozáření z oblaku. Značné dávky ze zevního ozáření může způsobit depozice radionuklidů emitujících záření gama na povrchu terénu. Později bude příspěvek jednotlivých cest ozáření záviset na radionuklidovém složení úniku. Únik radioizotopů jódu a dalších halogenů může mít za důsledek kontaminaci potravin. Depozice radionuklidů s delším poločasem, které emitují záření gama na povrchu terénu je významná pro zevní ozáření. Úvahy o provedení určitého ochranného opatření je třeba založit pouze na cestách ozáření a dávkách, které mohou být opatřením ovlivněny. Při radiační havárii mají význam zejména opatření snižující inhalaci z oblaku.

V předúnikové fázi havárie je většina dostupných informací o možném radionuklidovém složení úniku a jeho velikosti (zdrojový člen) a o pravděpodobném vývoji havárie a jejich následcích zatížena značnou nejistotou. Informace jsou založeny prakticky výhradně na hodnocení stavu technologie v daném zařízení. Rozhodování o ochranných opatřeních bude tedy vycházet ze stavu zařízení a předpovědi jeho změn, na dostupné informaci o radiační situaci v areálu na meteorologických datech. Pro hrubý odhad dávek se použije odhad rychlosti a trvání úniku a jeho pravděpodobné složení. Na základě tohoto odhadu lze zdůvodnit rozhodnutí o preventivních opatřeních, která mohou být zahájena, pokud to čas dovoluje, ještě před začátkem úniku. V průběhu času bude přibývat informací z monitorování radionuklidů, které se uvolnily do hermetických prostor nebo ochranné obálky.

V únikové fázi jsou již dostupná data charakterizující zdrojový člen získaná monitorováním a nebo v hermetických prostorech, či v ochranné obálce. Brzy také musí být dostupná data z monitorování v okolí zařízení (např. dávkové příkony, celková alfa a

beta aktivita, později koncentrace jednotlivých radionuklidů v ovzduší a postupně koncentrace radionuklidů v dalších vzorcích životního prostředí). V této fázi je dominantní z inhalace a zevního ozáření z oblaku. V únikové fázi se setkáváme s vyššími dávkovými příkony (jak zevního ozáření, tak v důsledku vnitřní kontaminace) než ve fázi poúnikové.

V poúnikové fázi se očekává již poměrně úplný přehled o radiační situaci v dotčených oblastech. Dominantní část pokračujícího ozáření je způsobena z deponitu a vnitřní kontaminací po požití radionuklidů v potravinách. Méně významné je ozáření z inhalace nesuspendovaných radionuklidů. Rozhodnutí o povaze a rozsahu ochranných opatření mohou tudíž být založena na výsledcích monitorování povrchové kontaminace terénu a obsahu radionuklidů v různých složkách životního prostředí.

3. Významné radionuklidy při havárii jaderné elektrárny

Pokud nebereme v úvahu jadernou pumu, je nejmohutnějším zdrojem ionizujícího záření jaderný reaktor. Současně je zařízením obsahujícím největší množství různých radionuklidů (kapitola 2.2). V jaderném reaktoru vznikají štěpné produkty (zhruba 300 různých radionuklidů), které jsou radioaktivní a mají poločasy rozpadu obvykle od zlomků sekund do stovek let. Další radioaktivní jádra vznikají záchytem neutronů. Ze štěpného paliva tak vznikají transurany (př. ^{239}Pu , $T_{1/2}=25$ tisíc let) a ve všech látkách a materiálech v dosahu neutronů stovky dalších radionuklidů. Mezi nejvýznamnější radionuklidy, které tedy vznikají při provozu jaderné elektrárny, patří:

- štěpné produkty, tj. vzácné plyny ^{85}Kr a ^{133}Xe , izotopy jódu ^{133}I a ^{131}I , Sr, ^{134}Cs a ^{137}Cs
- aktivační korozní produkty, tj. ^{54}Mn , ^{51}Cr , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{65}Zn
- aktivační produkty, tj. ^3H , ^{14}C
- transurany, zejména ^{239}Pu

Při havárii jaderné elektrárny únik radionuklidů do životního prostředí představuje značné ohrožení. Radionuklidy můžeme rozdělit na radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu (př. I^{131}) a na radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu (př. ^{134}Cs , ^{90}Sr).

Radionuklidy s krátkým poločasem se rozpadnou od několika sekund maximálně do několika měsíců, představují tedy ohrožení v okamžiku jejich úniku až do několika měsíců po úniku. Radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu způsobují dlouhodobé kontaminace. Jedním z nejvýznamnějších radionuklidů s dlouhým poločasem rozpadu je ^{137}Cs ($T_{1/2}=30\text{let}$). To znamená, že po úniku do životního prostředí zamoření klesne na přijatelnou mez po 100 až 300 letech.

Při havárii jaderné elektrárny vzniká radioaktivní spad, který se dělí na lokální a globální. Lokální spad obsahuje částice do velikosti 20-40 mikrometrů. Tyto částice sedimentují v závislosti na své velikosti. Například partikule o velikosti 1 mm vypadávají v bezprostřední blízkosti epicentra, kdežto částice o velikosti kolem 40 mikrometrů sedimentují až 24 hodin po výbuchu. Globální spad obsahuje částice 20 mikrometrů a menší, které rychle vystoupají do stratosféry a jsou unášeny větrnými proudy do velkých vzdáleností. Po několika dnech, týdnech či měsících pak mohou vypadnout v závislosti na větrných proudech kdekoliv na Zemi. Tento druh spadu může způsobit pouze vyšší incidenci stochastických účinků v postižené populaci. Vysoké vzdušné výbuchy dosahující stratosféry netvoří lokální spad (8).

Z biologického hlediska je důležité chemické složení radionuklidů obsažených v radioaktivním mraku.

- Nevstřebatelnými nebo málo vstřebatelnými jsou těžké kovy, lanthanoidy a transurany.
- Středně dobře vstřebatelné jsou alkalické prvky jako jsou stroncium, bariem a vápník.
- Velmi dobře vstřebatelné jsou radionuklidy cesia, jódu a vodíku.

Absorbované radionuklidy mohou být v organismu distribuovány povšechně (např. vodík, sodík a cesium), anebo se můžou selektivně inkorporovat do afinitních tkání. Příkladem může být afinita jódu ke štítné žláze, stroncia ke kostem a lanthanoidů s transurany ke kostem a játrům. Snížení aktivity vstřebaných radionuklidů je závislé na jejich poločase rozpadu a rychlosti eliminace radionuklidů z organismu určeného biologickým poločasem (8).

3.1 Kontaminace radionuklidy

Radionuklidy, které způsobují ozáření, se k člověku dostávají různými expozičními cestami. Kontaminací se rozumí přítomnost radionuklidu na povrchu nebo uvnitř organismu. Kontaminaci dělíme na zevní (externí) a vnitřní (interní).

Zdrojem kontaminace mohou být přírodní radionuklidy. Zvláště nebezpečné jsou kontaminanty životního prostředí uvolněné za mimořádných podmínek a vypadlé v radioaktivní stopě při havárii jaderného reaktoru jako jsou ^{131}I , ^{132}Te , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{103}Ru , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{144}Ce , ^{144}Pr , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{65}Zn , ^{60}Co a ^{239}Pu aj. Rozhodující složkou spadu bývá směs štěpných produktů tvořená převážně β a γ zářiči. Radionuklidy, nacházející se v ovzduší a radionuklidy, které se z ovzduší usadily na povrchu země, vegetace, budov, komunikaci apod. ozařují tedy člověka zevně. Velikost ozáření závisí na druhu radionuklidu – přesněji na celkovém množství uniklých radionuklidů, složení směsi uniklých radionuklidů, energii, se kterou jsou radionuklidy do prostředí uvolňovány a také na mechanismu jejich šíření.

Radionuklidy z ovzduší jsou ale člověkem také vdechovány a jsou zdrojem vnitřního ozáření. Dalším zdrojem vnitřního ozáření jsou radionuklidy, které se dostaly do potravního řetězce a jsou člověkem požitý. Z hlediska časového sledu po jaderné havárii jde nejdříve o radionuklidy, které z ovzduší vypadávají ve formě suchého nebo mokrého spadu s deštěm do vody a na povrch vegetace, a člověkem mohou být požitý s pitnou vodou nebo s nedostatečně očištěnou zeleninou či ovocem. Později se radionuklidy z povrchu vegetace dostávají k hospodářskému zvířectvu a odtud zpět

k člověku přes mléko nebo maso. Z půdy se kořenovou cestou dostávají některé radionuklidy do vegetace a tak opět kolují v potravním řetězci. Transfer radionuklidů v potravních řetězcích opět závisí na druhu radionuklidu a jeho fyzikální a chemické formě, která se však může během času měnit a tím se může měnit i dostupnost radionuklidů pro přestup z půdy do rostlinstva. V některých ekosystémech je doba, po níž radionuklidy v potravinových řetězcích kolují, velmi dlouhá (9).

Při těžké havárii jaderného reaktoru, při které by došlo k destrukci všech ochranných bariér (povlak paliva, primární okruh, hermetická zóna, tak jak k tomu došlo v Černobylu, kde navíc třetí bariéra neexistovala), se nejnáze do ovzduší dostávají radioaktivní vzácné plyny, které jsou zdrojem zevního ozáření a v menší míře vnitřního ozáření inhalační cestou. Dále se uvolňují těžké radionuklidy, z nichž nejvýznamnější jsou radionuklidy jódu. Ty se dostávají k člověku všemi uvedenými cestami a protože jód je biogenní prvek, který se kumuluje ve štítné žláze člověka i všech savců, jsou z hlediska expozice člověka jako radioizotopy nejvíce sledovány (9).

Z dalších těžkých radionuklidů jsou důležité radioizotopy cézia. Césium je homologem draslíku, který je obsažen ve všech živých organismech. Pro dlouhý poločas rozpadu (přibližně 30let) je tento radionuklid z hlediska ozáření člověka rovněž velmi významný (9).

Z netěžkých radionuklidů je pak velmi nebezpečné radiostroncium, to navíc s kontaminovanou vodou odtéká do vodních toků a moře a přes plankton se zabudovává do ryb, které představují značné riziko pro člověka (9).

Důležité cesty expozic lidí při nehodě nebo havárii jsou:

- Zevní ozáření z poškozeného zařízení nebo zdroje mimo kontrolu
- Zevní ozáření z mraku uvolněného radioaktivního materiálu
- Zevní ozáření z depozitu radioaktivních látek na povrchu terénu

- Kontaminace povrchu těla a oděvu
- Požití potravy a vody kontaminované radioaktivními látkami (5)

3.2 Cesty vstupu radioaktivních látek

Do organismu se radioaktivní látky dostávají různými způsoby. Radionuklidy mohou být vdechovány se vzduchem – tzv. inhalační cesta, požitím kontaminované vody či potravin – tzv. ingesce, ale také přes poraněnou kůži a sliznicemi.

3.2.1 Inhalační kontaminace radioaktivních látek

Radionuklidy jsou vdechovány ve formě radioaktivních plynů a aerosolů se vzduchem. V závislosti na velikosti částic aerosolů radionuklidy pronikají do jednotlivých oddílů dýchací soustavy. Nejdříve do oddílu nasofaryngálního, pak tracheobronchiálního a nakonec do oddílu plicního, kde se zadrží jen asi 10 až 15% vdechnutých radioaktivních látek. Přibližně polovina vdechnutých radioaktivních látek se zachytí v horních dýchacích cestách, ciliárním mechanismem jsou doprovázeny do ústní dutiny, odkud po spolknutí kontaminují zažívací trakt.

Rozpustné sloučeniny radionuklidů se z plicních alveolů vstřebávají do krevního nebo lymfatického řečiště plic a rozdělí se v tělesných orgánech. Část radioaktivních látek je fagocytována a deponuje se v hrudních lymfatických uzlinách a retikuloendoteliálním systému. Jedná se o nerozpustné sloučeniny a velké částice, jejich biologický poločas v plicích je 120 dnů. Zářením vyvolaná obliterace kanálků v tracheobronchiálních lymfatických uzlinách může vést k chronickému intersticiálnímu edému v plicích a k difúzní fibróze a jizvení plicní tkáně.

3.2.2 Kontaminace zažívacími cestami

Do gastrointestinálního traktu (GIT) přicházejí radionuklidy přímo spolknutím (ingescí) kontaminované vody, jiných tekutin a potravin, nebo polknutím radioaktivních částí přesunutých ciliárním mechanismem a vykašláním z horních dýchacích cest do úst. Přibližně polovinu vdechnutých radionuklidů tímto způsobem přesuneme z plicního do zažívacího traktu. Rozpustné radionuklidy jsou resorbovány převážně v tenkém střevě a jen menší část v horním oddílu tlustého střeva. Z důležitých štěpných produktů se prakticky úplně vstřebávají ze zažívacího ústrojí radiojód a radiocesium, radioaktivní stroncium a barium se vstřebává ze 60%. Vzácné zeminy, které představují největší část štěpných produktů se z trávicího traktu prakticky nevstřebávají a procházejí celou soustavou a tím představují nejvyšší riziko pro střevní sliznici.

Z ostatních částí GIT se radionuklidy prakticky nevstřebávají. Vstřebávání je výrazně ovlivněno rychlostí pasáže, nejintenzivnější je do 2 hodin po spolknutí a končí za 3 až 6 hodin. Nevstřebatelné radioaktivní látky se vyloučí přirozenou cestou stolicí během několika dnů. Kritickým úsekem GIT po ingesci radioaktivních částic je proto tlusté střevo, kde je stolice po několik dnů zahušťována než odejde přirozenou cestou mimo organismus. Radiační poškození sliznice má charakter postradiační kolitidy.

Tab.2: Nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin pro radiační mimořádné situace dle vyhlášky 307/2002 Sb. o radiační ochraně (22)

| Radionuklid | Nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin a) pro radiační mimořádné situace [Bq/kg] nebo [Bq/l] | | | | |
|---|--|------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------|
| | Potraviny pro děti b) | Mléko a mléčné výrobky | Pitná voda a tekuté potraviny | Minoritní potraviny c) | Ostatní potraviny |
| Izotopy stroncia, zejména ^{90}Sr | 75 | 125 | 125 | 7500 | 750 |
| Izotopy jódu, zejména ^{131}I | 150 | 500 | 500 | 20000 | 2000 |
| Izotopy plutonia a transuranových prvků, emitující záření alfa, zejména ^{239}Pu a ^{241}Am | 1 | 20 | 20 | 800 | 80 |
| Všechny ostatní nuklidy s poločasem přeměny delším než 10 dní, zejména ^{134}Cs a ^{137}Cs , kromě ^3H , ^{14}C , ^{40}K . | 400 | 1000 | 100 | 12500 | 1250 |

- a) Nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin se u koncentrovaných nebo sušených potravin vztahují na výsledný produkt, který je určen pro přímou konzumaci (tj. např. po zředění).
- b) Potravinami pro děti se rozumí všechny potraviny, které jsou určeny zejména k výživě kojenců mezi 4. až 6. měsícem života a splňují nutriční požadavky pro tuto věkovou kategorii dětí.
- c) Minoritní potraviny – tzn. potraviny z přírodních ekosystémů.

Tab.3: Nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin pro přetrvávající ozáření po černobylské havárii dle vyhlášky 307/2002 Sb o radiační ochraně (22)

| radionuklid | nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin a) pro přetrvávající ozáření po černobylské havárii [Bq/kg] nebo [Bq/l] | | | | |
|----------------------------------|---|------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------|
| | potraviny pro děti b) | mléko a mléčné výrobky | pitná voda a tekuté potraviny | minoritní potraviny c) | ostatní potraviny |
| Sumární aktivita Cs-134 a Cs-137 | 370 | 370 | 600 | 6000 | 600 |

Nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin se u koncentrovaných nebo sušených potravin vztahují na výsledný produkt, který je určen pro přímou konzumaci .

3.2.3 Vstup neporušenou a poraněnou kůží

Intaktní kůží radionuklidy kromě tritia a jodu ve formě par nebo roztoků nepronikají. Poškozenou kůží pronikají radionuklidy do krevního řečiště a míst depozice. Nerozpustné sloučeniny zůstávají v ráně a při vysoké aktivitě mohou komplikovat hojení. Radioaktivní látky jsou vlastně cizím tělesem v ráně a kromě vyvolání obvyklé reakce na cizí těleso mohou negativně ovlivnit průběh hojení emitovaným ionizujícím zářením. Přístupné sliznice ke vstřebávání radionuklidů jsou sliznice dutiny nosní a dutinyústní.

3.2.4 Kombinovaná radiační poškození (mixty)

V případě, že radiační poškození organismu doprovází další poranění způsobené tlakovou vlnou nebo tepelným zářením, hovoříme o kombinovaném radiačním poško-

zení. Uvedené poškozující faktory výrazně zhoršují prognózu úspěšné léčby akutní nemoci z ozáření (ANO) (4).

3.3 Radioaktivní jód ^{131}I

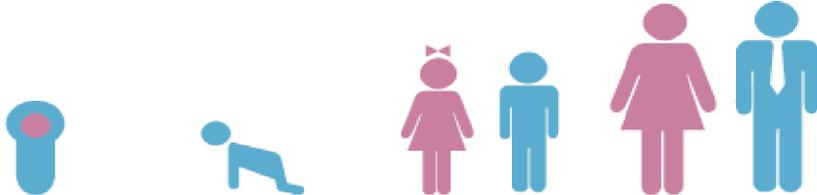
Významným radionuklidem při havárii jaderné elektrárny, který představuje největší zdravotní riziko bezprostředně po havárii je radioaktivní jód ^{131}I , jehož poločas rozpadu je 8,04 dne. Jde o těkavou látku s vysokou pohyblivostí v životním prostředí. Je dobře rozpustný ve vodě a téměř 100% vstřebatelný. Radioaktivní jód je tedy významnou součástí radioaktivního mraku uvolněného z havarovaného reaktoru. Radioaktivní izotopy jódu, zejména ^{131}I , přecházejí v případě vdechnutí nebo požití do vnitřního prostředí organismu a jsou vychytávány štítnou žlázou, kde se mohou hromadit ve vysoké koncentraci a vést k jejímu poškození. Vzhledem ke specifickému vychytávání jódu ve štítné žláze, stává se tedy kritickým orgánem jak pro akutní (hypofunkce), tak i pozdní účinky ozáření (nádory). Je hlavní příčinou velkého zvýšení výskytu rakoviny štítné žlázy v jaderné éře a prakticky jedinou příčinou výskytu tohoto závažného onemocnění u dětské populace. ^{131}I se usazuje také ve vaječnicích. Biologický poločas je 138 dní. Dostává se k člověku hlavně v mléce. Jód dosahuje maximální aktivity v mléce po 3 dnech od jeho uložení v píci.

Aby se předešlo jeho hromadění a následnému poškození zdraví, užívají se tablety s jódem neradioaktivním ve formě jodidu draselného (KI), který nasytí štítnou žlázu a nedovolí (zabrání) hromadění jódu aktivního. Tento proces, který je namířen proti působení radioaktivního jódu se nazývá jodová profylaxe. Podání 50 – 300 mg stabilního jódu ve vhodné formě, např. jodidu draselného poskytuje téměř 100% ochranu, uskuteční-li se 1-6 hodin před očekávanou dobou příjmu. Podá – li se KI až po příjmu radioaktivního jódu, účinnost se snižuje s prodlužováním intervalu a dosáhne méně než 50% při podání profylaktické dávky až 6 hodin po příjmu kontaminantu. Je však třeba myslet na to, že šíření radioaktivního mraku z havarovaného reaktoru může

pokračovat i několik dní a podání KI může být v takových případech zdůvodněno i řadou hodin po prvním kontaktu s radioaktivním mrakem (5,8).

Dávkování jodidu draselného(KI)

- Dospělí včetně těhotných žen a kojících matek: 2 tablety po 65 mg (130mg)
- Děti v rozmezí 1 měsíce až 3 let : ½ tablety po 65mg (32mg)
- Novorozenci do 1 měsíce: ¼ tablety po 65 mg (16mg) (5)



| Novorozenci do 1 měsíce | Kojenci a děti do 3 let | Děti od 3 do 12 let | Osoby starší 12 let |
|------------------------------------|--|------------------------------------|------------------------------------|
| ¼ tablety 16 mg KI | ½ tablety 32 mg KI | 1 tableta 65 mg KI | 2 tablety 130 mg KI1 |

3.4 Radioaktivní césium ^{134}Cs , ^{137}Cs

Mezi významné dlouhodobé radionuklidy patří zejména ^{137}Cs , jehož poločas rozpadu je 30 let. Než se jeho hodnota sníží na zanedbatelné hodnoty trvá několik set let. Přispívá jak k vnějším tak k vnitřním dávkám. Jeho produkce je při jaderném výbuchu asi 1,6 – krát vyšší než produkce ^{90}Sr a jeho aktivita ve spadu je přiměřeně větší. Pevně se váže na půdu, a proto na rozdíl od ^{90}Sr jen poměrně těžko přechází do vegetace. Do potravinového řetězce se dostává v důsledku povrchového zamoření vegetace, píče a potravin. ^{137}Cs se usazuje ve vaječnicích a svalovině. Radioaktivní cesium se chová v živém organismu jako draslík, který je typickým nitrobuněčným kationtem. Jeho množství v buňce je určeno stupněm prokrvení tkáně. Poněvadž se volně pohybuje v buňce, může velmi významně emitovanou radiací ovlivňovat buněčné organely i jádro buňky se všemi důsledky z poškozených buněčných struktur a chromozomů v jádře buňky. Snadno se vstřebává (asi 80%) a vylučuje se močí. Jeho biologický poločas (vyloučení) je 110 dní. Radioizotopy cesia je možné ve střevním obsahu vázat a vhodným způsobem je eliminovat. Mezi účinné prostředky eliminace řadíme ferrokyanid železitý a Berlínskou modř. Je možné použít i ferrokyanidy některých dalších těžkých kovů, jako kobalt, měď, nikl a další. Léčbu je možno zahájit kdykoliv po kontaminaci a spočívá v opakovaném podání menších dávek Berlínské modři (0,2 – 1 g) několikrát denně. Snižuje biologický poločas cesia dvou až čtyřnásobně. Jeho dceřiným prvkem je ^{134}Cs s poločasem rozpadu 2,5 roku. Metabolizuje jako draslík a ukládá se také hlavně ve sva-lech. Biologický poločas činí 150 dní (8).

3.5 Radioaktivní stroncium ^{89}Sr , ^{90}Sr

Dalším významným radionuklidem při jaderné havárii je stroncium ^{90}Sr , které patří mezi dlouhodobé osteotropní nuklidy. Chemicky se chová jako vápník. Vzhledem na intenzitu jeho tvorby, dlouhý poločas rozpadu 27,7 let a skutečnost, že se ukládá v kostech, je stroncium považováno za velmi nebezpečné. Zabudován v kostech pak bezprostředně ozařuje orgány krevetvorby. Poměrně brzy, již po 24 hodinách, je inkorporováno do struktury kostí a zde vytěšňuje atomy vápníku z vazeb na hydroxyapatit. Díky tomu, že tato vazba je velmi pevná je eliminace radioizotopů stroncia pomalá a obtížná. Avšak většina radiostroncia je např. vyloučena v průběhu asi 3 měsíců, zbylé množství v kostech se zabudovává trvale a nerovnoměrně, což způsobuje neuniformní ozáření kosti. Vstup $1,5 \cdot 10^7$ Bq radiostroncia do zažívacího traktu způsobí za 2 měsíce dávku 1 Sv. Kmenové buňky krevetvorby z méně ozářených oblastí mohou zvýšenou proliferací udržet krevetvorbu na dostatečné úrovni a její akutní zhroucení nehrozí. Dlouhodobé ozařování kosti se může projevit jako zátěž, která zpomaluje úpravu krevetvorby, zejména po současném nebo následném zevním ozáření. Nejzávažnější jsou pozdní výskyty nádorových onemocnění, leukémií, osteosarkomů a jiných, které vznikají po uplynutí desítek let od kontaminace v několika časových vlnách. Do organismu je přijímáno jako málo rozpustná sloučenina potravinovým řetězcem přes povrchově kontaminované plodiny, přes půdu kořenovým systémem rostlin, nebo přes další články potravinového řetězce. Ukládání stroncia v kostech a chrupavkách je zvláště závažné zejména u dětí. Nejzávažnějším zdrojem ^{90}Sr lokálně v oblastech jaderných havárií je mléko. Dodání vápníku a hořčíku může omezit zabudování stroncia do kostí. Biologický poločas činí 18 let.

Radionuklid ^{89}Sr se chová stejně jako ^{90}Sr , má však podstatně kratší poločas rozpadu, jen 52,7 dne. ^{89}Sr se navíc mění na stabilní nuklid ^{89}Y , zatímco ^{90}Sr je mateřským nuklidem dalšího radionuklidu ^{90}Y s poločasem rozpadu 64 hodin, který emituje částice beta (8).

3.6 Další významné radionuklidy

3.6.1 Radioaktivní uran ^{238}U , ^{239}U , ^{235}U

Nejčastěji se vyskytující izotopy uranu ^{238}U , ^{235}U a ^{239}U jsou jako plutonium těžkými kovy využívanými při řetězové reakci. Tyto izotopy emitují všechny typy záření, nejvíce však alfa částice. Vzhledem k tomu, že fyzikální poločas rozpadu ^{235}U přesahuje 700 miliónů let, klesá aktivita ^{235}U velmi zvolna.

Vstřebatelnost izotopů uranu z gastrointestinálního traktu je jako u ostatních těžkých kovů nízká. Dojde-li však k průniku do organismu, jsou molekuly uranu velmi toxické pro parenchym ledvin již při koncentraci 0,1 mg/kg. V ledvinách lze v závislosti na koncentraci požitého uranu pozorovat nekrotické změny proximálních tubulů ledvin od 6 hodin po několik dní po kontaminaci.

Volbou léčby je bikarbonát sodný snižující nefrotoxický potenciál uranových solí a tubulární diuretika. V průběhu léčby je nutné sledovat ledvinné a jaterní funkce, včetně pozorování exkrece uranu formou sbírání celodenních vzorků moče.

Zvláštní kapitolou se vzhledem k nevědomosti stal ochuzený uran. Chemicky jde o ^{238}U ochuzený o významný obsah ^{235}U v průběhu získávání obohaceného uranu. Ochuzený uran samotný pak nepředstavuje zvláštní zdravotnické riziko. Jeho schopnosti emitovat zejména alfa částice jsou nízké a lze se k němu chovat jako k ostatním těžkým kovům (8).

3.6.2 Radioaktivní plutonium ^{239}Pu

Izotop ^{239}Pu vzniká jak při štěpení uranu v jaderných reaktorech, tak při jaderném výbuchu. Samotné plutonium tvořilo nálož bomby použité v Nagasaki (v Hirošimě to byla nálož uranová). Jde o těžký kov, alfa a gama emitor. Po požití způsobuje toxické projevy organismu, jako nejnebezpečnější byla zjištěna cesta inhalační. Plutonium lze

z kůže lehce dekontaminovat, při vnitřní kontaminaci se používá dietylenetriamin pentaoctová kyselina (DTPA), která je také efektivní pro ostatní transuranové prvky, lanthanoidy a izotopy niobu a zirkonia. Vápenatou sůl dietylenetriamin pentaoctové kyseliny je možné použít první a druhý den po vnitřní kontaminaci. Tuto sůl v množství 1 g aplikujeme rozpuštěnou do 10-20 ml fyziologického roztoku v pomalém intravenózním podání (5 minut), anebo v infuzi s 250 ml fyziologického roztoku či 5% glukózy (30 minut).

Kontraindikací podání dietylenetriamin pentaoctanu vápenatého (ditripentat – fi. Heyl) jsou leukopenie, trombocytopenie a renální insuficience. Pakliže dojde k inkorporaci plutonia, je obtížné jej eliminovat. Jeho poločas rozpadu činí takřka 25 000 let (8).

3.6.3 Radioaktivní tritium ^3H

Tritium ^3H s poločasem rozpadu 12,6 let vzniká v aktivní zóně reaktoru při štěpení ^{235}U , přibližně dvakrát častěji vzniká tritium při štěpení ^{239}Pu . Kromě toho vzniká tritium záchytem neutronů jádru deuteria a hlavně při interakci neutronů s bórem, který je obsažen v chladivu jako prostředek jeho regulace. Z jaderné elektrárny se tritium dostává ve formě plynu a ve formě vody. K člověku se dostává tritium pitnou vodou, vdechováním a kůží. Lidský organismus je tak vystaven β záření. Zabudovává se do biochemických molekul.

Tritium ve formě plynné se velmi rychle rozptýluje v atmosféře a proto si lze představit kontaminaci jen v uzavřených prostorách. Ačkoliv fyzikální poločas je 12,3 roku, biologický poločas je pouhých 10 dní. Tritium ve formě triciové vody (T_2O) je nejen rychle absorbováno, ale i vylučováno, podobně jako běžné molekuly vody. Proto jednorázové požití tricia nevyvolává nežádoucí účinky. Léčebným postupem je zvýšení obratu vody formou vyššího příjmu vody. Možností volby při požití velmi významného množství tricia je aplikace diuretik (8).

3.6.4 Radioaktivní kobalt ^{60}Co

Kobalt ^{60}Co s poločasem rozpadu 5,26 let je produktem aktivace v jaderném reaktoru. Jedná se o γ zářič. Kritickým orgánem jsou plíce a trávicí ústrojí. Izotop kobaltu, ^{60}Co , je jedním z nejpoužívanějších izotopů v medicíně. Je využíván k zevnímu ozařování pacientů. Jde o gama a beta emitor s převahou gama záření. V případě vnitřní kontaminace je volbou léčby vedle klasických doporučení, jako jsou výplach žaludku a nálevy, také aplikace penicilaminu s chelatačním účinkem (8).

3.6.5 Radioaktivní americium ^{241}Am

Americium ^{241}Am má poločas rozpadu 458 let. Jedná se o nebezpečný prvek, je vysoce radioaktivní a může se hromadit v kostní tkáni. Dceřinný produkt plutonia, americium ^{241}Am , je alfa a gama emitorem s převahou alfa částic. Riziko vnitřní kontaminace je nejvyšší u inhalační cesty a kožními lézemi, vstřebávání gastrointestinálním traktem je u tohoto těžkého kovu minimální. Po průchodu do organismu je nejen hepatonefrotoxickým, ale ve velkých dávkách představuje vážné radiační riziko. Léčebný postup je stejný jako u vnitřní kontaminace uranovými soli, tj. aplikovat DTPA v průběhu prvních 24 až 48 hodin (8).

3.6.6 Radioaktivní cer ^{144}Ce

^{144}Ce je prvkem ze skupiny lanthanoidů (ve vodě špatně rozpustných) a je obsažen ve směsi štěpných produktů. Jde o beta a gama emitor s nízkou vstřebatelností (asi 1%). Z toho vyplývá zvýšené riziko poškození tlustého střeva (pomalý posun trávení). Cér po vstřebání má afinitu k buňkám retikulo-endoteliálního systému. Rychlé vyloučení céru vyvoláme podáním laxativ (8).

Tab.4: Doporučené léčebné postupy při vnitřní kontaminaci (8)

| Radionuklid | Medikace | Podání | Účinek |
|----------------------------------|--|---|--|
| Jód | Jodid draselný | Až 7 tbl. Po 130 mg | Kompetitivní inhibice jódu ve štítné žláze |
| Plutonium a Ytrium | Diethylentriamin pentaocetát vápenatý (DTPA) | 1g Ca – DTPA v 250 ml 5% roztoku podávat přes 30 minut | Vyvázení |
| Uran | Bikarbonát sodný | Pomalá infúze 250 ml 14% roztoku | Alkalizace moči |
| Cesium, Rubidium, Thalium | Berlínská modř | 1g v 100 – 200 ml vody, p.o. 7 dní | Mobilizace z orgánů |
| Radium, Stroncium | Síran bárnatý, alginát sodný | Ba SO ₄ 100 g v cca 250 ml vody, alginát sodný 10 mg v 250 ml vody | Snížení vstřebávání |
| Tricium | Voda | Podat 6 – 12 l vody denně | Ředění a vstřebávání |
| Olovo, Plutonium, Kobalt | D - penicilium | 1 g/den, i.v., 0,9 g po 4 – 6 hod. p.o. | Vyvázení |

II. CÍL PRÁCE A HYPOTÉZA

Cílem mé diplomové práce je analýza rizik nejvýznamnějších radionuklidů, a to zejména při jaderné havárii v Černobylu, jakožto největší havárii jaderné elektrárny s vysokým únikem radionuklidů do životního prostředí. Analýzu jaderné havárie v Černobylu provedenou z nejnovějších poznatků mezinárodních agentur jsem umístila do části nazvané výsledky.

Je předpoklad, že při havárii jaderné elektrárny dojde k úniku směsi radionuklidů, ve které se s časem po výbuchu mění riziko možného poškození a to zejména ^{131}I , ^{137}Cs a ^{90}Sr . Studie má potvrdit nebo vyvrátit, že se význam štěpných produktů mění s časem.

III. METODIKA

Rozbor a poučení z materiálů vycházejícího ze získaných znalostí z odborných světových zpráv o jaderných haváriích, zaměřených zejména na jadernou havárii v Černobylu.

Rozbor a poučení z materiálů získaných z internetu na dané téma.

IV. VÝSLEDKY

4. Jaderná havárie Černobyl

Havárie jaderné elektrárny Černobyl nastala 26. dubna 1986. Dnes je považována za největší jadernou havárii v historii jaderné energetiky. K události došlo na 4. bloku jaderné elektrárny Černobyl, nacházející se zhruba 130 kilometrů severně od hlavního města Ukrajiny, Kyjeva – blízko hranice s Běloruskem (11).

K výbuchu, kterým se jaderná havárie spustila, došlo v 1:24 hodin ráno tamního času. Experimentem se mělo zjistit, zda bude generátor jaderného reaktoru po rychlém uzavření páry do turbíny schopen při svém setrvačném doběhu ještě zhruba 40 sekund napájet proudem čerpadla havarijního chlazení. Před zahájením testu jaderné elektrárny Černobyl a v jeho průběhu došlo k několika vážným lidským chybám a nedodržení bezpečnostních předpisů.

Následkem toho v průběhu experimentu nekontrolovatelně vzrostl výkon reaktoru, došlo k přehřátí paliva a destrukci jeho pokrytí. Následovala jaderná havárie - dva výbuchy (zhruba 40 – 60 sekund po zahájení experimentu). Jaderný reaktor byl přetlakován tak, že pára při první explozi odsunula horní betonovou desku reaktoru o váze 1000 tun. Druhá exploze následovala v rozmezí dvou až pěti sekund po první a došlo k ní (podle jedné z verzí) vniknutím vzduchu do reaktoru a reakcí vodní páry s rozžhaveným grafitem. Jaderná havárie v elektrárně Černobyl se projevila tedy dvěma explozemi, které rozmetaly část aktivní zóny jaderného reaktoru, včetně paliva a hořícího grafitu.

Horní část budovy reaktoru 4. bloku elektrárny Černobyl byla zničena. Vznikl požár na střeše turbínové haly a také v prostorách reaktorové haly. Hořící radioaktivní grafit z reaktoru byl vyvržen do areálu jaderné elektrárny. Hořela také zhruba čtvrtina grafitových bloků v jaderném reaktoru (11).

Z rozbitého a rozžhaveného reaktoru 4. bloku elektrárny Černobyl začala unikat radioaktivita, jejímž důsledkem bylo masivní radioaktivní zamoření bezprostředního, ale později i stále vzdálenějšího okolí. Došlo k uvolnění značného množství radionuklidů. Radioaktivní mrak postupoval západní částí sovětského svazu, Východní Evropou i Skandinávií. Přibližně 60% radioaktivního spadu skončilo v Bělorusku. Těsně po havárii zemřelo 31 osob, z toho 28 na následky ozáření a tři na následky zranění po výbuchu. Akutní nemocí z ozáření (ANO) různého stupně bylo postiženo 203 osob. Přes 140 lidí bylo zraněno a více než 100 000 bylo evakuováno. Mnoho lidí v nejvíce zamořených oblastech obdrželo významné dávky (někteří až dvacetkrát více než obdrží během jednoho roku průměrný člověk kdekoli na Zemi, tedy přepočteno na dny to znamená, že někteří byly ozáření během výbuchu 7308 krát více než jiný den). Určení případných pozdějších následků je však složité, avšak platí, že jakýkoliv přírůstek obdržené dávky znamená určité zvýšení pravděpodobnosti vyvolání rakoviny. Úmrtnost se v obci zasažené explozí zvýšila až třikrát. Přes 40 tisíc dětí trpí nemocí štítné žlázy, dvanáctkrát se zvýšila onemocnění anémií, velmi vzrostl výskyt leukémie (20).

Brzy po havárii byl největším zdravotním rizikem radioaktivní jód ^{131}I . Po 20 letech budí největší obavy kontaminace půdy izotopy stroncia ^{90}Sr a cesia ^{137}Cs . Nejvyšší koncentrace byly ^{137}Cs nalezeny v povrchových vrstvách půdy, kde jsou absorbovány rostlinami, hmyzem a houbami a dostávají se tak do místního potravního řetězce. Předpokládá se, že hlavním způsobem odstranění kontaminace bude přirozený rozpad ^{137}Cs na stabilní izotop barya ^{137}Ba (12).

Prvním krokem likvidace jaderné havárie v elektrárně Černobyl bylo hašení požáru v reaktorové hale a na střeše turbínové haly. Speciálnímu hasičskému útvaru se podařilo tento požár zlikvidovat zhruba po třech hodinách od výbuchu v reaktoru. Uvnitř reaktoru však stále hořel grafit. Hasiči, kteří jadernou havárii likvidovali, vůbec neznali příčinu ohně a zalévali nejdříve trosky reaktoru vodou, čímž situaci ještě zhoršovali a docházelo k dalším menším explozím a následné akceleraci radioaktivního zamoření. Aby se zabránilo únikům radioaktivity, byl reaktor postupně zasypán celkem pěti tisíci tunami sloučenin bóru, dolomitu, písku, hlíny a olova shazovanými z rychle přelétajících vrtulníků. Sypké materiály uhasily požár grafitu a částečně absorbovaly

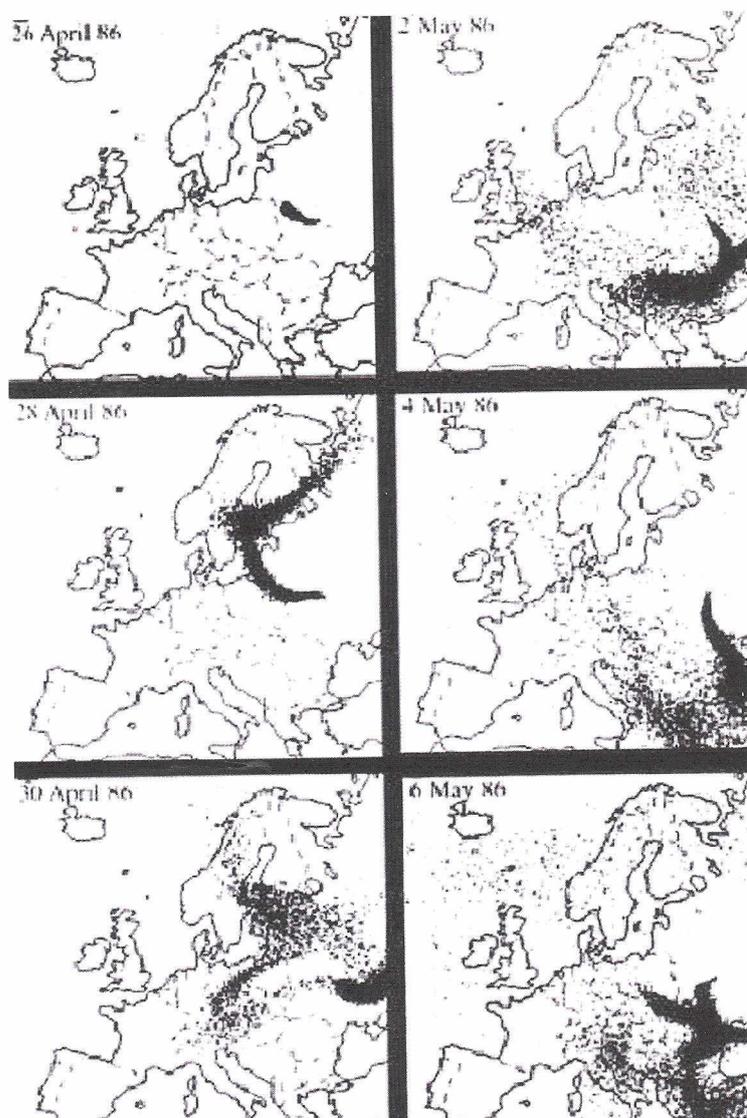
unikající radioaktivní aerosoly. Dva týdny po jaderné havárii rozhodly sovětské úřady zakonzervovat celý havarovaný blok včetně strojovny do tzv. sarkofágu - betonové obálky s vestavěným chladícím systémem. (11)

4.1. Šíření radioaktivních látek z havarovaného reaktoru

První signály úniku radionuklidů zachytilo Švédsko 27.4.1986. Po prošetření, že nejde o havárii na žádné ze švédských elektráren, se pozornost zaměřila na blízké sovětské elektrárny. Ke zjištění, že jde o Černobylskou jadernou elektrárnu, napomohlo vyhodnocení amerických družicových snímků (9).

Proces radioaktivního znečištění zemského povrchu měl 3 fáze: Vlastní vychrlení radioaktivních látek při katastrofě, jejich šíření a roznášení a poté jejich dopad. Ve dnech havárie byl v Černobylu vítr velmi slabý a jeho rychlost se stále měnila. Výbuch černobylského reaktoru však vynesl radioaktivní látky do výše 1500 m, kde proudil vzduch z jiho – východu o rychlosti 8 – 10 m/s. Vlivem výbuchu a vysokých teplot následného požáru se do výšky dostaly i radioaktivní látky, které byly unášeny přes západní SSSR směrem na Finsko a Švédsko. Dne 30.dubna 1986 se změnil směr větru, vzduch proudil ze severo-východu. Do střední Evropy, a tedy i na území tehdejšího Československa se dostaly kontaminované vzdušné masy z více směrů, např.severní stopa nad Skandinávií se obrátila a se zpožděním se dostala i na naše území (9).

Obr.2: Časový průběh radioaktivní kontaminace (3)



Celkové množství uniklých radioaktivních látek z černobylského reaktoru bylo odhadováno odborníky mnoha zemí na základě měření kontaminace ovzduší, atmosférického spadu a s použitím modelů šíření v atmosféře (9).

První odhady úniků byly provedeny na základě měření spadu na území tehdejšího SSSR a celkový únik byl podhodnocen, protože nebyl vzat v úvahu spad z ostatních evropských zemí. Další odhady, které berou v úvahu veškeré uniklé množství radio-

nuklidů, jsou tedy pro některé, zejména těkavé radionuklidy poněkud vyšší. Celková aktivita uvolněného radioaktivního materiálu je odhadována na 10^{19} Bq. Aktivita uvolněného jódu ^{131}I byla $(1,2 - 1,7) \cdot 10^{18}$ Bq a cesia ^{137}Cs $3,7^{16}$ Bq (7).

Pokud se týká chemicko-fyzikální formy uniklých radionuklidů, jednalo se o radioaktivní vzácné plyny, zejména izotopy xenonu a kryptonu, jichž uniklo z havarovaného reaktoru téměř 100%, dále to byly radioizotopy jódu v plynné fázi, ve formě aerosolů a ve formě organické. Poměry mezi jednotlivými formami jódu se lišily v závislosti na čase a místě, kde byly detekovány. Celkově z paliva uniklo asi 50 až 60% jódu (9).

Další těkavé prvky a sloučeniny jako je césius a telur byly vzduchem transportovány ve formě aerosolů velikosti 0,5 až 1 μm nebo společně s částicemi rozprášeného paliva na aerosolech o větších rozměrech. Únik těchto radionuklidů z paliva se odhaduje na 20- 60%.

V menším zastoupení se dostaly do ovzduší s rozprášeným jaderným palivem, k němuž došlo při výbuchu reaktoru, štěpné produkty – radioizotopy málo těkavých prvků jako je cér, zirkonium, bariem a stroncium. S rozprášeným palivem se dostaly do ovzduší i aktinidy. Všechny tyto netěkavé radionuklidy se vyskytovaly ve formě větších aerosolů a jejich podíl byl nejvýznamnější v místech bezprostředního okolí havarovaného reaktoru. V menším množství se dostaly i do velké vzdálenosti a byly identifikovány i na území ČR.

Částičky rozprášeného paliva, obsahující netěkavé štěpné produkty se vyskytovaly ve formě tzv. horkých částic. Jejich množství bylo největší v místech poblíže Černobylu, nicméně byly nalezeny i ve Skandinávii a v jihovýchodní Evropě. Jiný druh horkých částic vznikl kondenzací těkavých radionuklidů, byly identifikovány částice obsahující takřka výhradně cesium a ruthenium. Některé částice obsahovaly nerozpustné křemičitany, pocházející pravděpodobně z betonu, byly nalezeny horké částice, které kromě štěpných produktů obsahovaly i produkty aktivační jako ^{60}Co , což znamená, že obsahovaly materiál reaktoru i vlastní stavby (9).

Radionuklidové složení částic i jejich fyzikální a chemická forma se lišily rovněž v závislosti na fázích havárie – nejdříve došlo k výbuchu. Při něm se do ovzduší dostaly radioaktivní vzácné plyny a částečně i rozprášený obsah destruovaných palivových článků, pak reaktor hořel a při vysokých teplotách unikaly těkavé radionuklidy, při hašení byl reaktor zasypáván borem, olovem a dolomitem, což se mohlo též projevit na složení úniků. Vlivem měnících se meteorologických podmínek se tak do různých částí Evropy dostávaly kontaminované vzdušné masy, vzniklé v různých fázích havárie a tedy s různým složením. Velikost depozice pak ovlivňovaly nejvíce dešťové srážky, které se na daném území v době přechodu vzdušných mas vyskytly (9).

Nerovnoměrné rozložení spadu bylo nejvýraznější na vysoce kontaminovaných územích Ukrajiny, Běloruska a Ruské federace. Území s absolutně největší kontaminací ^{137}Cs bylo podle kontaminace rozděleno do čtyř skupin, které se lišily režimem a opatřeními na ochranu obyvatelstva. Tyto mapy byly poprvé zveřejněny až v roce 1989 (19):

1. **Oblast prvního stupně** zamoření představuje 30-ti kilometrovou, tzv. zakázanou zónu, která musela být vysídlena. Přesto zde trvale žije přes asi tisíc lidí, kteří se navzdory zákazu vrátili zpět do svých domovů, nebo se na ně při evakuaci zapomělo. Úroveň radiace zde přesahuje 40 Ci/km^2 ($1\,500\,000 \text{ Bq/m}^2$). Plocha této oblasti je 3100 km^2 .
2. **Druhý stupeň** zasažení představují území, kde jsou místa s úrovní radiací často vyšší než v bezprostřední okolí elektrárny. Zdejší obyvatelé mají právo na evakuaci, pokud se k ní rozhodnou. Stupeň zamoření se pohybuje od 15 do 40 Ci/km^2 ($555\,000 - 1\,480\,000 \text{ Bq/m}^2$). Na Ukrajině, v Rusku a v Bělorusku zde dodnes žije zhruba 205 000 obyvatel. Lidé mají zakázáno jíst přírodní plodiny a jsou závislí na potravinách, které se dovážejí z jiných míst. Plocha takto zamořeného území je zhruba $8\,000 \text{ km}^2$.
3. **Na území třetího stupně** dnes trvale žije 580 000 obyvatel. Množství radioaktivity činí $5 - 15 \text{ Ci/km}^2$ ($185\,000 - 555\,000 \text{ Bq/km}^2$). Děti dostávají čisté jídlo třikrát denně ve školách, kde musí trávit čas až do večera. Mají totiž zakázáno hrát si na otevřených prostranstvích, která nejsou dekontaminována. Dekonta-

minovány jsou většinou asfaltové plochy, silnice a chodníky. Zamořené území má rozlohu 21 000 km².

4. A konečně nejvíce lidí dodnes setrvává v **oblasti čtvrtého stupně**. Celkový počet lidí, kteří dodnes žijí na kontaminovaném území, představuje jen na Ukrajině 2 miliony obyvatel, v Bělorusku 2,5 milionu a v Rusku 3 miliony lidí – tedy celkem 7,5 milionu lidí. Radioaktivita se zde pohybuje od 1 do 5 Ci/km² (37 000 – 185 000 Bq/m²). Území má rozlohu 76 000 km². V těchto oblastech sice mohou lidé jíst vlastní zemědělské plodiny, ty ale před konzumací podléhají kontrole zdravotních úřadů (19).

Kontaminace centrální části C vznikla v počátečním stádiu úniku západním a severozápadním směrem. Kontaminace oblasti B (Bělorusko – Brjanská) vznikla při dešti 28. až 29. dubna 1986, stejný mrak je zdrojem povrchové kontaminace v oblasti K (Kagula- Tula – Orel). Depozice radionuklidů na povrchu je nejdůležitějším zdrojem kontaminace potravin a je významná z hlediska zevního ozáření obyvatel. Nelze z ní ale jednoznačně odvozovat dávky obyvatelstvu, protože např. inhalační složka vnitřní kontaminace mohla být významná právě v oblastech, kde nepršelo. Měřitelná povrchová kontaminace se projevila na území celé Evropy. Z hlediska ochrany obyvatelstva je však důležitá kontaminace pouze na území Běloruska, Ukrajiny a Ruska. Na ostatních územích je příspěvek externího ozáření k ozáření od přírodního radionuklidů v podloží velmi malý a obsah radionuklidů v potravinách je velmi nízký (9).

Tab.5: První oficiální údaj z r. 1986 o úniku z havarovaného reaktoru v Černobylu (9)

| Nuklid | Inventář(PBq) | Únik(PBq) | Únik (% z inventáře) |
|--------------------------|----------------------|------------------|-----------------------------|
| ⁸⁵ Kr | 33,30 | 33,30 | 100,00 |
| ⁸⁹ Sr | 2330,00 | 92,50 | 4,00 |
| ⁹⁰ Sr | 204,00 | 8,14 | 4,00 |
| ⁹⁵ Zr | 4810,00 | 155,00 | 3,00 |
| ¹⁰³ Ru | 4810,00 | 141,00 | 3,00 |
| ¹⁰⁶ Ru | 2070,00 | 592,00 | 3,00 |
| ¹³¹ I | 3180,00 | 629,00 | 20,00 |
| ¹³² Te | 2700,00 | 407,00 | 15,00 |
| ¹³³ Xe | 6290,00 | 6290,00 | 100,00 |
| ¹³⁴ Cs | 185,00 | 18,50 | 10,00 |
| ¹³⁷ Cs | 285,00 | 37,00 | 13,00 |
| ¹⁴⁰ Ba | 4810,00 | 270,00 | 6,00 |
| ¹⁴¹ Ce | 5550,00 | 130,00 | 2,00 |
| ¹⁴⁴ Ce | 3260,00 | 88,80 | 3,00 |
| ²³⁸ Pu | 1,00 | 0,03 | 3,00 |
| ²³⁹ Np | 26 600 | 851,00 | 3,00 |
| ²³⁹ Pu | 0,85 | 0,03 | 3,00 |
| ²⁴⁰ Pu | 1,22 | 0,04 | 3,00 |
| ²⁴¹ Pu | 174,00 | 5,18 | 3,00 |
| ²⁴² Pu | 0,00 | 0,00 | 3,00 |
| ²⁴² Cm | 25,90 | 0,78 | 3,00 |

Tab.6: Novější odhady úniku radionuklidů z černobylského reaktoru (9)

| Inventář reaktoru 26.4.1986 | | | Celkový únik během havárie | |
|-----------------------------|------------|---------------|----------------------------|---------------|
| Nuklid | Poločas | Aktivita(PBq) | Procento inventáře | Aktivita(PBq) |
| ¹³¹ Xe | 5,3 dne | 6500,00 | 100,00 | 6500,00 |
| ¹³¹ I | 8,0 dne | 3200,00 | 50 – 60 | ~1760 |
| ¹³⁴ Cs | 2,0 let | 180,00 | 20 – 40 | ~54 |
| ¹³⁷ Cs | 30,0 let | 280,00 | 20 – 40 | ~85 |
| ¹³² Te | 78,0 hod. | 2700,00 | 25- 60 | ~1150 |
| ⁸⁹ Sr | 52,0dne | 2300,00 | 4 – 6 | ~115 |
| ⁹⁰ Sr | 28,0 let | 200,00 | 4 – 6 | ~10 |
| ¹⁴⁰ Ba | 12,8 dne | 4800,00 | 4 – 6 | ~240 |
| ⁹⁵ Zr | 1,4 hod. | 5600,00 | 3,50 | 196,00 |
| ⁹⁹ Mo | 67,0 hod. | 4800,00 | >3,5 | >168 |
| ¹⁰³ Ru | 39,6 dne | 4800,00 | >3,5 | >168 |
| ¹⁰⁶ Ru | 1,0 let | 2100,00 | >3,5 | >73 |
| ¹⁴¹ Ce | 33,0 dne | 5600,00 | 3,50 | 196,00 |
| ¹⁴⁴ Ce | 285,0 dne | 3300,00 | 3,50 | ~116 |
| ²³⁹ Np | 2,4 dne | 27000,00 | 3,50 | ~95 |
| ²³⁸ Pu | 86,0 let | 1,00 | 3,50 | 0,04 |
| ²³⁹ Pu | 24 400 let | 0,85 | 3,50 | 0,04 |
| ²⁴⁰ Pu | 6 580 let | 1,20 | 3,50 | 0,04 |
| ²⁴¹ Pu | 13,2 let | 170,00 | 3,50 | ~6 |
| ²⁴² Cm | 163,0 dní | 26,00 | 3,50 | ~0,9 |

4.2 Radioaktivní kontaminace Běloruska

Důsledkem výbuchu v Černobylu byla radioaktivní kontaminace rozsáhlých území Běloruska. První týdny po nehodě byly v celé zemi zaznamenány extrémně vysoké hladiny radiace, způsobené izotopy s krátkým poločasem rozpadu, v první řadě jódu ^{131}I . V následujícím období radioekologickou situaci určovaly izotopy s dlouhým poločasem rozpadu včetně cesia (^{137}Cs), stroncia (^{90}Sr) a trans-uranové prvky: plutonium (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu) a americium (^{241}Am). Tato situace je typická pro současnost a budoucí roky (7).

4.2.1 Radioaktivní kontaminace radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu

Radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu, v první řadě jód (^{131}I) zaslouží naši zvláštní pozornost. Množství izotopů s krátkým poločasem rozpadu (zirkonium ^{95}Zr , jód ^{131}I , baryum ^{140}Ba a lanthan ^{140}La) v radioaktivním spadu je výrazně vyšší než množství izotopů s dlouhým poločasem rozpadu. V důsledku tvoří hlavní část radiačních dávek. Aktivita spadu jódu ^{131}I dosahovala 50-60% celkové aktivity uvnitř reaktoru.

I přes mírné větry byl jód ^{131}I objeven v Brestu a Vitebsku 26.dubna a o dva dny později také v Gomelu, Minsku a Mogilevu. Přemístil se hlavně na západ a severozápad a dostal se až do Dánska a Švédska. Směrem k jihu se při zemském povrchu prakticky nepřenesl a proto pozadí radiace vzrostlo v Kyjevě do 30.dubna pouze slabě. Ovšem lehké aerosoly se vznesly do výšky 5 km, dostaly se až k Černému moři, do pásma bouřkových mračen díky srážkám a vytvořily ohnisko kontaminace v oblasti Oděsy a Khersonu.

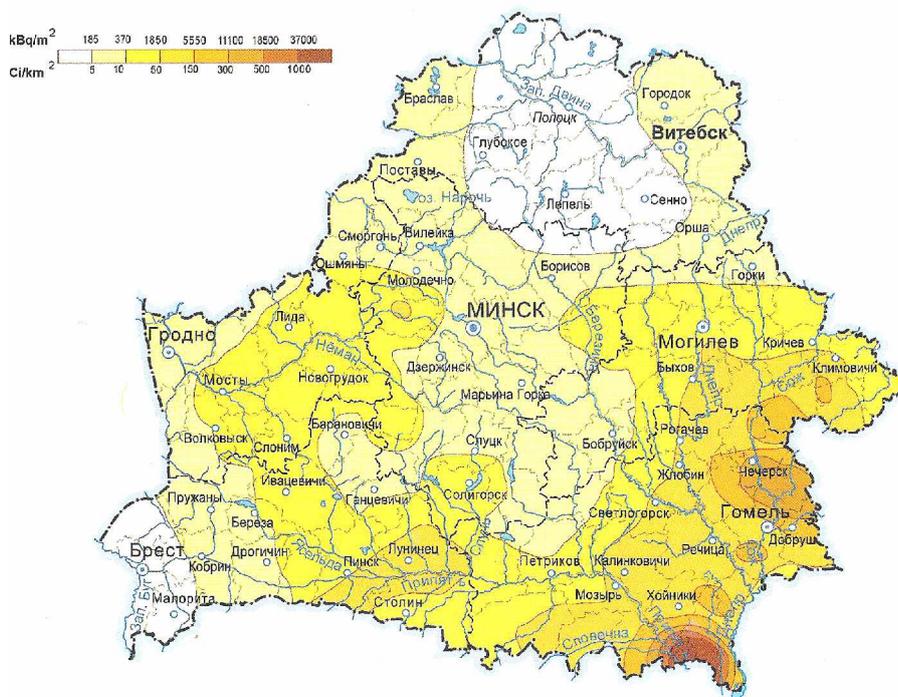
Kontaminace jódem I^{131} byla pozorována na rozsáhlém území. Poškodila baltské země, Maďarsko i Gruzii (7).

4.2.3 Kontaminace jódem ^{131}I

Podle údajů Hydrometeorologického oddělení Ministerstva přírodních zdrojů a ochrany životního prostředí Republiky Běloruska v dubnu - květnu 1986 se nejvyšší hladiny spadu jódu ^{131}I v zóně nejbližší JE Černobyl vyskytovaly v oblastech Bragin, Khoiniki, Narovlya v Gomelském regionu, kde jeho obsah v půdě činil 37.000 kBq/m^2 a více (předpoklad ze dne 10. května 1986). Jihozápadní a severní oblasti Gomelského regionu a některé oblasti v regionech Mogilev a Brest také zaznamenaly výraznou kontaminaci.

Důsledkem tohoto byl velký nárůst ozáření gama-radiací očekávan prakticky na celém území Běloruska. V některých obcích dosáhlo $0,5 \text{ mSv/h}$, což je mnohatisíckrát vyšší radiace než je přirozená radioaktivita prostředí. Kontaminace jódem ^{131}I vedla k silným ozářením štítné žlázy, které postihlo prakticky celou populaci Běloruska (tzv. „jódová rána“) a výrazný nárůst chorob štítné žlázy zejména u dětí (7).

Obr.3: Předpokládaná kontaminace Běloruska jódem ^{131}I (rekonstrukce) k 10.květnu 1986 (7)

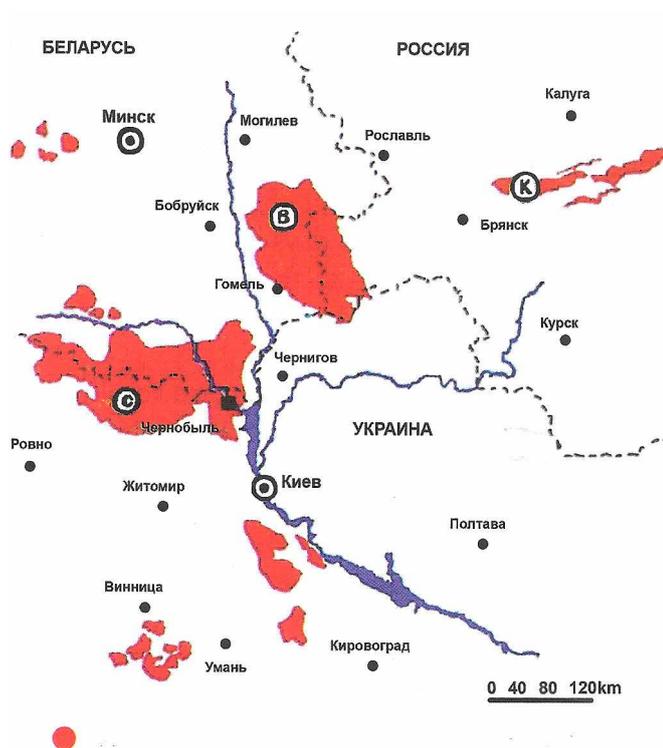


4.2.4 Kontaminace cesiem ^{137}Cs

Analýza radioaktivní kontaminace Evropy cesiem ^{137}Cs ukazuje, že cca 35% spadu radionuklidů z Černobylu dopadlo na území Běloruska. Před nehodou dosahovala kontaminace území cesiem ^{137}Cs na různých místech 1,5 kBq/m² až 3,7 kBq/m². Po Černobylské tragédii přesáhla koncentrace cesia ^{137}Cs v půdě 10 kBq/m² na 136,5 tisících km² (66% území Běloruska).

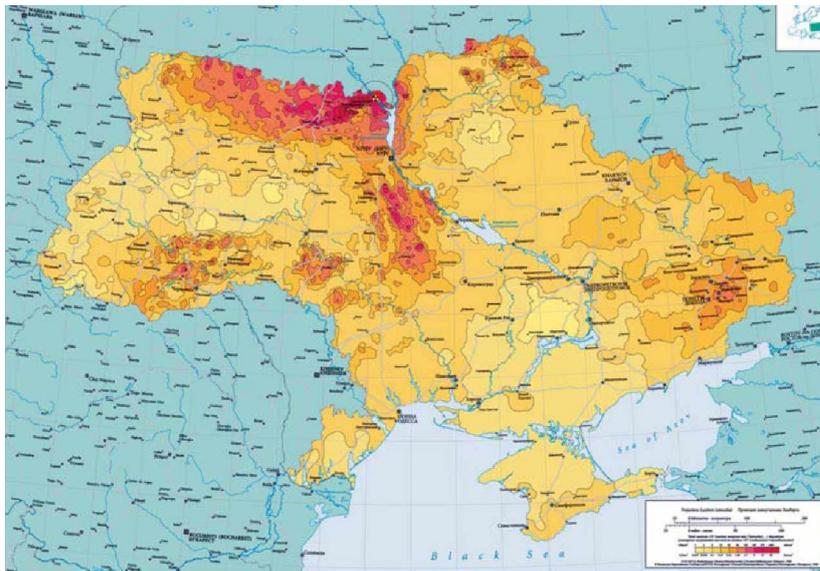
Podle současné legislativy je jedním z kritérií pro kontaminaci území koncentrace cesia ^{137}Cs nad 37 kBq/m². Takové překročení bylo zaznamenáno na 23% území Běloruska (7).

Obr.4: Kontaminace území o koncentraci cesia ^{137}Cs více než 555 kBq/m² (7)

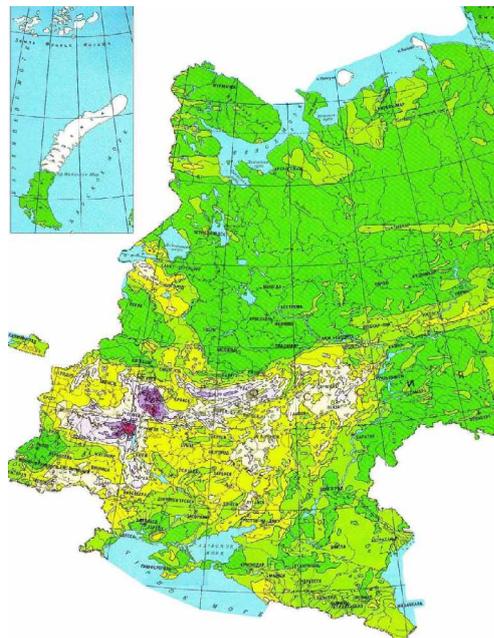


Srovnáme-li údaje s Ukrajinou, tam bylo toto zjištěno na 7% území (Obr.5), v Evropské části Ruska na 1,5% (Obr.6).

Obr.5: Kontaminace Ukrajiny ^{137}Cs (3)



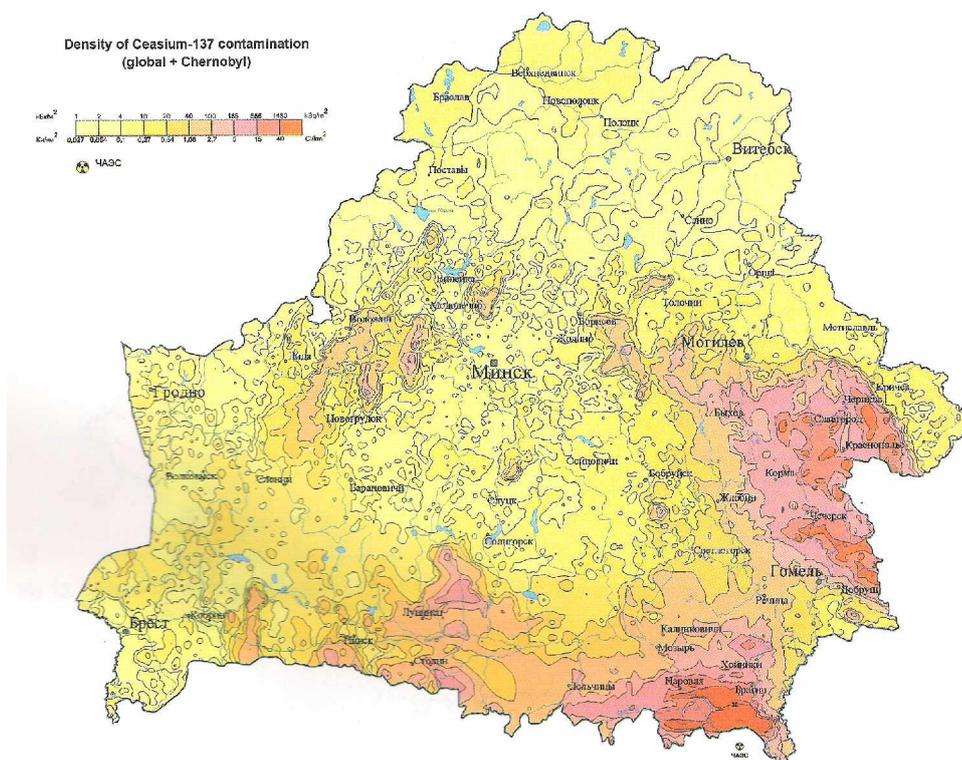
Obr.6: Kontaminace Ruska ^{137}Cs (3)



Na kontaminovaném území se nacházelo 3.600 obcí včetně 27 měst s populací 2,2 mil. obyvatel v roce 1986, což je pětina celkového obyvatelstva Běloruska. Regiony Gomelský, Mogilevský a Brest byly kontaminovány nejvíce.

Nejvyšší kontaminace půdy cesiem ^{137}Cs , která dosáhla 60.000 kBq/m^2 , byla naměřena v obcích jednak v těsné blízkosti (Gomelský region), ale také ve velké vzdálenosti (region Mogilev). V lednu 2004 území Běloruska kontaminované cesiem ^{137}Cs nad koncentraci 37 kBq/m^2 činilo 41,11 tisíc km^2 , tedy 19,75% území (7).

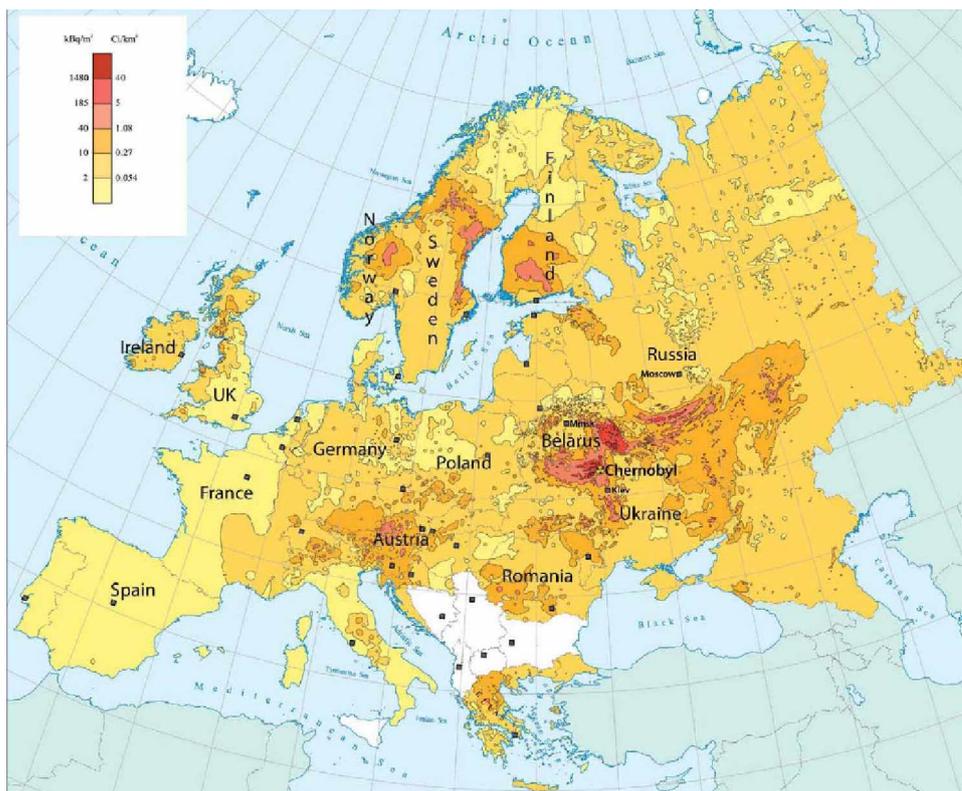
Obr.7: Kontaminace Běloruska cesiem ^{137}Cs (1986) (7)



V důsledku přirozeného radioaktivního rozpadu cesia ^{137}Cs se radioaktivně kontaminované území postupně zmenšuje. Hydrometeorologické oddělení Ministerstva přírodních zdrojů a ochrany životního prostředí Republiky Běloruska vytvořilo mapy

s předpověďmi kontaminace ^{137}Cs pro roky 2016 a 2046. Do roku 2016 klesne rozloha území s koncentrací cesia ^{137}Cs , převyšující 37 kBq/m^2 , 1,5krát ve srovnání s původním stavem a do roku 2046 až 2,4krát.(7)

Obr.8: Kontaminace ^{137}Cs v evropských zemích po černobylské havárii (4)



4.2.5 Kontaminace stronciem ^{90}Sr

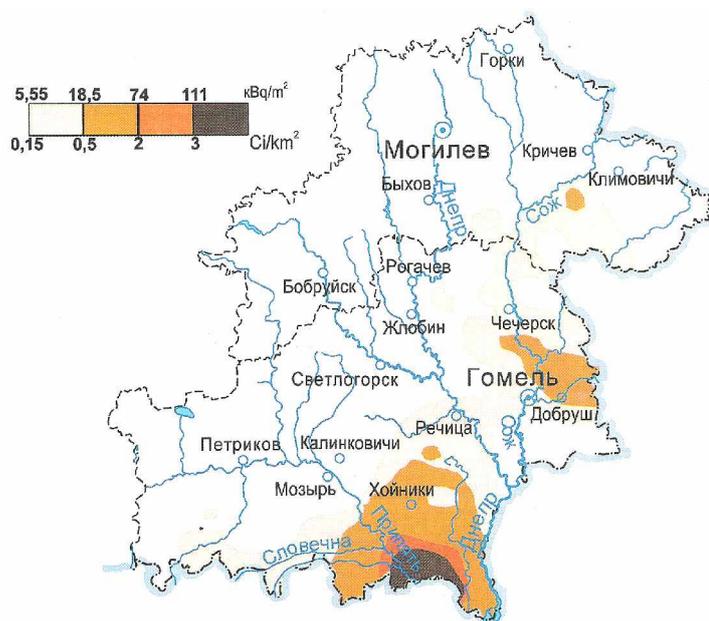
Kontaminace území Běloruska stronciem ^{90}Sr je ve srovnání s cesiem ^{137}Cs spíše lokální povahy. Úroveň kontaminace půdy tímto radionuklidem přesahující $5,5 \text{ kBq/m}^2$ (kritérium stanovené legislativou pro kontaminaci území) byla zjištěna na území o rozsahu 21,1 tisíc km^2 v regionech Gomel a Mogilev, což je 10% území Běloruska. Koncentrace stroncia ^{90}Sr dosáhla 1.800 kBq/m^2 ve 30 –ti kilometrové zóně kolem JE Černobyl (region Gomel) (7).

Na severu Gomelského regionu byla koncentrace stroncia ^{90}Sr 137 kBq/m^2 . V regionu Mogilev, který leží 250 km od JE Černobyl, byla koncentrace 29 kBq/m^2 .

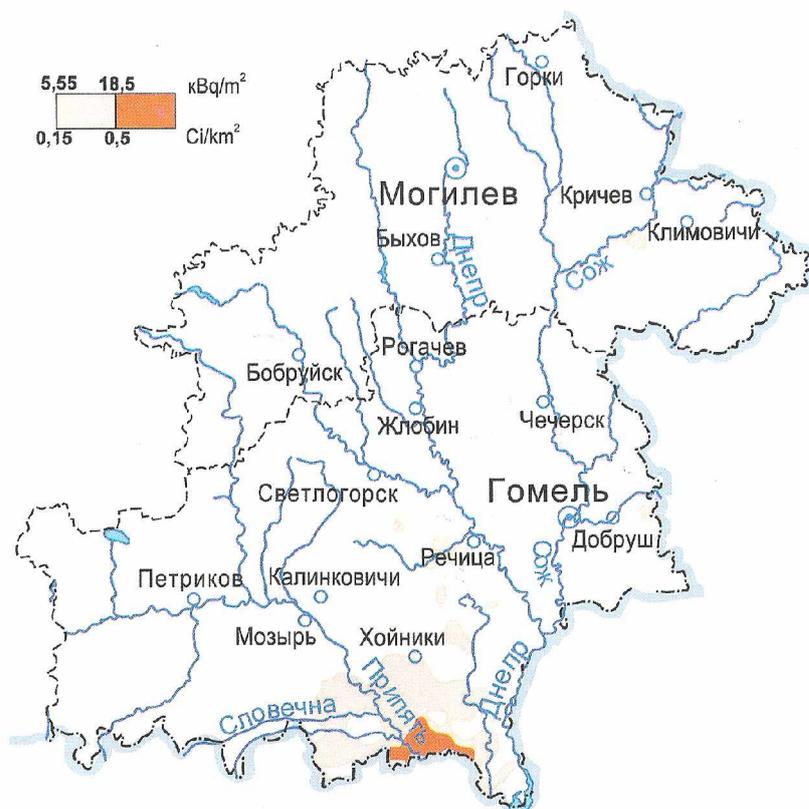
Hustota kontaminace plutoniem ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu větší než $0,37 \text{ kBq/m}^2$ (legislativou stanovené hraniční kritérium pro kontaminaci) se rozšířila na 4 tisíce km^2 , tedy téměř 2% území. Tato místa se nacházejí hlavně v regionu Gomel v Mogilevském regionu. Nejvyšší hladiny kontaminace jsou pozorovány v okruhu 30 km kolem JE Černobyl, hlavně v oblasti Khoyniki - více než 111 kBq/m^2 .

V důsledku přirozeného radioaktivního rozpadu plutonia ^{241}Pu se zvyšuje aktivita ^{241}Am . Předpovědi ukazují, že v roce 2058 specifická aktivita americia ^{241}Am převyší celkovou aktivitu všech izotopů plutonia 1,8 krát (7).

Obr.9: Kontaminace uzemí Běloruska stronciem ^{90}Sr předpoklad pro rok 2005 (7)



Obr.10: Kontaminace Běloruska transurany předpoklad pro rok 2005 (7)



4.3 Dopady na životní prostředí po havárii v Černobylu

Spad radionuklidů po havárii v Černobylu měl za následek vznik složitého radio-ekologického prostředí na převážné části území Běloruska, Ruska a Ukrajiny. Na těchto územích se radionuklidy objevují prakticky ve všech složkách celého ekosystému. Vyskytují se v geochemických a potravních řetězcích migrace a vedou k ozařování populace. V posledním roce se stala konzumace potravin, kontaminovaných radionuklidy, hlavním faktorem vnitřního ozařování. Jedinou schůdnou cestou k udržení bezpečnosti před ozařením je tedy vybudování systému protipatření, a to v první řadě - v zemědělské výrobě (7).

V prvních měsících po havárii převažovalo nad kontaminací zemědělských rostlin a zvířat konzumujících kontaminované rostliny povrchové usazování radionuklidů. Největší bezprostřední obavy vzbuzovalo usazování radioaktivního jódu, ale tento problém byl omezen na první dva měsíce po havárii vzhledem k rychlému rozpadu nejvýznamnějšího izotopu ^{131}I . Radioaktivní jód se rychle absorboval do mléka, což vedlo k závažným dávkám ozáření štítné žlázy u lidí konzumujících mléko, zejména dětí v Bělorusku, Rusku a Ukrajině.

Po počáteční fázi přímé kontaminace se stával stále důležitější příjem radionuklidů z půdy kořeny rostlin. Radioizotopy cesia ^{137}Cs a ^{134}Cs byly nuklidy, které vedly k největším problémům, a i po rozpadu ^{134}Cs ($T_{1/2} = 2,1$ roku) do poloviny 90.let si úroveň ^{137}Cs s delším poločasem rozpadu může v zemědělských produktech z vysoce zasažených oblastí stále vyžadovat ekologickou nápravu. Navíc ^{90}Sr by mohlo působit problémy v oblasti blízko reaktoru, ale ve větších vzdálenostech byla úroveň usazování nízká. Jiné radionuklidy jako izotopy Pu a ^{241}Am nezpůsobily podstatné problémy v zemědělství buď proto, že úroveň usazování byla nízká, nebo jejich množství nebylo dostatečné pro příjem kořeny rostlin.

Obecně došlo k podstatnému snížení v přenosu radionuklidů do zeleniny a zvířat v intenzivním zemědělství v prvních několika letech po usazení, jak se předpokládalo vzhledem k počasí, rozpadu, migraci radionuklidů do půdy a snížení biologické dostupnosti v půdě. V posledním desetiletí však došlo ještě k dalšímu zřetelnému poklesu, a to o 3-7% za rok.

Z dlouhodobého hlediska nadále nejvýznamněji přispívá k vnitřním dávkám u lidí cesium ^{137}Cs obsažené v mléce a v menším měřítku ^{137}Cs v rostlinné potravě a zemědělských plodinách. Jelikož koncentrace aktivity ^{137}Cs jak v zelenině, tak v pícei pro zvířata se v posledním desetiletí snižuje velmi pomalu, bude v příštích desetiletích ^{137}Cs nejvíce přispívat k interním dávkám. Význam jiných radionuklidů s dlouhým poločasem rozpadu jako ^{90}Sr , izotopy plutonia a ^{241}Am je z hlediska dávek u lidí zanedbatelný (4).

4.3.1 Kontaminace půdy

Půdní složka systému je jednou z nejdůležitějších a počátečních fází ekologického cyklu pro transfer radionuklidů do lidského organismu. Jedním z typických procesů v této fázi je migrace radionuklidů, což znamená pohyb radionuklidů z půdy vertikálním nebo horizontálním směrem a také jejich rozmístování do různých chemických forem.

Důvody pro pohyb radionuklidů, ať již horizontální nebo vertikální, jsou:

- vstup do půdy atmosférickými srážkami
- kapilární jevy
- difúze
- přesun kořenovými systémy rostlin
- činnost zvířat
- činnost lidí

V dnešní době je většina radionuklidů umístěna v horních vrstvách půdy. Vertikální migrace ^{137}Cs a ^{90}Sr v půdě probíhá velice pomalu. Průměrná rychlost takové migrace je cca 0,3 - 0,5 cm ročně. Migrační intenzita ^{90}Sr je ve většině případů poněkud vyšší než u ^{137}Cs . Rychlost migrace roste se zvyšováním půdní vlhkosti.

V neobdělávaných půdách je největší množství radionuklidů koncentrováno v horních 5 cm. V zemědělských půdách jsou téměř všechny radionuklidy lokalizovány v obdělávané vrstvě. V nejbližší budoucnosti bude samoregulace vrstvy půdy, kterou prorůstají kořeny rostlin, co do vertikální migrace zanedbatelná.

Maximální hloubka migrace je zaznamenána v travním gleji, rašelinovitém travním gleji a rašelinovitých půdách. Ve většině případů nepřesáhne hloubka průniku radionuklidů 15 cm, v rašelinovitých půdách je pozorováno i 35 cm a více.

Základní množství radionuklidů zůstane v půdě prorostlé kořenovým systémem a bude v dosahu rostlin po dlouhou dobu (7).

Snižování množství radionuklidů ve vrstvě půdy, prorostlé kořenovými systémy rostlin, se děje díky jejich vertikální migraci a také přirozeným uhníváním. Proto je pro

předpovídání radiologické situace včetně výpočtů dávek ozáření používáno tzv. efektivní období polo - dekontaminace, tedy období, za které se množství radionuklidů ve vrstvě půdy sníží dvakrát, přičemž je bráno v úvahu jejich uhnívání.

Horizontální migrace se objevuje díky větru, požárům, toku povrchové vody, záplavám a dešťovým proudům. Všechny tyto faktory vedou ke stupňování dekontaminace některých částí území a zamoření jiných.

Největší množství radionuklidů se pohybuje ve zlomku jemné půdy (prachu) v povrchovém vzduchu díky větrné erozi nebo deflaci. Přenos jemné půdy během jara-léta je obzvláště aktivní. Maximální akumulace radionuklidů, co do deflace, je pozorována v místech, kde se rychlost větru mění: na úpatí údolí, na závětrných stranách kopců.

Dále je migrace spojená s vodní erozí - dešťovými srážkami a táním sněhu. Povrchová migrace při tání sněhu je pozorována méně než při deštích.

Horizontální migrace může vést k sekundární kontaminaci půdy a rostlin a měla by být brána v úvahu při zemědělské výrobě. Jako ochranná opatření lze využít systém ochrany půdy vhodnou rotací plodin a speciální kultivaci půdy periodickou hloubkovou orbou (až do 40 cm). To umožňuje snížení sekundárního zamoření půdy a úbytku humusu (7).

Přesun radionuklidů do rostlin je ovlivněn hlavně formou jejich složení v půdě. Existují 4 formy: rozpustné ve vodě, přeměnitelné, pohyblivé a nepohyblivé (vázané nebo pevné). Mají – li radionuklidy jednu ze tří prvních forem, je možný jejich přesun do rostlin. Relativní množství radionuklidů ve formách přijatelných pro rostliny se postupem času mění, v mnoha ohledech je určen typem půdy a liší se pro radionuklidy cesia a stroncia. Je již všeobecně známo, že v prvních letech po havárii se snížily přijatelné zlomky ^{137}Cs v různých typech půdy a po 10 letech byla zaznamenána určitá stabilizace, avšak část přijatelných forem ^{90}Sr se všeobecně zvýšila.

Pro řízení zemědělské výroby na kontaminovaných územích je hlavním úkolem získání výroby s množstvím radionuklidů v přijatelných mezích. Za tímto účelem byl přijat celý komplex speciálních ochranných opatření, umožňujících snížení koncentrace radionuklidů v zemědělské produkci (7).

- **Výběr kultur a druhů** s minimální akumulací radionuklidů je nejdostupnějším prostředkem ke snížení penetrace radionuklidů z půdy do plodin.
- **Kultivace půdy** - hluboká orba, která snižuje přesun radionuklidů do rostlin 5-10krát.
- **Zavápnění kyselých půd** - přidávání vápna je účinným způsobem snižování přenosu ^{90}Sr z půdy do rostlin. V závislosti na počáteční kyselosti půdy umožňuje vápnění snižování přenosu radionuklidů do výrobků 1,5 až 3 krát.
- **Hnojiva** - aplikace organických hnojiv snižuje přenos radionuklidů z půdy do rostlin až na 30%.
- **Ochrana rostlin** - míra chemické ochrany rostlin proti škůdcům, chorobám a plevelům také pomáhají snížit akumulaci radionuklidů v produktech.
- **Řízení zavlažovacího režimu** - v případech vysušování přemokřených půd je jednou z důležitých metod snížení obsahu radionuklidů v zemědělských plodinách (7).

Hospodářská zvířata, chovaná na jaderně znečištěných územích jsou pro radionuklidy zásadní cestičkou, vedoucí do lidského těla.

Radioaktivní substance vnikají do organismů zvířat gastro-enteritickou cestou coby části píce, během pastvy, a také s částicemi hlíny a travních drnů. V současné době je role půdy jako potenciálního zdroje zamoření chovu dobytka radionuklidy nepodstatná, faktory přenosu v systému „půda-mléko“ tvoří 0,02% pro ^{137}Cs a 0,01% pro ^{90}Sr .

V podmínkách neustálého přenosu ^{90}Sr a ^{137}Cs s pící je rovnovážný stav radionuklidů v měkkých orgánech a tkáních dobytčat dosažen po cca 30-40 dnech od začátku krmení. Později se již koncentrace radionuklidů (Bq/kg) v mase a vedlejších produktech zvířete prakticky nemění.

Je vyzpozorováno, že ^{90}Sr se prakticky zcela koncentruje v kostře a jeho koncentrace ve svalech a měkkých orgánech je počítána na desetiny (u prasat) a setiny (rohatý dobytek) procenta denní dávky radionuklidů. Pro ^{137}Cs je typické rovnoměrné rozšíření v organismu, s výjimkou radionuklidů v kostře, jejich koncentrace je cca 2-3krát nižší než v měkkých orgánech a tkáních. Koncentrace radionuklidů ve vnitřním tuku je cca 20-30 krát nižší než v mase a vedlejších produktech (7).

Tab.7: Koncentrace radionuklidů v orgánech a tkáních při trvalém příjmu s pící (% z denního aktivního příjmu v pící na kg živé váhy – živá váha rohatého dobytka 400 kg, u prasat 100 kg) (7)

| Orgány a tkáně | Krávy | | Prasata | |
|----------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | ^{90}Sr | ^{137}Cs | ^{90}Sr | ^{137}Cs |
| Svaly | 0,011 | 3,0 | 0,03 | 13,0 |
| Játra | 0,029 | 4,9 | 0,30 | 7,4 |
| Plíce | 0,028 | 4,2 | 0,63 | 5,7 |
| Srdce | 0,032 | 5,4 | 0,40 | 9,7 |
| Ledviny | 0,024 | 7,0 | 0,65 | 13,3 |
| Kosti | 4,32 | 0,9 | 115,5 | 2,4 |

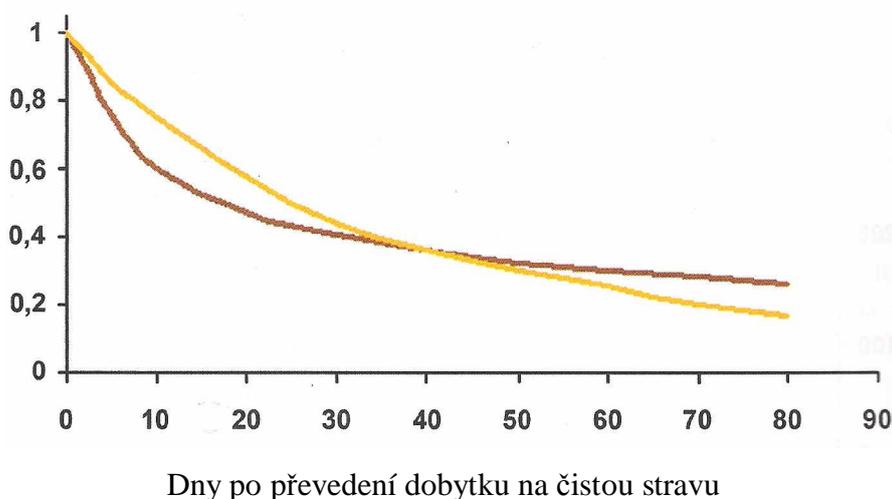
Základním postupem, snižujícím obsah radionuklidů v počáteční fázi zemědělské výroby, je výměna travních porostů. Výsledkem tohoto protipatření se akumulace ^{137}Cs sníží více než 2 krát.

Ve stejné množině krmné píce, vypěstované ve stejných podmínkách, je možné dosáhnout výrazné změny v kontaminaci výroby už změnou krmení. Pro omezení vniknutí radionuklidů cesia do trávicího traktu chovného dobytka se užívají preparáty tzv. „ferrokyanidy“ (berlínská modř, BM). U krav je doporučená dávka 3g denně, (asi 6mg/kg váhy) nebo 2-3 kapsle o váze 200g, obsahující 15-20% BM každých 6-8 týdnů. Takto klesne koncentrace ^{137}Cs v mléce cca 2-4krát.

U zvířat, která tráví dlouhou dobu na pastvě, se dosáhlo dobrých výsledků použitím solných lizů (sůl na lízání pro zvířata). Důsledkem bylo snížení koncentrace ^{137}Cs v mase v průměru dvakrát oproti původnímu stavu.

Pokud masný dobytek akumuluje nepřiměřeně vysoké množství radionuklidů v důsledku nepříznivých podmínek při krmení a chovu, používají se metody celoživotního „čištění“ zvířat od dříve nashromážděných radionuklidů. Již byly zjištěny faktory snižování kontaminace masa radioaktivním cesiem. Je možné dosáhnout snížení koncentrace radionuklidů v mase a souvisejících produktech během jednoho měsíce v případě, že je dobytek převeden na „čistou“ stravu (7).

Graf 1: Faktory snižování obsahu ^{137}Cs u zvířat po čisté stravě (červená – krávy, žlutá - prasata) (7)



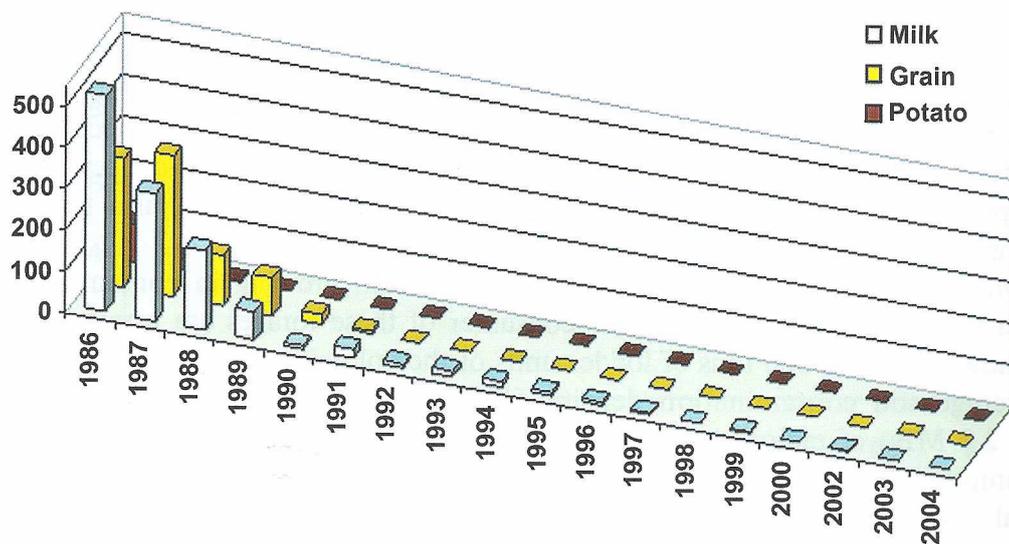
Výrazného snížení hladiny kontaminace lze dosáhnout zpracováním zemědělských výrobků z kontaminovaných území. A tak při separaci mléka přechází asi 85% radionuklidů do odtučněného mléka, do 20% smetany jen kolem 15%. Během dalšího zpracování smetany při výrobě másla 1,3 – 2,3% z původního obsahu v mléce. Rozpuštěné máslo neobsahuje žádné radionuklidy (7).

Tab.8: Přenos radionuklidů z mléka do mléčných výrobků (7)

| Potravina | TF* | | Potravina | TF* | |
|------------------------------|------------------|-------------------|--------------------------|------------------|-------------------|
| | Mléčné výrobky | | | Mléčné výrobky | |
| | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs | | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs |
| Smetana (20%tuku) | 0,78 | 0,60 | Tvarohový sýr | 0,7 | 0,8 |
| Máslo | 0,09 | 0,12 | Tvrdý sýr | 5,8 | 0,5 |
| Rozpuštěné máslo | 0 | 0,01 | Měkký sýr | 4,0 | 0,7 |

TF * - procento koncentrace radionuklidu (Bq/kg) v produktu vzhledem ke koncentraci radionuklidu v mléce

Graf 2: Dynamika zemědělské produkce s překročením stanovených povolených limitů obsahu ¹³⁷Cs v období 1986 – 2004 (milk – mléko, grain– obilí, potato – brambory) (7)



4.3.2 Kontaminace lesů

Výsledkem nehody v Černobylské JE byly více než 2 miliony hektarů lesa (22%) zasaženy radioaktivním spadem nad úrovní 37 kBq/m² (tab.9), což přesahuje obdobné parametry v Rusku a Ukrajině. Oblasti, ve kterých je zakázáno sbírání plodů a hub či příprava medicinského materiálu se nachází v lesích regionů Gomelu, Mogileva, Brestu, Minsku a Grodna. Lesy v oblastech Narovlya, Khoiniki, Braginu, Chechersku, Dobrush, Vetky, Krasnopolje, Slavgorodu a Cherikova jsou kontaminovány ještě více (7).

Tab.9: Oblasti lesů kontaminovaných ¹³⁷Cs - km² (7)

| Země | Hustota kontaminace, kBq/m ² | | | | Celkem |
|------------------|---|---------|----------|--------|--------|
| | 37-185 | 185-555 | 555-1418 | > 1480 | |
| Bělorusko | 13970 | 3194 | 2162 | 789 | 20115 |
| Rusko | 8650 | 1040 | 290 | 20 | 10000 |
| Ukrajina | 10880 | 1010 | 313 | 95 | 12300 |

Hlavní důvod snížení zásob cesia ¹³⁷Cs byl radioaktivní rozklad a vstřebání vegetací. Rychlost snižování je asi 2% ročně. Proces snižování dávek záření byl vymezen nejen rozkladem radioaktivních substancí v půdě, ale také migrací cesia ¹³⁷Cs hluboko do půdního profilu. V důsledku vertikální migrace je nyní největší podíl množství cesia ¹³⁷Cs v půdě v zóně ukotvení kořenových balů rostlin (hloubka 3-6 cm), což právě způsobuje akumulaci radionuklidů ve vegetaci.

Ve vzestupném pořadí dle hladiny akumulace cesia ¹³⁷Cs kornatým dřevem je možné vytvořit následující posloupnost hlavních lesotvorných dřevin: jedle, borovice, olše, bříza, osika, dub.

V dnešní době obsahuje lesní vegetace 5-7% radionuklidů z jejich celkové zásoby v lesních ekosystémech (7).

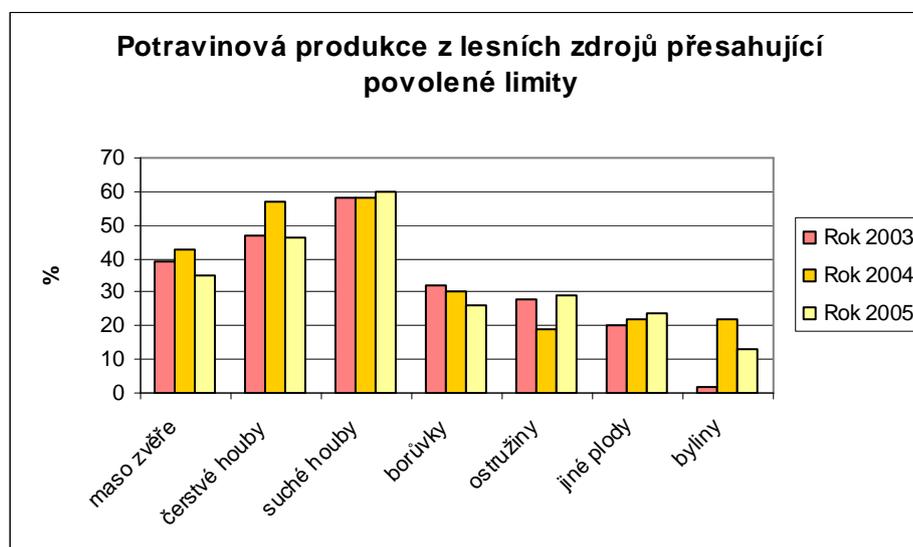
Předpovědi ukazují, že kontaminace lesní vegetace bude vzrůstat, a kořenová akumulace je hlavním mechanismem přenosu radionuklidů do rostlin. V nejbližších 10 letech povrchová fytomasa naakumuluje až 10-15% z celkové zásoby cesia ^{137}Cs ve velkých lesních masivech.

Výsledky radiační inspekce lesních rezerv a radiační kontroly lesnických výrobků potvrzují, že intenzita důsledků Černobylu v lesních ekosystémech neklesá. I přes zákazy používání těchto lesů k produkci, dle testů cca 2% palivového dřeva překračují povolené hladiny obsahu radionuklidů. Vysoké hodnoty radioaktivní kontaminace potravinových produktů z lesních zdrojů znamenají výrazný přísun dávek vnitřního ozáření u lesních pracovníků i populace.

Mezi potravinové produkty z lesních zdrojů patří houby a plody (borůvky, brusinky) k nejvíce kontaminovaným. Okolo 50 % provedených testů hub a plodů, sbíraných v místech, kde je to povoleno, je ročně pozitivních. Obsah cesia ^{137}Cs přesahuje povolené limity i v oblastech s nevýraznou hustotou kontaminace (kolem 37 kBq/m^2). Maximální hodnoty koncentrace cesia ^{137}Cs v čerstvých houbách na území Běloruska v r. 2005 dosahovaly 156 tisíc Bq/kg, v sušených 86 tisíc Bq/kg. Specifická aktivita ^{137}Cs v plodech borůvek v r. 2005 dosáhla 2,8 tisíc Bq/kg.

Výsledky výzkumů lesnického průmyslu službou radiační kontroly Ministerstva lesnictví pro období od r. 2003 do 2005 jsou zobrazeny (graf 3) (7).

Graf 3: Potravinová produkce z lesních zdrojů přesahující povolené limity (podíl z množství provedených testů) (7)



Viditelné důsledky vlivu radiace na vegetaci jsou sledovány jen při abnormálně vysoké hustotě kontaminace (nad 3.700 kBq/m²) v bezprostřední blízkosti zničeného reaktoru. Mezi nimi jsou pokřivení a tumorální zbytnění stonků, asymetrie a kadeřavost listů, mikrosomie, houstnutí, gigantismus a také poškození na buněčné úrovni.(7)

Po havárii tedy prokazovaly rostliny a zvěř v lesních a horských oblastech zvláště vysoký příjem radioaktivního cesia s nejvyššími zaznamenanými urovněmi ¹³⁷Cs v lesních plodinách. To je způsobeno trvalou recyklací radioaktivního cesia.

Obzvláště vysoké koncentrace aktivity ¹³⁷Cs byly zjištěny v houbách, bobulích a zvěřině a tyto vysoké hladiny přetrvávají již dvě desetiletí. Takže zatímco objem ozáření lidí prostřednictvím lesních produktů celkově klesá, vysoké úrovně kontaminace lesních produktů trvají a stále překračují úroveň pro zákrok v mnoha zemích. V některých oblastech Běloruska a Ruska k interním dávkám přispívá konzumace lesních plodin s ¹³⁷Cs. Lze předpokládat, že tento stav potrvá několik desetiletí.

Proto relativní význam lesů z hlediska přispívání k ozáření obyvatel několika postižených oblastí v průběhu doby vzrostl. Je to v první řadě kombinace propadání ¹³⁷Cs do půdy a jeho rozpadu, která bude přispívat k dalšímu pomalému dlouhodobému snižování kontaminace lesních produktů.

Vysoká úroveň přenosu radioaktivního cesia cestou lišejníků – sobí maso – lidé se po černobylské havárii znovu prokázala v arktických a subarktických oblastech Evropy. Černobylská havárie vedla k vysoké kontaminaci sobího masa ve Finsku, Norsku, Rusku a Švédsku a způsobila závažné problémy domorodým Laponcům.(4)

4.3.3 Kontaminace vodních soustav

Radioaktivita z Černobylu kontaminovala povrchové vodní systémy blízko elektrárny i v mnoha jiných částech Evropy. Počáteční kontaminace byla způsobena v první řadě přímým usazováním radionuklidů na hladinách řek a jezer, kde převažovaly radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu (především ¹³¹I). V prvních několika týdnech po havárii vzbuzovaly největší obavy vysoké koncentrace aktivity v pitné vodě z kyjevské nádrže. Kontaminace vody rychle klesala v průběhu týdnů po spadu vlivem zředění,

rozpadu a absorpce radionuklidů v záchytných půdách. Naplavené sedimenty jsou významnou dlouhodobou jímku radioaktivity. Počáteční příjem radioaktivního jódu u ryb byl prudký, ale koncentrace aktivity rychle klesala především vlivem rozpadu. Bioakumulace radiocesia ve vodním potravním řetězci vedla ke značným koncentracím aktivity u ryb v nejvíce postižených oblastech a některých jezerech až v daleké Skandinávii a Německu. Vzhledem k obecně menšímu spadu a nižší bioakumulaci nebyly hladiny ^{90}Sr v rybách významné pro dávky v porovnání s radiocesiem, zejména proto, že ^{90}Sr se hromadí spíše v kostech než v požitelné svalovině. Z dlouhodobého hlediska pokračuje sekundární kontaminace odtokem ^{137}Cs a ^{90}Sr s velkým poločasem rozpadu z kontaminovaných půd až do dnešního dne. V současnosti jsou koncentrace aktivity v povrchových vodách u ryb nízké. Zatímco hladiny ^{137}Cs a ^{90}Sr ve vodě a rybách v řekách, otevřených jezerech a nádržích jsou v současné době nízké, v některých uzavřených jezerech bez vytékajících toků v Bělorusku, Rusku a Ukrajině zůstanou ryby i voda kontaminovány ^{137}Cs ještě v následujících desetiletích. Například u některých lidí žijících v blízkosti uzavřeného Kožanovského jezera v Rusku přispěla konzumace ryb nejvíce k celkovému příjmu ^{137}Cs (4).

Převážná část radioaktivního spadu se dostala do spádových území Dněpru, Pripjatu a jejich přítoků. V prvních letech po neštěstí bylo splavování radionuklidů ze spádových území nejvýraznějším sekundárním zdrojem radioaktivní kontaminace ekosystémů.

Nyní, když se situace stabilizovala, je splavování radionuklidů z povodí nevyhnutelné jen u těch řek, které mají povodí částečně nebo zcela v 30 km okruhu kolem Černobylské JE

Odnos ^{137}Cs řekou Pripjat na hranici Bělorusko – Ukrajina naměřený na říční stanici byl téměř o třídu vyšší než na říční stanici na řece Mozyr. To zejména proto, že splavování radionuklidů z povodí 30-ti km zóny je daleko vyšší. A tak se zde projevuje výrazný přeshraniční odnos radionuklidů povrchovými vodami Pripjat, na hranici Bělorusko-Ukrajina má největší vliv na znečišťování vod této řeky na Ukrajině. Splavování radionuklidů, hlavně ^{90}Sr z povodí v 30km zóně se povážlivě zvyšuje při záplavách.

Analýza přenosu radioaktivní kontaminace řekami povodí Dněpru ukázala, že jestli během prvních let po nehodě Černobylské JE byl výrazný přeshraniční přenos cesia ^{137}Cs v povrchových vodách řek jako Iput a Besed (Rusko-Bělorusko), nyní je tento přenos zanedbatelný a nepřekračuje 1% celkového objemu cesia ^{137}Cs v povodích.

Díky procesu vodního transferu, přerušení sedimentace v nádržích a přirozenému rozkladu, koncentrace cesia ^{137}Cs ve velkých a středních řekách výrazně klesla. Nicméně v povrchových vodách většiny kontrolovatelných řek aktivita cesia ^{137}Cs a stroncia ^{90}Sr dodnes přesahuje hodnoty před nehodou.

Jiná situace je na řekách, které mají nádrže zčásti nebo zcela na vyloučeném území. Např. vody řeky Nižnaja Braginka obsahují větší koncentraci radionuklidů ve srovnání s jinými kontrolovatelnými řekami. V r. 2005 byl rozsah koncentrace cesia ^{137}Cs v této řece (s.Gden) 1,8-6,3 Bq/l; koncentrace stroncia ^{90}Sr byla 2,7-3,6 Bq/l. Tedy obsah cesia ^{137}Cs je pod zdravotně-hygienickou normou (10 Bq/l), zatímco obsah stroncia ^{90}Sr závažně (7-10krát) převyšuje normu (0,37 Bq/l).

U vod řeky Nižnaja Braginka je pozorováno zvýšení aktivity stroncia ^{90}Sr během záplav v období jaro-podzim, kdy se rozlije na kontaminovaná záplavová území. Splavování stroncia ^{90}Sr v povodích probíhá hlavně v rozpuštěné formě.

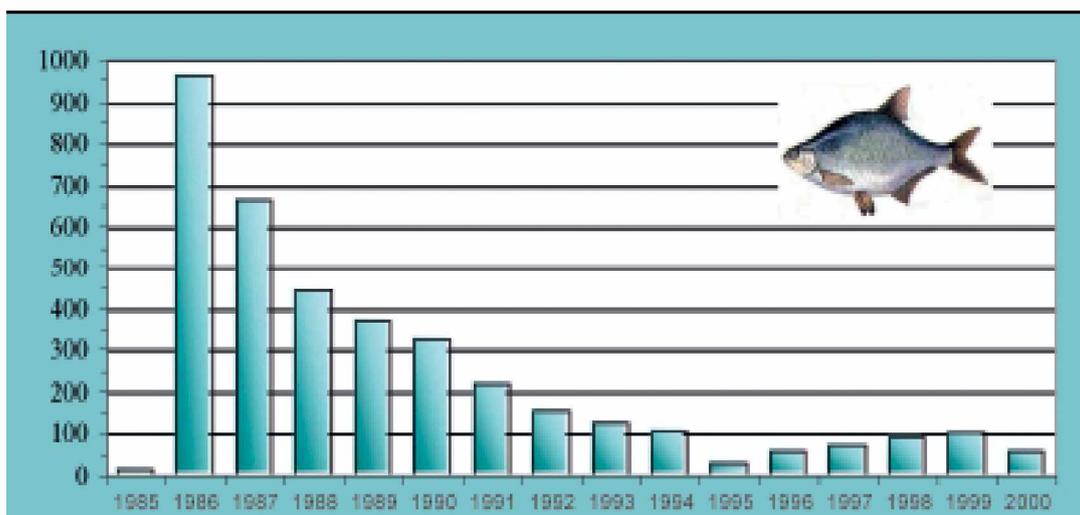
Svalová tkáň ryb v řekách mimo 30 km zónu kolem Černobylu v průměru obsahuje cesium ^{137}Cs v přijatelných limitech (5-15 Bq/kg).

V uzavřených a slabě cirkulujících vodních systémech typu jezer se splavování radionuklidů z povodí a následně aktivita cesia ^{137}Cs a stroncia ^{90}Sr v povrchové vodě blíží a někdy také přesahuje zdravotně-hygienické normy. Radioaktivitu povrchových vod zejména způsobují nánosy sedimentů, rostlinné a živočišné organismy – vodní biota. Tendence k snižování jejich aktivity během času je nevýznamná. Jezera a rezervoáry jsou charakteristické vysokými hladinami akumulace cesia ^{137}Cs v sedimentech (až 49kBq/kg).

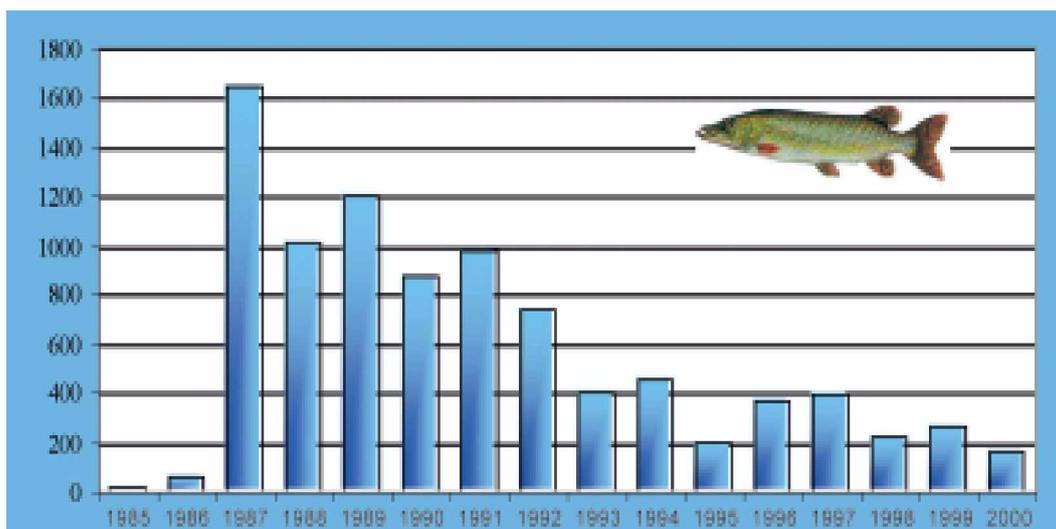
Jezerní nádrže sloužící k rybolovu mohou hrát určitou roli při vytváření radiačních dávek v populaci. Ryby ve stojatých vodách mohou mít extrémně vysokou koncentraci cesia ^{137}Cs , dosahující až 70 kBq/kg u dravých druhů. Tyto koncentrace přímo závisí na míře znečištění nádrže (7).

V současnosti nejsou v kontrolních vrtech poblíž obydlí, kontaminovaných radionuklidy, v podpovrchových vodách pozorovány izotopy cesia ^{137}Cs a stroncia ^{90}Sr (7).

Graf 4: Zprůměrované koncentrace aktivity ^{137}Cs u nedravých ryb (cejn) (4)



Graf 5: Zprůměrované koncentrace aktivity ^{137}Cs u dravých ryb (štika) (4)



4.4 Zdravotní následky u populace po havárii

Při černobylské havárii došlo k ozáření tří kategorií obyvatel:

- Pracovníci likvidující následky havárie
- Obyvatelstvo evakuované z kontaminovaných oblastí
- Obyvatelé kontaminovaných oblastí, kteří nebyli evakuováni

Z celkového množství radionuklidů způsobujících ozáření a způsobů ozáření byla hlavní radiační dávka utvořena:

- Interním ozářením krátkodobými radionuklidy vniklými do lidského těla (hlavně ^{131}I) vdechnutím a požitím kontaminovaných potravin
- Externím ozářením radionuklidy uloženými v půdě a ostatním povrchu
- Interním ozářením dlouhodobými radionuklidy z kontaminovaných potravin

Dávky ionizujícího záření

Interakce ionizujícího záření (alfa, beta, gama a jiné druhy záření) s živou hmotou může poškodit lidské buňky a způsobit tak u některých smrt a u jiných změny. Mírou ionizujícího záření je množství absorbované energie v jednotce hmotnosti, což je absorbovaná dávka. Jednotkou absorbované dávky je jeden grey (Gy), což je (J/kg). Absorbovaná dávka v lidském těle o několika Gy může způsobit akutní nemoc z ozáření (ANO), jak se stalo u několika pracovníků likvidujících následky černobylské havárie.

Jelikož v důsledku černobylské havárie bylo ozářeno mnoho orgánů a tkání, je běžně používán další pojem, a sice koncepce efektivní dávky, která charakterizuje celkové zdravotní riziko způsobené jakoukoliv kombinací záření. Efektivní dávka vysvětluje jak absorbovanou energii, tak typ záření a náchylnost různých orgánů a tkání k rozvoji závažného karcinomu vyvolaného zářením nebo genetického poškození. Kromě toho platí stejnou měrou pro vnější i vnitřní ozáření a rovnoměrné nebo nerovnoměrné ozá-

ření. Jednotkou efektivní dávky je sievert (Sv). Jeden sievert je značně vysoká dávka, proto se k popisu normální expozice používá milisievert (mSv).

Živé organismy jsou trvale vystaveny ionizujícímu záření od přírodních zdrojů, jako je kosmické záření, radionuklidy kosmického nebo pozemského původu. UNSCEAR odhadl roční efektivní dávky pozadí, které dostávají lidé na celém světě, v průměru na 2,4 mSv s typickým rozmezím 1 – 10 mSv. Celoživotní dávky od přirozené radiace tak byly kolem 100 – 700 mSv. Radiační dávky u lidí lze charakterizovat jako nízké, jsou – li srovnatelné s úrovněmi záření přirozeného pozadí, které činí několik mSv/rok.

4.5 Časový průběh následků jaderné havárie v Černobylu

Černobylskou havárii z hlediska časového průběhu ozáření můžeme rozdělit do několika fází:

- okamžité následky
- krátkodobé dopady
- dlouhodobé dopady

4.5.1 Okamžité následky

Část personálu obsluhy bloku na elektrárně a havarijních pracovníků byla 26.dubna 1986 zasažena vysokými dávkami externího gama záření, které se odhadem pohybovaly od 2 do 20 Gy, následkem čehož 28 z nich zemřelo během prvních čtyř měsíců na následky ozáření a tepelných popálenin a dalších 19 zemřelo do r.2004. Bezprostředně po havárii zemřeli ještě 3 lidé v důsledku výbuchu. Počet úmrtí na akutní nemoc z ozáření (ANO) během prvního roku po havárii je dobře zdokumentován. Podle UNSCEAR (2000) byla akutní nemoc z ozáření původně diagnostikována u 237 pracovníků obsluhy bloku a havarijních pracovníků, ale později byla detailní klinickou

analýzou potvrzena u 134 osob. Z toho zemřelo právě 28 pracovníků v roce 1986 a dalších 19 do roku 2004.

Při jaderném výbuchu se uplatňuje tzv.okamžité ozáření neutronů (během 10⁻⁶s). Potom následuje počáteční gama záření (během prvních deseti sekund). Epicentrum výbuchu a radioaktivní mrak jsou zdrojem reziduálního záření. Záření na člověka působí jako stresor. Při velkém ozáření (několik desítek Sv) dochází k velkým změnám v mozku a k těžké poruše vědomí. Silně postižená je i trávicí soustava. Ozářený umírá během několika hodin. Při středním ozáření (jednotky Sv) dochází u ozářeného k vodnatým průjmům s příměsí krve, k zvracení, k dehydrataci a ledvinnému selhání. Ozářený obvykle umírá 1. – 2. týdny po ozáření. Slabší ozáření postižený zpravidla přežívá – trpí však krvácivým syndromem a anémií . U široké veřejnosti postižené radioaktivním spadem byly však dávky poměrně nízké a nedocházelo k vyvolání akutní nemoci z ozáření.

Celkový počet lidí, kteří mohli nebo mohou v budoucnosti zemřít v důsledku ozáření způsobeného havárií během života havarijních pracovníků a obyvatel kontaminovaných oblastí, se odhaduje na 4000. Tento celkový počet zahrnuje 50 havarijních pracovníků, kteří zemřeli na akutní nemoc z ozáření (ANO) v roce 1986 a z jiných příčin v pozdějších letech, 9 dětí, které zemřely na rakovinu štítné žlázy, a odhadem asi 3940 lidí, kteří mohli zemřít na rakovinu způsobenou ozářením. Toto poslední číslo se vztahuje na 200 000 pracovníků podílejících se na likvidaci následků havárie a nápravných operacích z let 1986-1987, 116 000 evakuovaných lidí a 270 000 obyvatel nejvíce kontaminovaných oblastí. Účastníci likvidace důsledků nehody v Černobyly (tzv. likvidátoři, uklízecí čety, zásahové jednotky) jsou tou nejvíce ohroženou skupinou mezi veškerou populací Běloruska, protože podstoupili větší ozáření.

Likvidátoři si vytvořili vlastní sdružení, v rámci kterého se snaží vzájemně si pomáhat. Do roku 1994 jich však již 13 000 zemřelo, z toho 20% sebevraždou. Dalších 70 000 je nyní v invalidním důchodu. Průměrný věk zemřelých je 35 let. Zdravotní prohlídky v roce 1991 konstatovaly, že jen třetina likvidátorů je zdravá. Výrazné zhoršení jejich zdravotní situace nastalo mezi 5. – 8. rokem po havárii. Nejčastější problémy jsou nemoci dýchacích cest, zhoubné nádory, poruchy nervového systému a srdeční potíže.

Kolem 90 % likvidátorů trpí duševními poruchami - depresemi, úzkostí, nepokojem. Výzkum také prokázal snížení imunity. To by vysvětlovalo nadprůměrně vysoký výskyt infekčních onemocnění a dalších běžných chorob. Podle ministerstva pro ochranu obyvatel se od havárie do roku 1994 zvýšil v Bělorusku výskyt poruch štítné žlázy 40-krát, poruchy tvorby krve 8-krát. Nádorová onemocnění jsou nyní mezi likvidátory 2- až 3-násobně častější.

4.5.2 Krátkodobé dopady po havárii

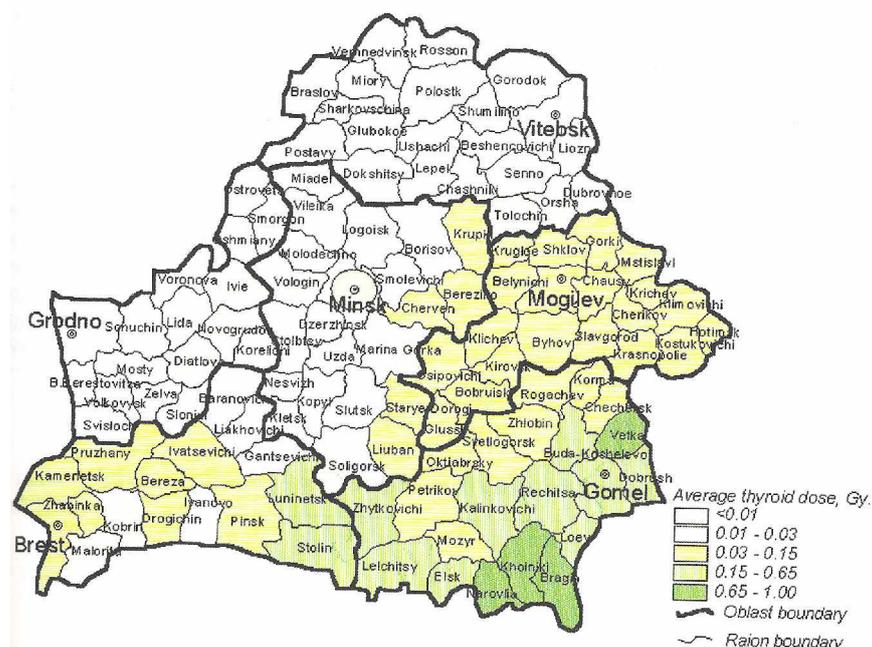
Při havárii se nejnáze dostávají do ovzduší radioaktivní vzácné plyny, které způsobují vnitřní i zevní ozáření a těžké radionuklidy (^{131}I , ^{137}Cs). Brzy po havárii je největším zdravotním rizikem radioaktivní jod ^{131}I s poločasem rozpadu 8 dnů. Avšak po 2 měsících se vzhledem ke svému krátkému poločasu rozpadá. Po havárii radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu tvoří větší množství než radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu a vytváří tak hlavní část radiačních dávek. Z hlediska časového sledu radioaktivní jod způsobuje ozáření nejdříve z ovzduší, a to zevní i vnitřní, později se dostává díky mokrému a suchému spadu na povrch vegetace. Člověkem je pak požit přes kontaminované potraviny a kontaminovanou vodou. Později se k člověku dostává přes hospodářská zvířata cestou zejména přes mléko a maso.

Přijímání potravy kontaminované radioaktivním jodem mělo u obyvatel kontaminovaných oblastí Běloruska, Ruska, a Ukrajiny za následek významné dávky postihující štítnou žlázu a to přibližně v polovině června 1986. Důsledkem ozáření jodem (mléko, listová zelenina) byly dávky vnitřního ozáření pozorovány u většiny Běloruské populace. Ozáření štítné žlázy se pohybovalo v širokém rozmezí podle věku, úrovně kontaminace půdy ^{131}I a množství konzumovaného mléka. Hlášené dávky ozáření štítné žlázy u jednotlivců se pohybovaly kolem 50 Gy, přičemž průměrné dávky v kontaminovaných oblastech byly kolem 0,03 až 0,3 Gy v závislosti na oblasti, kde lidé žili a na jejich věku.

Dávky ozáření štítné žlázy u obyvatel města Pripjat' ležícího v blízkosti černobylské elektrárny byly významně sníženy včasnou distribucí tablet stabilního jódu. Pití

mléka od krav, které se živily kontaminovanou trávou bezprostředně po havárii, bylo jednou z hlavních příčin vysokých dávek ozáření štítné žlázy u dětí a také důvodem následného rozvinutí karcinomu štítné žlázy u dětí. Hodnoty dávek ozáření štítné žlázy u dospělé populace jsou výrazně nižší (7).

Obr.11: Průměrné dávky ozáření štítné žlázy u dětí 0 – 18 let (7)



4.5.3 Dlouhodobé dopady po havárii

Jak jsem se již zmínila největší obavy těsně po havárii budil radioaktivní jod, ale ten se brzy rozpadl díky svému krátkému poločasu rozpadu. Dnes po 20 letech budí největší obavy kontaminace půdy izotopy stroncia ^{90}Sr (poločas rozpadu 27 let) a cesia ^{137}Cs (poločas rozpadu 30 let), jejichž nejvyšší koncentrace byly nalezeny v povrchových vrstvách půdy, kde jsou absorbovány rostlinami, hmyzem a houbami a dostávají se tak do potravních řetězců a způsobují ozáření obyvatelstva (10).

Veličinou popisující radiotoxicitu radionuklidů z hlediska vyvolání stochastických účinků je úvazek efektivní dávky E_{50} . Jde o efektivní dávku způsobenou vnitřní kontaminací po dobu přítomnosti radionuklidu v organismu, maximálně však 50 let. Vztah radionuklidů k vyvolání deterministických účinků lze popsat jednoduše pomocí veličiny absorbované dávky. Snížení aktivity absorbovaného radionuklidu vyjadřuje veličina efektivního poločasu T_{eff} , který je závislý na poločasu rozpadu absorbovaného radionuklidu T_{rad} a biologickém poločase T_{biol} , určujícím rychlost vylučování radionuklidu z organismu (8).

$$T_{eff} = \frac{T_{rad} \times T_{biol}}{T_{rad} + T_{biol}}$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že radionuklidy pomalu vylučované nebo nuklidy s velmi dlouhým poločasem rozpadu jsou více radiotoxické než radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu nebo s rychlým vylučováním z organismu. Můžeme zobecnit, že aktivita absorbovaného radionuklidu je snižována rozpadem radionuklidu a jeho exkrecí (8).

Široká veřejnost byla v průběhu posledních dvaceti let po havárii vystavena ozáření jak z externích zdrojů (^{137}Cs v půdě atd.) tak přijímáním radionuklidů (hlavně ^{137}Cs) v potravě, vodě a vzduchu (4).

Pozdější období po nehodě od roku 1992 a dále se vyznačuje postupným snižováním množství protiopatření a zpomalováním procesu přirozené dekontaminace potravin od radionuklidů. Specifická aktivita ^{137}Cs a ^{90}Sr v zemědělské výrobě po období 1991-1992 se snižovala společně s polovinou období 10-20 let. Mezitím se koncentrace ^{137}Cs v lidském těle statisticky výrazně nezměnila a v některých oblastech se dokonce zvýšila. To by mohlo být vysvětleno postupným snížením a v některých případech i úplným zrušením protiopatření a také faktem, že populace začala opět konzumovat potraviny místní zemědělské a lesní produkce. V té době se role přírodních potravin v utváření dávky vnitřního ozáření výrazně zvýšila. V současné době tyto potraviny

přispívají v některých oblastech k dávce vnitřního ozáření ze 70-80%. To je způsobeno v první řadě téměř nezměněnou koncentrací v lesních houbách již od momentu vzniku radioaktivního spadu ^{137}Cs . Houby jsou z radiologického pohledu již pravidelně nejvýznamnějším komponentem přírodní stravy dotčených území.

Od roku 1986 až do dneška se dávka vnitřního ozáření formuje hlavně na účet příjmu cesia ^{137}Cs v potravinách.

Podíl ^{90}Sr na dávce vnitřního ozáření je bezvýznamný – několik procent, nicméně jeho relativní příspěvek k předpokládaným dávkám poroste.

Podíl na dávce vnitřního ozáření, co se týče vdechování izotopů plutonia a americia, je v řádu zlomků procenta (4).

Hlavním způsobem odstranění kontaminace bude přirozený rozpad ^{137}Cs na stabilní izotop barya ^{137}Ba , neboť vymývání deštěm a povrchovou vodou se ukázalo jako zanedbatelné (12).

4.6 Zdravotní dopady černobylské havárie

V Republice Bělorusko je prováděno specializované zdravotnické sledování u všech skupin zasažené populace pomocí pravidelných masových zdravotních prohlídek. Roční individuální zdravotní údaje u více než 1,5 milionů osob jsou shromažďovány ve 201 regionálních odděleních a uloženy v databázi Státního registru populace vystavené záření jako důsledku Černobylské katastrofy (Černobylský registr). Údaje Černobylského registru jsou nutné pro vyvozování závěrů. Používají se pro rozvržení léčby a rehabilitace, vývoji dlouhodobých programů zdravotní rehabilitace a dokumenty pro sociální ochranu populace vystavené záření v důsledku Černobylské havárie.

Na druhou stranu slouží tato data jako základ pro studium medicínsko-biologických důsledků nehody. V dnešní době je možné, v důsledku dvacetiletého sledování skupiny dotčené populace, říci následující:

- Byla prokázána radiací podmíněná povaha nadměrného výskytu rakoviny štítné žlázy u jedinců vystavených radionuklidům jódu v dětství a dospívání. Výskyt rakoviny štítné žlázy pořád stabilně narůstá u dospělé populace Běloruska. Díky včasné diagnóze

a vhodně načasovanému zdravotnickému zásahu byly možné smrtelné důsledky rakoviny štítné žlázy sníženy na minimum.

- Nedávno provedené výzkumy stále neprokázaly přímý vztah důsledků náhodného ozáření a zvýšeného výskytu jiných nemocí, kromě rakoviny štítné žlázy. Přitom bychom měli vzít v úvahu krátký čas, který uběhl od konce teoreticky minimálního latentního období.

- Mezi nejméně chráněnou skupinou likvidátorů nadměrně narůstá výskyt maligních tumorů, např. plic, močového měchýře, kůže a žaludku oproti kontrolní skupině. Nebezpečí výskytu všech zmíněných typů maligních tumorů u likvidátorů je o 23% vyšší než u neexponované populace: rakovina žaludku – 15%, tlustého střeva – 33%, rakovina plic – 26%, močového měchýře – 65%, ledvin – 24%, štítné žlázy – 2,6krát.

- U dětí žijících na územích kontaminovaných radionuklidy – regiony Gomelu a Mogileva v r. 1993 – 2003 ve srovnání s obdobím před nehodou nebyl pozorován nárůst leukémie včetně Hodgkinovy choroby a non-Hodgkinova lymphomu. Přesto tyto regiony vykazaly náhodný nárůst všech forem chronické leukémie u populace jako celku a výrazný nárůst výskytu non-Hodgkinova lymphomu.

- V období 1990-2003 nastal statisticky výrazný nárůst rakoviny prsu u ženské populace žijící na územích, kontaminovaných radionuklidy. Riziko rakoviny prsu u této skupiny je o 25% vyšší než u kontrolní skupiny. Specifickým znakem rakoviny prsu v kontaminovaných územích je její posun do mladších věkových skupin: nejvyšší výskyt byl zaznamenán u žen o 15 let mladších a korespondoval s věkovou skupinou 55-59 let, u žen v kontrolní skupině to bylo 70-74 let. Byla zjištěna lineární souvislost mezi akumulovanou dávkou záření a zjištěným úměrným nebezpečím rakoviny prsu u ženské populace regionu Gomel.

- Speciální pozornost nutno věnovat zaznamenanému vysokému výskytu kataraktu hlavně u pracovníků úklidových čt.

- Vážné znepokojení je způsobeno výrazným nárůstem nemocí, vyznačujících se hypertenzí, cerebrovaskulárními poruchami, infarkty myokardu, chorobami štítné žlázy u tělesně zdatných likvidátorů a populace žijící na územích kontaminovaných

radionuklidy. Statisticky výrazný nárůst vrozených deformací v zasažených územích není pozorován. Nicméně celkově se v zemi počet zjištěných vrozených deformací ve striktních záznamech zvýšilo na dvojnásobek ve srovnání s dobou před nehodou (7).

4.6.1 Rakovina štítné žlázy

Jeden z hlavních radionuklidů uvolněných při havárii Černobylu byl jód ^{131}I . Štítná žláza akumuluje jód z krevního řečiště v rámci normálního metabolismu. Proto spadá radioaktivního jódu vedl u místních obyvatel k závažnému ozáření štítné žlázy při vdechování a požívání kontaminovaných potravin, zejména mléka. Štítná žláza je jedním z orgánů nejvíce náchylným k vyvolání rakoviny ozářením. Zjistilo se, že děti jsou nejzranitelnější částí populace a po havárii byl zaznamenán podstatný nárůst rakoviny štítné žlázy u lidí, kteří byli ozáření jako děti.

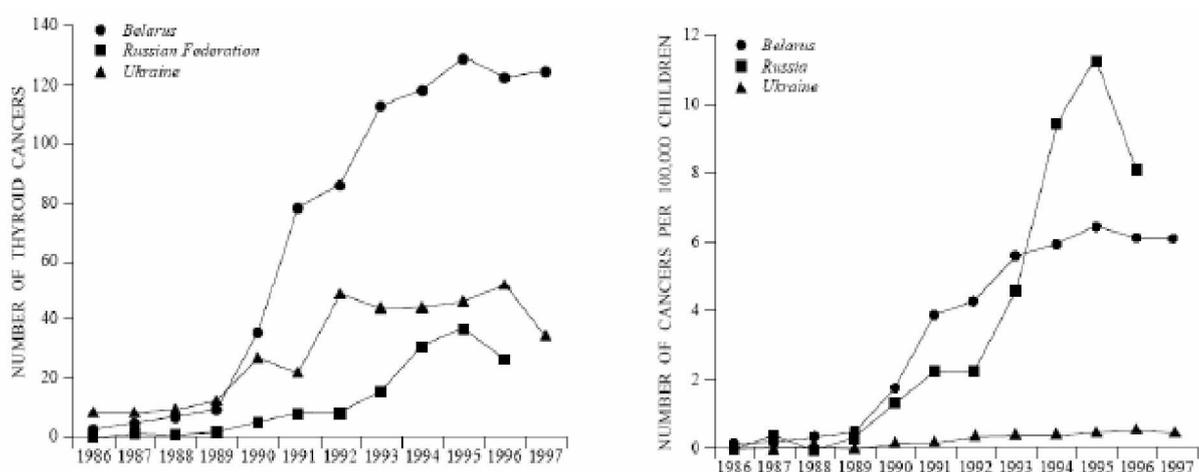
V období 1986-2004 její výskyt u dospělé populace vykazoval 6-ti násobný nárůst z 1,9 případů na 100.000 obyvatel v r. 1986 na 12,7 případů na 100.000 obyvatel v 2004. Vrchol výskytu u dětí nastal v období 1995-1996, kdy vzrostl 39 krát ve srovnání s rokem 1986.

V období 1986-2004 bylo zaznamenáno 2.430 případů rakoviny štítné žlázy u jedinců vystavených záření ve věku 0-18 let, navíc 2.399 z nich bylo diagnostikováno v r. 1990. Celkový počet primárně diagnostikovaných případů rakoviny štítné žlázy z období po nehodě (graf 7).

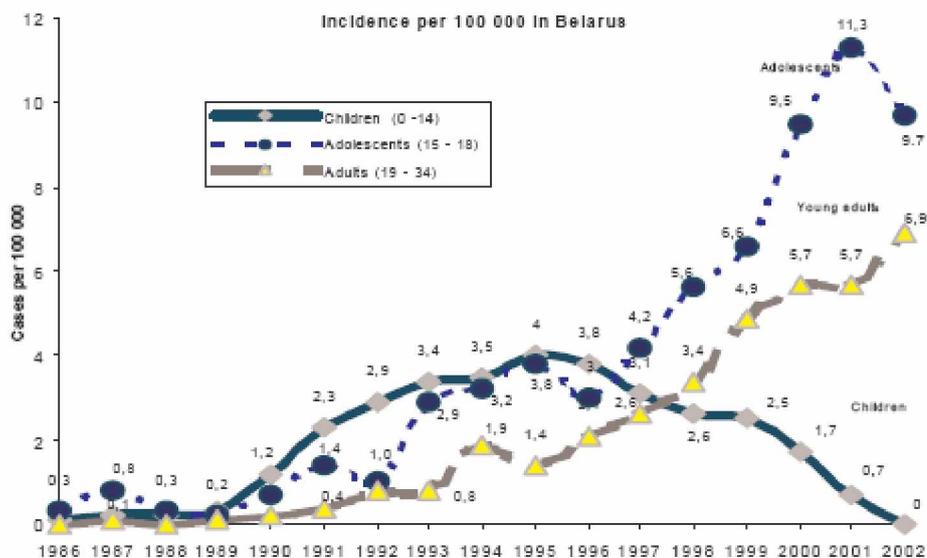
Nárůst výskytu rakoviny štítné žlázy vyžadoval absolutně nový přístup k diagnostikování a léčbě maligních a benigních tumorů štítné žlázy.

Vypracovaná metoda léčby pacientů s lokálně umístěnou rakovinou štítné žlázy zajišťuje v 98% případů 5 let života a umožňuje snížit riziko návratu nemoci na 3,2%. Radiojódová terapie u pacientů se vzdálenými metastázemi rakoviny štítné žlázy končí v 55,5% případů trvalým snížením a zmírňuje úmrtnost na 0,9% (celosvětově činí cca 10%) (7).

Graf 6, 7: Rakoviny štítné žlázy u dětí v letech 1986 – 1997(dle UNSCEAR 2000) (4)



Graf 8: Incidence rakoviny štítné žlázy u dětí v Bělorusku 1986 – 2002 dle věkových skupin 0-14, 15-18, 18 + (3)



4.6.2 Výskyt maligních tumorů u likvidátorů

Ionizující záření je stanovenou příčinou určitých typů rakoviny, tj. leukémie a nádorových onemocnění. Ozáření různých částí populace vysokými dávkami po havárii JE je spojováno se zvýšeným výskytem rakoviny a úmrtnosti.

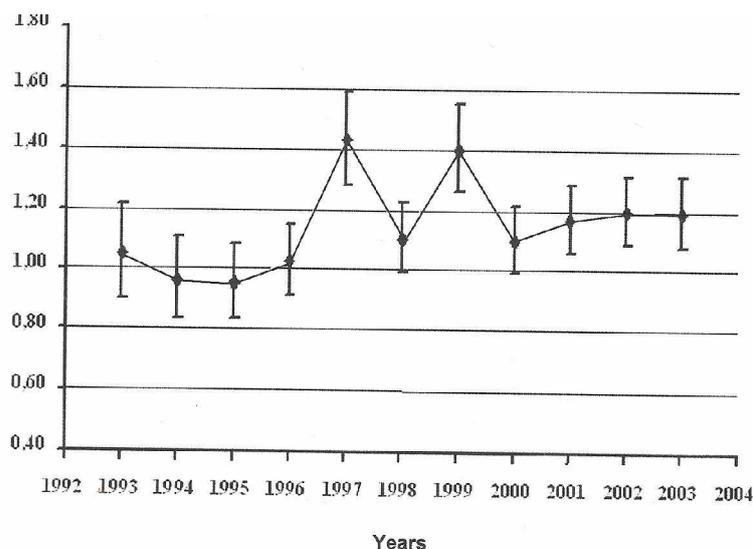
Relativní nebezpečí výskytu maligního tumoru u likvidátorů začalo narůstat v r. 1997 a v 1999-2003 výrazně překročilo hodnotu 1,0 (Graf 8).

V období 1993 – 1996 žádné místo výskytu tumoru kromě štítné žlázy nevykazovalo statisticky výrazný nárůst.

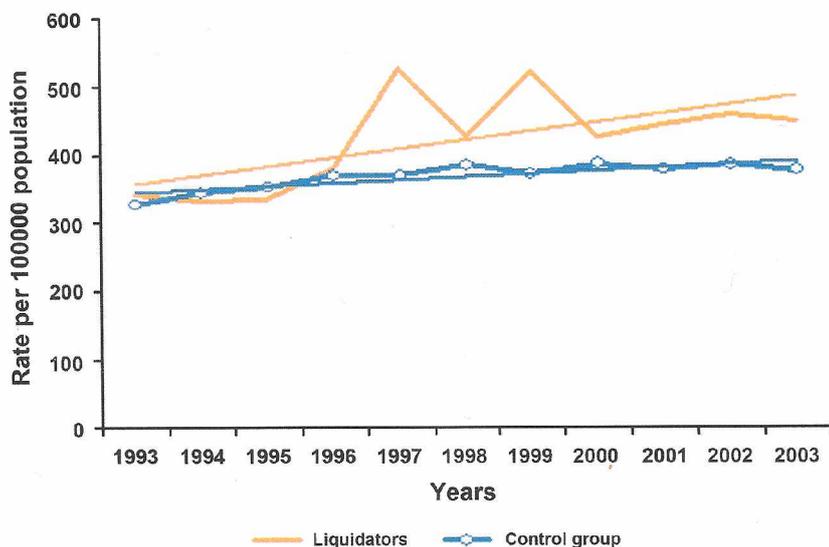
V období 1997 – 2003 relativní nebezpečí výskytu rakoviny žaludku, tlustého střeva, plic, močového měchýře, ledvin, štítné žlázy přesáhlo hodnotu 1,0.

Tempo růstu výskytu maligního tumoru plic, žaludku, ledvin, močového měchýře u likvidátorů je výrazně vyšší než tempo u kontrolní skupiny obyvatel. Výrazné rozdíly v tempu růstu rakoviny žaludku a plic u likvidátorů ve srovnání s kontrolní skupinou byly způsobeny opačným trendem dynamiky vývoje: u likvidátorů byl pozorován statisticky výrazný nárůst výskytu a u kontrolní skupiny naopak pokles (Graf 9) (7).

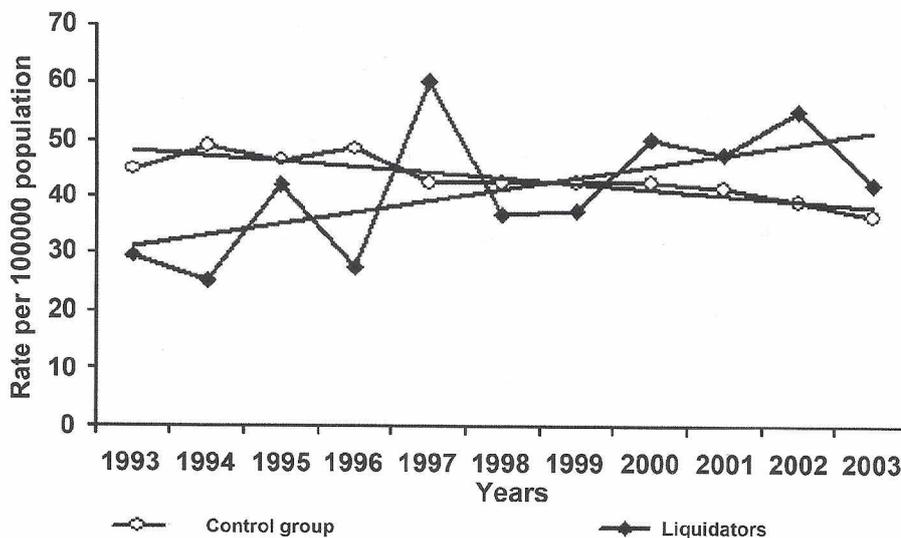
Graf 9: Dynamika relativního nebezpečí vzniku maligních tumorů mezi likvidátory (7)



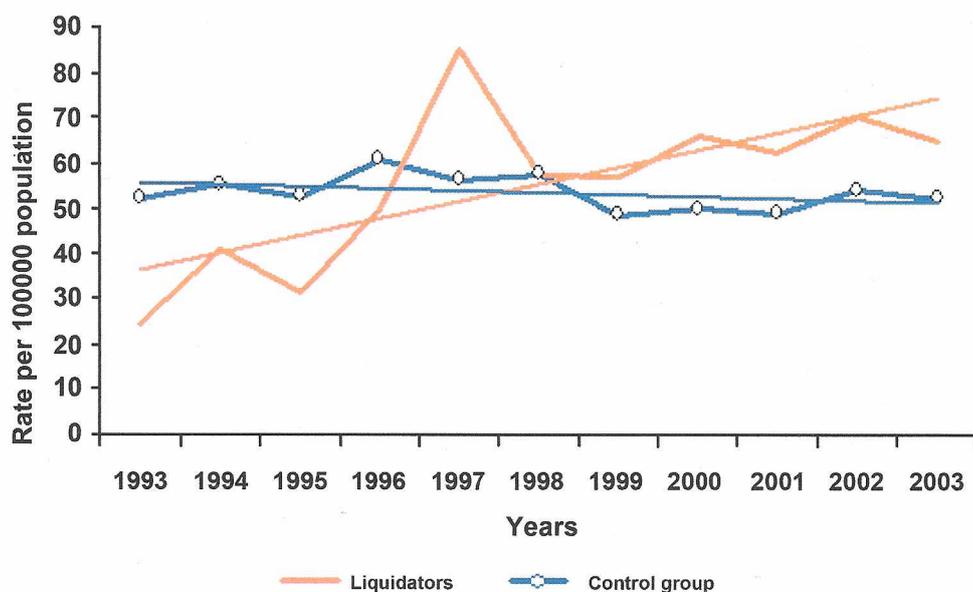
Graf 10: Dynamika standartizované míry výskytu maligního tumoru u likvidátorů a populace kontrolní skupiny v období let 1993 – 2003 (7)



Graf 11: Dynamika standartizované míry výskytu rakoviny žaludku u likvidátorů a populace kontrolní skupiny v období 1993 – 2003 (7)



Graf 12: Dynamika standartizovaného výskytu rakoviny plic u likvidátorů a populace kontrolní skupiny v období 1993 – 2003 (7)



4.6.3 Výskyt hematoblastózy u populace regionů Gomelu a Mogileva

Celkový počet případů leukémie u Běloruských dětí (0 – 14 let) v období 1990 – 2004, kdy bylo zaznamenáno 1.117 případů. Zmíněná patologie je nejvyšší z pohledu světové struktury výskytu maligního tumoru u dětí (asi 30% případů) – je na prvním místě. U Běloruských dětí během sledovaného období byl podíl případů leukémie nižší (24,4%) v důsledku zvýšeného výskytu karcinomu štítné žlázy způsobeného zářením.

V období 1990 – 2004 nebylo prokázáno zvýšení ani u celkového počtu případů leukémie, ani u akutní lymfoblastní leukémie (ALL). V Bělorusku obecně nepřesahuje výskyt leukémie stejně jako akutní lymfoblastní leukémie a akutní myeloblastní leukémie (AML) výskyt v evropských zemích (tab.10) (7).

Tab.10: Standartizovaný poměr leukémií dle věku vztažené na milion dětí (0 -14 let) v Evropě (1990 – 1999) a v Bělorusku (1990 – 1999, 2000 – 2004) (7)

| | Evropa (na 1 milion dětí) | | | | | | | Bělorusko | |
|----------|---------------------------|----------|---------|-------|----------------|-------------|------|-----------|--|
| | Centrální | Východní | Severní | Jižní | Velká Británie | Celá Evropa | 1990 | 2000 | |
| | | | | | | | 1999 | 2004 | |
| Leukémie | 45,1 | 39,2 | 48,5 | 43,3 | 43,6 | 44,1 | 38,3 | 40,3 | |
| ALL | 36,8 | 31,4 | 40,3 | 35,2 | 35,8 | 35,9 | 31,0 | 31,0 | |
| AML | 7,5 | 6,9 | 4,9 | 6,3 | 5,8 | 6,3 | 4,8 | 7,1 | |

U dětí, žijících v oblastech s různými hladinami kontaminace radionuklidy v regionech Gomelu a Mogileva v období po nehodě, ve srovnání s obdobím před ní (1979 – 1985) nebyl zaznamenán nárůst případů leukémie, Hodgkinovy choroby ani non-Hodgkinova lymfomu.

Ve srovnatelných obdobích nebyl všeobecně zaznamenán nárůst výskytu akutních forem leukémie u dospělé populace Gomelu a Mogileva, stejně jako u populace žijící na nejvíce kontaminovaných územích. V těchto regionech může být zaznamenán nárůst akutních lymfoblastních a non-lymfoblastních forem leukémie v období 1993 – 2003 vysvětlen pomocí vylepšené diagnostiky, která vedla k výraznému snížení podílu akutní leukémie nespecifikovaného buněčného typu.

V období 1993 – 2003, ve srovnání s obdobím 1979 – 1985, byl v regionech Gomelu a Mogileva stejně jako v nejvíce kontaminovaných územích zaznamenán nárůst výskytu všech forem chronické leukémie.

Přitom v nejvíce kontaminovaných oblastech regionu Gomel byl v období 1993-2003 počet případů zjištěné chronické lymfo a myeloleukémie, erytémie vyšší, než výskyt v regionu Gomel všeobecně. V zasažených oblastech regionu Mogilev v období

1993 – 2003 výskyt pouze lymfo a myeloleukémie převýšil podobný poměr zjištěný v regionu jako celku; ale i tak je výskyt chronické myeloleukémie nižší než ve zmíněných oblastech před nehodou v Černobyly.

Při srovnání období 1979 – 1985 a 1993 – 2003 lze vysledovat statisticky výrazný nárůst výskytu myelomatózy u populace regionů Gomelu a Mogileva všeobecně, a rovněž u obyvatel teritorií kontaminovaných radionuklidy. Přitom nebyly pozorovány výrazné rozdíly mezi výskytem v zasažených územích a v regionu jako celku.

Ve srovnání s mírou výskytu před černobylskou nehodou byl v období 1993-2003 zaznamenán výrazný nárůst non-Hodgkinova lymphomu u populace oblastí Gomel a Mogilev včetně populace žijící v zasažených územích. Navíc ve druhém sledovaném období míra výskytu této nemoci, zjištěná u populace zasažených oblastí, převýšila obdobný poměr výskytu u populace regionu jako celku.

Nárůst míry výskytu Hodgkinovy choroby u populace žijící na územích Gomelu a Mogileva s různou radioaktivní kontaminací v období 1993 – 2003 nebyl ve srovnání s obdobím před nehodou zaznamenán.

Získané výsledky naznačující zvýšené riziko výskytu rakoviny prsu a statisticky výraznou závislost efektu dávky záření u žen regionu Gomel, vystavených záření v souvislosti s černobylskou nehodou, jsou předběžné a budou potvrzeny při dokončení případové studie. Měli bychom si všimnout, že nejasnosti v získaných výsledcích vyplývají z neurčitosti dávek (7).

4.6.4 Rakovina prsu u ženské populace

V současnosti existují výrazné důkazy, že efekt ionizujícího záření velmi zvyšuje nebezpečí vývoje rakoviny prsu u žen, které přežily atomové bombardování a u pacientů podrobených terapií ozařováním. To je důvod, proč je tolik důležité zkoumat výskyt rakoviny prsu u žen vystavených externímu a internímu záření v důsledku nehody v Černobyly a žijících v jednom z nejvíc zasažených regionů, Gomelu. V období 1990 – 2003 byl zaznamenán výrazný statistický nárůst výskytu rakoviny prsu u ženské populace regionu Gomel, žijící na území s hustotou kontaminace ^{137}Cs 185 – 555 kBq/m² a

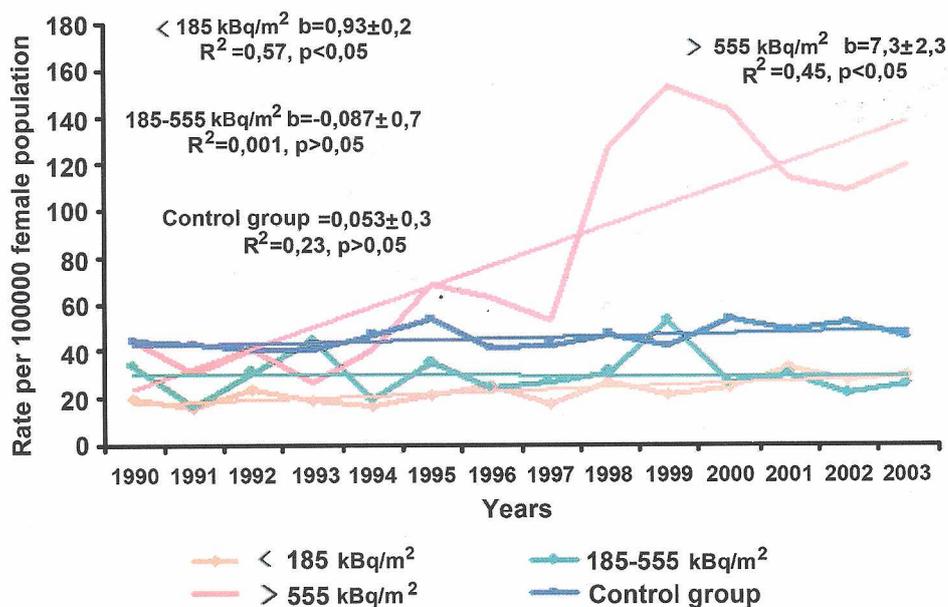
nad 555 kBq, ve srovnání s příslušnými hodnotami na územích s hustotou kontaminace ^{137}Cs 37 – 185 kBq/m² (7).

Dynamika výskytu na územích podrobených sledováním vykazovala také výrazné rozdíly. Podstatný nárůst výskytu byl zaznamenán u žen žijících na území s hustotou kontaminace ^{137}Cs nad 555 kBq/m² ve srovnání s kontrolní skupinou a méně kontaminovanými územími.

U žen z kontrolní skupiny, stejně jako u těch, které žily na územích s hustotou kontaminace ^{137}Cs 37 – 185 kBq/m² byl meziroční nárůst výskytu 1,2% resp. 5,7%, zatímco na územích s hustotou kontaminace ^{137}Cs nad 555 kBq/m² byl meziroční průměrný nárůst výrazně vyšší – 32,7%.

Věková analýza výskytu rakoviny prsu vykazovala závažný posun směrem k mladšímu věkovému průměru u žen žijících na územích kontaminovaných radionuklidy ve srovnání s kontrolní skupinou. Takže, na územích s hustotou kontaminace na 555 kBq/m² byl vrchol výskytu dosažen ve věkové skupině 55-59 let (7). S nárůstem radiační dávky byl pozorován nárůst výskytu rakoviny prsu u žen. Získané výsledky naznačující zvýšené riziko výskytu rakoviny prsu a statisticky výraznou závislost efektu dávky záření u žen regionu Gomel, vystavených záření v souvislosti s černobylskou nehodou, jsou předběžné a budou potvrzeny při dokončení případové studie. Měli bychom si všimnout, že nejasnosti v získaných výsledcích vyplývají z neurčitosti dávek (7).

Graf 13: Dynamika výskytu rakoviny prsu u žen žijících v regionu Gomel a územích s hustotou kontaminace 37 – 185 kBq/m², 185 – 555 kBq/m² a kontrolním regionu (Vitebsk) (7)



4.6.5 Výskyt zákalů (kataraktu)

Mezi chorobami očí u likvidátorů-mužů v období 1993-2003 zjištěn významný nárůst výskytu zákalu (kataraktu): roční tempo růstu bylo v průměru 6,0%. Podíl zákalu (kataraktu) u likvidátorů byl výrazně vyšší ve srovnání s podílem u jiných skupin zasažené mužské populace (7).

4.6.6 Nemoci oběhového systému

Výrazný nárůst primárního výskytu nemocí oběhového systému u zasažené populace, zejména u likvidátorů - mužů, budí velké obavy. V období 1993-2003 měl celkový výskyt u mužů - likvidátorů ve třídě „nemoci oběhového systému“ roční tempo růstu v průměru 2,1%. Byl také zjištěn statisticky výrazný vzrůst nemocí vyznačujících se zvýšeným krevním tlakem (4,3%); akutního infarktu myokardu (3,9%); cerebrovaskulárních chorob (6,7%); arteriosklerózy krajních tepen (2,3%). Maximální tempo růstu bylo zjištěno u nemocí vyznačujících se zvýšeným krevním tlakem, druhé místo zauímají cerebrovaskulární choroby – ročně bylo zaznamenáno 164 (zvýš. kr. tlak) a 92 (cerebrovask.) nových případů (na 100.000 mužů). Pozornost by měla být věnována výraznému nárůstu výskytu cerebrovaskulárních nemocí a nemocí vyznačujících se hypertenzí u mladších skupin produktivního věku (40-49 let).

Speciálně by mělo být zaznamenáno, že byl zjištěn výrazný nárůst chorob, vyznačujících se zvýšeným krevním tlakem, ischemické choroby srdeční včetně infarktu myokardu a cerebrovaskulárních chorob u mužů-likvidátorů ve srovnání s poměry u mužů ostatních zasažených skupin.

Podobné trendy primárního výskytu jsou pozorovány také u žen-likvidátorek (7).

4.6.7 Genetické dopady

Studie vrozených deformací novorozenců a plodu byla provedena na základě běloruského registru vrozených vad. Analýza dynamiky vrozených vad v letech 1981-2004 ukázala, že po nehodě v Černobylu v Bělorusku počet zjištěných vrozených vad v přesné registraci (VV PR) ročně vzrůstal. Frekvence těchto vrozených vad vzrostla z 5,58 v období před nehodou na 9,38 v letech 2001-2004.

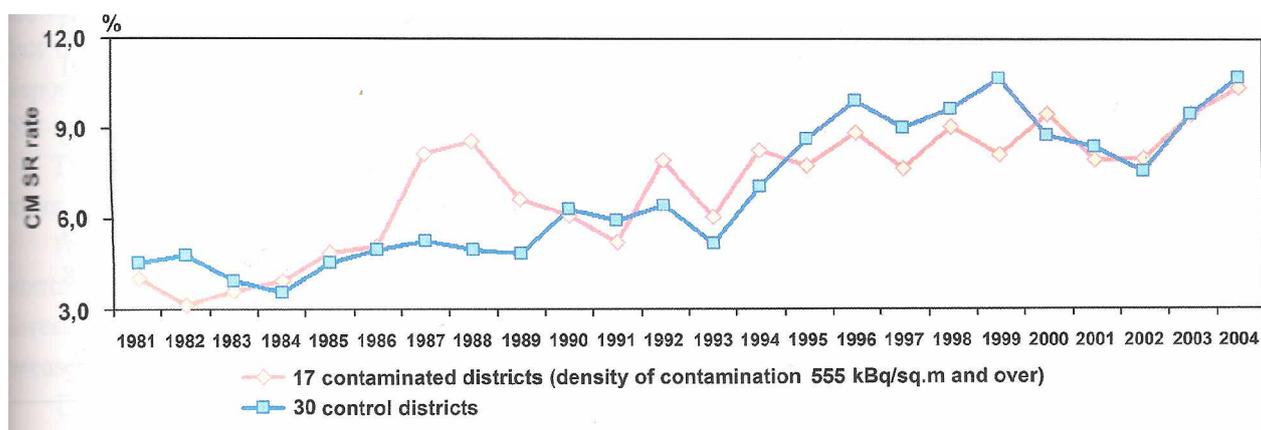
Dynamika frekvence VV PR na regionální úrovni kopírovala trend zaznamenaný na úrovni okresů, ale rozdíly mezi kontaminovanými regiony byly méně výrazné. Pro poslední desetiletí se tempo růstu vrozených vad v přesné registraci výrazně snížilo.

Analýza dynamiky některých deformací ukázala, že vedle zvýšené frekvence VV PR v prvních letech po nehodě byla mnohem vyšší frekvence deformací s vysokým podílem dominantních mutací - polydaktylie (výskyt více prstů), redukční deformace okrajových částí a vícenásobné vrožené deformace.

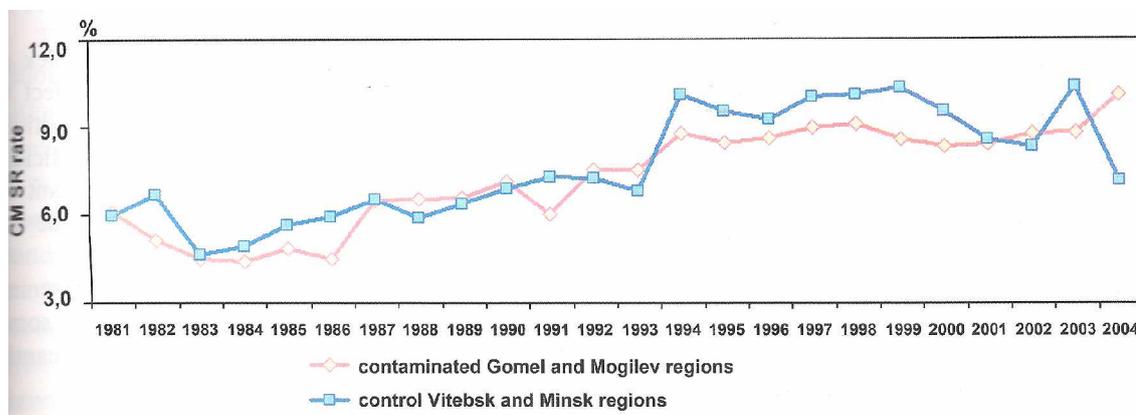
Nejpravděpodobnějším důvodem pro stabilní nárůst frekvence VV PR v Bělorusku je komplexem negativních faktorů. Vedle efektu ionizujícího záření nemůžeme přehlížet negativní efekt dalších faktorů na embryogenezi a vrožené vady v přesné registraci jako jsou např. chudá strava, deficit vitamínů a proteinů, nedostatek rozpustného selenu, vysoký podíl populace s nedostatečnou funkcí štítné žlázy. Závažný nárůst podílu deformací s vysokým podílem dominantních de novo mutací v regionech s maximální hladinou kontaminace radionuklidy nevylučuje roli složky záření.

V zemi provedený specializovaný pravidelný zdravotnický průzkum zabránil dramatickému zhoršování zdravotního stavu, napomohl stabilizaci poměru výskytu a dokonce výraznému poklesu některých tříd a forem chorob. Podíl úmrtnosti ve skupinách zasažené populace je výrazně nižší než u kontrolní skupiny nevystavené radiaci (7).

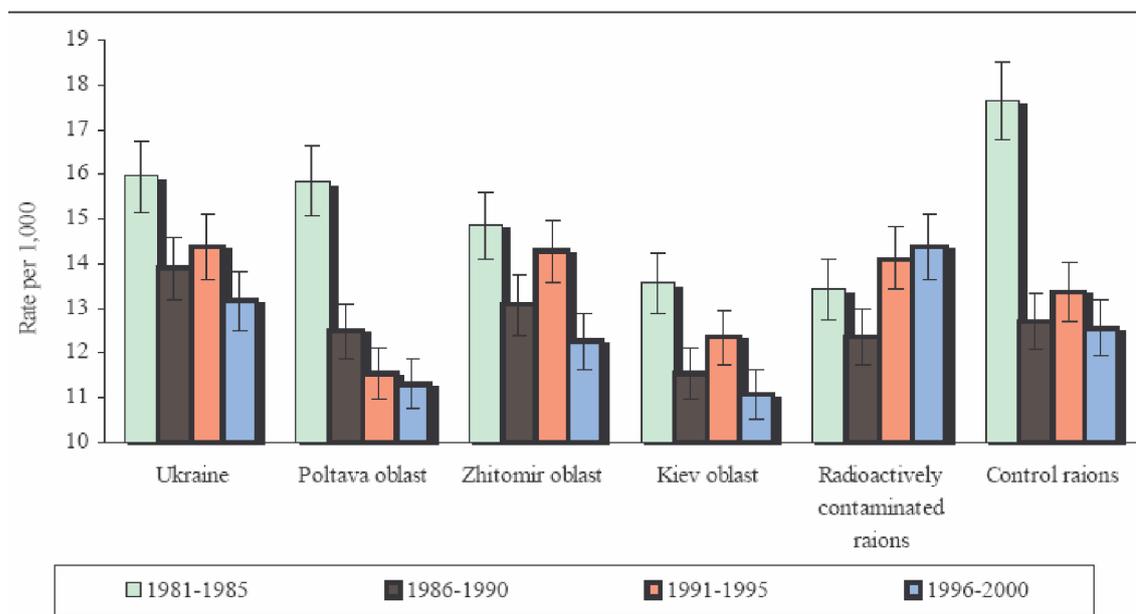
Graf 14: Frekvence vrožených vad v přesné registraci v 17 kontaminovaných a 30 kontrolních okresech (7)



Graf 15: Frekvence vrozených vad v přesné registraci v kontaminovaných regionech (Gomel, Mogilev) a kontrolních regionech (Vitebsk, Minsk) (7)



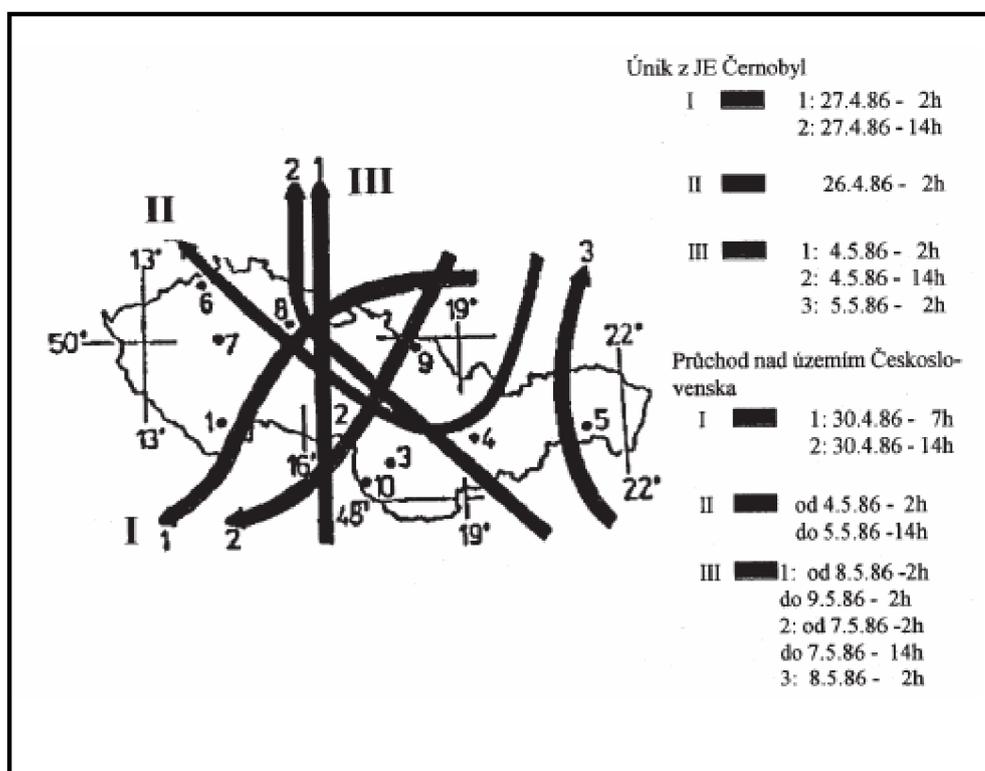
Graf 16: Kojenecká úmrtnost na Ukrajině 1981 – 2000 (3)



4.7 Situace v Československu po havárii v Černobylu

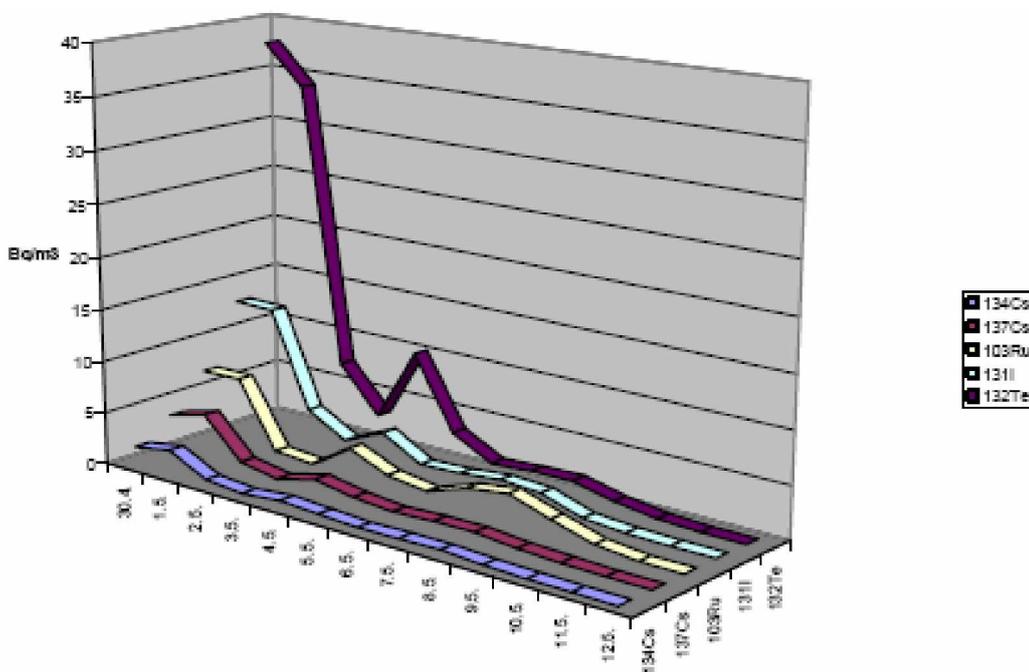
První signály o příchodu vzdušných kontaminovaných mas na naše území zachytily v průběhu noci z 29. na 30.dubna 1986 v rámci prováděných kontrolních měření. Byly zaznamenány celkem tři významné průchody. První v noci z 29. na 30.dubna 1986, druhý 3. a 4. května 1986 a třetí 7.května 1986 (15).

Obr.12: Předpokládané trasy kontaminovaných vzdušných mas (15)



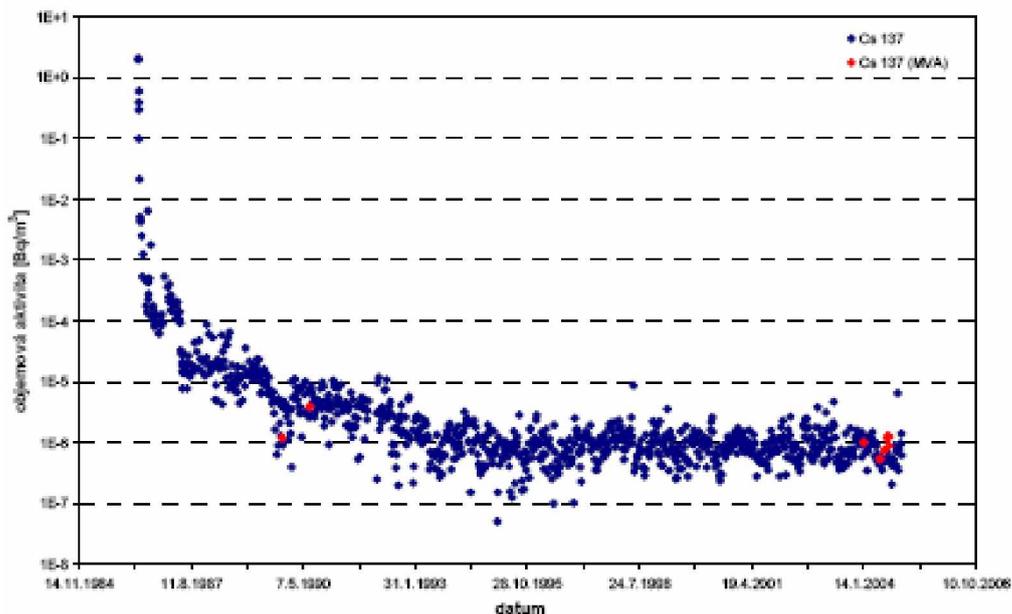
V aerosolech bylo identifikováno až 20 různých radionuklidů, přitom typické hodnoty z hlediska expozice významných radionuklidů (^{131}I , ^{132}Te , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{106}Ru) se pohybovaly v řádu jednotek až desítek Bq/m^3 . Poměr jednotlivých uniklých radionuklidů se během nehody měnil, to umožnilo využít například poměru ^{103}Ru a ^{137}Cs k identifikaci jednotlivých průchodů vzdušných mas (15).

Graf 17: Objemové aktivity významných radionuklidů v ovzduší v prvních dnech po nehodě (15)



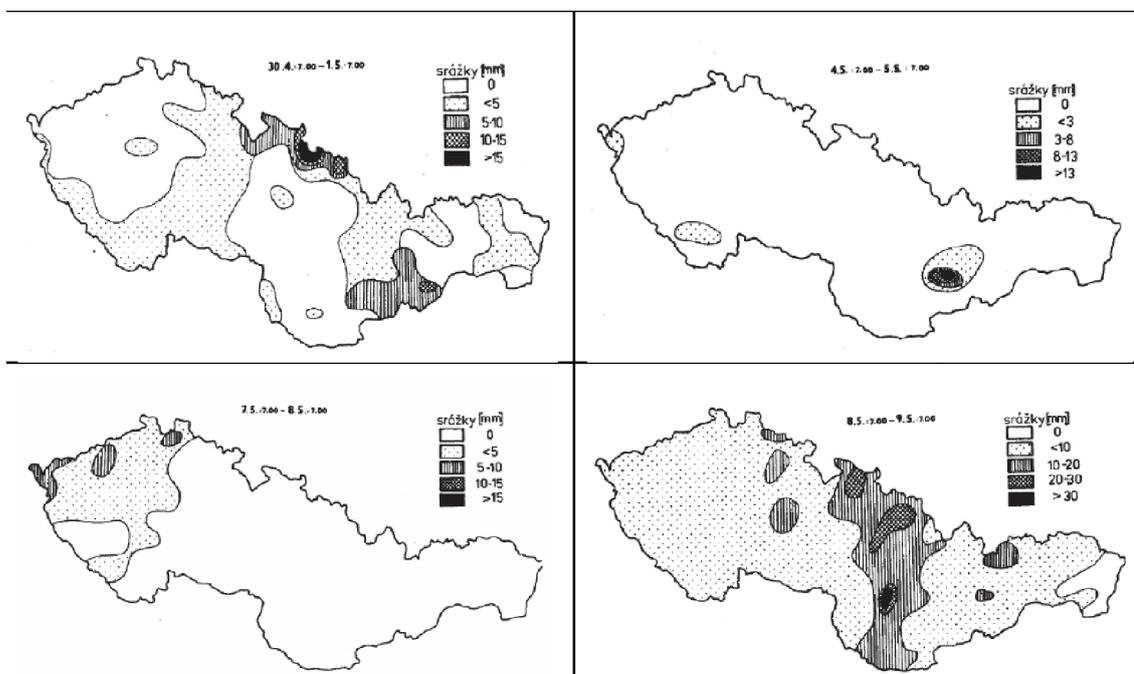
Důležité je zmínit zastoupení jódu v různých fyzikálně chemických podobách a to přibližně: v aerosolové formě (20 – 30% aktivity), v plynné podobě CH₃I (30 – 40%). V odebraném vzdušném aerosolu byla stanovena i objemová aktivita ⁸⁹Sr a ⁹⁰Sr, která byla však 10 až 50 krát nižší než objemové aktivity ¹³⁷Cs. V dalších analýzách bylo ve vzduchu stanoveno malé množství transuranů ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu a ²⁴²Cm (na úrovni μBq/m³), malé zvýšení tritia, 30.dubna 1986 byl na úrovni desítek Bq/m³ také naměřen ¹³³Xe. Aktivita v ovzduší výrazně poklesla po přechodu posledních kontaminovaných mas po 10.květnu (15).

Graf 18: Časový průběh dlouhodobého poklesu objemové aktivity ^{137}Cs v ovzduší (15)



Nehomogenita v kontaminaci území byla zejména důsledkem nerovnoměrných srážek při přechodu jednotlivých vzdušných mas.

Obr.13: Srážky na území Československa v období přechodu kontaminovaných mas (15)



Obr.14: Kontaminace na území ČR ^{137}Cs (15)



Zatímco např. přímé zevní ozáření z přechodu radioaktivního mraku bylo zanedbatelné (0,001 mSv), ozáření ze spadu bylo významnější. A toto zvýšení bylo běžnými prostředky měřitelné v časovém horizontu několika týdnů. Na příspěvku k zevnímu ozáření se podílely zejména $^{132}\text{Te} + ^{132}\text{I}$, ^{131}I , ^{103}Ru , dlouhodobě zejména radioizotopy cesia ^{137}Cs a ^{134}Cs . Po vymření krátkodobých radionuklidů po asi 2-3 měsících se zvýšení dávkového příkonu způsobené prakticky již jen izotopy cesia nedá na většině území běžným měřením již po několika týdnech odlišit od přírodního pozadí (v ČR na úrovni 0,1 Gy/h). Průměrná dávka od zevního ozáření ze spadu v České republice byla v roce 1986 odhadnuta na 0,05 mSv (za zbývající období lidského života cca 70 let (1986-2056 z modelu přibližně na 0,28 mSv) (15).

Co se týče sledování obsahu radionuklidů v potravinách a ingesci, ke kontaminaci došlo v období, kdy byla vzrostlá pouze tráva a některá listová zelenina (špenát, salát...). V období na přelomu dubna a května se při krmení hospodářských zvířat teprve přecházelo na zelené krmivo. Hmotnostní aktivity významných radionuklidů se u trávy pohybovaly v rozmezí stovek až tisíců Bq/kg, ale díky hmotnostnímu přírůstku (a rozpadu např. ^{131}I) poměrně rychle klesaly. Hlavní pozornost byla proto soustředěna na

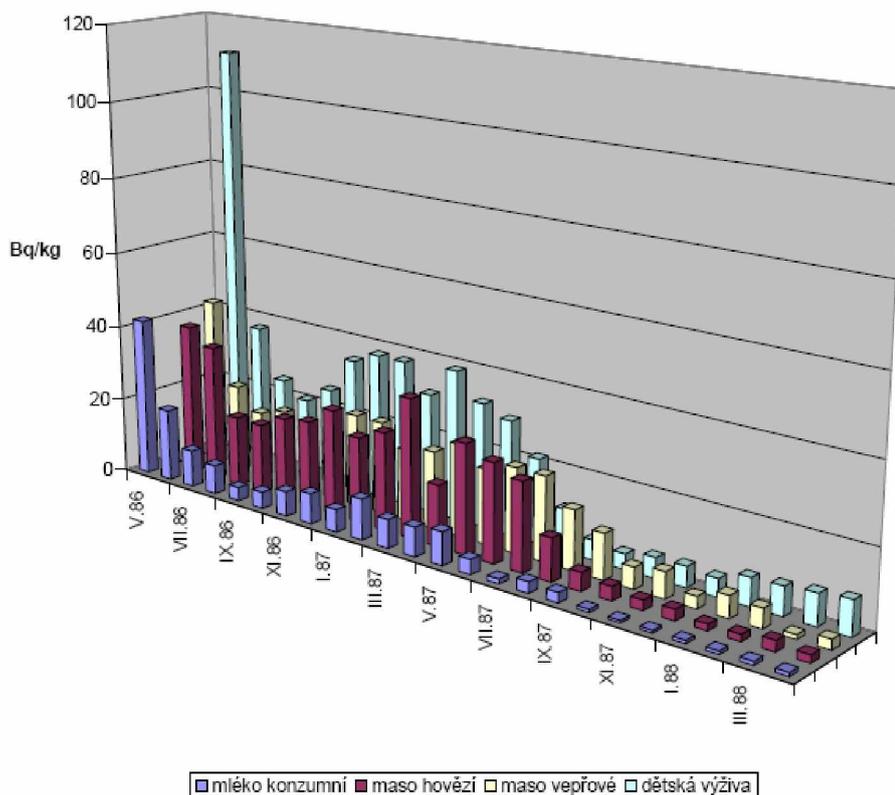
sledování obsahu radionuklidů v mléce a mléčných produktech, protože tyto produkty byly nejvýznamnějším zdrojem příjmu ^{131}I , ^{134}Cs a ^{137}Cs potravinovým řetězcem. Očekávalo se, že tato expoziční cesta je pravděpodobně významnější než inhalační příjem, a je přitom regulovatelná. Pozornost byla proto zaměřena na 25 vybraných mlékáren rozložených po celém území Československa. V květnu, červnu a prosinci bylo provedeno několik státních průzkumů, které zahrnovaly všechny mlékárenské závody ve státě. Aktivita ^{131}I v mléce z mlékáren po 15.5.1986 již na žádném místě nepřesáhla zásahovou úroveň 1000 Bq/l. Obsah ^{137}Cs ve vzorcích mléka z vybraných 25 mlékáren je sledován až do současné doby.

Speciální pozornost byla také věnována dětské mléčné výživě, jelikož oblast, ze které se sváželo mléko do těchto závodů, zahrnovala převážně okresy více zasažené radioaktivním spadem (Náchod, Ústí nad Orlicí, Šumperk). To se projevilo už v prvních dnech května zvýšeným obsahem radionuklidů ^{131}I , ^{134}Cs a ^{137}Cs v dětské mléčné výživě. Byly proměřeny mléka z jednotlivých kravínů, svozové linky, kontrolovány směsné vzorky z každého dne výroby vždy dvakrát - ihned po ukončení výroby, jednak po zabalení ještě před expedicí výrobků. Distribuce dětské mléčné výživy vyrobené po 29.4.1986 byla pozastavena a podmíněna souhlasem hlavního hygienika. Teprve po vyčerpání zásob byla tato výroba uvolněna z částí pro expedici: vycházelo se z výsledků měření a uvolňovány byly dětské mléčné výživy s nejnižším obsahem radionuklidů. Již tímto zpožděním v distribuci byl prakticky eliminován krátkodobý ^{131}I a obsah radioizotopů cesia byl omezen na v té době asi nejnižší reálně dosažitelnou úroveň. Opatření na snížení měrné aktivity dětské mléčné výživy zůstala v platnosti do konce roku 1987. Sledování obsahu ^{137}Cs v dětské mléčné výživě trvá v redukováném rozsahu dodnes.

Z dalších potravin byly sledovány ty, které jsou z hlediska spotřeby obyvatelstva nejvýznamnější, tj. kromě mléka, zejména maso, obilniny, zelenina a ovoce. Hmotnostní aktivity ^{131}I u listové zeleniny (salát, špenát, pórek...), případně u jarních sušených léčivých rostlin se v prvních dnech pohybovaly v řádu až tisíců Bq/kg, v ovoci a kořenové zelenině se díky poločasů a vegetačním obdobím kontaminace ^{131}I projevila minimálně. Kontaminace ovoce a zeleniny cesiem v roce 1986 se pohybovala v rozpětí jed-

notek až desítek Bq/kg (vyjímečně stovek u rybízu), kontaminace obilnin ve sklizni 1986 se pohybovala v rozmezí jednotek až desítek Bq/kg (15).

Graf 19: Časový průběh hmotnostní aktivity ^{137}Cs vybraných potravin (první 2 roky po nehodě) (15)



Radioizotopy cesia se vyskytují v přírodních ekosystémech. Je známo, že rychlost ubývání cesia z prostředí je pro přírodní ekosystémy delší než pro oblasti s obdělávanou půdou. U nás se takové oblasti vyskytují zejména na Šumavě a v Jeseníkách. Příjem cesia z potravin z přírodních ekosystémů (minoritních potravin) však nejsou dominantní v jídelníčku české populace a dávka z nich nepřispívá významně k průměrné dávce naší populace. Konzumace hub a zvěřiny bývá čas od času otázkou zvýšeného zájmu některých skupin obyvatelstva, proto byla do pravidelného sledování vnitřní kontaminace ^{137}Cs zařazena i skupina, která vykazuje zvýšenou konzumaci zejména zvěřiny. U malé skupiny lesníků byla pravidelně nacházena retence až o jeden až jeden a půl

řádu vyšší než je průměr u obyvatelstva. Znamená to, že zatímco úvazky efektivní dávky z ročního příjmu ^{137}Cs jsou obvykle 1 až 2 μSv , osoby, u nichž je dominantní složkou potravy zvěřina a houby, mohou mít roční dávku z příjmu ^{137}Cs potravou 10 až 100 μSv , což je maximálně 1/10 mezinárodně uznávaného limitu pro případné ozáření obyvatelstva z umělých zdrojů (15).

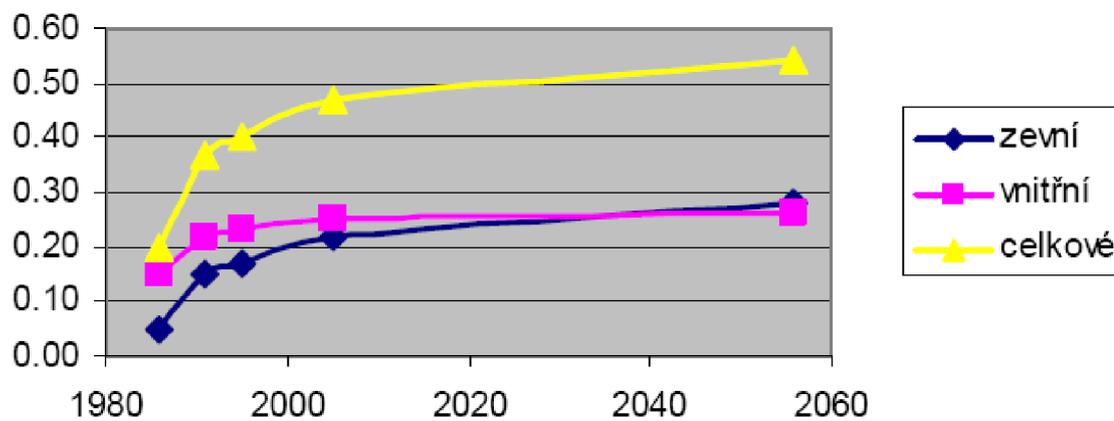
Tab.11: Úvazky efektivní dávky z příjmu radionuklidů v r. 1986 (15)

| | Inhalace μSv | Ingesce μSv | celkem μSv | Relativně (%) |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------|
| ^{131}I | 94 | 2 | 96 | 63 |
| $^{132}\text{I}+^{132}\text{Te}$ | 16 | - | 16 | 10,5 |
| ^{103}Ru | 0,7 | - | 0,7 | 0,1 |
| ^{137}Cs | 2,5 | 21 | 23,5 | 15,4 |
| ^{134}Cs | 1,8 | 14,5 | 16,3 | 11 |
| celkem | 115 | 37,5 | 152,5 | 100 |

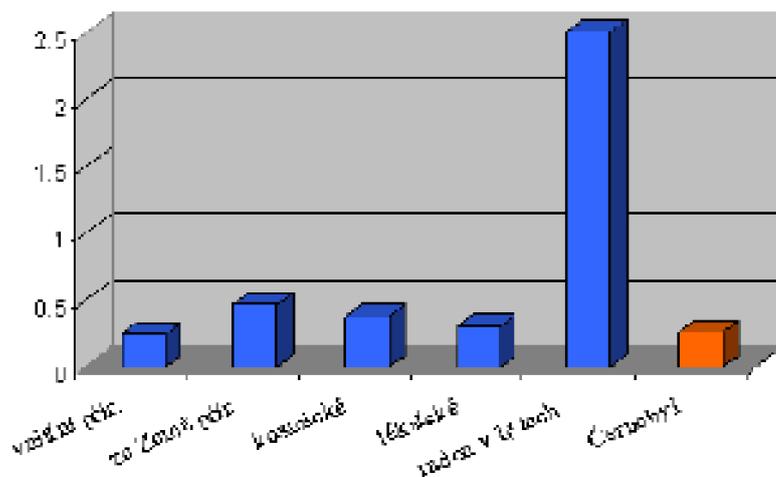
Tab.12: Srovnávání původních a nových odhadů dávek obyvatelstvu ČR z černobylské havárie (15)

| Dávka (mSv) | 1986 | 1986-1991 | 1986-1995 | 1986-2005 | 1986-2056 |
|-----------------------------------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Zevní ozáření | 0,05 | 0,15 | 0,17 | 0,22 | 0,28 |
| Vnitřní ozáření (původní) | 0,21 | 0,28 | 0,29 | 0,32 | 0,36 |
| Vnitřní ozáření (nový odhad) | 0,15 | 0,22 | 0,23 | 0,25 | 0,26 |
| Celkem původní | 0,26 | 0,43 | 0,46 | n/a | n/a |
| Celkem (nový odhad) | 0,2 | 0,37 | 0,4 | 0,47 | 0,54 |

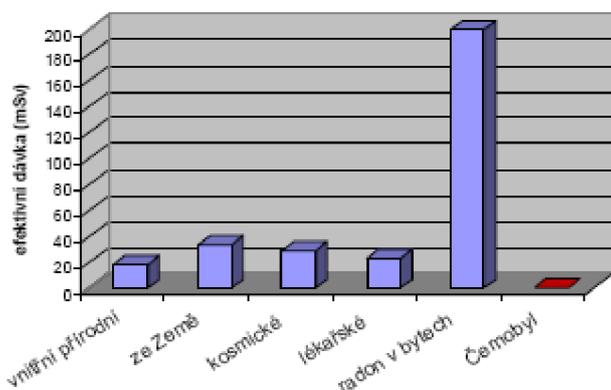
Graf 20: Časový průběh vývoje efektivní dávky (15)



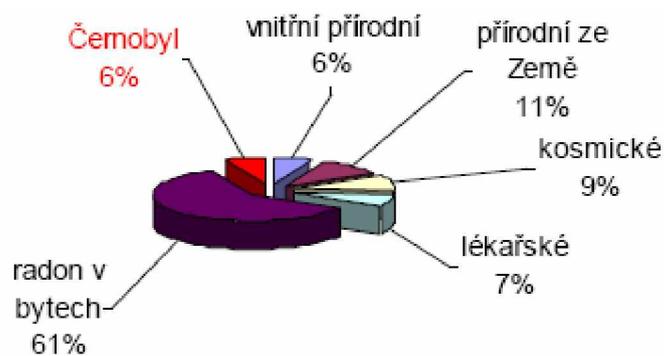
Graf 21: Průměrná efektivní dávka 1986 (15)



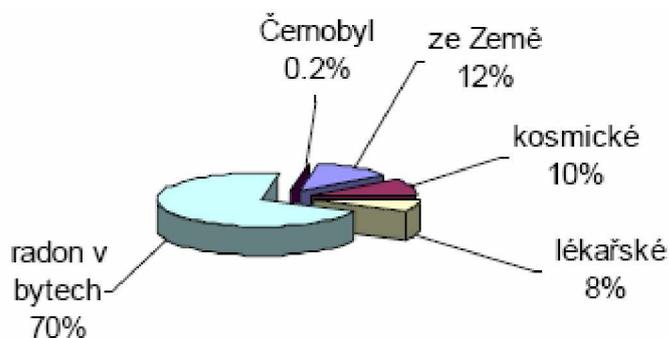
Graf 22: Průměrná efektivní dávka – celoživotně (15)



Graf 23: Relativní podíl ozáření v roce 1986 (15)



Graf 24: Relativní podíl ozáření celoživotně (15)



Vzhledem k měřeným aktivitám a dávkám, které podle našich i mezinárodních předpisů nevyžadovaly zavádění ochranných opatření, byla zavedena pouze taková opatření, která nezasahovala do života lidí a vyžadovala minimální finanční náklady (15).

1. Pokud to bylo realizovatelné, doporučeno ponechat dojnice ve stájích na suchém krmení
2. Z konzumace vyloučeno mléko s aktivitou ^{131}I vyšší než 1000 Bq/l (Doporučení WHO – vyřadit mléko s aktivitou vyšší než 2000 Bq/l)
3. Do spotřeby uvolněny zásoby sušeného a kondenzovaného mléka
4. Výroba dětské mléčné výživy dočasně přesunuta ze závodů Opočno a Zábřeh do provozny Nový Bydžov
5. Doporučeno zvýšené kropení silnic ve městech
6. Přechodně zastavena výroba léků z čerstvých hovězích štítných žláz
7. Jodová profylaxe zavedena na Slovensku u bačů z důvodu vysokých aktivit ^{131}I v ovčím mléce (15)

V. DISKUSE

Lidé ke svému modernímu životu potřebují stále více energie. Jako nejmladší zdroj energie se využívá energie jaderná, vyráběná v jaderných elektrárnách. Jaderné elektrárny však kromě výroby jaderné energie pro potřeby lidstva představují riziko nehod či havárií. I když riziko havárie jaderné elektrárny je velmi malé, při takové havárii může dojít k dlouhodobým následkům vzhledem k obyvatelstvu žijícímu v blízkosti elektrárny, ale i ve větší vzdálenosti, tak také na životním prostředí a to v důsledku úniku radionuklidů z jaderného reaktoru.

Při studiu tohoto tématu jsem se dozvěděla z historie jaderné energetiky o řadě nehodách a haváriích. Rozsáhlejší havárie byly zaznamenány tři, a to Windscale (Anglie-1957), Three Mile Island (USA-1979) a samozřejmě Černobyl (SSSR-1986), ale vážných nehod a havárií nastalo mnohem více. Při těchto třech haváriích došlo k úniku většího množství radioaktivity. Ani tehdejší Československo se svou jadernou elektrárnou v Jaslovských Bohunicích bohužel neuniklo havárii.

V anglické jaderné elektrárně Windscale 7. – 11. října 1957 došlo k havárii, jejíž příčinou byla porucha snímače teploty a následkem toho palivové články uvnitř reaktoru začaly hořet. Teplota přesáhla 1000°C a teprve čtvrtý den se podařilo zaplavením reaktoru 5 mil.litry vody požár uhasit. Při této havárii uniklo do okolí značné množství radionuklidů a to zejména ^{131}I , ^{137}Cs a ^{210}Po . Dávka, kterou dostali obyvatelé v okolí elektrárny, přesáhla desetinásobně celoživotní povolené maximum. Podle oficiálních odhadů vyvolala uniklá radioaktivita předčasnou smrt asi 300 lidí. Poškozený reaktor byl zalit do betonu a dodnes je v hrobce ukryto 22 t roztaveného a částečně shořelého uranu.

Další velkou havárií označovanou za největší jadernou havárii na západě byla havárie v jaderné americké elektrárně Three Mile Island 28. března 1979. V období nehody byl druhý blok, na němž se nehoda stala, v provozu méně než 3 měsíce. Havárie začala poměrně nevinně, čerpadlo sekundárního potrubí vypovědělo službu a poté také turbína, která se automaticky odpojila. Ačkoli reaktor již nevyráběl elektřinu, pracoval dál na plný výkon. Ani jedna z těchto událostí však nebyla neobvyklá. Tentokrát však

došlo k zablokování pojistného ventilu v otevřené poloze. Tlak v potrubí stále klesal, zatímco nádrž, do které ústil, brzy přetekla. Radioaktivní voda zaplavila prostor kolem reaktoru. Voda v reaktoru začala vřít. Teplota prudce stoupala a začaly prskat palivové tyče. Reaktor se začal tavit. A od této chvíle unikaly radioaktivní plyny pod tlakem přímo na oblohu nad okolím elektrárny. Důsledkem manipulací a tajeň je, že dodnes nikdo neví přesně kolik tehdy uniklo radioaktivních látek. Během týdne po havárii mnoho lidí pocíťovalo příznaky ozáření – silná kovová příchut' v ústech, záněty pokožky, pálení a slzení očí, nevolnost, zvracení a průjmy. Někdy potíže vyústily v nevyléčitelné záněty nebo zvýšení počtu bílých krvinek.

Ani Československo neuniklo havárii jaderné elektrárny. Dokonce zde došlo ke dvěma závažným haváriím. První havárie v jaderné elektrárně v Jaslovských Bohunicích nastala 5.ledna 1977, kdy došlo k úniku vysoce radioaktivního oxidu uhličitého. Příčinou bylo nedostatečné zasunutí palivových článků. Do životního prostředí uniklo značné množství radioaktivního ^{131}I a ^{137}Cs . Další ještě závažnější nehoda nastala 22. února 1977. Při výměně palivových článků se do reaktoru spustil i článek ucpaný těsnícím silikagelem. Chladicí plyn jím proto nemohl proudit a palivový článek se začal tavit. Poté se začaly tavit další články až se jich roztavila asi čtvrtina. Do okolí uniklo větší množství radioaktivity. Množství césia ^{137}Cs ve vodních rostlinách dosáhlo 67 000 Bq/kg, množství stroncia ^{90}Sr 28 000 Bq/kg.

Avšak největší katastrofou v jaderné energetice zůstává havárie jaderné elektrárny Černobyl. Slovo Černobyl dnes znají snad lidé na celém světě. Tehdy 26. dubna 1986 to byl skutečný šok pro celý svět. I když, jak jsem již zmínila existuje řada nehod v jaderné energetice žádná z nich není srovnatelná s havárií v Černobyly. Vždyť pro představu, radiace při havárii v Černobyly byla 40 krát vyšší než po výbuchu atomové bomby svržené na Hirošimu ve 2.Světové válce. V mé diplomové práci jsem se zaměřila na tuto havárii, jakožto havárii s velkým únikem radionuklidů do životního prostředí a snažila jsem se popsat nejvýznamnější radionuklidy uvolněné při jaderné havárii a jejich následná rizika. Snažila jsem se čerpat spíše z nejnovějších studií mezinárodních agentur z důvodu nejnovějšího zpracování tohoto tématu. Na téma následky Černobyly toho bylo napsáno již spoustu, spíše jsem se zaměřila na sumarizaci nejnovějších po-

znatků. A to vzhledem k tomu, že dlouho po havárii nebyli poskytovány skutečné informace, ale pouze zkreslené. Teprve později došlo k odhalení skutečných informací o této havárii. Z velké části jsem použila také literaturu napsanou ke 20. výročí této havárie k příležitosti Mezinárodní konference o Černobylu v Minsku.

Při této havárii uniklo do životního prostředí celkem $1,4 \cdot 10^{19}$ Bq radionuklidů a to zejména radioaktivní jód a césium, které představovaly značné ohrožení pro obyvatelstvo a to těsně po havárii, kdy bylo obyvatelstvo ohroženo zejména radioaktivním jódem, který se dostává do potravních řetězců. Z hlediska dlouhodobého rizika ohrožovaly obyvatelstvo zejména radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu jako cesium a stroncium.

Po černobylské havárii byla provedena řada opatření na snížení rizika radionuklidů uniklých do životního prostředí. Zaměřím se především na opatření, která byla provedena na území Běloruska, jakožto území, které bylo nejvíce zasaženo radioaktivním spadem. Při provádění protipatření na kontaminovaných půdách po černobylské havárii je možné pozorovat dvě fáze: 1986 - 1991 a od 1992 dodnes. V první fázi byla těžce kontaminovaná území, kde bylo nemožné dosáhnout výroby s přijatelným obsahem radionuklidů, vyřazena z provozu. Plodiny akumulující velké množství radionuklidů byly vyňaty z rotace plodin. Všude, kde se provedlo vápnění půdy, se aplikovaly také zvýšené dávky fosforických a draslíkových hnojiv. Na větší části bahnitých polí se provedlo odvodňování a vláčení, a také zatravňování a přetravňování pastvin a luk.

Od roku 1992 nastává fáze cílených protipatření v zemědělství z pohledu jednotlivých oblastí a chovných farem. Užívají se opatření pro snižování kontaminace v rostlinné výrobě, aplikace bakteriálních doplňků a nových forem hnojiv. Při pěstování dobytka se používá technologická separace krmiv v závislosti na stupni kontaminace radionuklidy. Normalizace dávek se dělá pomocí potravních doplňků, které snižují obsah radionuklidů v mléce. Výše zmíněná ochranná opatření umožnily snížení přenosu ^{137}Cs do zemědělských výrobků v průměru 10-krát. Zejména výroba mléka, které by přesahovalo povolené limity se snížila z 524,6 tisíc tun v r. 1986 na 1,4 tisíc tun v r. 2000 a 0,2 tisíc tun v r. 2004. Množství masa, které překročilo povolené limity se snížilo podobně - z 21,1 tisíc tun na pouhých několik tun. Množství dobytka, jejichž maso

bylo vráceno jako nevyhovující dle výsledků dozimetrie se snížilo z 448 v roce 1997 na 48 zvířat v roce 2004.

V průměru se přenos radiostronců do potravin během období po havárii snížil dvakrát. Nicméně je nutno vzít na vědomí, že přístupnost rostlin pro přenos ^{90}Sr zůstává vysoká a vykazuje sklony ke zvyšování. Tedy, celkem vysoká efektivita velkoplošných ochranných zemědělských opatření je zřejmá. I když je nemožné říci, že problém bezpečného života lidské populace a získávání vysoce kvalitních zemědělských produktů by byl vyřešen. Navzdory výraznému množství provedených opatření, je nezbytné neutralizovat zvýšenou kyselost a zlepšit draslíkový režim. Je nevyhnutelné provedení prací na regulaci vodního režimu a povrchové úpravy zavodněných a neproduktivních pastvin, kde je pěstován dobytek zejména z malých, soukromých farem. V nadcházejících letech mohou být významné části odvodněných území podmáčeny, a přenos radionuklidů do obilí, mléka a masa opět vzroste. Údržba odvodňovacího systému by měla mít v plánu prací na kontaminovaných územích prioritou a měla by být kontrolována.

Ve veřejném sektoru je významná část píce vyráběna s obsahem ^{137}Cs nad povolenými limity. Hlavně (až 80%) kontaminace krmných obilnin je pozorována na půdách s hustotou kontaminace ^{137}Cs nad 555 Bq/kg. Kontaminace travin nad stanovené limity na málo úrodných, podmáčených půdách a rašeliništích je pravděpodobná i při menší hustotě kontaminace půdy.

Zvláštní pozornost vyvstává u kvality potravin vyráběných v soukromém sektoru. V období 2002-2004 jsou v 165-273 obcích pravidelně označeny případy produkce mléka s obsahem radionuklidů nad povolené limity. Ekonomický aspekt problému je rovněž důležitý. I při povolených limitech obsahu radionuklidů není zemědělská výroba z kontaminovaných území konkurenceschopná. Ve spojení s vyloučením území, snížením produktivity a mnoha dalšími důvody včetně odlivu kvalifikovaných odborníků se na většině dotčených území snížila produkce obilí, brambor a zelených krmiv a v ještě větším měřítku produkce mléka a masa.

V souhrnu je možné říci, že na rozsáhlých územích Běloruska se vytvořilo obrovské skladiště radionuklidů. Během mnoha dekad bude zásobovat kořeny rostlin radi-

onuklidy a způsobovat výrazné ztráty v zemědělství. I při udržování rozsáhlých protio-patření bude v zemědělství negativně ovlivněna konkurenceschopnost. Řešení těchto problémů vyžaduje hluboké studie ekonomických a technických aspektů zemědělské výroby na kontaminovaných územích, expanzi mezinárodní spolupráce a investic.

Akumulace radionuklidů u zvířat souvisí s radioaktivním znečištěním jejich přirozeného prostředí. Nejvyšší hodnoty obsahu radionuklidů u zástupců jednotlivých druhů živočichů byly pozorovány v 30-ti km zóně v prvních letech po nehodě. Na sklonku 80.ých let nastal znatelný pokles radionuklidů (5-10krát). Během následující etapy se pokles musel nutně zpomalit a u některých druhů zvířat (ryby, obojživelníci, malí savci) žijících v nejvíce znečištěných lokalitách se hodnoty koncentrace radionuklidů vrátily do stavu podobného tomu v roce 1986. V současnosti je pozorována tendence ke stabilizaci obsahu radionuklidů v organismech živočichů. Odhady množství nečistot v mase divokých zvířat jsou výrazně nejisté v souvislosti s velkou rozlohou jejich životních teritorií a několika dalším faktorům. Obsah ^{137}Cs v mase divokých zvířat na kontaminovaných územích v r. 2002 činil 2-250 tisíc kBq/kg. Mezi lovnou zvěří je největší koncentrace radionuklidů pozorována u masožravců. To je způsobeno klimatickými specifiky ročních období a závisí na nich. Draví savci, coby závěrečný článek potravního řetězce, jsou charakterističtí nejvyšším obsahem radionuklidů. Tyto hodnoty dosahují 50 u vlků (a 47 u lišek) tisíc kBq/kg, což je 12krát více než u býložravců.

Radionuklidy ze zničeného jaderného reaktoru způsobily značné zdravotní potíže obyvatelstva. Světová zdravotní věda ještě nenašla řešení problémů nerakovinového typu, které jsou pozorovány u všech skupin zasažené populace: autoimunní záněty štítné žlázy, zákaly, problémy oběhového systému. Všechny tyto choroby s výjimkou zákalů nejsou dle dosavadních poznatků vyvolávány radiací. Většina vědců má za to, že nárůst všeobecné nemocnosti je způsobován kombinovanými efekty radiace a množstvím faktorů včetně nevládných podmínek přírodních i civilizačních již před nehodou, psychickým stresem způsobeným nehodou a také sociálně-ekonomickou pohromou (zánik SSSR, snižování blahobytu aj.). Přitom ionizující záření může sloužit jednak jako dominantní faktor a také jako spouštěcí mechanismus pro negativní dopady jiných faktorů. Zvláštní pozornost by měla být věnována zdravotnímu stavu likvidátorů. Samozřejmě,

na jednu stranu byla většina likvidátorů mladí zdraví lidé; jejich průměrný věk v době nehody byl něco přes třicet. Na druhou stranu, likvidátoři byli vystaveni nejvyššímu působení radiace při nehodě.

Na toto téma byla napsána řada publikací, kde jsou diskutovány následky této havárie. V literatuře jsem také narazila na určité nesrovnalosti v údajích zejména o počtu obětí této havárie. Převážně ve většině dostupné literatuře se psalo o 31 lidech, kteří zemřeli v důsledku havárie, 3 z nich v důsledku výbuchu reaktoru a dalších 28 (celkem tedy 59) na důsledky ozáření, tzn. na nemoci z ozáření. Dále je přisuzováno havárii dalších 4000 obětí. Ovšem na druhé straně v dalších publikacích je havárii přisuzováno mnohem více obětí a to 100 000 a více. Dnes je tento problém dle mého názoru těžko posuzovatelný, a to z důvodu, že nemůžeme s určitostí přisoudit, jestli opravdu lidé umírají na rakovinu v důsledku ozáření, či jestli by k tomu došlo i kdyby se tato havárie nestala.

Příčiny největší havárie v jaderné energetice byly už v samotném projektu jaderné elektrárny. Nebyla provedena dostatečná bezpečnostní analýza. Jedním z důvodů havárie byl také typ reaktoru RBMK, který měl mnoho záporných vlastností. Mezi tyto záporné vlastnosti patřily: nestabilita při nízkém výkonu, nerovnoměrné rozložení výkonu v aktivní zóně, možnost vypnutí či obejití ochranných systémů reaktoru při provozu a také nedostatečná rychlost zasouvání regulačních tyčí. Ale nemůžeme katastrofu svádět pouze na technologii, značnou roli u této havárie hraje také lidský faktor – lidské selhání operátorů. Po zkušenostech z Černobylu jsou dnešní jaderné elektrárny zajištěny tak, aby jejich bezpečnost na obsluze nezávisela.

Podle mého názoru, i když havárie v Černobylu byla tou nejzávažnější nehodou v jaderné energetice přinesla i určitá pozitiva. Pozitiva vidím především v rozvoji bezpečnosti v tomto oboru. Po této katastrofě došlo k značnému zlepšení jaderné bezpečnosti a začala se této problematice věnovat větší pozornost. Začala se věnovat pozornost lepšímu zabezpečení bezpečnostních systémů a prevenci samotných havárií.

Černobyl byl tedy jednou ze zlomových událostí v oblasti ochrany osob, havarijního plánování a havarijní připravenosti. Můžeme tedy napsat, že takový rozsah a závažnost jaderné havárie nebyl ani v nejmenším předvídan a překvapil prakticky

všechny orgány odpovědné za havarijní připravenost v zemích provozujících jaderné elektrárny. Doporučená kritéria a postupy neodpovídaly ani očekávanou délkou úniku radionuklidů a ani jeho rozsahem. Instituce, které byly odpovědné za rozhodování při řešení havárií, nebyly připraveny na volbu a aplikaci adekvátních ochranných opatření. Byla přijata opatření, kde nehrály roli radiačně hygienické faktory, ale spíše ekonomická a politická hlediska.

Ihned po havárii přišla celosvětová vlna protijaderných protestů. Ostře negativní a emociálně vypjatá reakce veřejnosti a médií vedla k předpovědi útlumu jaderné energetiky a jejího postupného nahrazování alternativními zdroji. Tato předpověď se ovšem nepotvrdila a jaderná energetika si stále udržuje podíl na světové výrobě elektřiny, který dosáhla rok před černobylskou havárií.

Přes počáteční ostře odmítavou reakci veřejnosti a médií podíl jaderné energetiky na světové úrovni nepoklesl, došlo k podstatnému zlepšení bezpečnosti a spolehlivosti jaderných elektráren. Pozornost se zaměřila nejen na technické vylepšení projektu, ale i na podstatné omezení pravděpodobnosti selhání lidského faktoru.

Odezva na černobylskou havárii se stala ukázkou, jak mezinárodní společnosti dokážou spolupracovat při řešení naléhavých zdravotních, ekonomických a sociálních problémů. Černobyl se stal jedinečným kamenem mezinárodní solidarity a spolupráce. Zapojily se vlády, mezinárodní organizace, lékaři, vědci a prostí lidé. Mnoho zkušeností získaných po černobylské havárii může být s úspěchem využito při případných dalších katastrofách ať už přírodních nebo způsobených činností lidí.

VI. ZÁVĚR

Radioaktivita je složkou životního prostředí, která je v poslední době velmi citlivě vnímána veřejností zejména v souvislosti s provozem jaderných elektráren. Stejně jako na jiných technických zařízeních, i na jaderných elektrárnách dochází čas od času k poruchovým stavům. Zatímco v případě klasických elektráren jsou i nejtěžší havárie spojeny prakticky jen s minimálními ekologickými následky, mohou být havárie jaderného reaktoru v maximálně nepříznivém důsledku zdrojem úniku určitého množství radioaktivních látek do prostředí se všemi z toho plynoucími dopady na životy a zdraví personálu jaderné elektrárny a obyvatelstva. Současná úroveň radiační bezpečnosti jaderných elektráren je velmi vysoká a je neustále předmětem zdokonalování. Tak vysoká úroveň bezpečnosti by ovšem nebyla bez velké katastrofy v jaderné energetice, kterou přinesla jaderná havárie v Černobylu, kdy si celý jaderný průmysl uvědomil, že na prvním místě ve využívání jaderné energie musí být především bezpečnost.

Při zpracování diplomové práce na téma „Nejvýznamnější radionuklidy při havárii jaderné elektrárny, zkušenosti z Černobylu“ jsem si především kladla za cíl analýzu rizik nejvýznamnějších radionuklidů při havárii jaderné elektrárny a přinést z tohoto pohledu co nejnovější poznatky o této problematice. Doufám, že cíl mé práce byl splněn a obohatí čtenáře o nové poznatky.

Hypotézou neboli předpokladem je, že při havárii jaderné elektrárny dojde k úniku směsi radionuklidů, ve které se s časem po výbuchu mění riziko možného poškození a to zejména ^{131}I , ^{137}Cs a ^{90}Sr . Hypotézu dle které se s časem po výbuchu mění riziko možného poškození radionuklidy, můžu potvrdit vzhledem k analýze uniklých radionuklidů při jaderné havárii v Černobylu, kterou jsem provedla v části IV (výsledky) této práce. Těsně po havárii způsobuje největší zdravotní riziko radioaktivní jod, který způsobuje ozáření štítné žlázy a následný vznik karcinomu štítné žlázy, a to zejména u dětí. Naopak z dlouhodobého hlediska po havárii jaderné elektrárny způsobují zdravotní rizika zejména radionuklidy s dlouhými poločasy rozpadu, a to zejména ^{137}Cs a ^{90}Sr , které se zcela rozpadnou až stovky let po havárii.

VII. LITERATURA

- 1)BRÁDKA S.,NAVRÁTIL,L.*Úkoly krizového managmentu v ochraně obyvatelstva*. 1.vyd.České Budějovice:Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích Zdravotně sociální fakulta.2006,80s.ISBN 80-7040-881-2.
- 2)ČEZ,a.s.*Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí*.informační brožura
- 3)FAIRLE,I.,SUMMER,D.*The other report on Chernobyl.An independent scientific evaluation of health and enviromental effects 20 years after nuclear disaster providing cricital analysis of a recent report by the international atomic energy agency(IAEA) and the world health organization(WHO)*Berlín,Brussel,Kyjev:91s.
- 4)KINLEY,D.*Dědictví Černobylu:Zdravotní, ekologické a sociálně-ekonomické dopady a Doporučení vládám Běloruska, Ruské federace a Ukrajiny*. Přel.Sinkulová,V. 1.vyd.Týn nad Vltavou:ČSTV v koedici s Českou nukleární společností,2006,51s.ISBN 80-02-01806-0
- 5)KOLEKTIV AUTORŮ.*Principy a praxe radiační ochrany*.Praha:Azin CZ,2000,619s. Vladislav Klener,ISBN 80-238-3703-6.
- 6)KUNA,P.,NAVRÁTIL.*Klinickáradiobiologie*. 1.vyd.Praha:Manus,2003,222s. ISBN 80-86571-09-2.
- 7)KUVSHINNIKOV,A.V.*20 years after the Chernobyl catastrophe The Consequences in the Republic of Belarus and their Overcoming*.Minsk:2006,101s. ISBN 985-01-0628-X
- 8)ÖSTERREICHER,J.,VÁVROVÁ,J.*Přednášky z radiobiologie*. 1.vyd.Praha:Manus, 2003,112s.ISBN 80-86571-01-7.

9)SÚJB.*10 let od havárie jaderného reaktoru v Černobylu – důsledky a poučení.*Praha,1996,37s.

10)SÚJB.*INES uživatelská příručka.*85s.

INTERNETOVÉ ZDROJE:

11)Černobyl.[online].[cit.2007-02-11]Dostupné z:<<http://www.pravda.cz/cernobyl/index.html>.>.

12)Černobylská havárie.[online].[cit.2007-01-23]Dostupné z:<http://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%Cernobylsk%C3%A1_hav%C3%A1rie>.

13)Fotky ve fotogalerie.Fotky Černobyl.[online].[cit.2007-04-18]Dostupné z:<http://www.vesmir.info/fotogalerie/cernobyl-po-vybuchu.htm#s_1933>.

14)Havárie a nehody jaderných elektráren nejsou výjimkou.[online].
[cit.2007-02-05]Dostupné z: <<http://www.ecn.cz/ENV/Temelin/c11/NEHODY.HTM>>.

15)HŮLKA,J.,MALÁTOVÁ,I.Radiační situace v České republice, přehled hlavních výsledků měření a opatření.[online].[cit.2007-03-28]Dostupné z:<http://www.suro.cz/pub/cernobyl/radiacni_situace_v_cr_po_cernobylu.pdf>.

16).Jaderné elektrárny.[online].[cit.2007-01-13]Dostupné z:<http://sweb.cz/oklzed/s/el_jaderna.htm>.

17)Jaderná energie.[online].[cit.2007-01-04]Dostupné z:<http://wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_energie>.

18) KOSTKA, T. Havárie v jaderné elektrárně Černobyl. [online]. [cit. 2007-03-24]

Dostupné z: <<http://www.volny.cz/kostka2000/cernobyl/htm>>.

19) PLEVÁK, M. Černobyl po 11 letech tragédie, která nekončí. [online].

[cit. 2007-03-15] Dostupné z: <<http://ekologie.xf.cz/temata/chernobyl/chernobyl/htm>>.

20) Před 19 lety se stala největší jaderná havárie. [online]. [cit. 2007-02-22] Dostupné z:

<<http://zpravy24.pantax.cz/2005/04/26.04.05.htm>>.

LEGISLATIVA

21) Vyhláška k zajištění havarijní připravenosti jaderných zařízení č. 318/2002 Sb. ve znění zákona č. 13/2002 Sb.

22) Vyhláška státního úřadu pro jadernou bezpečnost o radiační ochraně č. 307/2002 Sb. ve znění zákona č. 13/2002 Sb.

23) Zákon o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření č. 18/1997 ve znění zákona č. 186/2006 Sb.

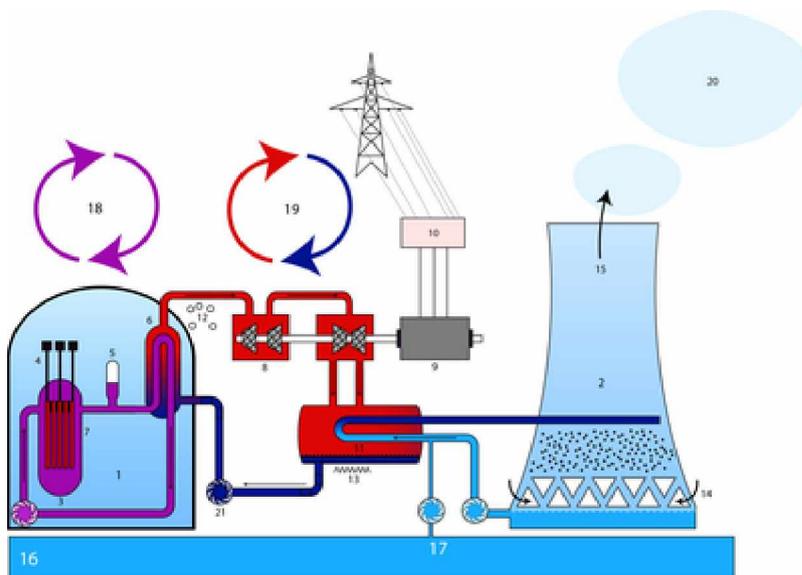
VIII. KLÍČOVÁ SLOVA

Jaderná elektrárna, jaderná havárie, radionuklidy, radioaktivní jód, radioaktivní cesium, radioaktivní stroncium, Černobyl.

IX. PŘÍLOHY

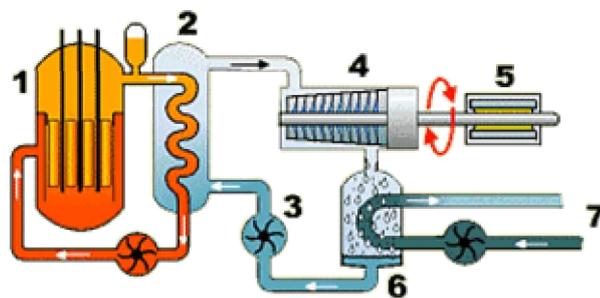
1. PŘÍLOHA - *Jaderná elektrárna*
2. PŘÍLOHA - *Havárie jaderné elektrárny Černobyl*
3. PŘÍLOHA - *Příručka pro ochranu obyvatelstva pro případ radiační havárie
JE Temelín*

Příloha 1: Jaderná elektrárna

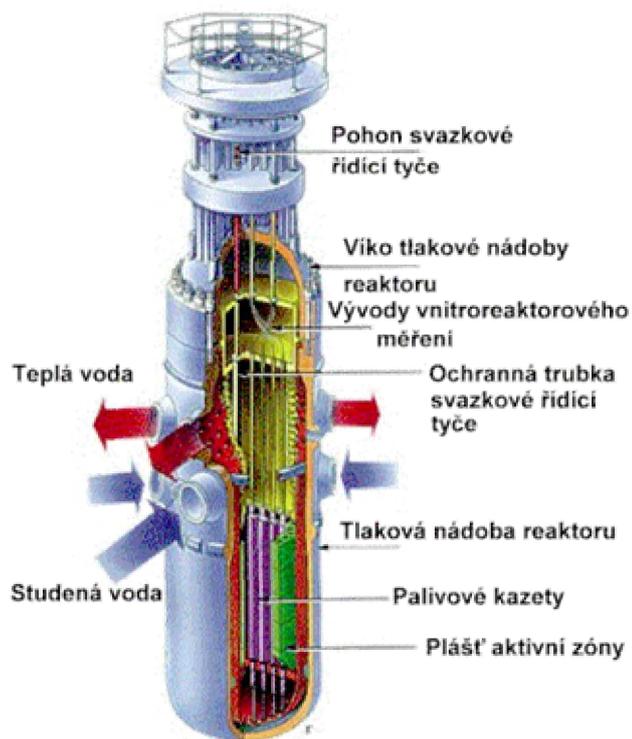


Obr.1: Schéma jaderné elektrárny

- 1. Reaktorová hala, uzavřená v nepropustném kontejnmentu.
- 2. Chladicí věž
- 3. Tlakovodní reaktor
- 4. Řídící tyče
- 5. Kompenzátor objemu
- 6. Parogenerátor. V něm horká voda pod vysokým tlakem vyrábí páru v sekundárním okruhu
- 8. Turbína - vysokotlaký a nízkotlaký stupeň
- 9. Elektrický generátor
- 10. Transformační stanice
- 11. Kondenzátor sekundárního okruhu
- 14. Přívod vzduchu do chladicí věže
- 15. Odvod teplého vzduchu a páry komínovým efektem
- 16. Oběhové čerpadlo primárního okruhu
- 17. Napájecí čerpadlo chladicího okruhu
- 18. Primární okruh (voda pouze kapalná pod vysokým tlakem)
- 19. Sekundární okruh (červeně značena pára, modře voda)
- 20. oblaka vzniklá kondenzací vypařené chladicí vody
- 21. oběhové čerpadlo sekundárního okruhu

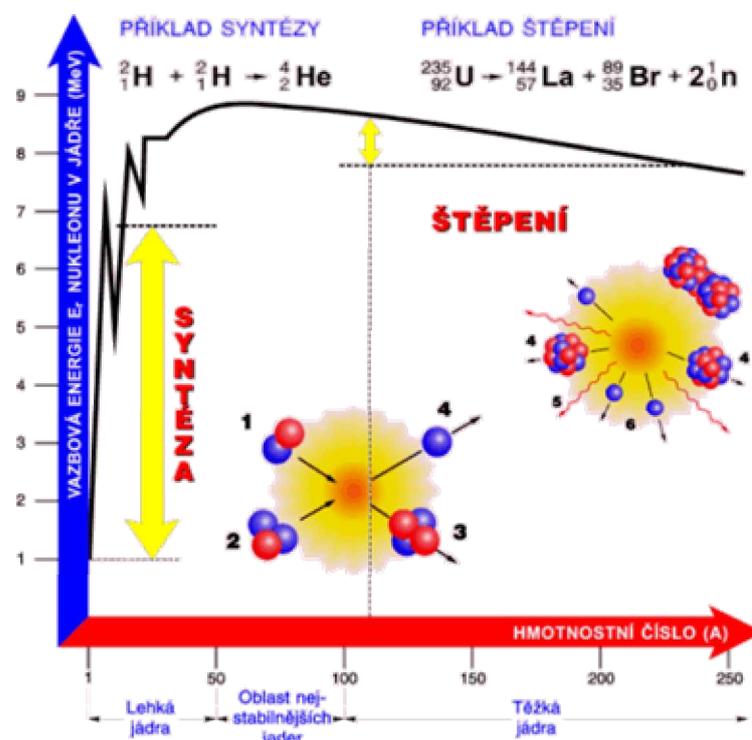


Obr.2: Schéma jaderné elektrárny
 1. Reaktor, 2. Parogenerátor, 3. Čerpadlo,
 4. Turbína, 5. Generátor, 6. Kondenzátor,
 7. Přívod a odvod chladicí vody



Obr.3 : Reaktor jaderné elektrárny

Obr.4: Jaderné štěpení



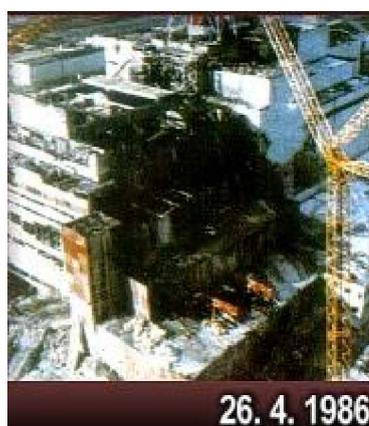
Obr.5: Jaderná elektrárna



Příloha 2: Havárie Jaderné elektrárny Černobyl



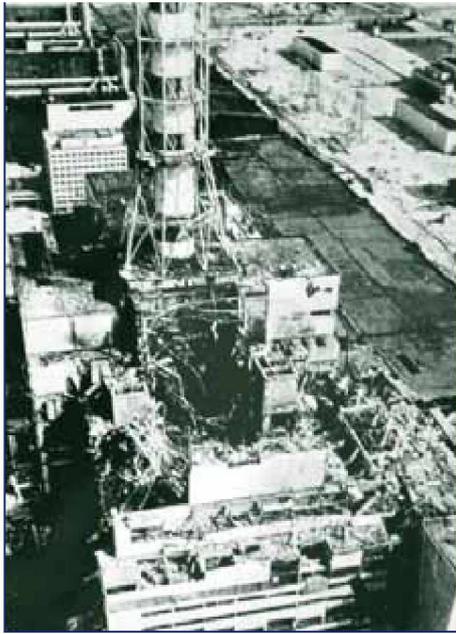
Obr.6: Okamžik výbuchu JE Černobyl



Obr.7: 26.4.1986 JE Černobyl

Obr.8: Jaderná elektrárna Černobyl po výbuchu

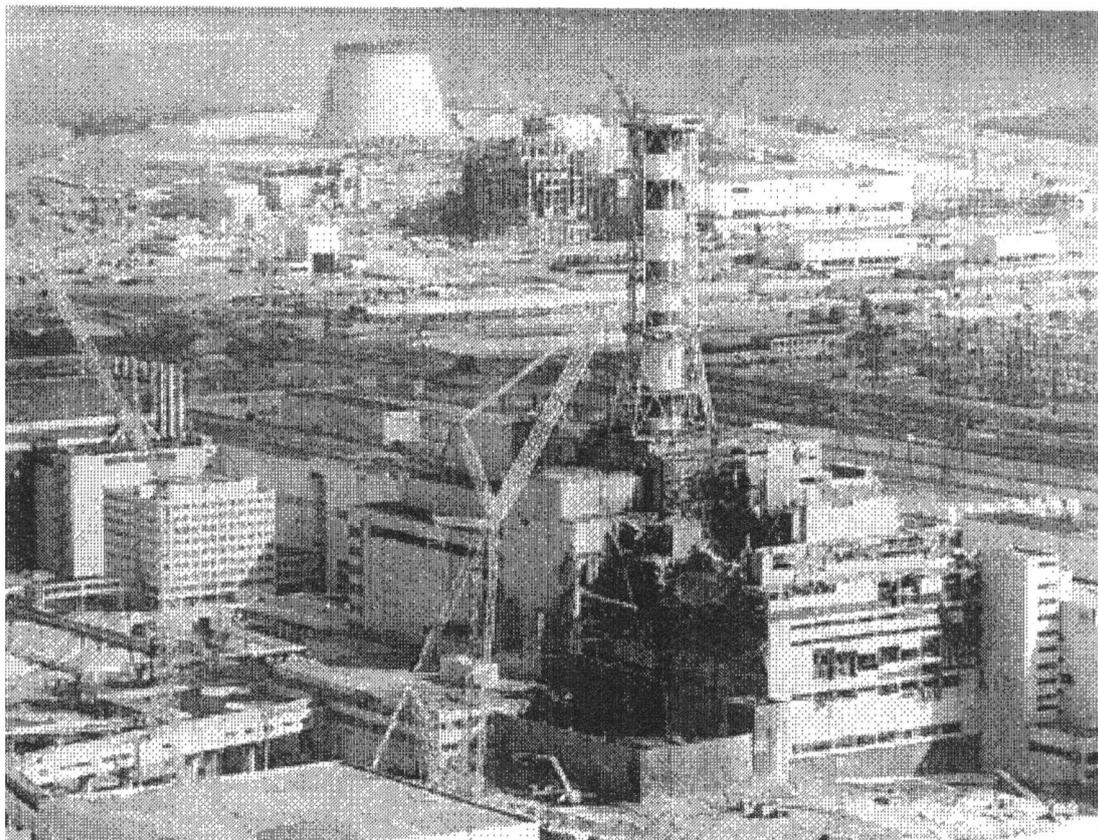




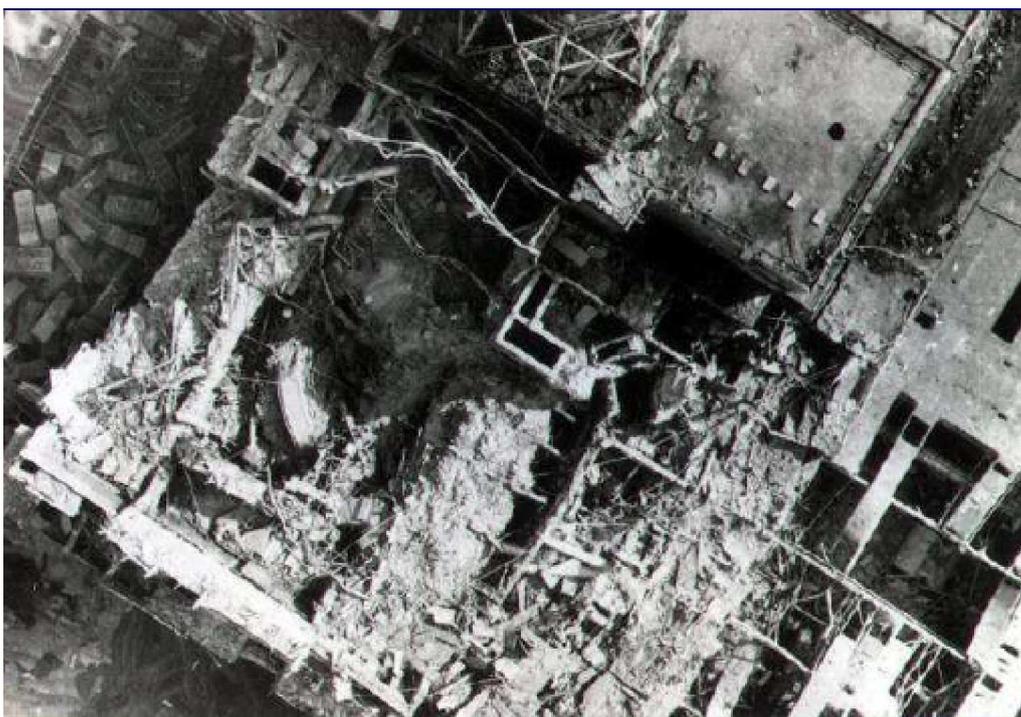
Obr.9: Zničený 4. blok JE Černobyl



Obr.10: JE Černobyl po havárii



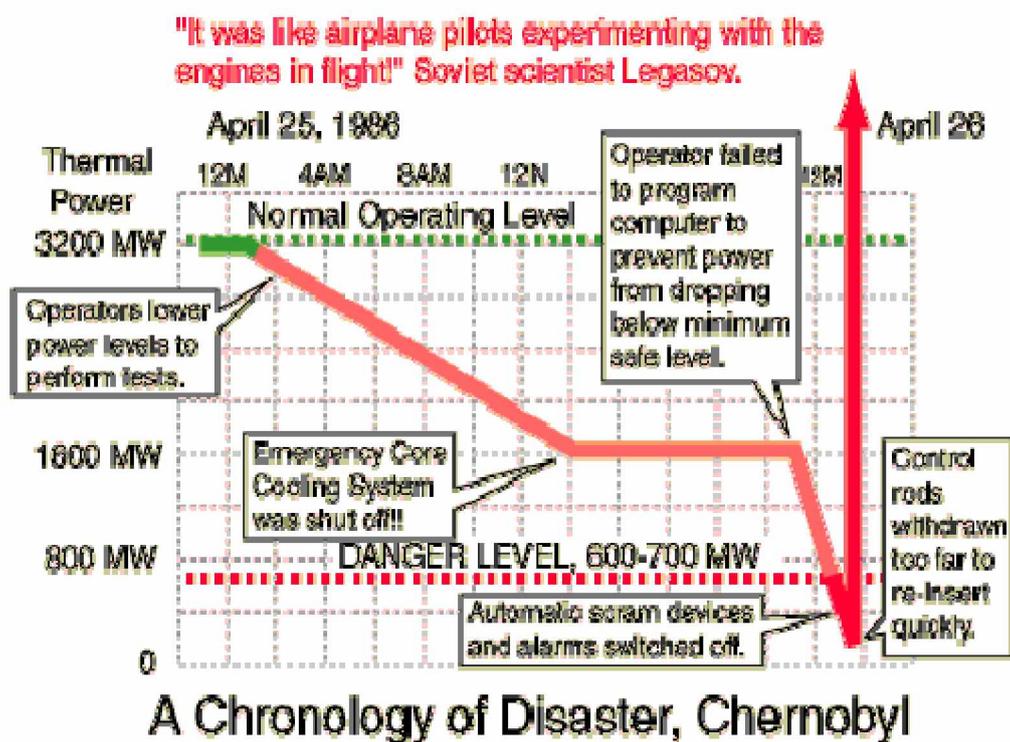
Obr.11: JE Černobyl po havárii 26.4.1986



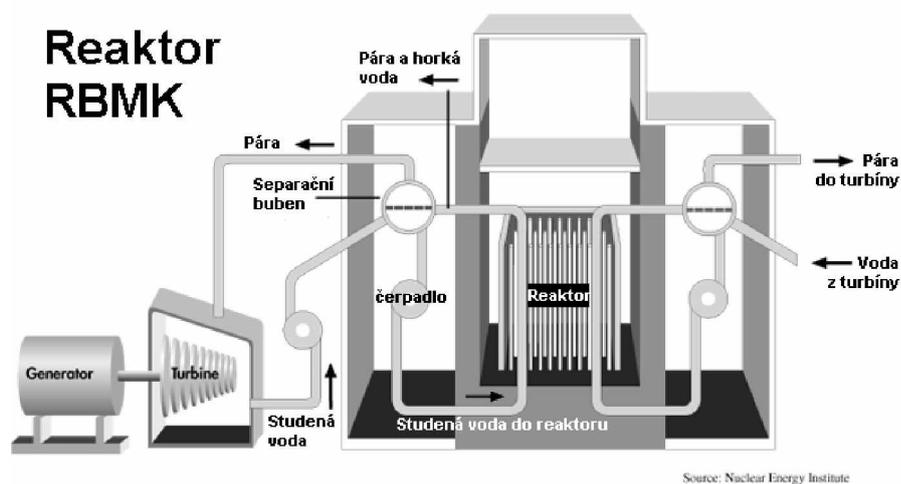
Obr.12: Pohled zezhora na zničený reaktor



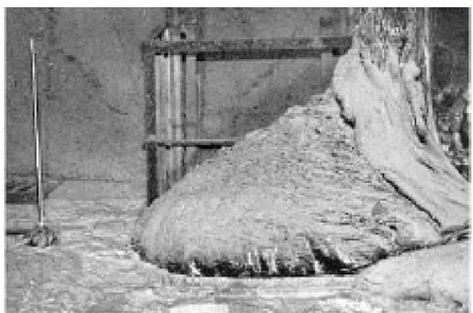
Obr.13: Zničený reaktor po havárii JE



Obr.14: Zobrazený chronologický sled událostí při havárii JE Černobyl



Obr.15: Reaktor typu RBMK – tento typ reaktoru měla JE Černobyl



Obr.16,17: Zničená jaderná elektrárna Černobyl



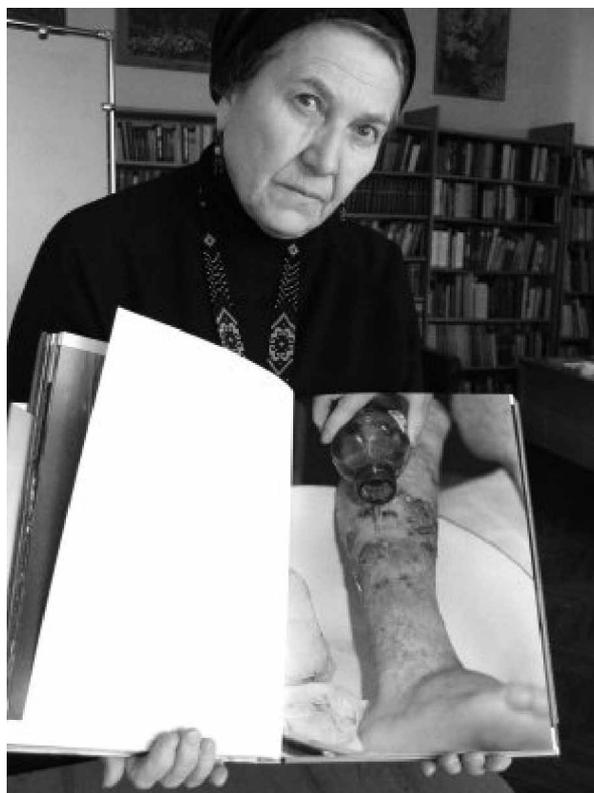
Obr.18: Pohled na zničený reaktor



Obr.19: Dekontaminace vozidel



Obr.20: Město Pripjat' dnes



Obr.21: Natálie Preobraženská z Ukrajiny se už mnoho let snaží bojovat za práva lidí postižených černobylskou katastrofou. Mezi její přátele patří i ženy požárníků, kteří zasahovali v Černobylu a později zemřeli na následky ozáření. Na snímku s knihou fotografa Igora Kostina, který zachytil jednoho ze statečných požárníků v nemocnici.



Obr.22: Vesnice s poetickým jménem Krásno leží asi 10 kilometrů od černobylské atomové elektrárny. I po dvaceti letech, které uplynuly od havárie, je vesnice stále silně radioaktivní. Přestože uvnitř domů je radioaktivita zhruba desetkrát menší než venku, i tak tu dozimetr ukazuje hodně přes 100 mikrorentgenů za hodinu.

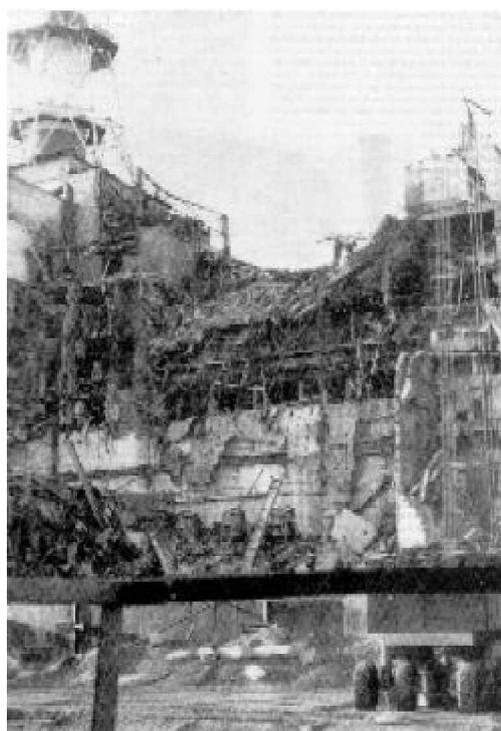


Obr.23: Fotograf Igor Kostin udělal historicky první snímek havarovaného reaktoru z nízko letícího vrtulníku. Fotoaparáty se mu však díky obrovské radiaci zasekly už po osmém snímku. Za svoji odvahu zaplatil zdravím. Dostal celkem 250 rentgenů, což je polovina smrtelné dávky. Přežil jen díky komplikovaným operacím na speciální klinice v Hirošimě. Kostin zasvětil svůj život dokumentování černobylské katastrofy.



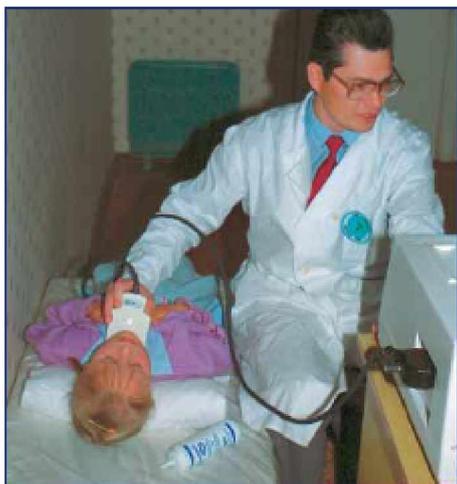
Obr.24: Alexejovi je devět let a má rakovinu žaludku. Jeho rodné město leží 80 kilometrů od Minsku a stejně jako mnoho dalších míst v Bělorusku je stále silně kontaminováno radioaktivitou. „Je to těžké, žádný lékař vám dnes neřekne, zda Alexej onemocněl kvůli Černobylu, nebo ne. Jisté je to, že z těchto kontaminovaných oblastí máme víc onkologických pacientů, zejména s rakovinou štítné žlázy,“ říká jeho ošetřující lékař Izmail Zade z Běloruského centra pro dětskou onkologii a hematologii.

Obr.25:
Zničený reaktor





Obr.26: Radioaktivní hřbitov Razsocha je v černobylské zóně největší skládkou pro helikoptéry, buldozery, vojenská auta a další stroje, které se podílely na úklidových pracích po havárii v Černobylu a byly natolik radioaktivně kontaminovány, že už nikdy nesmějí opustit zónu. Více než 2000 vozidel a další miliony tun radioaktivního materiálu jsou uloženy právě zde.



Obr.27, 28: Vyšetření postižených obyvatel

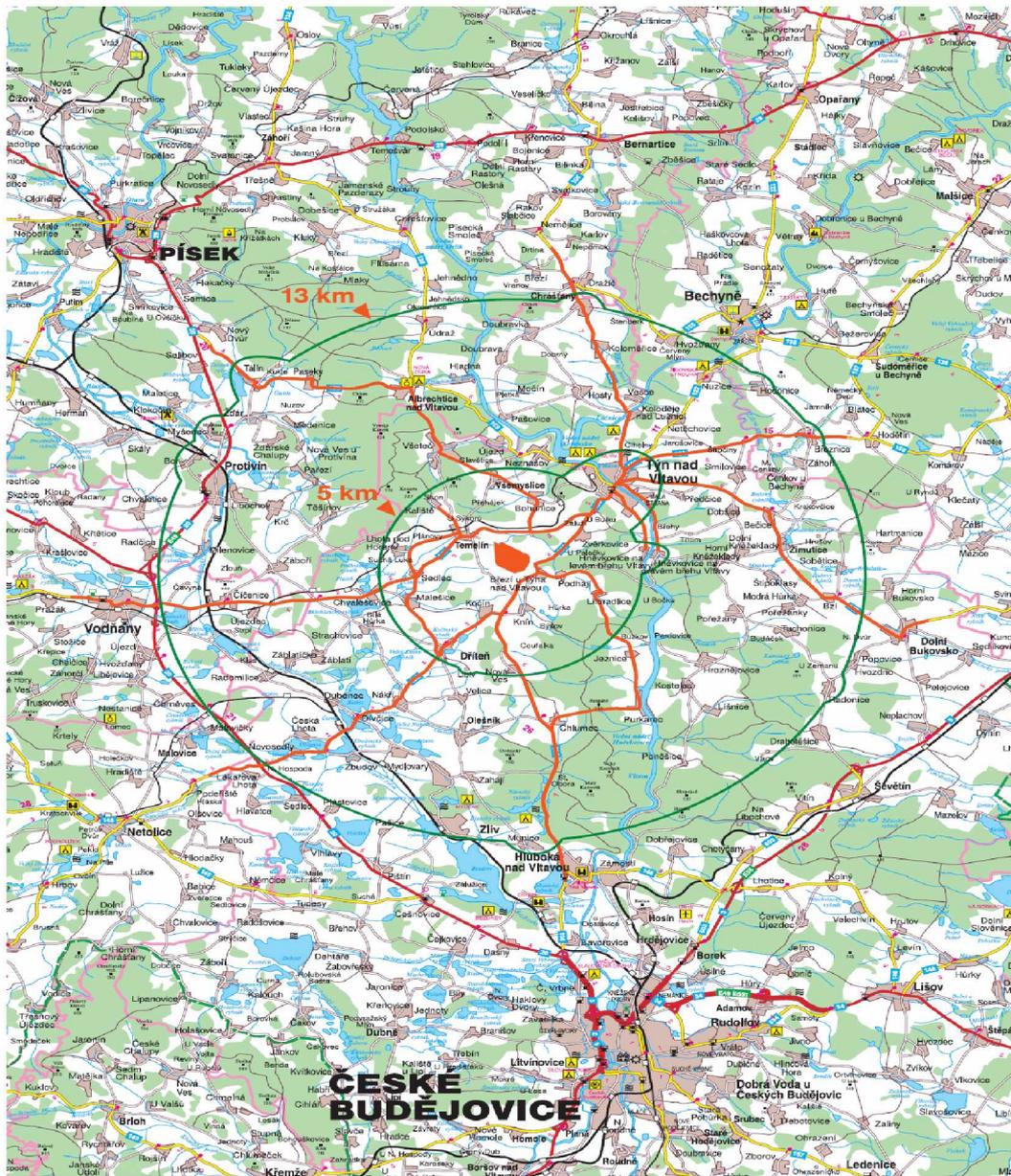


Obr.29,30: Lékařské vyšetření ozářených obyvatel



Obr.31: Pohled na jadernou elektrárnu Černobyl a nejbližší město Pripjat'

PŘÍRUČKA PRO OCHRANU OBYVATEL PRO PŘÍPAD RADIČNÍ HAVÁRIE JE TEMELÍN



Schématické znázornění zóny havarijního plánování JE Temelín

Po skončení roku 2007 (po ukončení platnosti kalendáře)
příručku uchovejte, platnost příručky je časově neomezená.

ZÁSADY POUŽITÍ TÉTO PŘÍRUČKY

VÁŽENÍ OBČANÉ,

příručka je určena pro obyvatelstvo v Zóně havarijního plánování JE Temelín.

Seznamte se laskavě s obsahem této příručky a nebude-li Vám něco z příručky jasné, příp. nenajdete-li v ní odpovědi na všechny otázky, které Vás v této souvislosti napadají, obraťte se na Informační centrum Jaderné elektrárny Temelín, které Vám podá doplňující informace.

Příručku mějte na dostupném a zapamatovatelném místě tak, abyste ji mohli kdykoliv najít. Věnujte pozornost formulářům, které jsou na konci příručky, seznamte se s nimi a v případě potřeby je pečlivě vyplňte. Příručku uchovejte její platnost je časově neomezená.

Při mimořádné události budete varováni spuštěním kolísavého tónu sirén po dobu 140 sekund, který může být 3x opakován v cca třiminutových intervalech a následně budou odvysílány na stanovených rozhlasových a televizních stanicích (ČT1 a ČRo) varovné relace o vzniku mimořádné události na jaderné elektrárně s pokyny pro obyvatelstvo.

Po vyhlášení mimořádné události v hromadných sdělovacích prostředcích jednejte uvážlivě a v souladu s informacemi obsaženými v této příručce a kalendáři. Řiďte se pokyny orgánů krizového řízení a orgánů místní samosprávy, které obdržíte prostřednictvím rozhlasového nebo televizního vysílání, místních hlášení nebo jiných místně dostupných prostředků.

SPOJENÍ NA INFORMAČNÍ CENTRUM JE TEMELÍN:

telefon: 381 102 639

fax: 381 104 900

e-mail: infocentrum.ete@cez.cz

www.cez.cz/ete-infocentrum

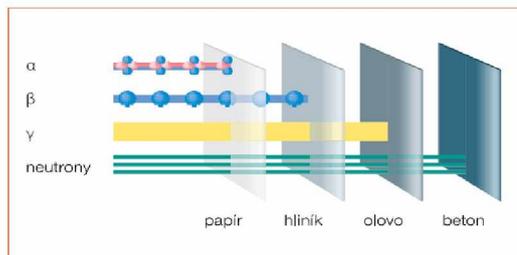
Otevřeno je každý den včetně státních svátků po–ne od 9.00 do 16.00 hodin (s výjimkou prvního pondělí v měsíci).

V období letních prázdnin je provozní doba prodloužena od 9.00 do 17.30 hodin.

CO JE TO RADIOAKTIVITA A JAK NA NÁS PŮSOBÍ?

Radioaktivita je přirozená schopnost některých látek (přírodních i umělých) se samovolně přeměňovat – rozpadat se. Při této přeměně radioaktivní látky vysílají neviditelné záření, které má schopnost pronikat hmotou. Některé druhy záření jsou velmi málo pronikavé a k jejich záchytu stačí například tenká vrstva papíru. Jiné jsou však tak pronikavé, že na jejich pohlcení je nutná silná vrstva těžkých materiálů, například olova nebo betonu.

Radioaktivní záření, nazývané také ionizující záření, může za určitých podmínek způsobovat škody na zdraví. Zabránění těmto škodám spočívá ve snížení kontaktu radioaktivních látek a ionizujícího záření s lidským organismem.



Průnik záření různými druhy materiálů

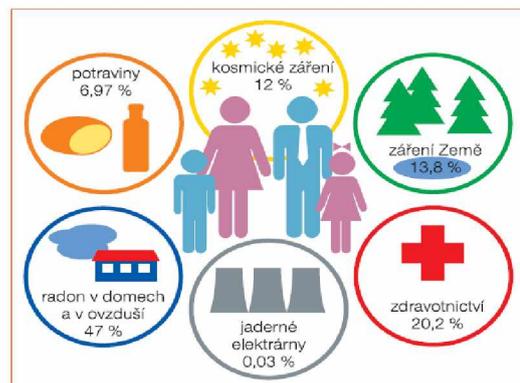
Radioaktivní látky a ionizující záření se vyskytují všude kolem nás již od vzniku naší planety nezávisle na existenci člověka. Úroveň jejich záření je však taková, že většinou našemu organismu neškodí. K přirozeným zdrojům ionizujícího záření patří kosmické záření a záření radioaktivních prvků obsažených v zemské kůře ale i přirozené radioaktivní látky v nás

samých. Mezi umělé zdroje ionizujícího záření patří zařízení pro lékařské aplikace ionizujícího záření, radioaktivní prvky vzniklé v důsledku dřívějších zkoušek jaderných zbraní ale i obrazovky televizorů.

Přeměna radioaktivních látek může trvat zlomky sekund ale také až tisíce let. Intenzitu radioaktivity – aktivitu, vyjadřuje počet rozpadů radioaktivní látky za sekundu. Jednotkou aktivity je Becquerel (Bq).

aktivita 1Bq = 1 rozpad za 1 sekundu

Živá hmota může být průchodem ionizujícího záření poškozena, přičemž míra poškození závisí především na obdržené dávce záření. Obecně lze říci, že při rozpadu radioaktivních látek dojde k poškození živého organismu pouze v tom případě, když vzniklé záření organismus zasáhne.



Příspěvky různých zdrojů na ozáření člověka

PRINCIP FUNGOVÁNÍ JADERNÉ ELEKTRÁRNY

Jaderná elektrárna je zařízení umožňující přeměnu tepelné energie, získané na základě štěpení jaderného paliva (uranu) v reaktoru, na energii elektrickou.

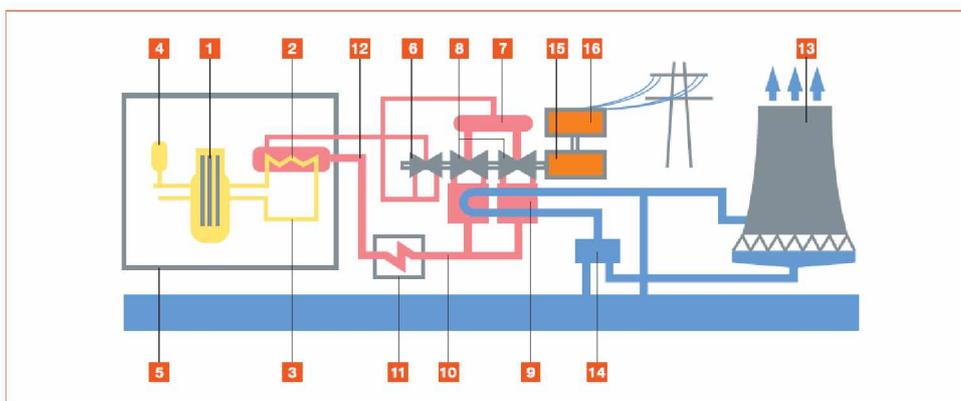
Celý proces vzniku tepla, výroby páry pro pohon turbíny a ochlazování páry po průchodu turbínou se uskutečňuje ve třech navzájem oddělených okruzích.

První – primární (jaderný) okruh tvoří reaktor (je zdrojem tepla), cirkulační čerpadla, (čerpají vodu z reaktoru do parogenerátorů), parogenerátory (hermeticky oddělují primární a sekundární okruh). Hlavní funkcí primárního okruhu je odvedení tepla vznikajícího v reaktoru v důsledku štěpení jaderného paliva a jeho předání sekundárnímu okruhu

prostřednictvím parogenerátorů, tj. tepelných výměníků, ve kterých se tvoří pára.

Druhý – sekundární (nejaderný) okruh tvoří parovody, turbína s generátorem elektrického proudu, kondenzátory páry a pomocnými okruhy. Hlavní funkcí sekundárního okruhu je odvedení páry vzniklé v parogenerátorech k roztočení lopatek turbíny a výroby elektrické energie.

Třetí – terciální (nejaderný) okruh chladicí vody odvádí zbytkové teplo z kondenzátorů turbíny do chladících věží. Hlavní funkcí tohoto okruhu je zpětná kondenzace páry prošlé turbínou na vodu.



Tepelné schéma jaderné elektrárny

Primární okruh: 1. reaktor, 2. parogenerátor, 3. hlavní cirkulační čerpadlo, 4. kompenzátor, 5. železobetonová ochranná obálka – kontejnment.

Sekundární okruh: 6. vysokotlaký díl turbíny, 7. separátor – přehřívák, 8. nízkotlaký díl turbíny, 9. kondenzátor, 10. čerpadlo kondenzátu, 11. ohřivače, 12. napájecí čerpadlo.

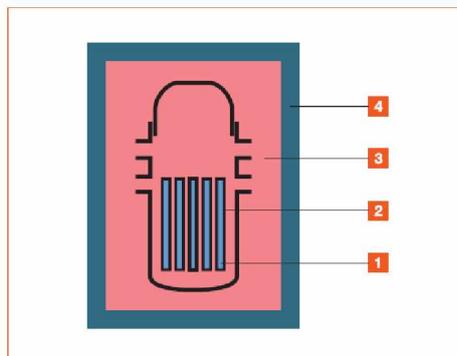
Terciální okruh: 13. chladicí věž, 14. čerpací stanice chladicí vody.

Elektrická část: 15. elektrický generátor, 16. transformátor.

BEZPEČNOST JADERNÉ ELEKTRÁRNY

Základním principem bezpečnosti jaderné elektrárny je zajištění neporušenosti ochranných bariér, které brání úniku radioaktivních látek obsažených v jaderném palivu do okolního životního prostředí.

Při možných poruchách provozu elektrárny chrání tyto bariéry bezpečnostní systémy, které jsou zálohovány a které jsou do provozu uváděny automaticky. I v případě velké havárie jsou radioaktivní látky zadrženy v prostoru ochranné obálky. Pravděpodobnost, že by při tom současně nastala i porucha ochranné obálky je velmi malá. Pokud by však k takové málo pravděpodobné poruše přesto došlo, použijí se pro zabezpečení ochrany zaměstnanců i obyvatelstva v okolí jaderné elektrárny ochranná opatření popsaná také v této příručce.



Principiální schéma ochranných bariér jaderné elektrárny

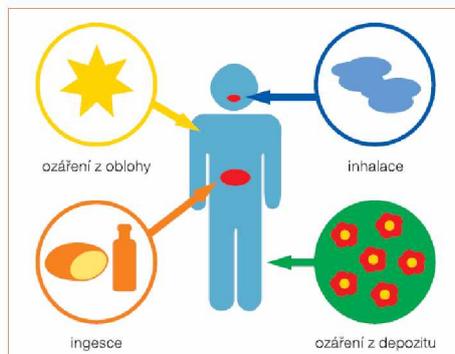
Tyto ochranné bariéry jsou tvořeny: 1. Pevnou keramickou strukturou paliva; 2. Hermetickým kovovým pokrytím jaderného paliva; 3. Uzavřeným jaderným (primárním) okruhem; 4. Železobetonovou ochrannou obálkou (kontejnmentem), která hermeticky odděluje jaderný (primární) okruh od životního prostředí

MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST S MOŽNOSTÍ ÚNIKU RADIOAKTIVNÍCH LÁTEK DO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ (RADIČNÍ HAVÁRIE)

Pojem radiční havárie vyjadřuje skutečnost, že na jaderné elektrárně došlo k současnému poškození více ochranných bariér. V této situaci lze předpokládat možnost úniku radioaktivních látek z jaderné elektrárny do životního prostředí, která vyžaduje provedení opatření na ochranu obyvatelstva.

Radioaktivní látky mohou být ve formě plynů nebo aerosolů (což jsou velmi jemné částičky, které vznikají například při rozprašování sprejů) odnášeny větrem do okolí jaderné elektrárny. Následně se mohou usazovat na budovách, půdě, na rostlinách, případně lidské pokožce nebo našich oděvech. Tento proces nazýváme kontaminací. Do lidského organismu se radioaktivní látky mohou dostat vdechnutím (tzv. inhalací) nebo konzumací kontaminovaných tekutin nebo potravin (tzv. ingestí). Radioaktivní látky usazené na povrchu terénu rovněž mohou způsobit vnější ozáření osob (tzv. ozáření z deponitu).

Jakým způsobem a v jaké koncentraci se budou radioaktivní látky šířit mimo elektrárnu je především ovlivněno:



Možné cesty ozáření

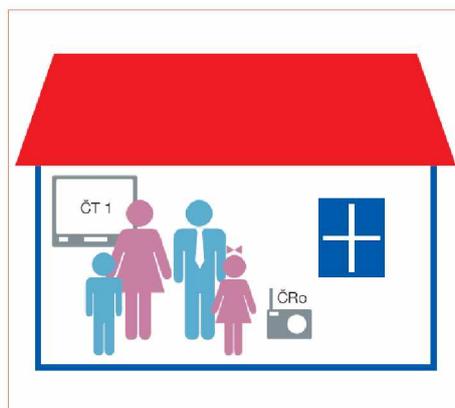
- vlastním průběhem mimořádné události
- počasím v okamžiku mimořádné události

Zjednodušeně však můžeme říci, že koncentrace radioaktivních látek a tím i míra ohrožení veřejnosti radioaktivními látkami klesá s rostoucí vzdáleností od zdroje.

OCHRANA PŘED IONIZUJÍCÍM ZÁŘENÍM

Podstatou všech opatření ochrany osob před účinky a následky nadměrného ozáření je podstatné snížení kontaktu se zářením.

Účinným a nejdůležitějším způsobem ochrany obyvatelstva před radioaktivními látkami je **ukrytí**. Již pouhým pobytem v budovách se zavřenými okny a dveřmi se podstatně omezí účinky radioaktivního záření. Nejlepší ochranu před účinky radioaktivních látek poskytují uzavřené, zděné prostory. Významným opatřením je také **jódová profylaxe**. Správné načasování požití tablety jodidu draselného zajistí plné nasycení štítné žlázy neradioaktivním jódem, a tím zabrání hromadění jódu radioaktivního v této štítné žláze. **Tablety požíjte pouze na základě pokynů v televizním nebo rozhlasovém vysílání nikoliv po zaznění sirén!**

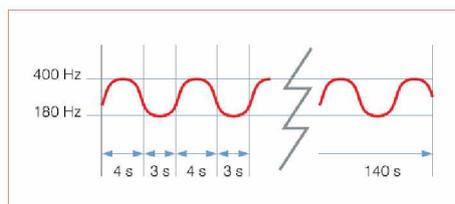


Ukrytí v domech

VAROVÁNÍ OBYVATELSTVA

Varování obyvatelstva je při radiční havárii jedním z prvořadých opatření. Účelem varování je zajistit, aby obyvatelstvo přijalo neodkladná opatření ke snížení působení uniklých radioaktivních látek na minimum.

V České republice je zaveden jednotný varovný signál VŠEOBECNÁ VÝSTRAHA. Tento signál je vyhlášen kolísavým tónem sirény po dobu 140 sekund a může být vyslán 3x po sobě v třiminutových intervalech. Varovný signál sirén Vás může zastihnout doma, na pracovišti, ve městě nebo v přírodě. **Varovný signál je pro Vás vždy pouze**



Grafické znázornění signálu „Všeobecná výstraha“

pokynem k získání dalších informací o příčině vyhlášení tohoto signálu. Odvysílání tohoto signálu značí obecné nebezpečí. O jaké nebezpečí skutečně jde (záplavy, živelné pohromy, radiční havárie atd.) a o způsobu ochrany obyvatelstva vč.

případného použití ochranných prostředků budete bezprostředně informováni prostřednictvím rozhlasu a televize, místním rozhlasem, vozidly složek integrovaného záchranného systému nebo jiným místně dostupným způsobem.

Zvuk sirén by pro vás měl být pokynem pro zapnutí rozhlasového nebo televizního přijímače na níže uvedených kanálech, kde v opakovaných několikaminutových rozhlasových a televizních relacích obdržíte nezbytné informace a pokyny.

- **Zapněte rádio a naladte stanici:
Český rozhlas 1 – Radiožurnál – 91,1 MHz FM
nebo stanici Český rozhlas Č. Budějovice
VKV 106,4 MHz FM**

nebo

- **Zapněte televizor a sledujte kanál ČT1**

Ve vlastním zájmu se řiďte pokyny, které Vám budou sděleny.

JAKÁ OPATŘENÍ MOHOU BÝT PRO VAŠI OCHRANU PŘIJATA?

Ochrana obyvatelstva je v případě vzniku radiální havárie neúčinněji zajišťována prostřednictvím následujících, neodkladných ochranných opatření:

- **Ukrytí**
- **Jodové profylaxe**
- **Evakuace**

Ochranná opatření ukrytí, jodová profylaxe jsou vyhlášována zpravidla na celém území zóny havarijního plánování současně (mapa zóny havarijního plánování JE Temelín je znázorněna v úvodní části této příručky).

Příprava na evakuaci – je vyhlášována pouze pro část zóny havarijního plánování o poloměru 5 km. Skutečný rozsah evakuace závisí na rozhodnutí krizového štábu kraje vydaného na základě doporučení Státního úřadu pro jadernou bezpečnost s přihlédnutím k aktuálním meteorologickým a dalším souvisejícím podmínkám.

O přijetí jednotlivých opatření budou rozhodovat týmy odborníků v souladu s předpokládanou a později se skutečně zjištěnou radiální situací na základě výsledků měření. Proto na vyhlášená opatření reagujte rozvážně a klidně, ale přičte bez zbytečných prodlev.

UKRYTÍ

DOMA

Jestliže se v době vyhlášení ukrytí nacházíte doma doporučujeme Vám dodržovat následující opatření:

- **Zachovejte klid.**
- **Shromážděte** všechny přítomné ve vhodné místnosti (nejlépe středové, suterénní nebo sklepní s minimálním počtem oken, dveří a jiných větracích otvorů) s možností poslechu televize nebo rozhlasového vysílání. Nesmí však být omezen přístup k pokynům sdělovaných prostřednictvím rozhlasových a případně televizních kanálech, protože přístup k informacím je stejně důležitý jako ochranné opatření ukrytí.
- **Zapněte** rozhlas nebo televizi na určených kanálech, na kterých Vám budou sdělovány pokyny pro Vaši další činnost. Tam, kde máte v obcích místní rozhlas nebo kabelovou televizi, sledujte pokyny, které bude vydávat obecní nebo městský úřad.
- **Zavřete** okna a dveře a pokud možno je utěsněte.
- **Vypněte** ventilační a klimatizační zařízení a uzavřete větrací otvory (v koupelnách, na WC, ve spížích apod.).
- **Telefon použijte** jenom v nejnútnejších případech (Zdravotní záchranná služba, Hasičský záchranný sbor, Policie ČR).
- **Uhaste (vypněte)** všechna zařízení na spalování paliv.
- **Uzavřete** domácí zvířectvo.
- **Neopouštějte** zvolený úkryt, pokud prostřednictvím rozhlasu, televize nebo místních sdělovacích prostředků, případně od orgánů krizového řízení nedostanete pokyny pro jinou činnost.

NA PRACOVIŠTI A JINDE

Postupujte podle pokynů svých nadřízených nebo podle havarijních plánů, pokud je má Vaše pracoviště zpracováno. Ve zdravotnických, sociálních, kulturních, dopravních a jiných zařízeních dodržujte pokyny jejich personálu.

V případě, že Vás vyhlášení varovného signálu zastihne na volném prostranství, je nevhodnější se neprodleně odebrat do nejbližší budovy alespoň k provizornímu ukrytí.

PÉČE O VAŠE DĚTI

V případě, že Vaše děti jsou doma bez dozoru, snažte se dopravit co nejdříve k nim. Pokud se nacházejí v předškolních zařízeních nebo ve školách, nepokoušejte se je za každou cenu vyzvednout nebo s nimi nějakým způsobem navázat kontakt. Zbytečný pohyb na volném prostranství může být pro Vaše děti i pro Vás nezdramý. V předškolních zařízeních a ve školách bude o děti postaráno. Každé z těchto zařízení má vypracován podrobný postup činnosti k zabezpečení potřebné ochrany Vašich dětí v případě vzniku radiální havárie.

PÉČE O TĚLESNĚ POSTIŽENÉ OBČANY

Vzpomeňte si, zda ve Vaší blízkosti nežijí lidé, kteří pro stáří, nemoc, upoutání na lůžko, omezené zrakové nebo sluchové schopnosti a podobně, mohli vyhlášení signálu přeslechnout nebo v důsledku svých omezených možností na ně nedokáží patřičně reagovat. Upozorněte je na vzniklou situaci a pomozte jim provést vyhlášená ochranná opatření nebo kontaktujte krizový štáb obce nebo starostu.

Obdobným způsobem se postarejte o děti bez dozoru.

JAK SE CHOVAT PŘI NEZBYTNÉM OPUŠTĚNÍ ÚKRYTU

Pokud musíte z jakéhokoli důvodu opustit byt nebo budovu, v níž se ukrýváte, doporučujeme:

- Omezit dobu opuštění úkrytu na co nejkratší dobu
- Chránit si nos a ústa improvizovanými ochrannými rouškami (stačí navlhčený kapesník, ručník, přeložená gáza, toaletní papír apod.)
- Chránit povrch těla pokud je to možné omyvatelnými prostředky
 - pokrývkou hlavy, která kryje temeno hlavy, čelo, uši a krk
 - pláštěm do deště nejlépe s kapucí
 - gumovými holínkami nebo návleky na obuv (ruce) ze sáčků z umělé hmoty, uvázané nad kotníky
 - rukavicemi
- Po návratu do budovy proveďte hygienickou očistu
 - za dveřmi do domu (na chodbě před vchodem do bytu) odložte svrchní použité oblečení, vložte je do igelitového pytle, který těsně uzavřete
 - podle možnosti se osprchujte nebo omyjte mýdlovou vodou, přičemž největší pozornost vě-

- nujete umytí rukou, obličej, vlasů a vousů. Ústa, nos a oči si vypláchněte (borovou vodou, OPHTALEM nebo alespoň obyčejnou vodou)
- oblečte si čisté prádlo a šatstvo

STRAVOVÁNÍ V OBDOBÍ UKRYTÍ

Konzumujte pouze chráněné potraviny (uzavřené v obalech, v lahvích, uložené v ledničkách, konzervy a podobně). Zásadně nepoužívejte potraviny, zejména zeleninu a ovoce, které se nacházely po vyhlášení radiální havárie na nechráněném prostoru. Vodu z vodovodního řádu můžete používat bez obav. Bude kontrolována a v případě kontaminace bude její přítok včas uzavřen.

Vodu z krytých studní můžete v případě nutnosti použít. Nepřipravujte si náhradní zásoby nekryté vody.

HOSPODÁŘSKÁ ZVÍŘATA

Hospodářským zvířatům zabraňte, pokud možno, v požívání nechráněného krmiva, zejména zelené píce a vody z povrchových zdrojů. Je třeba uzavřít je a dát jim zásobu krmiva a vody na 2–3 dny. Zásobní krmivo a vodu zabezpečit před kontaminací překrytím plachtou nebo folií z umělé hmoty.

JODOVÁ PROFYLAXE

Jednou z látek unikajících při radiální havárii jaderných zařízení je radioaktivní jód. Jód má tendenci shromažďovat se ve štítné žláze člověka. Aby se předešlo hromadění radioaktivního jódu a následnému poškození zdraví, užívají se tablety s jódem neradioaktivním ve formě jodidu draselného (KI), který nasycí štítnou žlázu a zabrání ukládání jódu radioaktivního.

Požití jódových tablet se provádí jednorázově po výzvě v hromadných sdělovacích prostředcích.

DÁVKOVÁNÍ

Předepsané dávkování je následující a současně je uvedeno v přiloženém návodu k tabletám.



| Novorozenci do 1 měsíce | Kojenci a děti do 3 let | Děti od 3 do 12 let | Osoby starší 12 let |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| ¼ tablety 16 mg KI | ½ tablety 32 mg KI | 1 tableta 65 mg KI | 2 tablety 130 mg KI |

Tablety jodidu draselného je třeba užít neprodleně po vyhlášení doporučení pro jejich požití. Zpoždění

v požití má za následek snížení ochranných účinků. Jodid draselný nemá běžné vedlejší účinky. Jódová profylaxe požitím tablet jodidu draselného se proto provádí u všech osob, včetně dětí, těhotných a kojících matek vyjma těch, které jsou vůči podávanému preparátu citlivé. Osoby s prokázanou přecitlivělostí na jódové preparáty či s poruchou štítné žlázy (zejména po 40.–45. roce věku) by se měly už nyní poradit při nejbližší návštěvě lékaře, jak postupovat v případě vyhlášení jódové profylaxe.

Pokud z nějakých důvodů nemáte tablety k dispozici v budově, ve které se v daném okamžiku nacházíte, nevycházejte pro ně ven. **Ukrytí je z hlediska Vaší ochrany důležitějším opatřením.**

UPOZORNĚNÍ K JODOVÉ PROFYLAXI:

- Nepoužívejte tablety jodidu draselného zbytečně nebo ve větším množství než je stanoveno. Svému zdraví tím nijak neprospějete. Bude-li to situace vyžadovat, budete prostřednictvím sdělovacích prostředků nebo místními rozhlasovými vyzvání k požití další dávky v průběhu 24–48 hodin, popřípadě Vám budou dodány dávky jodidu draselného na další dny.
- U novorozenců (do 1 měsíce) se další dávky jodidu draselného nepodávají, u těhotných žen a kojících matek se podávají nejvýše 2 dávky.
- V domácnosti uschovávejte tablety na chladném tmavém místě nepřístupném pro malé děti.

EVAKUACE

Evakuace obyvatelstva je mezním, ale současně nejučinnějším opatřením k zajištění jeho ochrany. K jejímu provedení jsou připraveny příslušnými orgány krizového řízení kraje evakuační plány, podle nichž jsou lidé evakuováni do předem stanovených míst nouzového ubytování. Evakuační trasy jsou voleny tak, aby doprava po komunikaci byla plynulá a nedocházelo ke komplikacím. **Evakuaci vyhlásují orgány krizového řízení** na základě doporučení Státního úřadu pro jadernou bezpečnost vycházejícího z analýzy výsledků monitorování radiační situace – pokyny k přípravě a zahájení evakuace budou vysílány rozhlasem, televizí a místními sdělovacími prostředky nebo jinými náhradními prostředky.

PŘÍPRAVA K EVAKUACI

Je vhodné mít předem připravený seznam věcí, které budete v případě evakuace brát s sebou. **Evakuační zavazadlo** by mělo obsahovat zejména:

- Osobní doklady (občanský průkaz, cestovní pas, rodný list, řidičský průkaz, doklady k provozování motorového vozidla, kartu zdravotní pojišťovny, včetně dokladů rodinných příslušníků);
- Léky a zdravotnické pomůcky (osobní léky, obvazy a další vybavení běžné lékárníčky), brýle ke čtení;
- Cennosti (peníze, šperky, vkladní knížky, cenné papíry, pojišťovací smlouvy, platební a sporožirové karty);
- Sezónní oblečení (náhradní oděv, obuv, prádlo, pláštěnka);
- Přiměřenou zásobu prostředků osobní hygieny a hygienických potřeb;
- Spací pytel (příkrývky), karimatku nebo nafukovací lehátko;
- Jídelní nádobí, potřeby pro šití, kapesní nůž, otvírač na konzervy;
- Základní potraviny na 2–3 dny včetně nápojů;
- Kapesní svítilnu a náhradní baterie, svíčky, zapalovač, zápalový;
- Dále se doporučuje přenosný rozhlasový přijímač s náhradními bateriemi, mobilní telefon s nabíječkou, psací potřeby a dopisní obálky se známkami, pištalku, předměty pro vyplnění dlouhé chvíle (např. stolní společenskou hru, knížku)

VÝZVA K EVAKUACI

Jste-li vyzváni k evakuaci řiďte se následujícími pokyny:

- Zaznamenejte si do mapky uvedené v této příručce doporučenou trasu evakuace.
- Nepřistupujte k evakuaci pokud Vás k tomu nevyzvaly orgány krizového řízení, zbytečně byste tím komplikovali situaci a provádění ochranných opatření.
- Řiďte se pokyny pracovníků místní samosprávy dotčeného území a složek IZS (městské Policie, Policie ČR, Armády ČR, příslušníků Hasičských záchranných sborů, atd.).
- Vzpomeňte si, zda ve Vašem bezprostředním sousedství nežijí lidé, kteří by v důsledku stáří, upoutání na lůžko, zhoršeného sluchu, zdravotního stavu mohli přeslechnout výzvu k evakuaci. Pomozte těmto lidem pokud to potřebují.
- Obdobně se postarejte o děti bez dozoru.

EVAKUACE POSTIŽENÝCH OBČANŮ

Pokud jste zdravotně postiženi nebo fyzicky omezeni a nemůžete provést všechna opatření spojená s Vaší evakuací požádejte o pomoc starostu obce, v případě nutnosti požádejte telefonicky o pomoc na čísle 112, 150, 155 nebo 158.

Nehledě na tato uvedená opatření, budete-li při vyhlášení evakuace potřebovat pomoc, vyvěste z okna nebo uvažte na kliku vstupních dveří do domu dostatečně velkou bílou látku, například prostěradlo. K organizaci této pomoci velmi přispěje, vyplníte-li předem údaje na formuláři „B“ – zpráva pro obecní (městský) úřad.



ZABEZPEČENÍ VAŠICH OBYDLÍ PŘED EVAKUACÍ

Před odchodem z Vašeho bytu proveďte následující opatření:

- Vypněte všechny elektrické spotřebiče s výjimkou ledničky a mrazáku
- **Pozor – hlavní elektrický jistič nevyplácejte!**
- Uložte potraviny, které podléhají zkáze, do ledniček a mrazáků nebo je vyhodte
- Uhasťte (vypněte) všechna zařízení pracující na principu spalování
- Uzavřete hlavní uzávěry vody a plynu
- Zkontrolujte uzavření oken a zamkněte dveře
- Odpojte anténní svody od přijímačů

Pokud máte hospodářská nebo domácí zvířata:

- Uzavřete je ve chlévech, kotcích či místnosti
- Dejte jim zásobu krmiva a vody cca na 2 dny
- Vyplňte formulář „C“ – označení domu pro péči o zvířata a umístěte jej na viditelném místě na dveře domu
- Zabezpečte vstupy do prostor, v nichž jsou zvířata tak, aby zůstala přístupná

Během Vaší nepřítomnosti ochrání Váš majetek Policie ČR, příslušníci Armády ČR. Nepovoláním osobám je pobyt v evakuovaném prostoru zakázán.

EVAKUACE VLASTNÍMI DOPRAVNÍMI PROSTŘEDKY

Po vydání pokynu k evakuaci můžete k opuštění ohroženého prostoru použít i vlastními soukromého vozidla podle dále uvedených zásad. Nikdy však neprovádějte samoevakuaci v období vyhlášení úkrytí. Může dojít ke kontaminaci Vás a Vašeho vozidla i přepravovaných osob. Základní evakuační trasy jsou uvedeny na obrázku zóny havarijního plánování.

Máte-li ve vozidle volná místa, můžete je nabídnout jiným osobám.

Při použití vlastního vozidla se doporučuje, aby vozidlo splňovalo následující kritéria:

- Je garážováno nebo zaparkováno v blízkosti místa Vašeho úkrytí
- Je v dobrém technickém stavu
- V nádrži má dostatečnou zásobu pohonných hmot na předpokládanou trasu jízdy

Při použití vlastního vozidla Vám doporučujeme:

- Znat určitou trasu do místa nouzového ubytování
- Pokud máte ve vozidle autorádio, doporučujeme sledovat vysílání na uvedených stanicích
- Při jízdě mějte zavřená okna, nevětrejte, nepoužívejte klimatizační ani topné zařízení vozidla pokud je evakuace prováděna přes kontaminované území
- Dodržujte pravidla silničního provozu, jeďte ohleduplně a bezpečně
- Je ve Vašem vlastním zájmu, abyste dodrželi stanovenou trasu. Jinak se může stát, že uvíznete v kolonách vozidel.

Můžete-li si zabezpečit vlastní ubytování, využijte je. V každém případě Vás žádáme: informujte o svém příjezdu obecní úřad v místě Vašeho náhradního ubytování, popřípadě krizový štáb kraje.

EVAKUACE PŘISTAVENÝMI DOPRAVNÍMI PROSTŘEDKY

K provedení evakuace budou do jednotlivých obcí přistaveny autobusy, které Vás dopraví do určených míst nouzového ubytování. S konkrétními místy přistavení Vás seznámí obecní (městské) úřady. Jsou volena tak, aby Vás pobyt na volném prostoru po opuštění úkrytu a při přemístění k autobusu byl co nejkratší a budou viditelně označena.

Způsob nasedání do autobusu bude upřesněn místně dostupnými sdělovacími prostředky.

Po výzvě k nasednutí dodržujte tyto zásady:

- Pokud již došlo k uniku radioaktivních látek použijte k přesunu do evakuačního autobusu doporučených ochranných prostředků
- Vezměte evakuační zavazadla
- Uzamkněte byt nebo dům
- Odeberte se nejkratší cestou k přistavenému autobusu
- Před vstupem do autobusu odložte prostředky improvizované ochrany a zanechte je před autobusem
- Po celou dobu evakuace zachovávejte klid, chovejte se ukázněně a řiďte se důsledně pokyny orgánů krizových orgánů

Nemusíte mít obavy, že zůstanete v ohroženém prostoru. Orgány místní samosprávy a další orgány a organizace dotčeného území budou kontrolovat, zda ohrožené území opustili všichni obyvatelé.

MÍSTA, KAM BUDETE EVAKUOVÁNI

Místa, kam budete evakuováni, pokud už Vám nebyla oznámena, si můžete zjistit již nyní na Vašem obecním (městském) úřadě. V místě kam budete evakuováni pro Vás bude připraveno ubytování, strava, lékařská pomoc. Následně bude zajišťováno i Vaše další sociální zabezpečení.

ZÁSADY POUŽÍVÁNÍ TELEFONŮ

Telefonní linky by měly být vyhrazeny pro zabezpečení spojení zasahujících složek. V případě vyhlášení varovného signálu proto nepoužívejte zbytečně telefon. Mohlo by dojít k přetížení pevné i mobilní telefonní sítě a jejímu následnému výpadku, což by ztížilo spojení pro potřeby řízení zásahu. Použijte telefon pouze v nutných případech hlášení událostí Policii ČR, Hasičskému záchrannému sboru nebo Zdravotní záchranné službě. Všechny důležité informace obdržíte prostřednictvím rozhlasových nebo televizních relací.

