

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZDRAVOTNĚ SOCIÁLNÍ FAKULTA

**KONTAMINACE OSOB RADIOAKTIVNÍMI LÁTKAMI PŘI HAVÁRII
JADERNÉ ELEKTRÁRNY**

bakalářská práce

prof. MUDr. Pavel Kuna DrSc.
vedoucí práce

Marek Sedláček
autor práce

2007

ABSTRACT

Contamination of people by radioactive material during the accident of nuclear power station.

An atomic energy exploitation is joint with a possibility of an accident origination as like as the everyone human activities. The first victims of radiation accident were served by development of atomic energy in the peacetime. The biggest extension and impact on the people's life had have the reactor explosion in the Chernobyl atomic power plant in Ukraine (1986). The consequences of the explosion and the people's contamination by the radioactive materials, which were taken from the accident, were and are balanced till today and are confronted with the experimental exposure effects in the Pacific Ocean.

There is some thematic articles in the work. The questions of human internal and external contamination by the radioactive materials, the questions of safety in power plant service and the effects of ionizing radiation on the human body are described in the first part. There are put brain to analyse the Chernobyl power plant accident and the consequences on the Belorussian area in the independent article; we talk about area's contamination and individual's exposure (assessors, population) by ionizing radiation. The questions of the protective equipments and the emergency plan, which is able to decrease the overall impact of power plant accident, are described in the next part. The summary of the accidents and the consequences minimalization are presented in the last article.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské 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.

Datum:

Marek Sedláček

Obsah

1. Úvod	6
2. Stav současné problematiky	7
2.1 Kontaminace osob	7
2.1.1 Zevní kontaminace osob	7
2.1.2 Vnitřní kontaminace osob	10
2.2 Účinky ionizujícího záření na lidský organismus	15
2.2.1 Deterministické účinky	15
2.2.2 Stochastické účinky	17
2.3 Radiační havárie jaderné elektrárny	19
2.3.1 Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí	21
3. Cíle práce a hypotézy	25
4. Metodika	25
5. Výsledky	26
5.1 Rozbory havárií jaderných elektráren	26
5.1.1 Windscale, Velká Británie, 1957	26
5.1.2 Three Mile Island, USA, 1979	26
5.1.3 Černobyl, SSSR (nyní Ukrajina), 1986	28
5.2 Černobylská havárie a radioaktivní kontaminace Běloruska	33
5.2.1 Utváření radioaktivní kontaminace	33
5.2.2 Radioaktivní spad radionuklidů z krátkým poločasem rozpadu	35
5.2.3 Radioaktivní kontaminace území Běloruska	35
5.3 Expozice obyvatelstva Běloruska radioaktivním zářením	40
5.3.1 Dávky ozáření štítné žlázy	40
5.3.2 Dávky ozáření běloruských likvidátorů	45
5.3.3 Dávky radioaktivního záření ve vztahu k populaci	47
5.4 Opatření při radiační havárii jaderné elektrárny	49
5.4.1 Radiační havárie jaderné elektrárny s únikem do ovzduší	49
5.4.2 Radiační havárie jaderné elektrárny s únikem do vodotečí	60
6. Diskuse	61

7. Závěr	66
8. Seznam použité literatury	68
9. Klíčová slova	70

1. Úvod

V posledních letech minulého století došlo v krátkém časovém sledu ke třem významným objevům. Röntgen objevil v roce 1895 pronikavé záření později nazvané po svém objeviteli, Becquerel v roce 1896 přírodní radioaktivitu a manželé Curieovi separovali v roce 1898 rádium. Nové poznatky byly velmi rychle využity v praxi. Rentgenové přístroje znamenaly v medicíně kvalitativní skok diagnostických možností. Začaly se uplatňovat spolu s rádiem i při léčení některých chorob, zejména zhoubných nádorů, které do té doby byly považovány za naprosto nevyléčitelné. Ve dvacátých letech byly z použitím rádia a mezothoria vyrobeny pro potřebu hodinářského průmyslu první svítivé radioaktivní barvy. Objev umělého štěpení atomových jader znamenal další kvalitativní skok. Válečné období bylo soustředěno na vojenské využití jaderné energie. V prvních poválečných letech se výzkum zaměřil na hledání možností mírového využití zdrojů záření. Byly postaveny první jaderné elektrárny.

Jako každá lidská činnost i využívání jaderné energie je spojeno s možností vzniku nehod a havárií. Rozvoj mírového využití jaderné energie tak přinesl první oběti havárií v mírových podmínkách. Největší rozsah a dopad měla havárie černobylského reaktoru na Ukrajině (1986). Dodnes jsou ve světě bilancovány následky ozáření a kontaminace osob radioaktivními látkami této nehody a srovnávány s následky pokusných jaderných výbuchů v Tichomoří.

Tato práce se ve své první části zabývá problematiku kontaminace osob radioaktivními látkami, problematikou bezpečnosti jaderných elektráren a stručně charakterizuje účinky ionizujícího záření na člověka. Hlavní částí práce je věnovaná rozboru havárie Černobylské jaderné elektrárny a jejich následků na území dnešního Běloruska z hlediska kontaminace území a expozice osob (likvidátorů, obyvatelstva) ionizujícím zářením. Dále je zde uvedena problematika ochranných opatření a havarijního plánování snižujících dopady případné havárie jaderné elektrárny. V závěru práce je pak provedeno shrnutí problematiky havárií a minimalizace jejich následků.

2. Stav současné problematiky

V nedávné historii došlo k několika haváriím jaderných elektráren při kterých došlo k úniku radioaktivních látek mimo prostor jaderného reaktoru. Radioaktivní látky, které unikly, následně kontaminovaly různou měrou prostředí a osoby.

2.1 Kontaminace osob

Kontaminací osob se rozumí přítomnost radionuklidů na povrchu organismu tzv. zevní kontaminace nebo uvnitř organismu tzv. vnitřní kontaminace. Kontaminace osob radioaktivními látkami je vedle zevního ozáření další způsobem expozice osob ionizujícím zářením.

2.1.1 Zevní kontaminace osob

Zevní kontaminací rozumíme znečištění nekrytého tělesného povrchu (kůže, sliznic) radionuklidy. Zevní kontaminace patří k nejčastějším případům zasažení osob radioaktivními látkami. Může pokrývat dle charakteru zasažení spektrum od nezávažné lokální zevní kontaminace, např. rukou při kontaktu se zamořeným materiálem, přes závažné lokální kontaminace zářiči (dávka 3- 5 Gy již vede k lokálnímu poškození kůže) nebo může být jediným upozorňujícím jevem na možnou vnitřní kontaminaci při pobytu v místech s radioaktivními aerosoly nebo vzácnými plyny (vnitřní kontaminace dýchacím, zažívacím ústrojím nebo porušeným kožním krytem).

Zevní kontaminace osob štěpnými produkty

Rozhodujícím zdrojem kontaminace při havárii jaderné elektrárny jsou štěpné produkty, které unikly z prostoru aktivní zóny jaderného reaktoru jako jsou ^{90}Sr , ^{91}Y , ^{95}Zr , ^{103}Ru , ^{131}I , ^{133}Xe , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{144}Ce aj. Tyto produkty jsou převážně beta a gama zářiči. Při povrchovém, kontaktním působení těchto produktů roste význam beta záření. Záření beta proniká v pokožce do hloubky několika milimetrů nejvýše 2-5mm a vyvolává převážně jen povrchová poškození. V případě, že jsou kontaminované odkryté části těla (nejčastěji bývají zamořené vlasy, obličej, ruce a předloktí) štěpnými produkty je dávka z beta záření v pokožce (bazálních vrstvách epidermis) přibližně 5-10krát vyšší než dávka současného gama záření. Dávka záření absorbovaného v epidermis při kontaktu radionuklidů s odkrytou pokožkou závisí na jejich aktivitě, na stáří směsi štěpných

produktů a na délce jejich kontaktu z pokožkou. Radiační poškození pokožky tedy závisí na absorbované dávce záření. Podle závažnosti ozáření má poškození formy od zarudnutí kůže až po hlubší poškození tkáně a vznik vředů, které se velmi obtížně hojí. Prahová dávka je kolem 3 Gy. Je-li kontaminován i obličej je pravděpodobné, k rozvoji patologických změn dojde mimo pokožky i ve spojivkách oka a na sliznicích dutiny ústní a nosní.

Případné celkové projevy akutní nemoci z ozáření po kontaktním ozáření beta částicemi mohou vzniknout až při značně vysokých koncentracích radioizotopů působících dlouhou dobu na převážnou část tělesného povrchu. Dokazuje to například zasažení rybářů z japonské lodi Fukuruju Maru radioaktivním spadem z amerického pokusného pozemního výbuchu na souostroví Bikini 1.3.1954. Rybáři nevěnovali pozornost vypadávajícímu „bílému popelu“, pokračovali v normálních činnostech. Za několik hodin se objevily lehčí i těžší příznaky a posléze se rozvinula akutní nemoc z ozáření. Rozvinula se též závažná poškození nekryté kůže jako horní části hlavy bez pokrývky, rukou a nohou.

První pomoc při zevní kontaminaci osob

Cílem první pomoci při kontaminaci těla je zabránit šíření zamoření, rychle provést povrchovou dekontaminaci osob a tím zabránit dalšímu ozařování a možnému průniku radioaktivní látky do organismu zamořených. Na rozdíl od vnějšího ozáření, kdy obvykle nehrozí nebezpečí z prodlení, je třeba při kontaminaci postupovat velmi rychle. Déle trvající povrchové zamoření těla zvyšuje nebezpečí průniku radioaktivní látky do organismu neporaněnou pokožkou a sliznicemi a především inhalací radioaktivní látky rozprášené z povrchu oděvu nebo těla.

Nejprve je nutno zabránit šíření kontaminace ze zamořených prostor a z člověka na člověka. Prostor, ve kterém došlo k úniku radioaktivních aerosolů nebo plynů, musí být uzavřen. Vstup může být povolen jen v nejnaléhavějších případech, a to jen osobám vybaveným ochrannými prostředky, respirátorem, maskou, ochranným oděvem, rukavicemi atd. Použití ochranných pomůcek a ochranných oděvů částečnou absorpcí záření beta snižuje dávkový příkon v kůži z případné povrchové kontaminace těchto pomůcek a oděvů. Především však umožňuje ukončit expozici odložením zamořených součástí.

Kontaminované osoby musí být převedeny do čistého prostoru. Mají být soustředěny pokud možno na jednom místě, nejlépe v blízkosti sprch, kde bude provedeno jejich odmoření. Zde musí být pod trvalou kontrolou, aby se nestaly zdrojem kontaminace dalších osob. Zamořený oděv je třeba svlékat velmi opatrně, aby nedošlo k dalšímu rozprašení radioaktivní látky. Všechny zamořené součásti oděvu musí být kontrolovaně shromažďovány. Po svléknutí oděvu je třeba provést dozimetrickou kontrolu těla. Poté následuje dekontaminace.

Dekontaminace osob

Radionuklidy nelze deaktivovat ve smyslu učinit je neradioaktivními, ale pouze provést dekontaminaci tzn. jejich odstranění. Při dekontaminaci je třeba postupovat opatrně, aby se radioaktivní látka ze zamořených částí těla (nejčastěji bývají zamořené vlasy, obličej, ruce a předloktí) nešířila na čisté části a hlavně, aby se zabránilo vniknutí radioaktivní látky do úst, nosu, spojivkového vaku apod. Z tohoto důvodu je nejlépe zahájit dekontaminaci odmořením nejvíce kontaminovaných míst. Lokální dekontaminace se provádí otíráním vlhkými tampóny mytím rukou v umyvadle apod. Po lokálním odmoření se pokračuje v dekontaminaci ostatních částí těla nejlépe osprchováním teplou vodou. Při oplachování vlasaté části těla je třeba postupovat opatrně, aby nedošlo k vniknutí radioaktivní látky do očí, nosu a úst. Nejlépe je zahájit dekontaminaci vlasů, sprchováním zakloněné hlavy. Účinnost dekontaminace musí být průběžně kontrolována dozimetrickými přístroji. Není-li odmoření vlasů úspěšné, je třeba rozprašování radioaktivních látek zabránit zakrytím vlasů, případně jejich ostříháním. Dekontaminace těla nesmí být prováděna drastickými prostředky, jejichž použití by vedlo k narušení celistvosti pokožky, k jejímu poranění. Obvykle plně dostačuje teplá voda a běžné toaletní mýdlo, případně jemný kartáček, který je účinným prostředkem při odstraňování zamoření v kožních řasách, za nehty apod. Cílem není odstranit radioaktivní látku za každou cenu, hlavně ne za cenu poranění pokožky.

Zvláštní postupy dekontaminace

Dekontaminace očí

Provádí se opakovaným výplachem fyziologickým roztokem. Je nutno dbát aby roztok vytékal tak, aby nekontaminoval druhé oko, případně nemohl kontaminovat du-

tinu ústní či nos. Část, která pronikne slzným kanálkem do nosohltanu nesmí postižený polykat, ale vyplivnout.

Dekontaminace dutiny ústní

Při kontaminaci dutiny ústní je nutno mít na paměti, že ta může být cestou vnitřní kontaminace. Proto je nutné odebrat před dekontaminací vzorek slin a hlenů na přeměření a poté provést výplach úst vlažnou vodou, 3% peroxidem vodíku nebo zubní pastou a kartáčkem. Nesmí dojít k polknutí vyplachující tekutiny nebo poranění a krvácení dásní.

Dekontaminace dutiny nosní

Při kontaminaci dutiny nosní je nutno mít na paměti, že ta může být cestou vnitřní kontaminace. Proto je nutné odebrat před dekontaminací vzorek nosního sekretu na přeměření. Dekontaminaci provádět opakovaným odsmrknutím nebo je možné provést výpach nosu vlažným fyziologickým roztokem při předkloněné hlavě, nesmí zatéct do nosohltanu a dojít k polknutí.

2.1.2 Vnitřní kontaminace osob

Vnitřní kontaminací se rozumí vniknutí radioaktivních látek do organismu. Radioaktivní látky mohou do organismu vnikat inhalací tj. vdechnutím radioaktivní látky ve formě aerosolu, páry plynu apod. spolu se vzduchem, ingescí tj. přechodem radioaktivního materiálu ústy do zažívacího traktu (např. požití kontaminovaných potravin a vody), přestupem poraněním přes kůži (sem lze zařadit i injekční aplikaci při lékařském použití) nebo adsorpcí neporušenou pokožkou (např. tritium).

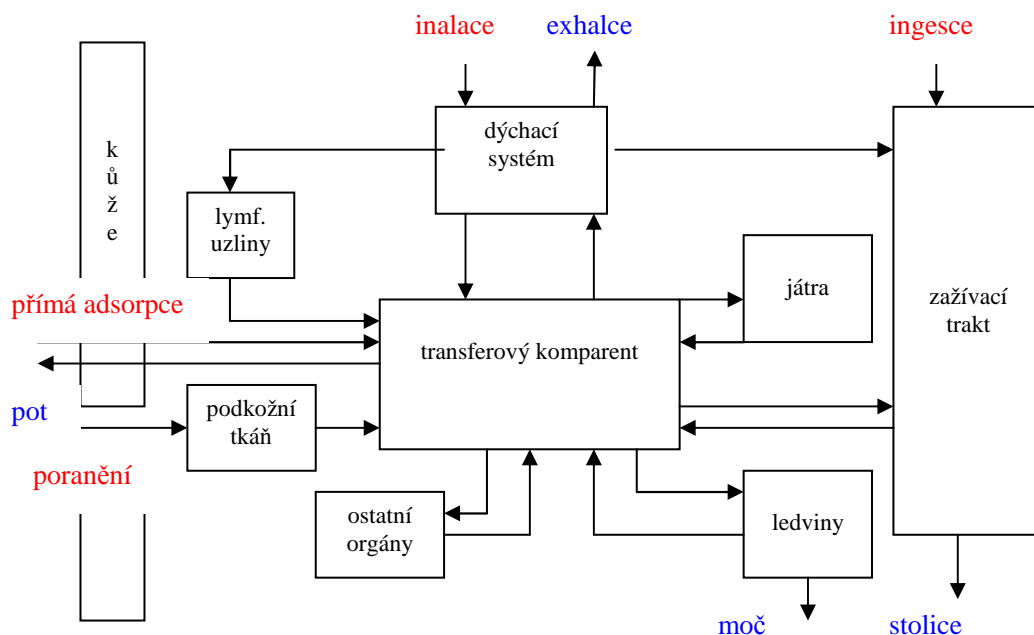
Kinetika radionuklidů v organismu

Jakmile je radionuklid přítomen v těle, jeho biokinetika je velmi složitá. Lidské tělo je převážně složeno z kyslíku, uhlíku a vodíku, ale obsahuje i velké množství ostatních prvků. Téměř všechny tyto prvky mají radioaktivní izotopy, které když se dostanou do těla, sledují stejné biokinetické cesty jako jejich neradioaktivní izotopy. Některé prvky např. fosfor, jód, draslík se podílejí na specifických metabolických procesech, čímž

je též řízena jejich distribuce a transport v těle. Radionuklidy dalších prvků se obvykle chovají jako jejich analogy, přítomné v těle ve větším množství. Např. cesium sleduje draslík a např. stroncium, baryum, a radium sledují chování vápníku. Další radionuklidy jako např. plutonium či americium nemají přírodní analogy a jejich chování v těle je určeno jejich afinitou k buněčným komponentám a transportnímu systému v těle.

Podle distribuce rozdělujeme radionuklidy do čtyř skupin: rovnoměrně rozdělené v organismu (např. Na, K, Rb, Cs, H, C), deponované v kostech (např. Ca, Sr, Ra, Pu), deponované v retikuloendoteliární soustavě (např. lehké lanthanoidy, zvláště lanthan, cer, praseodym), deponované selektivně (I ve štítné žláze, Fe v krvetvorných tkáních).

Radioaktivní látky jsou z těla vylučovány biologickým vylučováním a fyzikální přeměnou (poločasem rozpadu radionuklidů). Biologické vylučování se děje především močí a stolicí, částečně kožními mazovými žlázami, potem a slinami, případně mateřským mlékem, výjimečně i plícemi. Močí se vylučují převážně lehce rozpustné látky. Látky nerozpustné, koloidní a látky vázané na bílkoviny se dostávají do jater a žlučí do střeva a poté do stolice.



Obr. č.1: Schéma kinetiky radionuklidu v organismu

Vnitřní kontaminace inhalací

Radionuklidy jsou vdechovány ve formě radioaktivních plynů a aerosolů se vzduchem. V dýchacím ústrojí, podléhají procesu samočištění dýchacích cest a plic. Tento proces je životně důležitým obranným mechanismem organismu a je proto zajištěn několika způsoby. Vdechnutý aerosol může být kdekoliv v místě depozice rozpuštěn a vstřebán, nebo tenkou hlenovou vrstvou posouván ciliárním pohybem řasinek epitelu bronchiálního stromu odtransportován k hrtanu a tam samovolně polknut, anebo v alveolární oblasti plic zachycen makrofágy a vyplaven k řasinkovému epitelu bronchiálního stromu nebo vtažen do lymfatických cév a zachycen v lymfatických uzlinách.

Radionuklidy, které se zachytí v předních nosních cestách jsou odstraněny z organismu smrkáním. V ostatních částech jsou radionuklidy adsorbovány do krevního řečiště nebo transportovány do zažívacího traktu. Malá část radioaktivních látek, která byla transferována do místních uzlin se adsorbuje do tělních tekutin.

Radionuklidy, které byly inhalovány ve formě aerosolu, jsou deponovány v různých částech dýchacího ústrojí v závislosti na velikosti. Mezi radionuklidy, které se velmi rychle adsorbují patří např. všechny sloučeniny cesia a jódu. Naopak mezi radionuklidy, které mají adsorpci velmi malou patří např. nerozpustné sloučeniny uranu a plutonia.

Jiná je situace pro plyny a páry, jejichž depozice v dýchacím traktu je specifická pro jednotlivé prvky a sloučeniny. Molekuly všech plynů se při vdechnutí dostanou do kontaktu s povrchem dýchacích cest a jsou opět vydechnuty, pokud se v povrchové vrstvě nerozpustí nebo s ní nereagují. Depozice v jednotlivých oblastech dýchacího traktu závisí na rozpustnosti a reaktivitě vdechnutého plynu. Následná adsorpce do tělních tekutin je dána chemickými vlastnostmi daných par a plynů. Mezi nerozpustné a nereaktivní plyny u kterých je zanedbatelná depozice v dýchacím ústrojí patří např. ^{41}Ar , ^{85}Kr , ^{133}Xe . Mezi rozpustné a reaktivní u kterých se depozice může vyskytnout víceméně v celém dýchacím traktu patří např. ^{14}C , páry jódu, páry rtuti.

Vnitřní kontaminace ingescí

Do zažívacího traktu přicházejí radionuklidy přímo spolknutím kontaminované vody, jiných tekutin a potravin, nebo polknutím radioaktivních částí přesunutých ciliár-

ním mechanismem a vykašláním z horních dýchacích cest do úst. Přibližně polovinu vdechnutých radionuklidů tímto způsobem přesuneme z plicního do zažívacího traktu.

Rozpusťné radionuklidy jsou resorbovány převážně v tenkém střevě a jen menší část v horním oddílu tlustého střeva. Z ostatních částí zažívacího traktu se radionuklidy prakticky nevstřebávají. Vstřebávání je výrazně ovlivňováno rychlostí pasáže, nejintenzivnější je do 2 hodin po spolknutí a končí za 3 až 6 hodin. Nevstřeba­né radioaktivní látky se vyloučí přirozenou cestou stolicí během několika dnů. Kritickým úsekem zažívacího traktu po požití radioaktivních částic je proto tlusté střevo, kde je stolice po několik dnů zahušťována než odejde přirozenou cestou mimo organismus. Radiační poškození střevní sliznice má charakter postradiační kolitidy (zánětu). Mezi radionuklidy s vysokou adsorpcí řadíme: radium (20%), stroncium (30%), tritium (100%), jód (100%), cesium (100%).

Vnitřní kontaminace poraněním a adsorpcí

Neporušenou kůží se radionuklidy kromě tritia a jódu ve formě par nebo roztoků nepronikají. Poškozenou kůží pronikají radionuklidy do krevního řečiště a do míst depozice. Nerozpustné sloučeniny zůstávají v ráně a při vysoké aktivitě mohou komplikovat průběh hojení. Přístupné sliznice ke vstřebání radionuklidů jsou sliznice dutiny nosní, nosohltanu a bronchiálního kmene.

První pomoc při vnitřní kontaminaci

Vnitřní kontaminaci nelze vyloučit zejména při zamoření obličejové části hlavy nebo při kontaminaci v místě poranění, popálení nebo poleptání. Stupeň vnitřní kontaminace je možno s určitou přesností odhadnout z množství radioaktivní látky v kontaminovaném prostoru, z délky pobytu v tomto prostoru a z výsledků dozimetrické kontroly zevní kontaminace. Možnosti účinného zákroku po vniknutí radioaktivní látky do organismu a zejména po průniku do krve jsou omezené. Tato skutečnost zdůrazňuje význam všech opatření zamezujících nebo alespoň omezujících vniknutí radioaktivní látky do organismu. Po požití některých radionuklidů lze do určité míry omezit jejich vstřebávání vazbou alespoň části nuklidů na látky, které nejsou schopny transportu střevní stěnou. Dále je možné provést výplach žaludku a střeva fyziologickým roztokem. Míru kontaminace některými radionuklidy lze také snížit podáním látek zvyšující

eliminaci (odstraňování, vylučování) nuklidů z organismu. Při reaktorových nehodách představují poměrně vysoké riziko izotopy jódu. Jód se po vniknutí do organismu poměrně rychle vychytává a hromadí ve štítné žláze. Podání velkého množství neaktivního jódu ve formě tabletek jodidu draselného přesycuje organismus, blokuje štítnou žlázu a urychluje vylučování nadbytečného, tedy i radioaktivního jódu. Snížit resorpci nebo urychlit eliminaci lze jen do značné míry, a to jen u některých radionuklidů. První pomoc je ve všech případech účinnější čím rychleji je po kontaminaci provedena, čím dříve jsou prostředky první pomoci postiženým podány. Přehled látek bránící vstřebání nebo urychlující eliminaci radionuklidů z organismu je uveden v tabulce č. 1.

Tabulka č. 1: Přehled látek bránící vstřebání nebo urychlující eliminaci radionuklidů z organismu

Radionuklid	Medikace	Podání	Účinek
Jód	jodid draselný (KI)	až 7 tbl. po 130 mg	kompetitivní inhibice jódu ve štítné žláze
Plutonium, Yttrium, Americium, Lanthanidy, Transurany, Kobalt	dietyltriamin pentaocetan vápenatý (DTPA)	1 g Ca-DTPA v 250 ml 5% fyziologický roztoku podávat přes 30 minut	vyvázání
Uran	bikarbonát sodný	pomalá infúze 250 ml 14%-ního roztoku	alkalizace moči
Cesium, Rubidium, Thallium	Berlínská modř	1 g v 100-200 ml vody, p.o., 7 dní	mobilizace z orgánů
Radium, Stroncium	Síran barnatý, alginát sodný	BaSO ₄ : 100 g v cca. 250 ml vody. alginát sodný: 10 mg ve velké sklenici vody (250 ml)	snížení vstřebávání
Trícium	Voda	Podat 6-12 litrů vody denně	ředění a vylučování
Olovo, polonium a kobalt	D-penicilamin	1 g/den, i.v., 0,9 g po 4-6 hod., p.o.	vyvázání

2.2 Účinky ionizujícího záření na lidský organismus

Ionizující záření má na lidský organismus převážně negativní vliv. Jeho účinky představují široké spektrum různých poruch a projevů. Základní klasifikace účinků záření je založena na pravděpodobnosti, s jakou se po ozáření projeví poškození. Z tohoto hlediska se účinky rozdělují na deterministické (vždy nastávající) a stochastické (náhodné).

2.2.1 Deterministické účinky

Deterministické účinky jsou takové, které se projeví po ozáření celého těla nebo určité tkáně, nejčastěji jednorázově, takovou ekvivalentní dávkou záření, která v zasaženém jedinci vyvolá s vysokou pravděpodobností klinicky pozorovatelné účinky během poměrně krátké doby po ozáření. Za těchto podmínek se klinicky pozorovaný účinek projeví proto, že v ozářených tkáních je současně postiženo mnoho buněk za podmínek, kdy se nemohou uplatnit opravné procesy. Závislost pravděpodobnosti výskytu určitého poškození na ekvivalentní dávce záření má esovitý charakter a je pro ni charakteristická určitá prahová hodnota. Za prahovou hodnotu se pokládá dávka, která vyvolá příslušné poškození u 1-5 % ozářených osob. Menší ekvivalentní dávky než je prahová hodnota daný typ poškození nezpůsobují. K deterministickým účinkům se řadí:

1. Akutní nemoc z ozáření. Nastává pouze za zcela výjimečných okolností, kdy dochází k jednorázovému ozáření celého těla vysokými dávkami záření. Podle závažnosti ozáření se projevuje poškozením krvetvorných orgánů, trávicího ústrojí nebo centrálního nervového systému.

Nemoc se projevuje u většiny osob po ozáření dávkou 2 Sv, prahová hodnota je kolem 0,7 Sv a závisí na individuální odolnosti. Průběh nemoci má tři fáze. V prvních dnech po ozáření se projevuje nevolnost zvracení, skleslost, bolesti hlavy, zvracení a různé závažné změny v krevním obrazu. Pak následuje období částečného ustupování příznaků (latence), které je tím kratší čím vyšší bylo ozáření. Konečně se dostavuje období, kdy všechny počáteční příznaky jsou intenzivně rozvinuty a přistupuje padání vlasů, vnitřní krvácení a silná vnímavost vůči infekcím. Při ozáření ekvivalentní dávkou do 6 Sv převládá hematologická forma nemoci (poškození kostní dřeně a krvetvorby), při

dávkách vyšších se přidává forma střevní, kdy odumírají buňky střevní výstelky, období latence se zkracuje a závažné poškození se projevuje během 4 – 6 dní po ozáření. Pro střevní formu jsou charakteristické krvavé průjmy a poruchy funkce střev. Pravděpodobnost úmrtí je asi 80 % při 6 Sv, při 10 Sv se blíží 100 %. Při ozáření nižšími dávkami nastává postupné zlepšování stavu po 6 – 8 týdnech. U lidí, kteří nemoc přežijí, dochází k uzdravení za různě dlouhou dobu podle závažnosti ozáření. Často však jsou vyléčení lidé postiženi dlouho přetrvávajícími následky (poruchy krvetvorby, poruchy funkce pohlavních orgánů, neplodnost, zvýšená vnímavost k infekcím a nádorovým onemocněním, trvalá slabost a únava). Ozáření dávkou větší než 50 Sv způsobuje nervovou formu nemoci projevující se psychickou desorientací a zmateností, křečemi a bezvědomím. Během několika hodin až dnů nastává smrt v důsledku oběhového kolapsu, zástavy dýchání a poruch mozku.

2. Lokální akutní poškození kůže. Je to nejčastější typ poškození při nehodách se zdroji záření. Označuje se jako radiační dermatitida. Podle závažnosti ozáření má různé formy, od zarudnutí kůže až po hlubší poškození tkáně a vznik vředů, které se velmi obtížně hojí. Prahová dávka je kolem 3 Sv.

3. Poškození plodu. Vyvíjející se lidský zárodek je vůči záření mimořádně citlivý a to zejména mezi třetím a osmým týdnem, kdy probíhá tvorba orgánů. Poškození závisí na velikosti dávky a na období vývoje, v němž došlo k ozáření. Děti narozené matkám, které byly v těhotenství ozářeny, bývají postiženy mikrocefálií, očními defekty, rozštěpem patra a celkovým zaostáváním (mentální retardace, zakrslost). Prahová dávka je poměrně nízká – 0,05 Sv. Proto se těhotné ženy mají podrobovat rentgenovému vyšetření v břišní krajině jen v nejnnutnějších případech.

4. Poruchy plodnosti. Nemají ostře vymezenou prahovou dávku. U mužů dochází při ozáření dávkami 0,1 – 1 Sv k přechodné aspermii, trvalá aspermie se projevuje od 3 Sv. Ženy jsou z tohoto hlediska méně vnímavé. Hodnoty nižší než 1,5 Sv nevyvolávají žádnou odezvu, trvalou sterilitu mladších žen způsobují s 60-70% pravděpodobností dávky větší než 2,5 Sv.

5. Zákal oční čočky. Postihuje útvar, který nemá přímou výživu a vlastní buněčný substrát. To je příčinou dlouhé doby latence mezi ozářením a rozvojem změn. Prahová dávka je 1,5 až 2 Sv. Doba latence do vzniku prvních zjiitelných příznaků činí alespoň 6 měsíců, klinický závažný stupeň se vyvíjí v období let.

2.2.2 Stochastické účinky

Stochastické účinky jsou důsledkem poškození malého počtu buněk, popř. i jediné buňky. Mohou se projevit po jednorázovém ozáření dávkou, která je podprahová z hlediska deterministických účinků nebo při chronickém ozařování určité tkáně nebo celého těla malými dávkami. Podprahové dávky nevyvolávají v krátké době po ozáření žádné klinicky pozorovatelné poškození, ale mohou z jistou pravděpodobností způsobit poškození, které se projeví za dlouhou dobu po ozáření. Ke stochastickým účinkům patří vznik nádorových onemocnění, leukémie a genetické poškození další generace. Délka latentního období se uvádí u leukémie 5-20 roků, u nádorových onemocněních 10-40 roků. Stochastický (nahodilý) charakter účinků podprahových dávek záření spočívá v tom, že ve skupině osob se ozáření projeví jen u některých jedinců, při čemž nikdy nelze říci u koho. Pro stochastické účinky je charakteristické, že pravděpodobnost vzniku poškození je tím menší, čím menší dávkou byla skupina ozářena a že rostoucí dávka záření ovlivňuje pouze pravděpodobnost vzniku poškození a nikoliv jeho závažnost. Proto lze stochastické účinky záření odhalit pouze jen sledováním velkých skupin osob.

Při ozáření relativně velkou dávkou je pravděpodobné, že se v ozářené populaci po určité době projeví zřetelně zvýšený výskyt poškození (nad výskyt normální), který lze jednoznačně připsat vlivu ozáření. Jako příklady takových výrazných stochastických účinků záření lze uvést zvýšený výskyt leukémie mezi osobami, které přežily exploze atomových zbraní v Japonsku, zvýšený výskyt rakoviny štítné žlázy mezi obyvateli Marshallových ostrovů, kteří konzumovali potravu zamořenou radioaktivními látkami, zvýšený výskyt rakoviny štítné žlázy mezi dětmi na Ukrajině a v Bělorusku, které byly vystaveny vyššímu příjmu radioaktivních izotopů jódu po havárii černobylského reaktoru a zvýšený výskyt rakoviny plic mezi horníky uranových dolů.

Při ozáření dávkami menšími než 0,2 Sv, můžeme očekávat, že záření vyvolá pouze stochastické účinky. Skutečné riziko malých dávek záření dnes nelze stanovit, lze pouze odhadovat pravděpodobný počet osob v ozářené populaci, u nichž se ozáření může projevit. Přesto, že díky opravným mechanismům je vznik poškození při malých dávkách záření velmi málo pravděpodobný, převládá dosud při odhadu rizika z ozáření malými dávkami konzervativní přístup. Ten předpokládá, že stochastické účinky mohou být v krajním případě způsobeny mutací i jediné zasažené buňky, tj. že závislost výsky-

tu poškození na dávce je bezprahová. Podle této koncepce neexistuje sebemenší spodní hranice dávky, pod kterou by poškození nemohlo nastat. I když není známo, zda závislost účinku na malých dávkách záření je lineární nebo nelineární, konzervativní přístup, ve snaze nepodcenit riziko stochastických účinků, používá lineární závislost a navíc předpokládá, že se vliv malých dávek při chronickém ozařování sčítá, tj. ignoruje opravné procesy.

Již delší dobu je však bezprahový a lineární model účinků malých dávek záření vystaven značné kritice. Ta vychází z toho, že mechanismus, kterým se normální buňka může přeměnit ve zhoubnou a posléze rozvinout v rakovinový nádor, představuje složitý vícestupňový proces, během něhož se poškození DNA může opravit. V takovém případě se buňka může uzdravit nebo dokonce získat vůči záření větší odolnost. Mnoho údajů potvrzujících tento názor přinesla konference Americké jaderné společnosti v.r.1994. Porovnáním výskytu nádorových onemocnění u významně ozářených populací s populacemi neozářenými se ukázalo, že při ozáření dávkami pod 0,2 Sv nelze prokázat žádné škodlivé účinky, tj. vznik dodatečných případů rakoviny. Výjimkou je ozáření lidského plodu v období diferenciaci buněk, kdy se poškození projevuje při ozáření dávkami většími než 0,05 Sv.

Dnes skutečně přímé důkazy o škodlivosti malých dávek záření neexistují a žádná významná statistická studie o vlivu dávek do 0,2 Sv nepodporuje předpoklad lineárního a bezprahového růstu rizika vzniku rakoviny. Zdá se že při současném stavu vědomostí nikdo neví, zda malé dávky záření jsou vůbec člověku škodlivé. Pokud jisté riziko představují, jeví se toto riziko jako bezvýznamné a rozhodně ne větší než jsou přijímaná rizika mnoha jiných faktorů a lidských činností. Není ovšem vyloučeno, že ve spojení s dalšími nepříznivými faktory jako jsou vrozené dispozice, životní návyky (kouření, životospráva) nebo přítomnost karcinogenů nemohou malé dávky záření ke vzniku nádorových onemocnění přispívat. S těmito problémy souvisí úzce tzv. hormeze, tj. stimulující účinky malých dávek záření. Takové účinky jsou známy u různých živých organismů. U lidí se hormeze projevuje léčivými účinky radioaktivních koupelí v lázních, kde vyvěrají prameny radioaktivních vod. Mnohaletá klinická praxe ukázala, že léčebné kúry zmírňují příznaky různých onemocnění (revmatismus, degenerativní změny obratlů, infekční onemocnění nervového systému) a mají příznivý vliv na různé metabolické a fyziologické procesy.

2.3 Radiační havárie jaderné elektrárny

Jako radiační havárii jaderné elektrárny označujeme událost v jaderné elektrárně, která má za následek nepřipustné uvolnění radioaktivních látek nebo ionizujícího záření nebo nepřipustné ozáření osob, a která vyžaduje opatření na ochranu obyvatelstva a životního prostředí. Důsledky radiační havárie jaderné elektrárny se neomezují pouze na prostory elektrárny, ale ovlivňují i její okolí zejména únikem radioaktivních látek do životního prostředí.

I když je riziko havárie plynoucí z provozu jaderných zařízení malé a srovnatelné s ostatními riziky, kterým je lidstvo vystaveno, každá jaderná elektrárna sebou určité riziko nehody nese. Toto riziko je přímo úměrné úrovni tzv. "jaderné bezpečnosti". Jadernou bezpečností se v jaderné elektrárně rozumí stav a schopnost elektrárny a její obsluhy zabránit nekontrolovatelnému rozvoji řetězové štěpné reakce a nedovolenému úniku radioaktivních látek a ionizujícího záření do životního prostředí. Riziko provozu jaderné elektrárny spočívá v obrovské radioaktivitě štěpných produktů v aktivní zóně jaderného reaktoru. Proto je základním požadavkem zajištění bezpečnosti udržet aktivní zónu v neporušeném stavu, aby radioaktivní štěpné produkty nemohly uniknout a ohrozit obyvatelstvo a obsluhu elektrárny.

K poškození aktivní zóny s následným únikem radioaktivity by mohlo dojít z různých příčin: přehřátím při ztrátě chladiva (např. při roztržení potrubí chladícího okruhu) nebo při výpadku elektrického napájení čerpadel, provozem reaktoru při nadměrném energetickém výkonu (poruchy systému regulace reaktoru), stárnutím konstrukčních materiálů vlivem dlouhodobého neutronového záření, chemickými reakcemi pokrytí palivových elementů s chladivem (při přehřátí aktivní zóny) a konečně mechanickým poškozením (teroristické exploze, letecký útok, pád letadla, zemětřesení). Z nich za nejzávažnější se považuje přehřátí aktivní zóny. Pro bezpečný provoz reaktoru je proto zásadní zajistit chlazení aktivní zóny za všech předvídatelných okolností a udržet výkon reaktoru na předepsané provozní hodnotě. K tomu slouží technická opatření:

Aktivní zóna je vybavena rozsáhlým systémem nepřetržitého měření neutronového toku a teploty, další probíhají vně reaktoru. Na mnoho místech se soustavně měří teplota a tlak chladiva a kontroluje se funkce elektrického systému.

Údaje o měření související s výkonem reaktoru se nepřetržitě vyhodnocují a v regulačních obvodech bezpečnostního systému se porovnávají s předepsanými hodnotami. Při výraznějších odchylkách od provozních norem bezpečnostní systém aktivuje systém havarijní ochrany, který provede havarijní odstavení reaktoru. Tento systém se uvádí v činnost nejen v případě nepřijatelného překročení výkonu, ale i v jiných situacích jako při výpadku vlastního napájení, při vážnějších poruchách jiných komponent elektrárny nebo při chybném zásahu operátorů do řízení provozu, které by ve svých důsledcích mohly vést ke zvýšení výkonu. Nejdůležitější bezpečnostní systémy jsou několikanásobně zálohovány a paralelní systémy jsou na sobě nezávislé.

Součástí bezpečnostního systému jaderné elektrárny je dozimetrická kontrola. Monitorování dávek záření v jednotlivých provozech slouží jednak ke kontrole úniku radioaktivních látek mimo primární okruh, jednak k ochraně pracovníků elektrárny. Současně se monitoruje radioaktivita plyných a kapalných výpustí.

Chlazení reaktoru je rozděleno do několika nezávislých chladících smyček. Pohon hlavních oběhových čerpadel, mnoha dalších zařízení a napájení měřicího a řídicího systému je zálohované pro případ výpadku elektrické sítě v elektrárně.

Šíření radioaktivních látek z jaderného paliva do okolí brání několik bariér, které prakticky vylučují vážnější ohrožení okolí jaderné elektrárny i při velmi málo pravděpodobném poškození aktivní zóny. Za první bariéru lze pokládat kovové pokrytí palivových elementů. Druhou bariérou je umístění reaktoru a dalších exponovaných částí v reaktorové budově, která je tvořena soustavou hermetizovaných železobetonových kobek a prostor, v nichž by v případě úniku chladiva zůstala radioaktivita zadržena. Poslední nejúčinnější bariéru tvoří tzv. kontejnment. Je to válcová stavba s kulovou vrchní částí, z předpjatého betonu nebo oceli, která je projektována tak, aby odolala vysokému přetlaku a jiným mimořádným událostem (zásah padajícím letadlem). Kontejnment se pokládá za jeden ze základních bezpečnostních prvků jaderných elektráren.

Podstatnou součástí zajištění bezpečného provozu jaderné elektrárny je úroveň kvalifikace personálu. Kromě kvalifikace je významná také bezpečnostní kultura, tj. zda a jak personál dodržuje provozní normy a předpisy. Důležitá úloha zde připadá pracovníkům údržby. O důležitosti lidského faktoru svědčí analýzy příčin havárií jaderných reaktorů.

Jako žádnou technologii, ani výrobu elektřiny v jaderných elektrárnách nelze beze zbytku zbavit rizika vzniku poruch a událostí s možnými menšími či většími následky. Nejpravděpodobnějšími příčinami mohou být poruchy a závady komponent a chybný zásah pracovníků obsluhy nebo údržby do provozu elektrárny. Z hlediska jaderné bezpečnosti však nejsou události v jaderných elektrárnách stejně významné. Veřejnost však většinou různé události a jejich závažnost nerozlišuje a po dojmům černobylské havárie vnímá i menší, pro bezpečnost provozu nevýznamné poruchy velmi citlivě. Pro hodnocení událostí se používá stupnice, kterou v.r. 1991 zavedla MAAE.

2.3.1 Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí

Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí je určena k pohotové komunikaci s veřejností v terminologii, která je v souladu s bezpečnostním významem událostí hlášených na jaderných zařízeních. Informování o událostech ze správného úhlu pohledu může usnadnit vzájemné porozumění mezi jaderným společenstvím, sdělovacími prostředky a veřejností.

Stupnice zařazuje události do sedmi stupňů: vyšší stupně 4-7 se označují jako havárie, nižší 1-3 jako nehody. Události, které nemají žádný bezpečnostní význam a jsou klasifikovány stupněm 0, se nazývají odchylky. Události, které vůbec nesouvisejí s bezpečností se označují jako události mimo stupnici. Události se posuzují podle tří hlavních kritérií: dopad do okolí, vliv na jaderné zařízení a dopad na hloubkovou ochranu.

Dopad do okolí

Podle něj se hodnotí především únik radioaktivních látek mimo elektrárnu. Jsou to tedy nejhorší případy – třídy 7 až 3. Třída 7 znamená velkou jadernou havárii s dalekosáhlými následky pro zdraví a životní prostředí. Třída 3 představuje velmi malý únik, který by pro nejvíce postiženou skupinu obyvatel znamenal dávku záření odpovídající zlomku předepsaného ročního limitu, např. jedné desetině průměrné roční dávky záření od přirozeného pozadí.

Dopad na jaderné zařízení

Druhé kritérium hodnotí především stav aktivní zóny a únik radioaktivity v rámci elektrárny. Rozsah je od třídy 5, která představuje typickou situaci těžkého poškození aktivní zóny jaderného reaktoru, až ke třídě 3, která znamená velké zamoření elektrárny, nebo nadměrné ozáření pracovníků

Dopad na hloubkovou ochranu (bezpečnostní systémy)

Používá se pro události ohrožující soustavu bezpečnostních systémů elektrárny, které mají bránit nekontrolovatelným uvolněním radioaktivity z reaktoru do elektrárny a jejího okolí. Zařazují se do tříd 3 až 1.

Každá nehoda je vždy zvažována podle všech tří kritérií a je jí přiřazen nejvyšší dosažený stupeň závažnosti.

0 - odchylka

Odchylky, kde nejsou porušeny limity a podmínky provozu, a na které se, v souladu s adekvátními postupy, přiměřeně reaguje.

Mezi příklady patří: jednoduchá náhodná porucha v redundantním systému, odhalená v průběhu periodických kontrol nebo zkoušek, plánované rychlé odstavení reaktoru, které probíhá normálně, neúmyslná aktivace bezpečnostních systémů, bez významných následků, menší rozšíření kontaminace uvnitř kontrolovaného pásma bez širších důsledků pro kulturu bezpečnosti.

1 - anomálie

Anomálie od schváleného režimu, ale se zbývající významnou hloubkovou ochranou. K tomu může dojít v důsledku poruchy zařízení, lidské chyby nebo nedostatků postupů a mohou nastat v jakékoliv oblasti, kterou stupnice pokrývá, například provoz jaderné elektrárny, transport radioaktivního materiálu, manipulace s jaderným palivem a skladování odpadů.

Mezi příklady patří: porušení technických podmínek nebo přepravních předpisů, nehody bez přímých důsledků, které odhalí nedostatky v organizačním systému nebo kultuře bezpečnosti, defekty v potrubí, menší než předpokládá kontrolní program.

2 - nehoda

Nehoda s významným selháním bezpečnostních opatření, ale se zbývajícím dostatečnou hloubkovou ochranou k vypořádání se dodatečnými poruchami. To zahrnuje události, kde by skutečné události byly klasifikovány stupněm 1, ale odhalují významné dodatečné organizační nedostatky. Událost, která vyústila v dávku pracovníkovi, překračující povolený roční limit nebo událost, která vede k přítomnosti významných množství radioaktivity uvnitř zařízení v prostorách, kde to projekt nepředpokládal, a které vyžadují nápravná opatření.

Mezi příklady patří: Mihama-2, jaderná elektrárna, Japonsko, 1991

Pickering A-B, jaderná elektrárna, Kanada, 2003

3 - vážná nehoda

Únik radioaktivních materiálů do okolí s následkem dávky pro kritickou skupinu v řádu desetin milisievertů. Při takovém úniku nemusí být vnější ochranná opatření zapotřebí. Událost uvnitř zařízení s důsledkem takového ozáření zaměstnanců, že by způsobilo akutní zdravotní následky nebo událost s výsledkem těžkého rozšíření kontaminace, například několika tisíc TBq aktivity uvolněné v sekundárním kontejnmentu, kde lze materiál vrátit do vyhovujících skladovacích prostor. Nehoda, při níž by další porucha bezpečnostních systémů mohla vést k havarijním podmínkám, nebo situace, ve které by nebyly bezpečnostní systémy schopné zabránit havárii, pokud by nastaly určité iniciační události.

Mezi příklady patří: Vandellos, jaderná elektrárna, Španělsko, 1989

Davis Besse-1, jaderná elektrárna, USA, 2002

Paks, jaderná elektrárna, Maďarsko, 2002

4 - havárie bez vážnějšího rizika vně zařízení

Únik radioaktivních materiálů do okolí s následkem dávky pro kritickou skupinu v řádu několika milisievertů. S takovým rozsahem úniku by pravděpodobně obecně nebyly spojovány žádné vnější ochranné zásahy s výjimkou místní kontroly potravin. Významné poškození zařízení. Taková havárie může zahrnovat poškození vedoucí k velkým potížím uvnitř zařízení, jako je částečné tavení aktivní zóny v energetickém

jaderném reaktoru a srovnatelné události v zařízeních bez reaktoru. Takové ozáření jednoho nebo více zaměstnanců, že je vysoká pravděpodobnost rychlého úmrtí.

Mezi příklady patří: Jaslovské Bohunice – A1, Československo 1977,
Saint Laurent, jaderná elektrárna, Francie, 1980,
Tokaimura, závod na výrobu paliva, Japonsko, 1999.

5 - havárie s rizikem vně zařízení

Únik radioaktivních materiálů do okolí (s aktivitou stovek až tisíců TBq ¹³¹I). Takový únik by pravděpodobně vyústil do částečného uplatnění protipatření zahrnutých v místních havarijních plánech ke zmenšení pravděpodobnosti zdravotních následků. Těžké poškození jaderného zařízení. Může to zahrnovat těžké poškození velké části aktivní zóny energetického reaktoru, velká havárie s kritičností, nebo velký požár či exploze uvolňující velké množství radioaktivity uvnitř zařízení.

Mezi příklady patří: Windscale Pile, Velká Británie, 1957,
Three Mile Island, jaderná elektrárna, USA, 1979.

6 - těžká havárie

Únik radioaktivních materiálů do okolí (s aktivitou tisíce až desítky tisíc TBq ¹³¹I). Takový únik by pravděpodobně vyústil do plného uplatnění protipatření zahrnutých v místních havarijních plánech ke zmenšení pravděpodobnosti zdravotních následků.

Mezi příklady patří: Kyštym, Přeracovatelský závod, SSSR , 1957

7 - velmi těžká havárie

Únik značné části radioaktivních materiálů z velkého zařízení (například z aktivní zóny energetického reaktoru) do okolí. Typicky obsahující směs radioaktivních štěpných produktů s dlouhými i krátkými poločasy rozpadu (s aktivitou přesahující desítky tisíc TBq ¹³¹I). Takový únik by vyústil do možnosti akutních zdravotních účinků. Zpožděné zdravotní účinky v rozsáhlé oblasti s možností zasažení více než jedné země. Dlouhodobé důsledky pro životní prostředí.

Mezi příklady patří: Jaderná elektrárna Černobyl, SSSR (nyní Ukrajina), 1986

3. Cíle práce a hypotézy

Cílem práce je posoudit míru možné kontaminace radioaktivními látkami pro různé skupiny osob (tj. zaměstnance, záchranáře, obyvatelstvo) při havárii jaderné elektrárny a navrhnout možné opatření na snížení kontaminace.

Potvrdit nebo vyloučit, že po havárii jaderné elektrárny lze minimalizovat její následky z hlediska kontaminace osob radioaktivními látkami při dodržení správných nouzových opatření a taktických postupů odstraňování následků nehody dle předem vypracovaných havarijních plánů.

4. Metodika

Metodika mé práce spočívala zejména ve shromažďování informací z odborné literatury, internetových stránek a havarijních plánů. Z těchto informací jsem provedl rozbor havárií jaderných elektráren a popsal problematiku ochranných opatření a havarijního plánování.

5. Výsledky

5.1 Rozbory havárií jaderných elektráren

Za dobu vývoje a existence jaderné energetiky se v jaderných elektrárnách stalo několik vážnějších událostí (havárií). V této kapitole jsou popsány příčiny, průběh větších havárií a jejich důsledky.

5.1.1 Windscale , Velká Británie, 1957

V roce 1957 došlo k havárii v elektrárně Windscale ve Velké Británii. Příčinou bylo přehřátí 150 palivových článků v grafitovém, vzduchem chlazeném reaktoru. Při vysoké teplotě začal grafit a uran reagovat se vzdušným kyslíkem a větší část aktivní zóny byla zničena požárem. Než byla nakonec aktivní zóna zaplavena vodou, uniklo větracím komínem do atmosféry velké množství štěpných produktů. Rozsah úniku byl odhadnut na 10^{17} Bq ^{133}Xe , 10^{15} Bq ^{85}Kr a ^{131}Xe , 10^{14} Bq ^{131}I , ^{132}Te a ^{137}Cs , 10^{12} Bq ^{89}Sr , ^{106}Ru a ^{144}Ce . Radioaktivita byla zaznamenána i v Belgii, Německu a Norsku. Největší dávkový příkon, 40 $\mu\text{Gy/hod}$, byl ve vzdálenosti 1,5 km od reaktoru ve směru větru, maximální týdenní dávka záření v tomto prostoru byla 0,3 – 0,5 mGy. Nejzávažnější důsledek havárie byla kontaminace zemědělské půdy nuklidem ^{131}I . Mléko a mléčné výrobky byly vyřazeny z konzumace. Rozšíření ^{131}I zabránil rychlý zásah zdravotnických organizací, proto se havárie obešla bez zdravotních následků pro obyvatelstvo.

Mezi 238 lidmi, kteří podstoupili kontroly, mělo 126 lehce kontaminovanou štítnou žlázu. Maximální změřená kontaminace byla 0,16 Sv. Pro srovnání je povolená roční kontaminace štítné žlázy u pracovníků v jaderných zařízeních 0,16 Sv. Mezi 96 lidmi z elektrárny, i přes nošení ochranné masky, byla kontaminace štítné žlázy 0,1 Sv. Dalších 14 zaměstnanců mělo lehká ozáření na těle, ale menší, než vzniká při lékařských ošetřeních používajících radioaktivitu.

5.1.2 Three Mile Island ,USA, 1979

Nejzávažnější havárie v západních zemích se stala v elektrárně Three Mile Island (Pensylvánie, USA, 1979, tlakovodní reaktor). Tato havárie je ukázkou kombinace lidského faktoru, technické závady a nešťastné shody okolností. Prvotní příčinou byla ne-

pozornost pracovníků údržby, kteří při běžné kontrole nejprve uzavřeli a pak zapomněli otevřít ventil na vstupním potrubí z náhradních čerpadel pro napájení sekundární části parogenerátoru vodou. Když pak po několika dnech došlo k náhodnému zastavení hlavních čerpadel, byla sice náhradní čerpadla automaticky uvedena do provozu, ale vodu do parogenerátoru nemohla dodávat, protože byl ventil uzavřen. Parogenerátor nemohl odebírat teplo chladivu, teplota a tlak chladiva v primárním okruhu proto rostly a automatizovaný systém havarijní ochrany spolehlivě spustil do reaktoru havarijní tyče a reaktor odstavil. Současně rostoucí tlak chladiva otevřel pojistný ventil do kompenzátoru objemu. Lidskou chybu tedy automatika řízení napravila. Od tohoto okamžiku se však začaly odvíjet dvě události. Příčinou první byl zásah operátorů, kteří po osmi minutách ručně otevřely uzavřený ventil náhradních čerpadel. Mezi tím se však parogenerátory přehřály a při náhlém vstupu studené vody v nich popraskaly trubky. Vzniklými trhlinami se pak radioaktivní voda dostala z primárního do sekundárního okruhu. Druhá, vážnější, byla způsobena poruchou pojistného ventilu kompenzátoru objemu. Ten se měl po snížení tlaku v primárním okruhu opět uzavřít, zasekl se však v otevřené poloze, což obsluha zjistila teprve po více než dvou hodinách. Za tuto dobu postupně vyteklo z primárního okruhu 570 tun vařící radioaktivní vody a následkem nedostatku vody v primárním okruhu došlo k přehřátí a poškození palivových článků.

I přes vážné poškození reaktoru a zamoření primárního okruhu elektrárny unikly mimo elektrárnu pouze radioaktivní plyny. 10^{17} Bq, převážně ^{133}Xe a přibližně 4×10^{11} Bq ^{131}I . Únik radioaktivních plynů trval několik týdnů. Úřady doporučily evakuaci těhotných žen a školních dětí z oblasti do osmi kilometrů od elektrárny, pro okruh do vzdálenosti 15 km doporučily nevycházet z domů a nepoužívat klimatizační zařízení. V blízkém okolí elektrárny byla maximální dávka 1 mGy, ve vzdálenosti do 6 km 0,33 – 0,78 mGy a 60 km od elektrárny již jen 0,005 μGy . Hlavním zdrojem zevního ozáření obyvatelstva byly radioaktivní izotopy vzácných plynů. Ke kontaminaci potravy nedošlo, protože únik ^{131}I byl poměrně malý a dobytek v okolí elektrárny byl v té době krmen uskladněnou pící. Mléko z této oblasti mělo jen nízký obsah ^{131}I , nejvyšší hodnota byla 1,5 Bq/l. Havárie nezpůsobila obyvatelstvu ani zdravotní újmu, ani škody na majetku. Znamenala však významný mezník v jaderné energetice, protože vyvolala celosvětové přehodnocení koncepce jaderné bezpečnosti a revizi stavu mnoha reaktorů. Nehoda

smutně proslula špatnou organizací monitorovací služby nepřipraveností úřadů zvládat krizové situace a senzacechtivostí sdělovacích prostředků, což vedlo k panice mezi obyvatelstvem a k dopravnímu kolapsu oblasti při evakuaci.

5.1.3 Černobyl, SSSR (nyní Ukrajina), 1986

Nejzávažnější havárie v dějinách jaderné energetiky a jediná, při níž došlo k mohutnému úniku radioaktivních látek mimo prostor jaderné elektrárny, se udála v černobylské elektrárně (grafitem moderovaný reaktor s tlakovými varnými kanály). Došlo k ní nešťastnou kombinací vlastností reaktoru a hrubého porušení provozních předpisů ze strany obsluhy. Na začátku havárie stál plánovaný elektrotechnický experiment, který měl prokázat využití energie dobíhajícího turbogenerátoru při jeho odstavení. Experiment začal postupným snižováním výkonu reaktoru z 1000 na 700 MW. Předpisy nedovolovaly provozovat reaktor při nižším výkonu vzhledem k závislosti dutinového součinitele na výkonu reaktoru. Chybou operátora při manipulaci se systémem řízení však výkon neplánovaně klesl až na 30 MW a nepodařilo se jej zvýšit na více než 200 MW. Za těchto okolností měl být reaktor neprodleně odstaven. Skutečnost, že se tak nestalo a že obsluha dovolila elektroinženýrům pokračovat v experimentu, přispěla hlavní měrou k havárii. Když pak byl hlavní experiment zahájen odpojením turbogenerátoru, poklesl průtok chladicí vody v kanálech, začalo se tvořit větší množství páry, reaktor se dostal do stavu, kdy se projevil kladný součinitel reaktivity a výkon reaktoru začal růst. Poslední snaha operátorů odstavit reaktor manuálním zasunutím havarijních tyčí vyšla naprázdno. (Automatiku před tím vypojili, aby nerušila experiment). Tyče se nepodařilo úplně zasunout a také se projevila jejich chybná konstrukce, která způsobila růst reaktivity místo snížení. Výsledkem byl neuvěřitelně rychlý růst výkonu reaktoru až na stonásobek jmenovitého výkonu. V důsledku toho se reaktoru vytvořil obrovský přetlak páry, který způsobil první explozi. Při ní se nadzvedla a posunula horní deska reaktoru o váze asi 1000 tun, čímž se poškodily všechny palivové kanály. Odhaduje se, že při rychlém růstu výkonu se aktivní zóna zahřála až na 3 000 C . Při této teplotě reagoval grafit s vodní párou a produkty reakce, vodík a oxid uhelnatý, patrně způsobily druhou explozi a následný požár. Při explozích došlo k vyvržení paliva a grafitu z reaktoru a unikla radioaktivita řádově 10^{18} Bq. Neblaze se tak projevilo, že reaktor neměl kontejnment. V následujících dnech byl reaktor zasypáván mnoha tunami

karbidu bóru, dolomitu, písku a olova, později byl obestavěn betonovou konstrukcí se zařízením pro dlouhodobé dochlazování.

Havárie černobylské elektrárny se stala symbolem skutečné jaderné katastrofy. Na rozdíl od předešlých dvou událostí měla dalekosáhlé zdravotní následky i dlouhodobý dopad na životní prostředí. Při hodnocení této události je vhodné mít na zřeteli netypičnost reaktoru a okolnosti, které vedly k havárii a rozlišovat následky havárie na západním území bývalého Sovětského svazu a jinde v Evropě.

Celková aktivita, která při havárii unikla mimo elektrárnu byla odhadnuta na $1,9 \times 10^{19}$ Bq. Z toho polovina patřila radioaktivním izotopům vzácných plynů. Z reaktoru se dále uvolnilo $1,3 - 1,8 \times 10^{18}$ Bq izotopů jodu, 5×10^{16} Bq ^{134}Cs a 9×10^{16} Bq ^{137}Cs . Unikly všechny radioaktivní vzácné plyny, 20 – 60 % ostatních těkavých štěpných produktů, menší podíl netěkavých nuklidů a 3-4 % paliva.

Ozáření lidí bylo vysoké z hlediska dávek záření i počtu postižených osob. V letech 1986-1987 bylo do potlačení a likvidace následků havárie zpočátku zapojeno odhadem 200 000 havarijních pracovníků z armády a dobrovolníků, zaměstnanců elektrárny, místní policie a hasičů. Později počet registrovaných „likvidačních“ pracovníků stoupl na 600 000, ale pouze malý zlomek těchto lidí byl vystaven nebezpečným úrovním radiace. Největší dávky dostaly havarijní týmy a personál elektrárny, celkem asi 1 000 lidí, během prvního dne po havárii.

Následky havárie na personál JE a v první fázi havárie na zasahující jednotky (hasiče, zdravotníky) byly značné. Nejen, že v průběhu daného experimentu byly provozní směnou JE neodpovědně znehodnoceny funkce bezpečnostních systémů reaktoru, ale v době bezprostředně po výbuchu nebyla provedena prakticky žádná opatření na ochranu personálu JE ani na ochranu hasičů a záchranářů. Nebylo zajištěno vybavení ochrannými pomůckami a lidé si nebyli vědomi rizika, které podstupují. Dostupné přístroje na JE (ani osobní dozimetry) nebyly schopny měřit dávkové příkony nad 100 Gy/h, které se vyskytly kolem JE a ani v okolí JE nebyly automatizované monitorovací stanice, které by daly informaci o reálné radiační situaci.

Část personálu obsluhy bloku a havarijních pracovníků byla zasažena vysokými dávkami externího gama záření, které se odhadem pohybovaly od 2 do 20 Gy. Počet úmrtí na akutní nemoc z ozáření během prvního roku po havárii je dobře zdokumento-

ván. Podle UNSCEAR (2000) byla původně diagnostikována u 237 pracovníků obsluhy bloku a havarijních pracovníků, ale později byla detailní klinickou analýzou potvrzena u 134 osob. V mnoha případech byla zkomplikována popáleninami kůže a sepsí způsobenou extenzívním zářením beta. Z těchto pracovníků zemřelo 28 osob v roce 1986 na akutní nemoc z ozáření a 19 dalších osob zemřelo z různých příčin v letech 1987 - 2004. Osoby, které přežily ozáření vysokými dávkami dodnes trpí různými potížemi včetně psychického stresu.

Úroveň ozáření evakuovaných obyvatel Černobyli byla znepokojivá. Dávky, které bylo možné odhadnout až po nějaké době od vzniku pečlivým vyhodnocením všech dostupných informací, byly u evakuovaných Ukrajinců v průměru 17 mSv, přičemž u jednotlivců se dávky pohybovaly od 0,1 do 380 mSv. Průměrná dávka u evakuovaných Bělorusů byla 31 mSv s tím, že největší průměrná dávka ve dvou vesnicích byla kolem 300 mSv.

S ohledem na to, že začátek evakuace probíhal za stále stálého úniku radionuklidů z havarovaného reaktoru a o víkendu, nelze ji hodnotit jako neúspěšně provedené ochranné opatření. Z evakuovaných lidí méně než 10 % obdrželo v roce 1986 dávky vyšší než 50 mSv a méně než 5 % dávky vyšší než 100 mSv. Základní chybou odpovědných orgánů však bylo, že obyvatelstvo nebylo včas varováno (informováno o havárii) a nebyly včas nařízeny a provedeny ukrytí a jódová profylaxe.

Vyhlášení ukrytí a rozdávání jódových tablet bylo provedeno rovněž až v neděli 27.4., krátce před zahájením evakuace (pozdější odhady ukázaly, že obyvatelé Pripjati obdrželi 20 až 60 % celkové dávky na štítnou žlázu inhalací radionuklidů jódu). Pokud jde o evakuaci obyvatel - evakuace města Pripjať byla zahájena 27.4.1986 ve 14:00 a v průběhu 3 hodin bylo město prázdné (bylo přistaveno kolem 1200 autobusů z Kyjeva a okolí). 2.5.1986 byla evakuace rozšířena na celou zakázanou zónu (do 30 km od JE) a skončila 6.5.1986. Evakuace se týkala celkem 116 tis. lidí. Pro rozšířenou evakuaci byla zvolena následující kritéria. Evakuace povinná v místech, kde dávkový příkon byl 1. den havárie byl větší než 1 mSv/h. V případě ozáření dávkovými příkony v intervalu (0,1 – 0,3) mSv/h byly evakuovány pouze děti. V místech, kde dávkové příkony byly menší než 0,1 mSv/h se evakuace neprováděla.

Asi pět miliónů lidí žije v oblastech Běloruska, Ruska a Ukrajiny, které jsou kontaminovány radionuklidy po černobylské havárii (více než $37 \text{ kBq m}^{-2} \text{ }^{137}\text{Cs}$). Z nich

asi 400 000 lidí žilo ve více kontaminovaných oblastech - klasifikovaných sovětskými úřady jako oblasti se zpřísněnou kontrolou (více než $555 \text{ kBq m}^{-2} \text{ }^{137}\text{Cs}$).

V průběhu posledních dvaceti let byla široká veřejnost po havárii vystavena ozáření jak z externích zdrojů (^{137}Cs v půdě atd.) tak přijímáním radionuklidů (hlavně ^{137}Cs) v potravě, vodě a vzduchu. Průměrné efektivní dávky u obyvatel kontaminovaných oblastí nahromaděné v letech 1986 - 2005 se v různých oblastech odhadovaly v rozmezí 19 až 20 mSv. Někteří obyvatelé dostali až několik set mSv, zatímco jiní dostali nižší dávky. Roční efektivní dávky z radioaktivního spadu u velké většiny z asi pěti miliónů lidí žijících v kontaminovaných oblastech Běloruska, Ruska a Ukrajiny v současnosti činí méně než 1 mSv (doporučený dávkový limit pro širokou veřejnost). Avšak roční dávky u asi 100 000 obyvatel více kontaminovaných oblastí jsou stále ještě vyšší než 1 mSv. Ačkoliv se předpokládá, že snižování úrovně ozáření v budoucnu bude značně pomalé, tj. asi 3 až 5 % ročně, velká většina dávky pocházející od havárie již byla akumulována.

Přijímání potravy kontaminované radioaktivním jódem mělo u obyvatel kontaminovaných oblastí Běloruska, Ruska a Ukrajiny za následek významné dávky postihující štítnou žlázu. 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. 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, proč se u tolika dětí následně rozvinul karcinom štítné žlázy.

Emise radioaktivních nuklidů z černobylského reaktoru byla nesrovnatelně mohutnější než v případě jiných havárií a zasáhla i rozsáhlé oblasti mimo území bývalého Sovětského svazu. Radioaktivní mrak byl nejprve unášen směrem ke Skandinávii, po změně povětrnostních podmínek byly další emise unášeny směrem k západu. Vzhledem k velké vzdálenosti od místa havárie byla však v Evropě kontaminace zemského povrchu i ozáření obyvatelstva mnohem menší než na území bývalého Sovětského svazu. Zamoření terénu bylo měřeno ve všech evropských zemích a z něj byly odhadovány

dávky zevního a vnitřního ozáření. Výsledky se většinou uvádějí jako průměrná ekvivalentní dávka za první rok po havárii, protože v tomto období bylo ozáření největší.

V České republice způsobila radioaktivita z černobylské havárie za první rok ekvivalentní dávku průměrně 0,36 mSv u dětí a 0,22 mSv u dospělých. Podobné hodnoty byly stanoveny i v jiných zemích: ve Švédsku 1-4 mSv, ve Švýcarsku 2,2 mSv, v Rakousku 0,43 mSv. V následujících letech klesala ekvivalentní dávka tak, jak se v životním prostředí snižoval obsah radioaktivních nuklidů. Například v Rakousku činila v r. 1996 pouze 2,4 μ Sv. Místní dávky záření se však mohly dosti lišit podle reliéfu krajiny a momentálních povětrnostních podmínek. Zamoření terénu a následné ozáření obyvatelstva bylo například větší tam, kde při průchodu radioaktivního mraku přišlo, protože z něj srážková voda strhávala radioaktivitu. Celkové dávky, kterými bylo ozářeno obyvatelstvo ve střední a západní Evropě nepřekročily za první rok po havárii dvojnásobek ročního ozáření z přírodních zdrojů záření a lze je klasifikovat jako nízké.

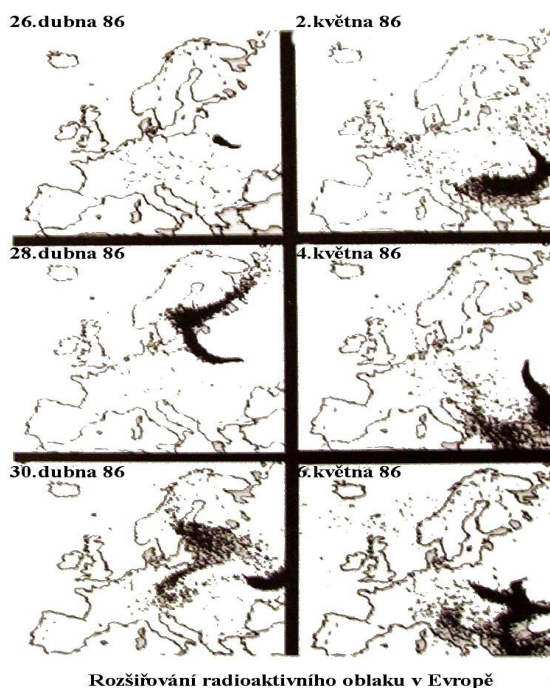
V období krátce po havárii bylo v Evropě zlikvidováno velké množství kontaminovaných potravin a zemědělských produktů, aby se u obyvatelstva předešlo zvýšenému příjmu zejména ^{131}I . Také v tehdejší Československu probíhalo rozsáhlé monitorování různých složek životního prostředí. Při systematickém sledování vlivu jaderné elektrárny Dukovany na okolí elektrárny se vliv černobylské havárie projevil například zvýšeným obsahem ^{134}Cs a ^{137}Cs v horní vrstvě půdy a v mase ryb z nádrží Mohelno a Malešice. Ve státním veterinárním ústavu bylo v našich zemích v letech 1987-1991 změřeno téměř 24 tisíc vzorků potravin, zemědělských produktů a krmiv. Nejvyšší obsah nuklidů ^{134}Cs a ^{137}Cs byl pozorován v roce 1987, kdy například průměrná měrná aktivita hovězího masa byla 25 Bq kg^{-1} a skopového masa 48 Bq kg^{-1} . Bylo to způsobeno tím, že v krátké době dobytek zkrmoval píci kontaminovanou v době havárie. Od té doby se radioaktivita potravin rychle zmenšovala a v roce 1991 již byla na úrovni detekčního limitu měřících aparatur.

5.2 Černobylská havárie a radioaktivní kontaminace Běloruska

5.2.1 Utváření radioaktivní kontaminace

Kontaminace zemského povrchu radioaktivními látkami se skládala ze tří stádií: únik radioaktivních látek, jejich rozšíření nebo přenesení a pád. Výsledkem nehody bylo uvolnění radioaktivních látek ve formě střeptů částí reaktoru, mikročastic a plynů.

Každá z těchto forem radioaktivních látek se chovala při úniku různě. Radioaktivní látky ve formě střeptů dopadly v blízkosti zničeného reaktoru. Mikročástice poměrně velké velikosti (o průměru několika desítek mikronů) dopadly převážně ve vzdálenosti desítek kilometrů od reaktoru a malé mikročástice byly rozšířeny v okruhu stovek a tisíců kilometrů. Únik radioaktivních látek trval dlouho a jeho rozšiřování bylo ovlivněno rapidně se měnícím počasím v místě nehody. V době výbuchu se vzduch u zemského povrchu v místě katastrofy nehýbal, ale ve výšce více než 1 kilometr vály jihozápadní větry rychlostí 5 – 10 m/s. Hlavní část mikročastic vystoupala až to výše 1200 – 1300 metrů a v průběhu večera 27. dubna dosáhl radioaktivní oblak skandinávských zemí. Změnou svého směru a tvaru během následujících dvou dní se dostal do zemí střední Evropy a po změně směru větru na Balkánský poloostrov.

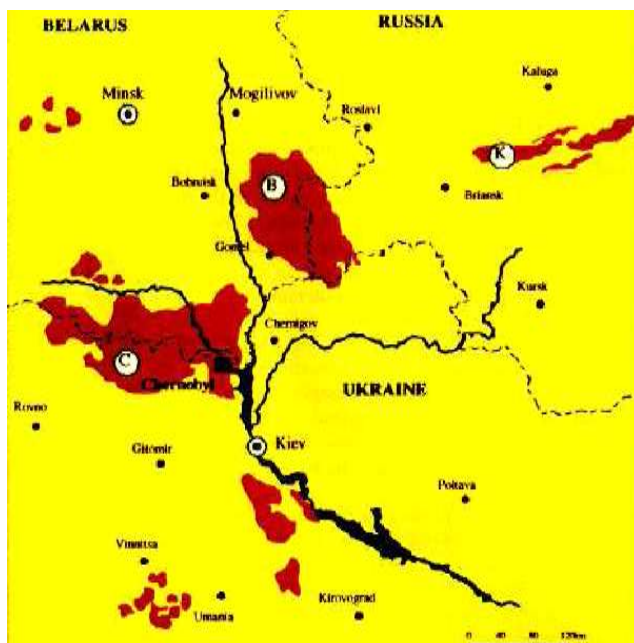


Obr. č. 2: Rozšiřování radioaktivního oblaku v Evropě

Nejmenší mikročástice částice vystoupaly velmi vysoko, několikrát obkroužily Zemi a v několika měsících se rozšířily po celé severní polokouli. Nejvíce radioaktivního spadu bylo samozřejmě v okolí reaktoru – oblasti v Ukrajině, Bělorusku a Rusku, kde bylo zamoření terénu bylo vysoké. Například území, kde plošná aktivita ^{137}Cs převýšila 185 kBq/m^2 , zahrnovala 16500 km^2 v Bělorusku, 4600 km^2 v Rusku a 8100 km^2 na Ukrajině. Úroveň kontaminace v evropských zemích byla významně nižší. Radioaktivní látky byly v malém množství nalezeny dokonce i v Japonsku a USA. Tyto informace svědčí o globálním charakteru neštěstí v Černobylu.

Deště jsou nejefektivnější prostředky na odstranění radioaktivních látek z atmosféry. Spad tzv. mikročástic byl 98% zapříčiněn deštěm. Na jaře 1986 nepršelo často. V místech kde pršelo byly i významné srážky radioaktivních složek. Na obrázku jsou vidět tři hlavní ohniska kontaminace : C - Centrální , B - Brjansk – Bělorusko, K - Kaluga – Tula – Orel. Centrální ohnisko vzniklo během počátečního stádia radioaktivního spadu. Další dvě ohniska se vytvořila 28.-29. dubna 1986 z důvodu radioaktivního spadu v dešti.

Kontaminovaná místa jsou specifikována následujícími rysy. Obsah radionuklidů není stejný, je určen vzdáleností a směrem od místa nehody a ukazuje změny v obsahu radioaktivního spadu s postupem nehody a změnou meteorologické situace.



Obr. č. 3: Hlavní ohniska kontaminace

5.2.2 Radioaktivní spad radionuklidů z krátkým poločasem rozpadu

Radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu, především ^{131}I , si zaslouží zvláštní pozornost. Množství izotopů z krátkým poločasem rozpadu (^{95}Zr , ^{131}I , ^{140}Ba a ^{140}La) bylo v radioaktivních spadech značně větší než množství izotopů s dlouhým poločasem rozpadu. Aktivita radioaktivního jódu ^{131}I dosáhla 50 – 60 % celkové aktivity radiace uvolněné z reaktoru. Z tohoto důvodu radioaktivní jód přispíval hlavní částí k ozáření obyvatelstva.

Navzdory slabým větrům byl 26.dubna ^{131}I nalezen v Brestu a Vitebsku a o dva dny později také v Gomelu, Minsku a Mogilevu. Další jeho šíření probíhalo především na západ a na severozápad, kde dosáhl Dánska a Švédska. Přenesení jižním směrem u zemského povrchu se prakticky nekonalo, proto se radiace v Kyjevě nezvýšila až do 30.dubna, ale lehké plyny byly vyneseny do nadmořské výšky 5 kilometrů, dosáhly Černého moře, dostaly se do bouřkových mraků a vytvořily centrum kontaminace v oblastech Oděsa a Cherson. Kontaminace ^{131}I byla celkově zaznamenána na velkém území. Zasaženy byly také pobaltské státy, Maďarsko a Gruzie. Na začátku května byla větší úroveň radioaktivity zaregistrována i v ruském Krasnojarsku a dokonce i v Chabarovsku, Vladivostoku, Južno-Sachalinsku. Zvýšení radioaktivity bylo zaznamenáno i v Japonsku.

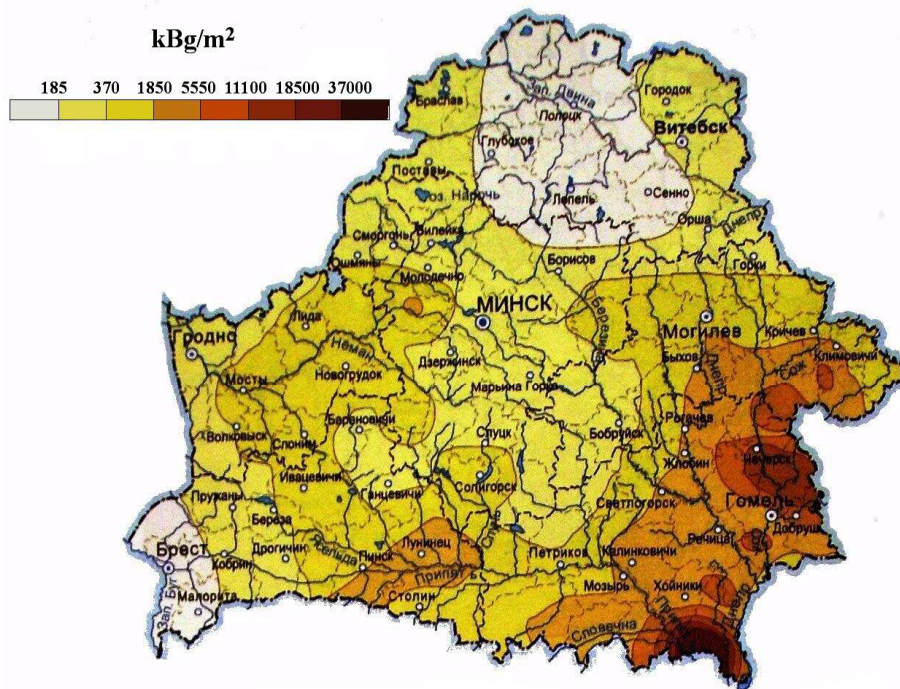
5.2.3 Radioaktivní kontaminace území Běloruska

Výbuch černobylského reaktoru vyústil v radioaktivní kontaminaci obrovských území republiky. První týdny po nehodě byla neobyčejně vysoká hladina radioaktivního záření způsobena radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu, především ^{131}I . Zvýšená radioaktivita byla zpozorována téměř v celé zemi. V dalším období byla radiační situace určena radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu, ^{137}Cs , ^{90}Sr , transuranovými částicemi: ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu a ^{241}Am . Kontaminace území radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu se do dnešní doby prakticky nezměnila.

Kontaminace jódem ^{131}I

Podle údajů Hydrometeorologického oddělení Ministerstva přírodních zdrojů a ochrany životního prostředí Běloruské republiky (duben – květen 1986), byly nejvyšší

úrovně aktivity ^{131}I zjištěny v nejbližší běloruské zóně atomové elektrárny Černobyl – v okrese Bragin, Chojniki, Narovlja Gomelského kraje, kde jeho obsah v půdách představoval 37000 kBq/m^2 a více (odhadnuto 10.května 1986). Závažně kontaminovány byly také jihozápadní a severní okresy Gomelského kraje a další okresy v Mogilevském a Brestském kraji.



Kontaminace území Běloruska jódem- 131 (10. května 1986)

Obr. č. 4: Kontaminace území Běloruska ^{131}I

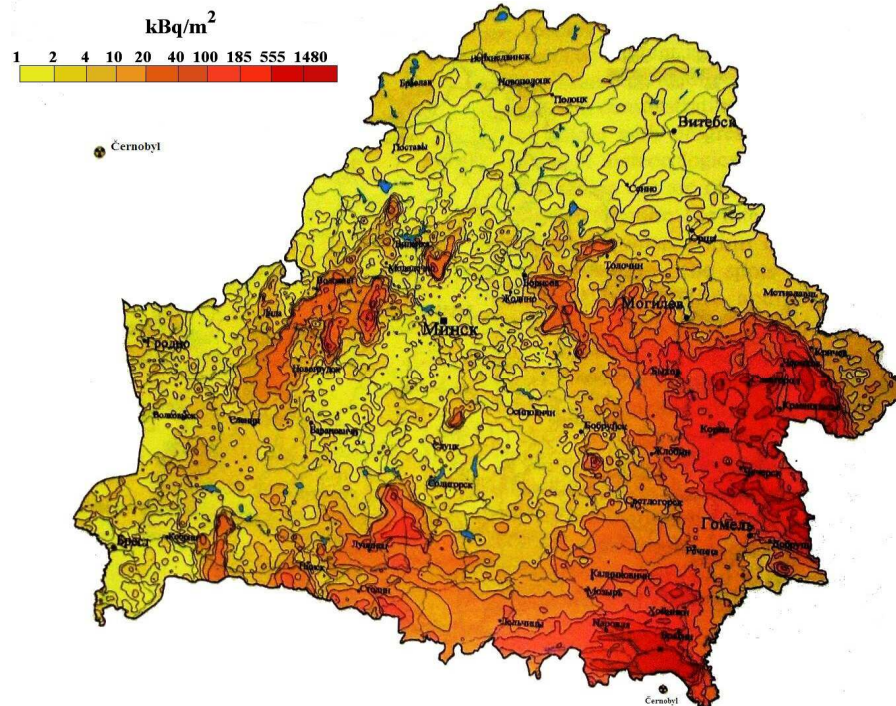
Výsledkem kontaminace bylo významného zvýšení dávek gama záření takřka na celém území Běloruska. V některých oblastech dosáhl dávkový příkon $0,5 \text{ mSv/h}$, což je několiksetkrát vyšší než dávkový příkon z přírodního přirozeného prostředí. Kontaminace ^{131}I vedla k ozáření u štítné žlázy takřka u celé Běloruské populace (tzv. „jódový úder“). Následkem toho došlo především u dětí, výraznému zvětšení výskytu onemocnění štítné žlázy.

Kontaminace cesiem ^{137}Cs

Analýzy radioaktivní kontaminace ^{137}Cs v Evropě ukázaly, že na území Běloruska dopadlo zhruba 35 % černobylských spadů tohoto radionuklidu. Před nehodou byla kontaminace ^{137}Cs jednotlivých oblastí Běloruska od $1,5 \text{ kBq/m}^2$ do $3,7 \text{ kBq/m}^2$. Po

nehodě v Černobylu ^{137}Cs obsažené v půdě překročilo 10 kBq/m^2 na $136,5 \text{ km}^2$ (66 % z celého území Běloruska).

Podle současné legislativy se za jedno z kritérií pro označení „kontaminovaná oblast“ považuje překročení aktivity ^{137}Cs přes hranici 37 kBq/m^2 . Takové překročení bylo zaznamenáno na 23 % běloruského území.



Kontaminace území Běloruska cesiem-137 (1986)

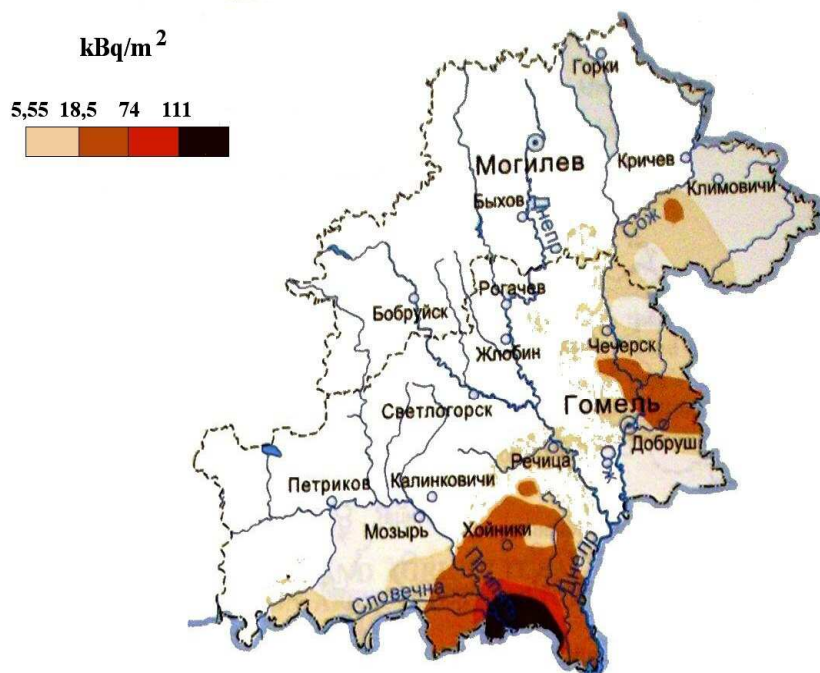
Obr. č. 5: Kontaminace území Běloruska ^{137}Cs

V porovnání s Ukrajinou kde je takto kontaminováno 7 % a v evropské části Ruska 1,5 %, je Bělorusko nejvíce postiženým státem. V kontaminovaných oblastech se nacházelo více než 3600 vesnic, včetně 27 měst s populací 2,2 milionů lidí v roce 1986, to je zhruba jedna pětina celé Běloruské populace. Nejvíce kontaminované se ukázaly Gomelský kraj (1528 vesnic), Mogilevský kraj (866) a Brestský kraj (167). Nejvyšší úroveň kontaminace půdy ^{137}Cs , která dosáhla až 60000 kBq/m^2 byla objevena v jednotlivých vesnicích v Braginském okrese Gomelského kraje a oblastech okresu Čerikov v Mogilevském kraji. V lednu 2004 kontaminovaná oblast ^{137}Cs v Bělorusku o aktivitě více než 37 kBq/m^2 dosáhla $41,11 \text{ tisíc km}^2$, což se rovná 19,75 % území.

Výsledkem přírodního radioaktivního rozpadu ^{137}Cs se radioaktivní kontaminace v oblasti pomalu snižuje. Hydrometeorologické oddělení Ministerstva přírodních zdrojů a ochrany životního prostředí Běloruské republiky vytvořilo mapy, které odhadují kontaminaci ^{137}Cs pro rok 2016 a 2046. V roce 2016 se v běloruské oblasti kontaminace ^{137}Cs přesahující 37 kBq/m^2 v porovnání s původní kontaminací sníží 1,5 krát a v roce 2046 – 2,4 krát.

Kontaminace stronciem ^{90}Sr

Kontaminace oblastí v Bělorusku ^{90}Sr je v porovnání s ^{137}Cs spíše místní povahy.



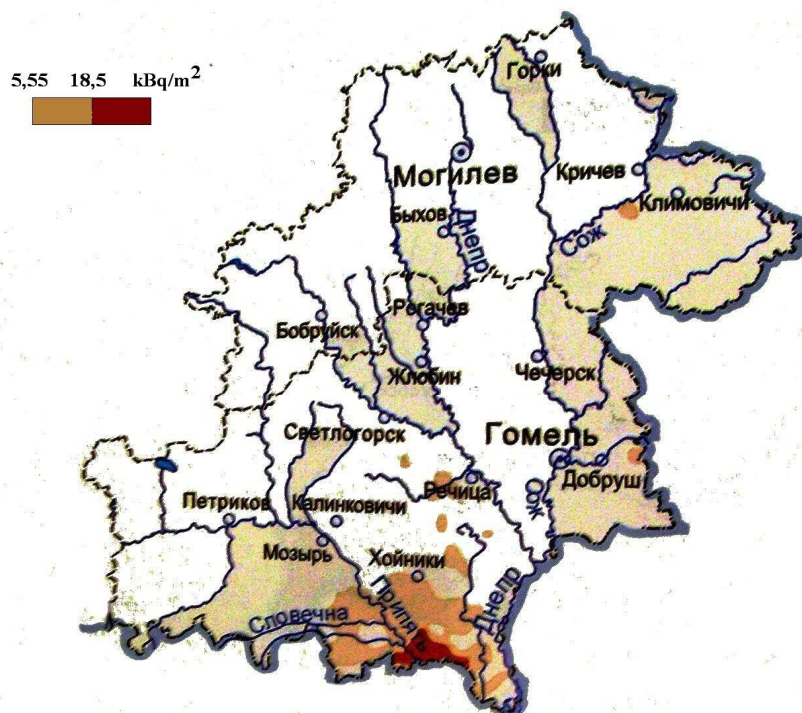
Kontaminace území Běloruska stronciem - 90 (1986)

Obr. č. 6: Kontaminace území Běloruska ^{90}Sr

Úrovně půdní kontaminace s aktivitou převyšující $5,5 \text{ kBq/m}^2$ (toto je také zákonem stanovené kritérium pro kontaminovanou oblast) byly nalezeny na 21,1 tisících km^2 rozlehlé oblasti Gomelského a Mogilevského kraje, což je 10 % z celkové rozlohy Běloruska. Aktivita ^{90}Sr v 30 km zóně od atomové elektrárny Černobyl (okres Chojniki Gomelského kraje) dosáhla 1800 kBq/m^2 . Na severu Gomelského kraje (okres Vetka) byla aktivita ^{90}Sr 137 kBq/m^2 . V okrese Čerikov v Mogilevském kraji, který je vzdálen 250 km od atomové elektrárny Černobyl, byla aktivita 29 kBq/m^2 .

Kontaminace transuranovými částicemi

Hustota kontaminace ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu více než $0,37 \text{ kBq/m}^2$ (zákonem stanovené kritérium pro kontaminované oblasti) je rozšířena na více než $4,0$ tisících km^2 což je téměř 2% celého území. Tyto oblasti jsou především v kraji Gomel (okresy Bragin, Narovlja, Chojniki, Rečica, Dobruš a Lojev) a v okrese Čerikov kraje Mogilev. Nejvyšší úrovně kontaminace jsou zpozorovány v 30 km zóně od atomové elektrárny Černobyl, přesněji v okrese Chojniki, přes 111 kBq/m^2 .



Kontaminace území Běloruska transurany (2005)

Obr. č. 7: Kontaminace území Běloruska transurany

V důsledku přírodního radioaktivního rozpadu ^{241}Pu se zvýšená aktivita ^{241}Am zvyšuje. Předpoklady ukazují že v roce 2058 aktivita ^{241}Am překročí celkovou aktivitu všech izotopů plutonia $1,8$ krát.

5.3 Expozice obyvatelstva Běloruska radioaktivním zářením

Výsledkem neštěstí v Černobylu byla ve skutečnosti radioaktivní kontaminace celého území Běloruska. Míra ozáření, kterému bylo obyvatelstvo vystaveno v důsledku havárie, se na různých místech území výrazně liší. Hlavním důvodem těchto rozdílů byla různá míra kontaminace území. Kontaminace daného území závisela na délce uvolňování radioaktivních látek do životního prostředí, množství uvolněných radionuklidů a jejich fyzikálně-chemických formách, různých meteorologických podmínkách v daných oblastech a jejich radioekologických zvláštnostech, na místních podmínkách lidské životní aktivity a ostatních faktorech.

Hlavními způsoby ozáření obyvatelstva byly:

- Vnitřní ozáření radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu (zejména radioaktivním jódem), které byly vdechnuty nebo požitý spolu s kontaminovanou potravou.
- Zevní ozáření z radionuklidů, které se usadily v půdě a ostatních plochách.
- Vnitřní ozáření po požití potravin kontaminovaných radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu.

5.3.1 Dávky ozáření štítné žlázy

Přibližně v polovině července 1986 byl jednou z hlavních příčin ozáření štítné žlázy radionuklid ^{131}I . Výsledkem příjmu této látky (hlavně mlékem a listovou zeleninou) byla ozářena štítná žláza u většiny běloruského obyvatelstva.

Během několika týdnů po nehodě byla provedena přímá měření míry ozáření štítné žlázy (měření gama záření vyzařované štítnou žlázou, použitím detektorů umístěných na lidské tělo) u přibližně 200 000 jedinců (2 % celkové populace), kteří žili v nejvíce postižené oblasti Gomel a Mogilev a také v městě Minsk. Většina měření byla provedena nekvalifikovanými speciality, kteří použili radiometrické přístroje s nekalibrovanými detektory nízké kvality. Z tohoto důvodu státní orgány rozhodly, že jedinec bude měřen pouze jednou, měření bude použito pouze pro tento záznam, a jedinec bude finančně odškodněn podle poměru výskytu ozáření.

Podle dostupnosti měřící techniky byly odhadnuty dávky ozáření štítné žlázy u 130 tisíc osob, včetně 39 tisíc dětí a mladistvých. Mělo by být zdůrazněno, že tyto údaje

byly nepřesné k odhadnutí celkového dopadu havárie na poškození štítné žlázy pro celou běloruskou populaci. Z celkového počtu 2 722 809 obyvatel Běloruska ve věku méně než 19 let v době nehody, bylo přímému měření podrobena pouze 39 188 jedinců (1,4 % z celkového počtu).

Tabulka č 2: Počet provedených přímých měření rozsahu poškození štítné žlázy v důsledku zamoření mezi dětmi a mladistvými v Bělorusku v dubnu a květnu 1986

Kraj	Počet dětí a mladistvých v roce 1986	Počet provedených měření	% z celkového počtu
Brest	404017	0	0
Vitebsk	354655	0	0
Gomel	468092	27463	5,9
Grodno	306784	0	0
Minsk	422121	0	0
Město Minsk	424455	7177	1,7
Mogilev	342685	4548	1,3
Bělorusko	2722809	39188	1,4

Použití metody radioekologického modelování rozšířenou rekonstrukcí průměrných dávek ozáření štítné žlázy bylo provedeno na 9,5 milionech osob, kterým bylo roku 1986 19 let, v 23 325 osídlených oblastech Běloruska – ve skutečnosti to bylo pro celou postiženou populaci celé země, vzhledem k věku a oblasti jejich bydliště.

Výsledky ukazují, že většina jedinců, u kterých byla dávka ozáření na štítnou žlázu největší (přesahující 1 Gy) spadají do nejmladší skupiny. Se zvyšováním věku, ve kterém došlo k ozáření, je počet jedinců s maximální obdrženou dávkou značně omezen. Z celkového počtu obyvatelstva představuje skupina dětí a mladistvých skoro 30 % a z celkového počtu případů s maximální dávkou na štítnou žlázu představuje přes 97 %.

Údaje v následující tabulce prokazují, že nejvíce byli ozáření obyvatelé Mogilevského a Gomelského kraje a že ozáření dětí a mladistvých v Brestském kraji je stejné jako v Mogilevském kraji.

Tabulka č. 3: Rozdělení obyvatelstva podle různých věkových skupin a dávky záření na štítnou žlázu

Věk v době nehody, roky	Počet obyvatel a míra ozáření štítné žlázy (Gy)					Počet obyvatel
	0-0,05	0,05-0,1	0,1-0,5	0,5-1	>1	
< 1 rok	62310	45229	32611	13086	4892	158128
1-2	58641	44683	30914	13657	4320	152215
2-3	60838	42261	29616	13716	3577	150008
3-4	62059	47028	24129	12959	3179	149354
4-5	63169	45569	31160	3398	2693	145989
5-6	66001	44500	29003	3201	2218	144923
6-7	65048	46427	25292	2800	1806	141376
7-8	63456	42894	28170	3077	2196	139793
8-9	64192	44980	24647	2706	1777	139302
9-10	94037	15717	24294	2298	1043	137389
10-11	102049	10878	22417	2556	199	138099
11-12	103062	10159	21560	2432	49	137622
12-13	102706	11488	19965	2309	32	136500
13-14	104187	12730	16732	2030	29	135708
14-15	107383	10604	15256	1749	17	135009
15-16	106064	10591	14573	1279	18	132525
16-17	106318	9833	14488	906	11	131556
17-18	213609	18155	29231	1005	26	262026
Cel. počet dětí a mladistvých	1605129	514086	434058	85164	28082	2666519
Dospělí	5597593	502866	727086	46966	596	6875107
Celkem	7202722	1016952	1161144	132130	28678	9541626

Tabulka č. 4: Průměrné dávka ozáření štítné žlázy obyvatel Běloruska v závislosti na roku narození a místa bydliště v době nehody, Gy

Kraj / Město	Rok narození								
	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
Brest	0,025	0,021	0,025	0,024	0,031	0,035	0,038	0,041	0,044
Město Gomel	0,118	0,102	0,120	0,136	0,152	0,167	0,185	0,195	0,212
Gomel*	0,134	0,115	0,135	0,129	0,169	0,188	0,207	0,218	0,237
Grodno	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,005	0,005	0,005
Město Minsk	0,024	0,020	0,024	0,027	0,030	0,0033	0,036	0,038	0,042
Minsk*	0,005	0,004	0,005	0,005	0,006	0,007	0,008	0,008	0,009
Mogilev	0,027	0,023	0,027	0,028	0,035	0,038	0,042	0,045	0,049
Vitebsk	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005	0,005	0,006	0,006

Kraj / Město	Rok narození								
	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Brest	0,052	0,061	0,069	0,061	0,067	0,080	0,093	0,104	0,116
Město Gomel	0,251	0,291	0,330	0,293	0,324	0,386	0,449	0,449	0,556
Gomel*	0,281	0,325	0,368	0,326	0,361	0,431	0,499	0,561	0,624
Grodno	0,006	0,007	0,008	0,007	0,008	0,010	0,011	0,013	0,014
Město Minsk	0,049	0,058	0,065	0,58	0,064	0,077	0,089	0,099	0,110
Minsk*	0,010	0,012	0,013	0,012	0,013	0,016	0,018	0,020	0,023
Mogi- lev	0,057	0,067	0,076	0,067	0,074	0,088	0,103	0,114	0,127
Vitebsk	0,007	0,008	0,009	0,008	0,009	0,011	0,013	0,014	0,016

* Oblast, kromě města

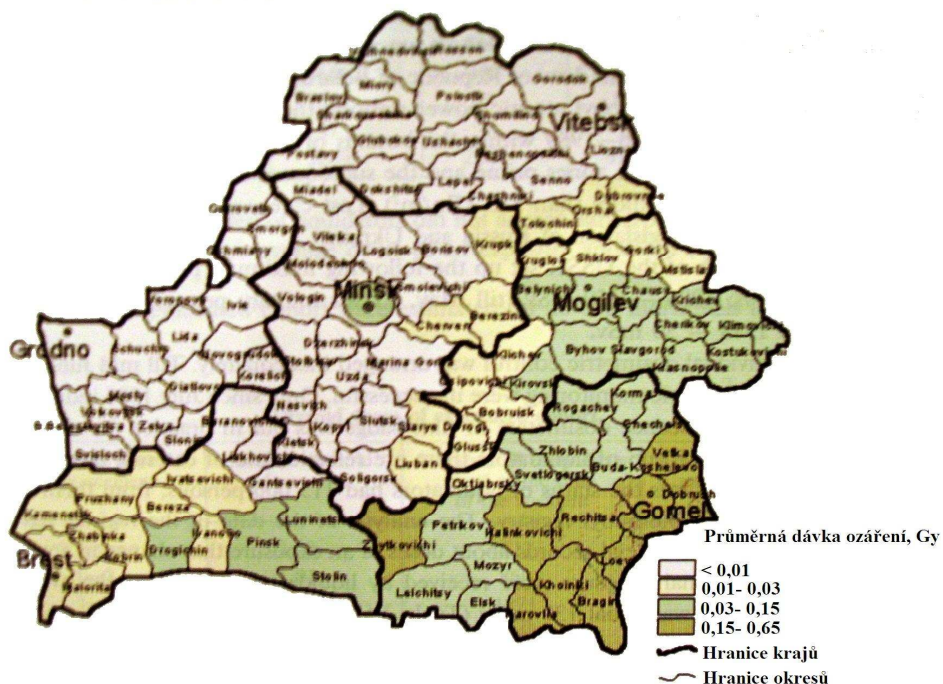
Maximální průměrná dávka ozáření štítné žlázy v krajových oblastech ve věkových skupinách pod 18 let byla naměřena u dětí a mladistvých bydlících v okresech Bragin, Chojniki, Narovlja a Vetka Gomelského kraje. (obr.8)



Obrázek č. 8: Průměrná dávka ozáření štítné žlázy mezi dětí ve věku 0 – 18 let

Úrovně dávek ozáření štítné žlázy jsou pro dospělou populaci výrazně nižší. V tomto případě byly nejvíce postiženy věkové skupiny lidí, kteří žili v nejvíce kontaminovaných oblastech a vzdálených okresech jako Kalinkoviči, Lelčicy, Dobruš, Reči-

ca, Žitkoviči Gomelského kraje. Nicméně dávky obdržené mezi skupinou lidí 18 let a více jsou skoro stejné po celé oblasti (obr. 9).



Obrázek č. 9: Průměrná dávka ozáření štítné žlázy mezi dospělými

Největší kolektivní dávku ozáření štítné žlázy obdrželi obyvatelé oblasti Gomel a města Gomel. Nejmenší kolektivní dávka ozáření byla u obyvatel Vitebského kraje. Celková kolektivní dávka ozáření štítné žlázy Gomelského kraje a města Gomel je 70 % z celkové kolektivní dávky ozáření štítné žlázy celé země.

Tabulka č. 5: Kolektivní dávka ozáření štítné žlázy pro dvě věkové skupiny

Kraj	Kolektivní dávka dětí a mladistvých (0-18 v době nehody), osoba - Gy	Kolektivní dávka dospělých (starší 19 let v době nehody), osoba - Gy	Celkové kolektivní dávka Běloruské populace, osoba - Gy
Brest	21129	24042	45171
Vitebsk	1164	1560	2724
Město Gomel	36998	38236	75234
Gomel	112812	171939	284751
Grodno	3329	4453	7782
Město Minsk	15063	19244	34307
Minsk	6404	8121	14525
Mogilev	22328	27694	50022

5.3.2 Dávky ozáření běloruských likvidátorů

Účastníci likvidace následků nehody v Černobylu (likvidátoři, uklízecí čety, pohotovostní pracovníci) jsou nejvíce ozářená skupina lidí patřící mezi obyvatelstvo Běloruska, kteří byli vystaveni dodatečnému ozáření. Podle Zákona o sociální ochraně obyvatel, které zasáhla nehoda v atomové elektrárně Černobyl Běloruské republiky jsou jako likvidátoři označováni občané podílející se na likvidaci, která se konala od roku 1986 do roku 1989 uvnitř zóny evakuace (uzavřená zóna) a také pracující v letech 1986 – 1987 v primárních a následně přemístěných zónách (území s hustotou zamoření ¹³⁷Cs více než 555 kBq/m²). Tato poslední skupina likvidátorů je uzákoněná pouze v Bělorusku.

Ministerstvo zdravotnictví SSSR stanovilo v době havárie následující maximální povolenou dávku ozáření, které mohou být likvidátoři vystaveni: 1986 – 250 mSv (do 21. května pro vojenský personál - 500 mSv), 1987 – 100 mSv, 1988 a 1989 – 50 mSv.

Naneštěstí jednotlivé dozimetrické kontroly byly provedeny nesprávně. Do poloviny července byly pokusy připravit použití dozimetrického monitorování neúspěšné. Teprve od července 1986 byla jednotlivá dozimetrická kontrola používající termoluminescenčních dozimetrů nebo filmových dozimetrů použita v praxi všemi civilními zaměstnanci. Následkem toho byla velmi omezena skupina likvidátorů se spolehlivými údaji o dávkách zevního ozáření. Od 01. 01. 1996 byl počet likvidátorů v Bělorusku 113 000 osob, z toho 91 000 osob bylo zařazeno do tzv. Černobylského registru. Rozbor dat z registru ukázaly, že zhruba 9 % likvidátorů mělo oficiální záznam o dávkách ozáření. Největší dávky zevního ozáření byly u likvidátorů v roce 1986 – průměrná dávka byla 60 mGy .V 95 % se rovnala 138 mGy.

Tabulka č. 6: Rozdělení dávek záření Běloruských likvidátorů

Roky aktivity	Počet likvidátorů	% známých zasažených jedinců	Dávky zevního ozáření*, mGy			
			Průměrná hodnota	Střední hodnota	75 %	95 %
1986	68 000	8	60	53	93	138
1987	17 000	12	28	19	29	54
1988	4 000	20	20	11	31	93
1989	2 000	16	20	15	30	42
1989	91 000	9	46	25	70	125

Dávka záření, které byla většina likvidátorů vystavena v letech 1986 – 1987 nepřekročila 100 mGy (80 % v roce 1986 a 96 % v roce 1987).

Tabulka č. 7: Rozdělení likvidátorů podle intervalů dávek záření

Intervaly dávek záření, mGy	Počet likvidátorů rozdělených podle jednotlivých let			
	1986	1987	1988	1989
0 – 50	2539	1943	865	387
50 – 100	1656	183	37	8
100 – 250	1027	78	10	7
250 - 500	47	4	1	1
Celkem	5269	2208	913	403

Většina běloruských likvidátorů se neúčastnila na pracích v elektrárně Černobyl a v blízkém okolí elektrárny, proto se průměrná dávka ozáření ukázala nižší, než u likvidátorů z Ruska a Ukrajiny.

Tabulka č. 8: Dávka ozáření štítné žlázy v evakuovaných oblastech

Věk jedinců v době nehody	Průměrný dávka na štítnou žlázu, Gy	Počet žijících jedinců v době nehody	Kolektivní dávka, Osoba - Gy
< 1 rok	2,03	422	858
1 – 2	1,91	869	1658
3 – 7	1,39	1871	2605
8 – 12	0,95	1848	1749
13 – 17	0,55	1699	932
Dospělí	0,46	17183	7884
Celkem	0,65	23892	15686

Dávka ozáření štítné žlázy v evakuované oblasti byla odhadnuta pro 23 892 osob. Kolektivní dávka ozáření štítné žlázy těchto skupin obyvatelstva je 15686 osob – Gy. Maximální dávka (přes 0,4 Sv) zevního ozáření dostalo méně než 1 % běloruských evakuovaných osob.

Tabulka č. 9: Rozdělení evakuovaných osob podle intervalů dávek

Dávka, mSv	0 - 50	50 – 100	100 – 200	200 – 400	>400
Počet obyvatel	21347	2286	800	244	28

Obecně vzato, dávka ozáření u evakuovaných osob závisela na datu evakuace.

Tabulka č. 10: Průměrná dávka ozáření evakuovaných osob v závislosti na datu evakuace v roce 1986

Období evakuace	Absorbovaná dávka záření štítnou žlázou z jódu 131, Gy	Efektivní dávka	
		Vnitřní ozáření celiem – 137, mSv	Zevní ozáření, mSv
2 – 7 Květen	1,33	2,1	31,2
3 – 10 Červen	1,04	1,6	15,9
Srpen - Zář	0,66	0,9	20,3

5.3.3 Dávky radioaktivního záření ve vztahu k populaci

Pozdější období po nehodě, začínaje rokem 1992 a v pozdějších letech, je charakterizováno postupným snižováním protiopatření a zpomalováním procesu přirozené dekontaminace radionuklidů z potravin. Aktivita ^{137}Cs a ^{90}Sr v zemědělské produkci se po letech 1991 – 1992 snížila společně s poločasem rozpadu těchto radionuklidů. Zatímco koncentrace ^{137}Cs se v lidském těle v té době významně nezměnila a v některých osídlených oblastech se dokonce zvýšila. To by mohlo být vysvětleno postupným snižováním a v některých případech úplným zrušením protiopatření a skutečností, že lidé začali znovu požívat místní zemědělské a lesní produkty. Funkce přírodních potravin byla ve vytváření dávek vnitřní radiace v té době výrazně zvýšena. I v současné době v některých osídlených oblastech může přispět požívání těchto potravin k zvýšení dávek vnitřního ozáření až o 70 – 80 %. To je způsobeno především nezměněnou koncentrací ^{137}Cs v lesních houbách, která se nezměnila od chvíle radioaktivního úniku. Houby jsou zpravidla nejdůležitější přírodní potravinou ve většině postižených oblastech, co se radiologického hlediska týče.

Od roku 1986 až do současné doby, jsou dávky z vnitřního ozáření způsobeny především příjmem ^{137}Cs jídlem. Příspěvek ^{90}Sr k dávkám z vnitřního ozáření je bezvýznamná, jen několik procent, ale jeho podíl příspěvku se bude zvětšovat. Účast dávek z vnitřního ozáření v případě vdechnutí izotopů plutonia a americia je podílové procento.

Začátkem roku 2004 bylo v Bělorusku 2646 osídlených oblastí s populací 1,34 milionů, které byly kontaminované radioaktivními látkami, z toho 88 % této populace sídlí v Gomelském a Mogilevském kraji.

Tabulka č. 11: Rozdělení osídlených oblastí a obyvatel podle průměrných ročních hodnot efektivních dávek ozáření

Průměrná roční efektivní dávka (PRED), mSv	Průměrná hodnota PRED, mSv	Vitebsk		Grodno		Brest	
		Osídlené oblasti	Obyvatelé	Osídlené oblasti	Obyvatelé	Osídlené oblasti	Obyvatelé
≤ 0,09	0,07	2	30	18	1364	39	47271
0,10 – 0,29	0,16	-	-	107	21139	94	88426
0,30 – 0,49	0,37	-	-	-	-	12	6556
0,50 – 0,69	0,58	-	-	-	-	1	1225
0,70 – 0,99	0,81	-	-	-	-	-	-
> 1	1,48	-	-	-	-	-	-
Celkem		2	30	125	22503	146	143478

Průměrná roční efektivní dávka (PRED), mSv	Průměrná hodnota PRED, mSv	Minsk		Mogilev		Gomel	
		Osídlené oblasti	Obyvatelé	Osídlené oblasti	Obyvatelé	Osídlené oblasti	Obyvatelé
≤ 0,09	0,07	31	2285	249	37698	133	694975
0,10 – 0,29	0,16	121	14082	464	74039	750	207614
0,30 – 0,49	0,37	1	4	67	14565	371	705522
0,50 – 0,69	0,58	-	-	8	364	106	45522
0,70 – 0,99	0,81	-	-	6	109	53	10618
> 1	1,48	-	-	3	17	9	1633
Celkem		153	16371	797	126792	1422	1030914

Počet osídlených oblastí, kde průměrná roční efektivní dávka překračuje 1 mSv je 12 ze 1000. Průměrná efektivní dávka v devíti z nich je 1,2 mSv, zbylé tři – zhruba okolo 2,5 mSv. Tyto osídlené oblasti leží v místech s vyšší kontaminace ¹³⁷Cs přes 555 kBq/m².

K dalším faktorům ovlivňujícím výši dávek ozáření v těchto osídlených oblastech by se mohlo poukázat na blízkost k „uzavřené zóně“, která slouží jako zásobárna kontaminovaných produktů a píce pro dobytek. Zvláštností těchto osídlených oblastí je jejich nízká populace: v deseti z nich se vyššího věku dožívají pouze 4–50 obyvatel.

Nicméně počet vesnic, kde v 95 % není průměrná roční efektivní dávka menší než je dávkový limit je 158 (většinou v Gomelské a Mogilevské oblasti), a počet obyvatel jejichž dávka ozáření přesahuje 1mSv je zhruba 2000. Maximální stálá koncentrace ¹³⁷Cs v těle odpovídá dávkám vnitřního záření 10 – 20 mSv/rok. Tyto osídlené oblasti leží na území s kontaminací ¹³⁷Cs přesahující 300 kBq/m², a mohou být považovány za „kritické“.

Roční kolektivní dávky záření na populaci pobývajících na území radioaktivní kontaminace je asi 21 osob – Sv, průměrná dávka, kterou dostane jedinec je 0,15 mSv. Obecně byly radioaktivní zplodiny vytvořeny pro běloruskou populaci v první dekádě po nehodě. Porovnáním dvou období po nehodě 1986 – 1995 a 1986 – 2005 bylo zjištěno, že s časem se roční podíl narůstání dávek záření neustále snižuje.

Tabulka č. 12: Hromadné narůstání účinných efektivních dávek pro dvě časová období: 1986 – 1995 a 1986 – 2005 (pro oblasti s hustotou kontaminace ¹³⁷Cs v roce 1986 přes 37kBq/m²)

Časové období	Hromadné účinné dávky záření, osoba-Sv		
	vnější	vnitřní	Souhrn
1986 – 1995	9636	5504	15140
1986 – 2005	11900	6800	18700

Pro poslední desetiletí narůstání kolektivních efektivních dávek ozáření se zvýšilo pouze o 23 %, proti nahromadění pro prvních deset let po nehodě, kdy byl průměrný roční nárůst méně než 2,5 %.

5.4 Opatření při radiální havárii jaderné elektrárny

Vážné nehody na jaderných zařízeních mohou vést k vysokým úrovním ozáření v areálu, selhání ochranné obálky či hermetických prostor a k šíření radioaktivních látek do životního prostředí cestou úniku do ovzduší nebo do vod. Předpokládá se, že úniky radioaktivních látek do ovzduší představují z hlediska ozáření větší riziko než úniky do vod. Úniky radioaktivních látek do ovzduší totiž způsobují vyšší dávky a dostávají se k člověku k kratším čase. Rovněž opatření na ochranu obyvatelstva se v případě atmosférického úniku radioaktivních látek provádí obtížněji.

5.4.1 Radiační havárie jaderné elektrárny s únikem do ovzduší

Havárie jaderné elektrárny spojená s únikem radioaktivních látek do ovzduší vyžaduje rozsáhlý soubor opatření na ochranu zdraví obyvatelstva a na ochranu hospodářství. Radioaktivní látky unikají do ovzduší zpravidla v delším časovém období. Zastoupení jednotlivých radionuklidů se může podstatně lišit v závislosti na charakteru havárie a v jejím průběhu se může značně měnit. K velkým únikům radionuklidů může dojít od zlomku hodiny až do několika desítek hodin, po iniciující události a mohou trvat až několik dnů. Každému velkému úniku předcházejí varovné příznaky, které však nemusí být vždy včas správně rozeznány. Při úniku se radioaktivní látky šíří a rozptylují v ovzduší, přičemž přízemní množství radionuklidů v určité vzdálenosti od místa úniku závisí na mnoha faktorech, jako je: celkové množství úniku, dosažená výška úniku radioaktivních látek, kategorie stability ovzduší, rychlost větru, tepelný obsah úniku, fyzikální a chemická forma uniklých látek.

V těsné blízkosti jaderné elektrárny může být obyvatelstvo ohrožováno také zevním ozáření pronikajícím stěnami objektu jaderné elektrárny.

Plánování a realizace ochranných opatření při radiační havárii JE

Z hlediska plánování a realizace ochranných opatření při radiační havárii jaderné elektrárny spojené s únikem radioaktivních látek do ovzduší se rozlišují tři fáze:

Časná fáze

Představuje ohrožení osob zevním ozáření (především radioizotopy vzácných plynů) a vdechováním (především radioizotopů jódu) z procházejícího radioaktivního oblaku. V závislosti na průběhu a rozsahu havárie, meteorologické situaci a dalších faktorech může trvat až několik hodin nebo dní. Při opakovaném průchodu radioaktivního oblaku může dojít k obnovení časné fáze. V těsné blízkosti JE mohou být osoby též ohrožovány zevním ozáření pronikajícím stěnami objektu JE.

Střední fáze

Představuje ohrožení osob způsobené především zevním ozáření radionuklidy ze zamořeného terénu a dále vnitřním ozáření z požití kontaminovaných potravin a vody

a vnitřním ozářením z vdechovaných znovu zviřených radioaktivních částic. Může trvat až několik dnů až měsíců.

Pozdní fáze

Je období postupného odvolávání ochranných opatření a přechodu k běžnému způsobu života podle zhodnocení přetrvávajícího ohrožení, způsobeného stejnými druhy ozáření jako ve střední fázi. Může trvat až několik let.

Při radiační havárii jaderné elektrárny lze očekávat ozáření osob a následné poškození jejich zdraví z důvodu:

- zevního ozáření z poškozeného zdroje,
- zevního ozáření z radioaktivního mraku,
- zevního ozáření z deponie radioaktivních látek na povrchu terénu po průchodu radioaktivního mraku,
- zevního ozáření z kontaminace povrchu a těla
- vnitřního ozáření po vdechnutí radioaktivních látek obsažených ve vzduchu,
- vnitřního ozáření z požití potravy a vody kontaminované radioaktivními látkami.

Nejvýznamnějšími druhy ozáření obyvatelstva při radiační havárii jaderné elektrárny jsou:

- zevní ozáření zářením gama
- ozáření štítné žlázy po vdechnutí nebo požití radioizotopů jódu
- ozáření dalších orgánů po vdechnutí nebo požití radioaktivních látek

Druhy ochranných opatření

Prvořadými opatřeními podmiňujícími rozhodovací proces k ochraně obyvatelstva a hospodářství při radiační havárii jaderné elektrárny je vyrozumění orgánů státní správy, varování obyvatelstva a monitorování vzniklé radiační situace.

K základním druhům ochranných opatření při radiační havárii JEZ na ohroženém území patří:

- Ukrytí
- Jodová profylaxe
- Regulace pohybu osob

- Evakuace obyvatelstva
- Přesídlení obyvatelstva
- Individuální ochrana osob
- Dekontaminace osob
- Regulace požívání zamořených potravin, vody a krmiv
- Dekontaminace území

Kromě těchto základních ochranných opatření musí být zajištěna prohloubená zdravotní péče a další doplňující opatření vyplývající ze specifík jednotlivých úseků hospodářství a zabezpečující provedení základních ochranných opatření.

Z hlediska naléhavosti a potřeby rychlého zavedení jsou mezi jednotlivými ochrannými opatřeními významné rozdíly. Neodkladnými opatřeními jsou zejména ukrytí, jodová profylaxe a evakuace, které se zavádějí bez vyčkání na výsledky monitorování skutečné radiační situace. Následnými ochrannými opatřeními jsou zejména přesídlení, regulace požívání zamořených potravin, vody a krmiv. Ochranná opatření při radiačních haváriích se provádějí tehdy, jestliže lze předpokládat, že u obyvatel budou dosaženy hodnoty dávkových ekvivalentů převyšující akční úroveň a jsou-li zdůvodněna větším přínosem, než náklady na opatření a škody jimi způsobené a mají být optimalizována co do formy, rozsahu a trvání tak, aby přinesla co největší rozumně dosažitelný přínos.

Akční úroveň pro ochranná opatření

Ochranná opatření se zavádějí tehdy, jestliže lze předpokládat, že u obyvatel budou dosaženy hodnoty dávkových ekvivalentů, převyšující stanovené akční úroveň.

S akčními úrovněmi pro opatření v časně fázi radiační havárie JE se porovnávají odpovídající předpokládané dávkové ekvivalenty, které by byly při neuskutečnění ochranných opatření časně fáze obdrženy v důsledku zevního ozáření a příjmu radioizotopů jódu vdechováním během průchodu radioaktivního oblaku. Předpokládá se, že průchod oblaku netrvá déle než 1 týden.

S akčními úrovněmi pro opatření ve střední fázi radiační havárie JE se porovnávají předpokládané dávkové ekvivalenty, které by byly obdrženy při neuskutečnění odpovídajících ochranných opatření střední fáze, a to pro přesídlení v důsledku všech způsobů zevního ozáření a příjmu radionuklidů vdechováním i požíváním během prvního roku po radiační havárii JE a pro regulaci požívání zamořených potravin pouze v důsledku příjmu radionuklidů požitím během prvního roku po radiační havárii JE.

Pro opatření v pozdní fázi radiační havárie JE se akční úrovně předem nestanovují. O těchto opatřeních se rozhoduje na základě porovnání předpokládaného snížení dávkových ekvivalentů vlivem těchto opatření s náklady a škodami spojenými s jejich zavedením.

Akční úrovně jsou stanoveny rozpětím hodnot dávkových ekvivalentů. Při překročení horní meze rozpětí akčních úrovní je provedení příslušných opatření nezbytné. Při dosažení dolní meze rozpětí akčních úrovní se realizace opatření zvažuje s ohledem na rozsah, proveditelnost a nákladnost opatření a jejich škodlivé důsledky. Opatření se vždy zavádějí po územních celcích.

Pohotovost k ochranným opatřením

Časovou rezervu od zjištění radiační havárie jaderné elektrárny nebo nebezpečí jejího vzniku danou vývojem havarijního stavu před únikem nebo během něj, jakož i dobou šíření radioaktivních látek k určitému územnímu celku je nutno využít k tomu, aby havarijní štáby, síly, prostředky a případně i obyvatelstvo byly včas uvedeny do pohotovosti k uskutečnění ochranných opatření a aby neodkladná opatření mohla být realizována ještě před únikem, nebo alespoň před zasažením územního celku.

Je také nutno počítat s postupnou změnou směru větru a rychlostí větru i s odchylným směrem větru ve větších vzdálenostech od jaderné elektrárny.

Vyrozumění a varování

Vyrozumění orgánů státní správy a varování ohroženého obyvatelstva při radiační havárii jaderné elektrárny. Podmiňuje účinnost základních ochranných opatření. Systém vyrozumění a varování, jako souhrn organizačních a materiálně technických opatření, zabezpečujících včasné a organizované vyrozumění a varování se připravuje na konkrétní podmínky jaderné elektrárny a její okolí předem s možností vyrozumění a varování v kteroukoli noční i denní dobu.

Monitorování

Monitorování je činnost nezbytná pro zjištění a hodnocení radiační havárie jaderné elektrárny. Provádí se měřením veličin charakterizujících ionizující záření a radionuklidy, jakož i jejich šíření a účinky, spolu s vyhodnocováním těchto měření. Údaje

jsou podkladem pro rozhodování o zavedení opatření na ochranu zdraví obyvatelstva a ostatních protihavarijních opatření.

Ukrytí

Včasné ukrytí ohroženého obyvatelstva v uzavřených místnostech domů, případně ve stálých a protiradiačních úkrytech má význam pro ochranu před procházejícím radioaktivním oblakem. Zabezpečuje podstatně snížení dávkových ekvivalentů způsobených zevním ozářením a vdechnutím radioaktivních látek. Ukrytí obyvatelstva je třeba dát předost před evakuací během průchodu radioaktivního oblaku.

Potřeba ukrytí je vzhledem k časovému průběhu havárie, již obdrženým a očekávaným dávkám záření, zabezpečení evakuace a jiným hlediskům krátkodobá nebo dlouhodobá. Za dlouhodobé ukrytí se považuje takové ukrytí, které trvá déle než 12 hodin. Dlouhodobé ukrytí, zejména v bytových prostorech občanů, může být příčinou sociálních, zdravotních a hygienických problémů. Při dlouhodobém ukrytí delší než 24 hodin se organizuje zdravotnická péče a zásobování potravinami.

Při ochraně obyvatelstva ukrytím má největší význam ukrytí občanů ve vlastních bytech a různých společenských a administrativních budovách. K ukrytí v budovách se přednostně využívají místnosti odvrácené od směru větru a s minimálním počtem oken a vchodů, a s možností jejich utěsnění a regulací vnitřní ventilace. Chování obyvatelstva při ukrytí se usměrňuje vydáváním průběžných pokynů. Větrání úkrytů je možné až po průchodu radioaktivního oblaku.

Ukrytí obyvatelstva se plánuje a připravuje v zóně havarijního plánování a při radiační havárii se uskutečňuje neprodleně po varování obyvatelstva a bez vyčkání na výsledky monitorování skutečné radiační situace.

Ukrytí obyvatelstva se upřesňuje, odvolává, případně na dalším území zavádí podle výsledků monitorování.

Jodová profylaxe

Jodová profylaxe spočívá v požití preparátů obsahujících stabilní jód, které blokují absorpci radioaktivního jódu štítnou žlázou. Není ochranným opatřením proti vnitřnímu ozářením jinými radionuklidy. Je doplňkem k ostatním ochranným opatřením a v žádném případě je nenahrazuje. Účinnost jodové profylaxe závisí na době podání pre-

parátů. Uskuteční-li se jejich podání 1-6 hodin před začátkem příjmu radioaktivního jódu, je ochrana jódovou profylaxí téměř úplná. Při opožděném podání se snižuje, například při podání 2 hodiny po začátku příjmu radioizotopu jódu je asi poloviční. Profylaktický preparát je proto třeba podat co nejdříve, nejpozději do 2 hodin od začátku vdechování radioaktivního jódu. Při dlouhodobém nebo vysokém příjmu radioaktivního jódu se jódová profylaxe opakuje. Zdravotní riziko vedlejších účinků při jódové profylaxi je zanedbatelné.

Jódová profylaxe se plánuje a připravuje v zóně havarijního plánování. Při radi-
ační havárii se v této zóně první dávka jodového profylaktika požije neprodleně po va-
rování obyvatelstva bez vyčkávání na výsledky monitorování skutečné radiační situace.

Jódová profylaxe a její opakování se upřesňuje, odvolává, popřípadě na dalším území zavádí podle výsledků monitorování.

Vhodné formy profylaktika v dostatečném množství pro první a následná použití se v zóně havarijního plánování rozdělují přímo do bytů občanů a na pracoviště. Profylaktické preparáty se pravidelně obměňují.

Regulace pohybu osob

Úkolem regulace pohybu osob na ohroženém území je:

- zajistit průjezdnost komunikací pro monitorovací skupiny,
- zabránit vstupu osob do nebezpečných oblastí radioaktivního zamoření, zejména v časně fázi havárie,
- zajistit průjezdnost komunikací pro evakuaci obyvatelstva,
- zajistit průjezdnost komunikací pro vstup nasazených sil a prostředků k provádění likvidačních prací po havárii,
- docílit snížení ozáření osob, nížení zamoření jejich vybavení a zásob a zabránit přesunům zamořeného materiálu do čistých oblastí,
- v době po evakuaci zamezit neoprávněný návrat osob do zamořených oblastí a zabezpečit ochranu majetku evakuovaných osob,
- celkově racionálně usměrnit dopravu a přepravu osob v ohrožené oblasti

Evakuace obyvatelstva

Evakuace obyvatelstva při radiační havárii jaderné elektrárny je souhrn organizačních a materiálně technických opatření, směřující ke včasnému a organizovanému přemístění obyvatelstva z ohroženého území.

Evakuace se provádí v časné fázi havárie pokud možno před průchodem radioaktivního oblaku a zpravidla po předchozím ukrytí.

Včasná evakuace obyvatel je nejúčinnějším ochranným opatřením, je-li však provedena v nevhodnou dobu (např. v době průchodu radioaktivního oblaku) nebo nevhodným směrem (např. ve směru do oblaku) může vést k tomu, že evakuovaní obdrží mnohem vyšší dávky než při ukrytí. Evakuace se provádí vždy přímo z obydlí, pracovišť a úkrytů bez předchozího shromažďování obyvatel. Zvláštní pozornost se věnuje evakuaci těhotných žen, dětských kolektivů, nemocných apod. Pominou-li důvody pro přemístění obyvatelstva, uskuteční se jeho organizovaný návrat, avšak až po rozhodnutí, zda podle výsledků monitorování nebude nutno obyvatelstvo přesídlit.

Evakuace se plánuje a připravuje v zónách havarijního plánování. Plány se zpracovávají tak, aby směr odsunu byl v ohroženém území pokud možno kolmý ke směru větru.

Přesídlení obyvatelstva

Přesídlení obyvatelstva je souhrn organizačně a materiálně technických opatření směřujících k dlouhodobé nebo trvalé změně bydliště. Uskutečňuje se ve střední nebo pozdní fázi havárie a na základě vyhodnocení podrobných výsledků monitorování ohroženého území, s ohledem na dlouhodobé ozařování z radioaktivního spadu.

Přesídlení obyvatelstva se předem neplánuje a nepřipravuje.

Individuální ochrana osob

Individuální ochrana osob při radiační havárii jaderné elektrárny zahrnuje ochranu dýchacích cest, očí, obličeje a hlavy a ochranu povrchu těla. Je nutná v časné fázi havárie, zejména při pohybu osob mimo budovy a úkryty, kdy je nebezpečí vdechování

radioaktivních látek (vnitřní kontaminace) a jejich usazování na odkrytých částech těla (zevní kontaminace).

Ochrana dýchacích cest se zabezpečuje:

- Improvizovanými prostředky ochrany dýchacích cest jako jsou kapesníky, ručníky a pod.
- V zóně havarijního plánování za využití spec. prostředků určených pro ochranu dýchacích cest, které jsou předem vydány obyvatelstvu.

Ochrana povrchu těla se zajišťuje vhodným oblečením a použitím oděvních doplňků k ochraně nechráněných částí těla (čepice, rukavice, brýle, pláštěnky apod.)

Individuální ochrana osob se plánuje a připravuje v zóně havarijního plánování a při radiační havárii JE se v této zóně vykonává neprodleně po varování obyvatelstva bez vyčkávání na výsledky monitorování skuteční radiační situace.

Ochrana příslušníků jednotek nasazených v ohroženém prostoru při záchranných a likvidačních pracích se zabezpečuje ochrannými maskami a speciálními ochrannými oděvy, kterými jsou tyto jednotky vybaveny.

Dekontaminace osob

Dekontaminace osob v okolí jaderné elektrárny se uskutečňuje zejména v časné fázi havárie. Po ukrytí v bytech nebo na pracovišti se obyvatelé důkladně umyjí běžnými mycími postupy se zvláštní pozorností na ty části těla, které nebyly chráněny oděvem, včetně vlasů a vousů. Ve společných úkrytech se dekontaminace osob organizuje a uskutečňuje v sociálních zařízeních budov a úkrytů.

Při evakuaci se uskutečňuje dekontaminace osob také poblíž hranic evakuovaného prostoru v stacionárních a mobilních protichemických zařízeních. K tomuto účelu se vyčleňují a zpohotovují předem určená protichemická zařízení.

Dekontaminace osob se plánuje a připravuje v zónách havarijního plánování a při radiační havárii se vykonává neprodleně po varování obyvatelstva bez vyčkávání na výsledky monitorování skutečné radiační situace.

Dekontaminace osob se upřesňuje, odvolává, popřípadě na dalším území zavádí podle výsledků monitorování.

Dekontaminace jednotek nasazených k likvidaci radiační havárie a jejích následků v objektu JE a jednotek provádějících dekontaminaci území v okolí JE se vykonává na místech speciální očisty.

Regulace používání zamořených poživatin

V časně fázi radiační havárie jaderné elektrárny se vydává zákaz spotřeby všech potravin a krmiv na ohroženém území s výjimkou potravin a krmiv předem zabalených, vhodně skladovaných nebo jinak chráněných proti zamoření. Zákaz pití vody, jejího používání k potravinářským účelům a k napájení hospodářských zvířat je vydán pro neupravenou vodu odebíranou z blízkosti hladiny nechráněných vodních zdrojů a pro dešťovou vodu. Přerušuje se pastva hospodářských zvířat, jejich krmení čerstvými krmivy (zelenou pící), lov a rybolov v ohroženém území.

Zákaz konzumace před zamořením nechráněných potravin se plánuje a připravuje v zóně havarijního plánování a při radiační havárii se vyhláší společně s varováním obyvatelstva bez vyčkávání na výsledky monitorování skutečné radiační situace.

Regulace používání zamořených poživatin a krmiv se upřesňuje, odvolává na dalším území zavádí podle výsledků monitorování.

Ve střední a pozdní fázi radiační havárie jaderné elektrárny se upřesňují a odvolávají zákazy týkající se spotřeby poživatin a ovlivnění průniku radionuklidů do nich. Na základě rozhodnutí orgánů hygienické služby se organizují zemědělská, vodohospodářská, veterinární a zásobovací opatření ke snížení pronikání radionuklidů potravinovým řetězcem. Spočívají zejména v jiném způsobu použití potravin a ve využití náhradních zdrojů potravin, vody, zemědělských produktů a krmiv. Lze také využít oddálení spotřeby do doby, kdy dojde ke snížení obsahu radionuklidů s krátkým poločasem rozpadu (např. sušení, konzervace, mražení, výroba sýrů ze zamořeného mléka).

V pozdní fázi se také vydávají příkazy k náhradnímu využití nebo zničení zamořených poživatin.

Opatření k regulaci zamořených poživatin a krmiv a souvisejících opatření pro střední a pozdní fázi se předem neplánují.

Dekontaminace postiženého území

Dekontaminace postiženého území zahrnuje očistu objektů, komunikací, terénu, vozidel a předmětů na tomto území. Šíření radioaktivního prachu se zabraňuje jeho fixací kroupami, smáčedly, pomocí pěny nebo polymerních fólií.

V oblastech kde došlo k evakuaci nebo přesídlení obyvatelstva se dekontaminace soustřeďuje zejména na komunikace, důležitá výrobní zařízení apod. Další očista území se pak v oblastech, kde došlo k evakuaci obyvatelstva uskutečňuje v souvislosti s jeho návratem.

Dekontaminace území se plánuje a připravuje pro území v zóně havarijního plánování a v pánu se uvádí pouze seznam sil a prostředků vyčleněných pro její provedení.

Zdravotní péče

Zdravotní péče při radiační havárii jaderné elektrárny spočívá v komplexu léčebně preventivních hygienických a protiepidemických opatření k udržení dobrého zdravotního stavu osob zdržujících se v ohroženém prostoru a ve zdravotnickém zabezpečení ochranných opatření. Zdravotní péče o obyvatelstvo postižené radiační havárií JE závisí na rozsahu této havárie a na počtu osob, které případně vyžadují i speciální péči z důvodů ozáření. Na této činnosti se kromě odborníků z oblasti ionizujícího záření účastní hematologové, psychologové a psychiatři. Při důsledném a včasném zavedení základních ochranných opatření se ovšem u obyvatelstva ani při rozsáhlé radiační havárii výskyt akutní nemoci z ozáření neočekává.

Zdravotní péče dále závisí na počtu osob, které vyžadují zvýšenou zdravotní péči spojenou se zabezpečováním jednotlivých ochranných opatření vedoucích ke změně obvyklého způsobu života obyvatelstva v obolí JE jako je déle trvající ukrytí, evakuace obyvatelstva, dekontaminace osob a přesídlení obyvatelstva.

5.4.2 Radiační havárie jaderné elektrárny s únikem do vodotečí

Ochrana obyvatelstva při radiační havárii JE spojené s únikem radioaktivních látek do vodotečí vyžaduje zejména opatření k omezení dávkových ekvivalentů způsobených vstupem radioaktivních látek do potravinových řetězců. Na příslušných úsecích povodí se při dosažení hodnot akčních úrovní vyhlásují zákazy používání pitné a užitkové vody z povrchových zdrojů, závlah, koupání, rybolovu a podobně. Následným opatřením je náhradní zásobování pitnou vodou, případně příslušná opatření zemědělské výroby.

Opatření se plánují a připravují ve vodohospodářských zařízeních kde se upravuje a jímá voda z vodotečí a používá jako zdroj vody pro obyvatelstvo.

6. Diskuse

V minulosti došlo v jaderných elektrárnách k řadě poruch a k několika haváriím. Pouze ve třech případech (Windscale, Three Mile Island, Černobyl) uniklo větší množství radioaktivních látek mimo elektrárnu do životního prostředí.

Z rozborů příčin vzniku havárií vyplívá, že hlavním faktorem je lidské selhání. Proto je podstatnou součástí zajištění bezpečného provozu jaderných elektráren úroveň kvalifikace personálu. Kromě kvalifikace je významná také bezpečnostní kultura, tj. jak personál dodržuje provozní normy a předpisy.

Potvrzení, že po havárii jaderné elektrárny lze minimalizovat její následky z hlediska kontaminace osob radioaktivními látkami při zavedení správných ochranných opatření a postupů odstraňování následků nehody dle předem vypracovaných havarijních plánů popisují v následujícím textu na příkladu černobylské havárie.

Ochranná opatření a černobylská havárie

Rozsah a vážnost černobylské havárie nebyl předvídan a překvapil prakticky všechny národní autority odpovědné za havarijní připravenost v zemích provozujících jaderné elektrárny. Doporučované postupy a kritéria neodpovídaly ani očekávanou délkou úniku radionuklidů a ani jeho rozsahem nastalé situaci. Osoby a instituce odpovědné za rozhodování a řízení havárie nebyly připraveny na volbu a aplikaci adekvátních ochranných opatření.

Vyrozumění a varování

I když vyrozumění odpovědných orgánů proběhlo více méně podle připraveného plánu s ohledem na centralizaci řízení v oblasti využívání jaderné energie v SSSR, reakce systému byla neúměrná rozsahu a průběhu havárie (důvody však byly spíše v politické než technické a odborné rovině), systém varování obyvatel selhal.

Vyrozumění a varování obyvatelstva bylo provedeno z velkým časovým zpožděním. Oficiální informace o možných důsledcích havárie na okolní státy byla zveřejněna až den po vzniku havárie.

Zásah u zdroje

Vedení elektrárny nemělo k dispozici potřebné zdroje k zvládnutí nastalé situace, ani oprávnění řídit opatření nutná k likvidaci havárie takového rozsahu a jejich následků a navíc vypracovaný havarijní plán neodpovídal vzniklé situaci. Krátce po explozi reaktoru a vzniku havárie byly signály o této skutečnosti automaticky předány Státnímu výboru pro využití jaderné energie v Moskvě, kde bylo rozhodnuto vyslat odborníky z Moskvy na místo havárie, aby řídili havarijní operace, současně byla vytvořena vládní komise, která měla pravomoc mobilizovat potřebné zdroje.

Rozsáhlé záchranné a likvidační práce v samotném areálu jaderné elektrárny s cílem dostat pod kontrolu havarované systémy, zlikvidovat rozptýlené zbytky havarovaného reaktoru a uvolněného jaderného paliva, výstavby ochranné obálky vyžadovaly obrovské úsilí. Největším rizikem při těchto činnostech byla neznalost radiačního nebezpečí. Hasiči, vojáci ani zdravotnický personál nevěděl zpočátku jaké riziko podstupují, jejich ozáření nebylo monitorováno ani regulováno. Dostupné přístroje na jaderné elektrárně nebyly schopny měřit dávkové příkony nad 100Gy/h, které se vyskytovaly kolem jaderné elektrárny a ani v okolí nebyly automatizované monitorovací stanice, které by daly informaci o reálné radiační situaci. Systém monitorování selhal.

Dávku zevního ozáření lze regulovat vzdáleností od zdroje záření, jeho stínění a minimalizací doby pobytu v místech s vysokým dávkovým příkonem. Toto jednoduché pravidlo nebylo hasiči ani záchranáři akceptováno, oni neznali radiační situaci na místě zásahu. Proto téměř všichni zasahující hasiči likvidující požár zemřeli na nemoc z ozáření. Tito muži však dokázali s nasazením vlastního života zabránit rozšíření požáru na další bloky jaderné elektrárny a tím zabránili vzniku ještě větší katastrofy.

Pokud by znali radiační riziko, které budou podstupovat a dodržovali taktické postupy (limitování ozáření), myslím že by nebylo v jejich silách požár zvládnout, nebyl by dostatek hasičů pro střídání a požár by se rozšířil na další objekty. Hasiči se tak ocitli v neřešitelné situaci. Zabránit šíření požáru a zemřít nebo žít a způsobit rozsáhlejší katastrofu.

Musím ocenit, že přes neomluvitelné lidské chyby, k nimž došlo v posledních hodinách před vznikem havárie, obrovské úsilí všech záchranářských a likvidačních

jednotek a odborných i řídicích pracovníků, kteří pracovali, či podíleli se na realizaci ochranných a likvidačních opatření od prvních dnů havárie.

Ukrytí a jodová profylaxe

Vyhlášení ukrytí a jodové profylaxe obyvatelstva bylo provedeno také až s jednodenním zpožděním. V důsledku toho obdrželo obyvatelstvo v blízkém okolí elektrárny 20 % - 60 % celkové dávky na štítnou žlázu.

Vysoký příjem radioaktivního jódu inhalací z radioaktivního mraku a konzumací kontaminované potravy způsobil zvýšený výskyt rakoviny štítné žlázy u dětí v oblastech silně zamořených radioaktivními izotopy jódu. Pokud by proběhlo varování, ukrytí a jodová profylaxe obyvatelstva včas, následky mohly být nižší.

Evakuace

S ohledem na to, že začátek evakuace probíhal za stále stálého úniku radionuklidů z havarovaného reaktoru, nelze ji hodnotit jako neúspěšně provedené ochranné opatření.

Další následná střednědobá a dlouhodobá opatření

Další následná střednědobá a dlouhodobá opatření týkající se likvidace následků havárie v prostoru jaderné elektrárny, dekontaminačních prací v sídlištních jednotkách a na kontaminovaných půdách, regulace potravních řetězců a přesídlení osob ze zasaženého území, preventivní a léčebné péče o obyvatele žijící na kontaminovaném území, byla masivní a v zásadě, z hlediska času a rozsahu, většinou zdůvodněná a účinná.

Významná byla a dosud jsou opatření týkající preventivní a léčebné péče o osoby, u nichž s ohledem na ozáření je zvýšená pravděpodobnost vzniku nádorových onemocnění a opatření zaměřená na kontrolu produkce, distribuce a spotřeby potravin na kontaminovaném území.

Tato opatření se týkají velkého počtu lidí na kontaminovaných územích Ukrajiny, Běloruska a Ruska. Rozsah a pokračování v těchto opatřeních jsou závislé spíše na ekonomických možnostech těchto zemí a na odborném, technickém a ekonomickém suportu ze zahraničí. Např. efektivním se pochopitelně ukázal dovoz „čistých“ potravin do nejvíce kontaminovaných oblastí, z nichž obyvatelé nebyli přesídleni.

Podářilo se dosáhnout stavu, kdy naměřené celotělové dávky u obyvatel v těchto oblastech byly významně nižší, než u obyvatel v méně kontaminovaných oblastech. Bohužel, když z ekonomických důvodů se dovoz „čistých“ potravin snížil, či dokonce ustal, celotělové dávky obyvatel opět vzrostly na úroveň korelující s úrovní kontaminace půdy v dané oblasti. Toto, celotělovým měřením prokázané, zjištění má obecně velký význam z hlediska plánování dlouhodobých opatření, zejména ve vyspělých zemích, kde podíl spotřeby z místní produkce je ve srovnání se spotřebou dovezených potravin i ze vzdálených míst (mezinárodní síť hypermarketů) nízký.

Do diskuze bych také rád položil otázku. Jsou po dvaceti letech od havárie jaderné elektrárny v Černobyli dávky z kontaminovaného prostředí pro život zde nebezpečné? Je třeba poznamenat, že průměrné dávky u obyvatel teritorií kontaminovaných radioaktivním spadem z Černobyli jsou celkově nižší než dávky u lidí, kteří žijí v dobře známých oblastech s vysokým pozadím přirozené radiace v Indii, Íránu, Brazílii a Číně. Někteří obyvatelé v těchto oblastech dostanou ročně více než 25 mSv z radioaktivních materiálů v půdě, na které žijí bez jakýchkoliv zjevných zdravotních následků.

Opatření ve světě

V prvních dnech „černobylské havárie bylo provedení určitých, okamžitých akcí považováno v některých zemích Evropy za nezbytné, jak však ukázala pozdější hodnocení efektivity těchto opatření, jejich zavádění bylo motivováno spíše nepřiměřenou mírou konzervatismu než informovaným, odborným posouzením (např. zaorávání zemědělských plodin, omezení porážek některých druhů hospodářských zvířat, omezení distribuce některých druhů mas na jedné straně a vyplácení pojistek a finančních příspěvků, neomezení distribuce druhé sklizně, apod. na straně druhé). Tyto rozdílné reakce systémů havarijní připravenosti (od nezavádění žádných specifických ochranných opatření na základě hodnocení výsledků zintenzivněných programů monitorování v některých zemích - až po nucené, ne vždy zdůvodněné restriktce týkající se distribuce a spotřeby potravin, zpravidla nezávislé na skutečné míře rizika, v jiných zemích) vyvolaly mnohdy zmatek a nejistotu nejen mezi obyvatelstvem, ale i mezi orgány odpovědnými za zavádění opatření.

Je však třeba říci, že uvedené problémy byly brzy identifikovány a úsilí mezinárodních, ale i v mnoha zemích vládních, institucí a organizací vedlo v následujících mě-

sících a letech ke zpracování „poučení“ a k přijetí harmonizovaných kritérií, postupů a doporučení.

Budoucnost jaderné energetiky

Černobylská havárie je často používána jako argument proti jaderné energii. Jakákoliv to byla katastrofa s vážnými důsledky pro zdraví obyvatelstva, průběh havárie ukazuje, že to byla událost zcela netypická. Ani v České republice, ani v jiných zemích se reaktory černobylského typu pro energetické účely nepoužívají, havarijní ochrana současných reaktorů je mnohem dokonalejší a ani by neumožnila obsluhu tak hrubé zásahy do chodu elektrárny. Bezpečnostní kultura personálu u nás a v západních zemích je na nesrovnatelně vyšší úrovni.

Provozování jaderných elektráren je zakotveno v zákonných normách a je pod přísným dohledem státních dozorových orgánů. Kromě toho se Česká Republika, spolu s dalšími zeměmi, zavázala řídit se tzv. konvencí jaderné bezpečnosti, první mezinárodní právní normou o bezpečnosti jaderných elektráren, přijatou v.r.1996.

Terorismus fenomén dnešní doby

Myslím, že největší hrozbou pro atomové elektrárny jsou v současné době teroristické akce. Např. pád dopravního letadla přímo na reaktor jaderné elektrárny by s největší pravděpodobností vyústil v únik radionuklidů srovnatelný s černobylskou havárií. Jak rychle by na danou situaci zareagoval záchranný systém a jak rychle by byla provedena ochranná opatření je a bude nezodpovězená otázka. Určitě by moderní systém monitorování umožnil určit spolehlivěji množství uniklých radionuklidů a spolu s meteorologickou předpovědí by bylo možno předpovídat směr šíření a rozsah kontaminace. Moderní informační technologie by umožnily rychle varovat obyvatelstvo a mobilizovat potřebné síly a prostředky na likvidaci havárie. To vše by vedlo k minimalizaci následků havárie. Teroristé však těží ze základního pravidla „Je jednodušší provést teroristický čin než vytvořit systém účinné ochrany“.

7. Závěr

Následky radiační havárie jaderné elektrárny se mohou podstatně lišit v závislosti na celkovém množství uniklých radionuklidů, na složení směsi uniklých radionuklidů, na energii se kterou jsou radionuklidy uvolňovány do prostředí, na mechanismu jejich šíření a na charakteru prostředí do kterého jsou uvolňovány.

Ve většině případů bude existovat pro ohrožené osoby jen omezený počet expozičních cest ozáření, se kterými je nutno uvažovat. Relativní příspěvek každé potenciaální cesty ozáření k celkovému ozáření v důsledku havárie se může lišit v závislosti na konkrétním typu rozsahu a průběhu události.

Odezva na radiační nehodu či havárii je v podstatě totožná s odezvou na jakoukoli nehodu vyvolanou rizikovými materiály. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že na rozdíl od řady jiných rizik není ozáření vnímatelné lidskými smysly, zrakem, čichem, nebo sluchem. Proto musí být opatření připravena a prováděna tak, aby bylo možné stanovit potenciaální riziko ozáření a informovat pracovníky havarijní odezvy a veřejnost o nejvhodnějším postupu.

Odezva na radiační havárii má tři základní cíle. Prvním cílem je provést přímo u zdroje havárie opatření zaměřená na zmírnění následků či snížení potenciaálního rizika. Druhým cílem je zajistit, aby lidé neobdrželi dávky vedoucí k onemocnění, či dokonce úmrtí v důsledku ozáření v období několika týdnů až měsíců po havárii. Třetím cílem je provést jakoukoli rozumnou akci ke snížení pravděpodobnosti vyvolání zhoubného bujení v důsledku 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. Menší význam má zevní ozáření z oblaku a depozitu. Při rozhodování o ochranných opatření je v počátečních okamžicích nejobtížnější předvídat další vývoj havárie a tedy odhadnout dávky a jejich možné snížení pro situace, které ještě nenastaly.

Při znalosti velikosti, místa úniku a charakteristiky radioaktivních látek, které se uvolnily do prostředí je odhad důsledků pro obyvatelstvo určován především meteorologickou situací. Nejvýznamnější z meteorologických parametrů jsou směr a síla větru v několika výškách nad zemí, třída stability počasí, přítomnost nebo nepřítomnost sráž-

žek. Tyto parametry spolu s geografickým profilem terénu rozhodují o směru a rychlosti šíření radioaktivního mraku o rychlosti depozice radioaktivních látek na terén.

Míra kontaminace osob závisí na mnoha faktorech. Základní z nich jsou aktivita radioaktivních látek v místě pobytu osob, doba jejich pobytu v kontaminovaném prostředí, účinnost ochranných prostředků a pomůcek. Je samozřejmě jasné, že nejohroženější skupinou jsou zaměstnanci a havarijní pracovníci pracující v místě havárie. U obyvatelstva pak také záleží na správnosti a včasnosti provedení ochranných opatření.

Neexistuje jediný vzorový sled událostí, který by mohl sloužit jako základ pro tvorbu havarijních plánů. Pro jaderně energetická zařízení musí vnější a vnitřní plán vycházet z konkrétního typu zařízení a potenciálu pro únik radionuklidů. Důsledky na okolí vypočítané pro řadu havarijních sekvencí pak tvoří další zdroj pro tvorbu vnějších havarijních plánů a stanovení zóny havarijního plánování.

8. Seznam použité literatury

1. Drábová D. Černobylská havárie aneb Pravda není nikdy čistá a málokdy bývá jednoduchá. Platný http://www.sujb.cz/docs/Černobylská_havárie.pdf , říjen 2006.
2. Hála J. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. Brno: Konvoj, 1998, 310 s, ISBN 80-85615-56-8.
3. Kolektiv autorů. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Azin CZ, 2000, 619s, ISBN 80-238-3703-6.
4. Kuna, P. Navrátil, L. a kol. *Klinická radiobiologie*. Praha: Manus, 2005, 222 s, ISBN 80-86571-09-2.
5. Mezinárodní komise pro atomovou energii ve Vídni (MAAE). *Dědictví Černobyli*. Přel. V. Sinkulová. 1. vyd. Týn nad Vltavou: ČSVTS v koedici s českou nukleární společností, 2006, 51 s, ISBN 80-02-01806-0.
6. Národní zpráva. *20 years after the Chernobyl catastrophe the consequences in the republic of Belarus and their overcoming*. Minsk: R.H., 2006, 102 s, ISBN 985-01-0628-X.
7. Neruda O. Prouza Z. *Problematika zásahů při událostech s radiačním rizikem*, Hostivice: Vydavatelství Seidl – Facom, 1992, 30 s, ISBN 80-901386-2-6.
8. Österreicher, J., Vávrová, J. *Přednášky z radiobiologie*. Praha: Manus, 2003, 116 s. ISBN 80-86571-01-7.
9. Prouza, Z. Co přinesl Černobyl v oblasti havarijní připravenosti, Platný http://www.suro.cz/cz/publikace/cernobyl/co_prinesl_cernobyl_pro_havarijni_pripavenost.pdf, říjen 2006.
10. Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Mezinárodní stupnice hodnocení jaderných událostí, uživatelská příručka. Platný <http://www.sujb.cz/docs/INES.pdf>, říjen 2006.
11. Vyhláška SÚJB č. 318/2002 Sb., o podrobnostech k zajištění havarijní připravenosti jaderných zařízení a pracovišť se zdroji ionizujícího záření a o požadavcích na obsah vnitřního havarijního plánu a havarijního řádu. Sbírka zákonů České republiky, roč. 2002, částka 116, Praha.

12. Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů. Sbírka zákonů České republiky, roč. 1997, částka 5, Praha.

9. Klíčová slova

Havárie jaderné elektrárny

Kontaminace osob

Ochranná opatření

Účinky ionizujícího záření