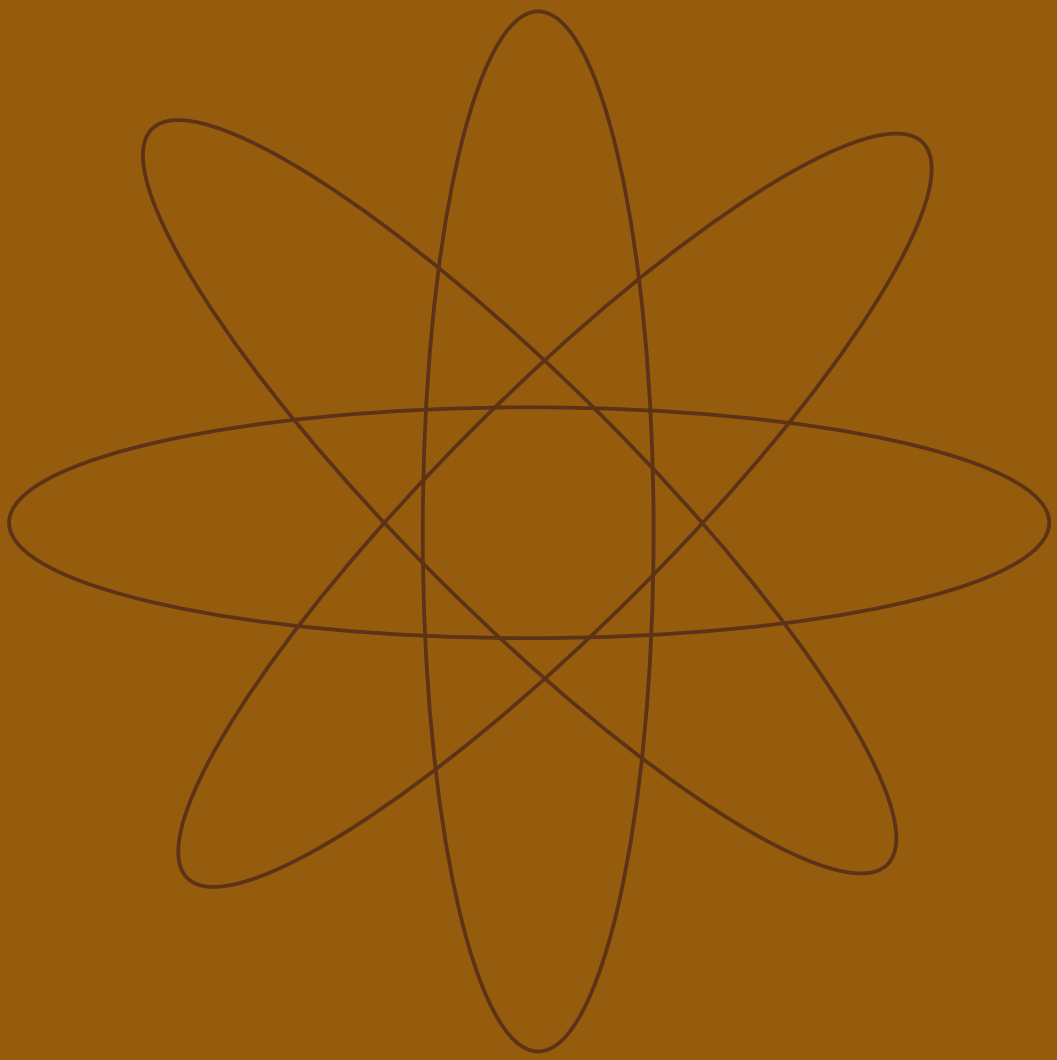
Patnáct let od havárie Černobylu



Důsledky a poučení

SÚJB

Patnáct let od havárie Černobylu — důsledky a poučení

Kolektiv autorů

SÚJB
2001

Obsah

Úvodem ... 5

Než začnete číst ... 7

Co se vlastně stalo ... 10

Co bylo u nás 16

Patnáct let od havárie Černobylu
— bilance zdravotních následků ... 19

Grafy podílů jednotlivých typů ozáření ... 29

Závěrem ... 31

© Státní úřad pro jadernou bezpečnost, Praha *(sujb@sujb.cz)*
© Státní ústav radiační ochrany, Praha *(suro@suro.cz)*
Autorský kolektiv:
Ing. Dana Drábová *(SÚJB)*
+ Ing. Ivan Bučina
Prof. MUDr. Vladimír Klener, CSc. *(SÚJB)*
Ing. Irena Malátová *(SÚRO)*
Ing. Jiří Hůlka *(SÚRO)*
MUDr. Emil Kunc, CSc. *(SÚRO)*
Editor: Ing. Pavel Pittermann *(SÚJB — pavel.pittermann@sujb.cz)*
Vydavatelství: Ing. Břetislav Janík (*janik@japhila.cz*)
Tisk: Moraviatisk Vyškov, spol. s r.o. (*moravia@vy.gin.cz*)
Vyšlo v dubnu 2001, Praha

Úvodem

„Když si letos připomínáme patnáctileté výročí jaderné katastrofy v Černobylu, není to pro experty z řady dotčených oborů jen rekapitulace historické události. Zkušenost jednotlivců i lidského rodu je založena mimo jiné na ochotě poučovat se z vlastních selhání. Nelze pochybovat o tom, že výbuch jaderného reaktoru 4. bloku černobylské elektrárny dne 26. dubna 1986 v 1 hodinu 23 minut místního času a události, které po výbuchu následovaly, byly tragickým selháním s následky nebývalých rozměrů. První odezvou na tragédii bylo mohutné vzepětí organizátorů technické pomoci a humanitárních aktivit. Přitom však úsilí odborníků od počátku směřovalo také k analýze podmínek a okolností vzniku nehody a k podrobné dokumentaci důsledků. Vědci jsou povinni shromáždit všechny užitečné informace a vyvodit z nich poučení, které by bylo přínosem, jak pro tuto generaci, tak pro generace příští. Mohou přitom vyvstat i širší problémy související s popisem a rozborem příčin úmrtí, či poruch zdraví. Někdy se v této souvislosti hovoří o neplánovaném experimentu, který je třeba využít pro obohacení našich vědomostí. Není to právě jemnocitné označení a mohlo by být nespravedlivou narážkou na nehumánní postoj vědců. I odborníci jsou si však při své analytické práci vědomi, že kulisu jejich vyšetřování tvoří nezměrné lidské utrpení a chovají k němu patřičnou úctu."

(Prof. MUDr. V. Klener, Csc. v úvodu k článku v časopise Vesmír 80, duben 2001)

Havárie jaderné elektrárny v Černobylu zanechala hlubokou stopu v myšlení jak odborníků v oborech týkajících se využití jaderné energie, tak i široké veřejnosti na celém světě. Také odborné instituce a státní orgány téměř všech evropských států, odpovědné za ochranu zdraví svých občanů, byly postaveny před neočekávanou situaci. Musely zvládnout nové aktuální úkoly a později se zamyslet nad tím, jak se z této mimořádné události poučit.

Samostatný vědní obor ochrany před zářením, který se rozvinul zejména po druhé světové válce v návaznosti na rozmach jaderného průmyslu s jeho vojenskou a civilní větví, si klade za cíl usměrňovat využívání zdrojů ionizujícího záření a jaderné energie způsobem, který chrání zdraví jednotlivců i populace včetně budoucích generací. V široké mezinárodní spolupráci jsou vypracovávány postupy jak tento cíl naplňovat jak za podmínek normálního provozu, kdy zdroje jsou pod kontrolou, tak i za mimořádných situací, kdy vlivem lidského činitele nebo technického selhání jsou ohroženi nekontrolovaným ozářením jednotlivci nebo i skupiny lidí. V souvislosti s připomínkou černobylské tragédie je účelné začít střízlivě a s patřičným odstupem hodnotit všechny její důsledky. Podkladem pro to jsou věrohodná data. Státní úřad pro jadernou bezpečnost ve spolupráci se Státním ústavem radiační ochrany se proto rozhodl shromáždit v této publikaci informace a data, která by k takovému objektivnímu hodnocení mohla přispět.

Než začnete číst ...

Stručný výklad hlavních pojmů, veličin a jednotek

Radioaktivita: samovolná přeměna atomových jader spojená s emisí ionizujícího záření (přírodní jev, vlastnost látek nikoli veličina).

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

Becquerel: jednotka pro aktivitu v soustavě SI; jeden becquerel (Bq) se rovná jedné reciproké sekundě (s^{-1}), čili jedné přeměně za sekundu (1/s); dřívější jednotka aktivity 1 curie (Ci) je rovna $3,7 . 10^{10}$ Bq; hmotnostní aktivita se měří v Bq na kilogram (Bq/kg), objemová v Bq/m^3 nebo Bq/l, plošná v Bq/m^2.

Nuklid: název pro atomy, mající v jádře vždy stejný počet protonů i neutronů; nuklidy, které mají stejný počet protonů, ale různý počet neutronů (různou atomovou hmotnost) jsou izotopy určitého prvku.

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

Poločas: míra rychlosti, se kterou se radionuklid přeměňuje na jiný nuklid; doba, za kterou z původního počtu radioaktivních jader zbude polovina.

Ionizující záření: záření, způsobující ionizaci látek i jiné podobné jevy; vznikají přitom dvě elektricky různě nabité části, vznikají volné elektrony.

Dávka: množství energie předané určité látce ionizujícím zářením v objemu s jednotkovou hmotností; míra účinků ionizujícího záření.

Gray: jednotka pro dávku ionizujícího záření v soustavě SI; jeden gray (Gy) je roven jednomu joulu připadajícímu na kilogram (J/kg).

Dávkový příkon: rychlost se kterou dávka narůstá; měří se v grayích za sekundu ($Gy . s^{-1}$ nebo Gy/s), za hodinu (Gy/h) apod.

Dávkový ekvivalent: biofyzikální veličina berouci ohled na rozdíly v působení různých druhů ionizujícího záření na buňky lidské tkáně; při větší hustotě ionizace jsou účinky záření větší a stejné dávce pak odpovídá větší dávkový ekvivalent.

Sievert: jednotka pro dávkový ekvivalent v soustavě SI; zvláštní název pro J/kg v ochraně před zářením; pro záření beta, gama a rentgenové platí, že dávce 1 Gy odpovídá dávkový ekvivalent 1 Sv; dřívější jednotkou dávkového ekvivalentu byl rem (1 rem = 0,01 Sv); u částic alfa a neutronů podle jejich energie odpovídá dávce 1 Gy dávkový ekvivalent vyšší, a to až 10 nebo 20 Sv; podobně jako u dávky existuje veličina příkonu dávkového ekvivalentu.

Efektivní dávkový ekvivalent: veličina v ochraně před zářením, umožňující hodnotit ozáření lidského organismu vcelku, i když je lidské tělo ozářeno nerovnoměrně; měří se také v sievertech; respektuje různou citli-

vost jednotlivých orgánů a tkání lidského těla z hlediska vzniku zhoubného bujení a dědičnosti (tzv. stochastické účinky); roční limity ozáření lidí se stanovují v této veličině.

Kolektivní (efektivní) dávkový ekvivalent: součet dané veličiny pro všechno obyvatelstvo nebo jeho skupinu; je to míra celospolečenské zdravotní újmy způsobené ozářením lidí.

Zevní ozáření: ozáření lidského těla způsobené zdrojem ionizujícího záření ležícím vně těla.

Vnitřní ozáření (vnitřní kontaminace): ozáření lidského těla způsobené radionuklidy přijatými do organismu vdechováním vzduchu nebo používáním potravin a vody; jeho mírou je aktivita radionuklidu, která vstoupila do těla, tzv. příjem radionuklidu; od něj se odvozuje tzv. úvazek dávkového ekvivalentu, což je dávkový ekvivalent, který člověk obdrží od radionuklidu během doby jeho pobytu v těle; pro jednotlivé radionuklidy jsou roční limity různé, podle toho, jak velký úvazek dávkového ekvivalentu odpovídá jednotce aktivity přijatého radionuklidu.

Cesty expozice lidí

Radionuklidy, které unikají do prostředí, se k člověku dostávají různými cestami. Přitom je člověk exponován ionizujícímu záření a proto mluvíme o expozičních cestách.

Radionuklidy, nacházející se v ovzduší a radionuklidy, které se z ovzduší usadily na povrchu země, vegetace, budov, komunikací apod. ozařují člověka zevně. Velikost ozáření závisí na druhu radionuklidu — přesněji řečeno na druhu a energii vysílaného záření a na poločasu přeměny daného radionuklidu, dále na tom, jak dlouho člověk pobývá venku nebo uvnitř budov, jak silné stěny budovy mají, jak se větrá apod. Radionuklidy z ovzduší jsou člověkem vdechovány a jsou zdrojem vnitřního ozáření. Dávka z inhalace (vdechnutí) závisí na stejných faktorech jako byly uvedeny pro dávku ze zevního ozáření, navíc závisí na fyzikálně—chemických vlastnostech daných radionuklidů. Dalším zdrojem vnitřního ozáření jsou radionuklidy, které se dostaly do potravního řetězce a jsou člověkem požity (ingesce). Nejdříve, z hlediska časového sledu po uvolnění do prostředí při havárii, to jsou radionuklidy, které z ovzduší vypadávají ve formě suchého nebo mokrého spadu s deštěm do vody a na povrch vegetace a člověkem mohou být požity s pitnou vodou nebo s nedostatečně očištěnou zeleninou či ovocem.

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

Podrobná znalost všech možných expozičních cest je nezbytná pro ocenění příspěvku k celkové expozici člověka. Na základě takového rozboru se pak při havarijním úniku radionuklidů do prostředí mohou zavést opatření ke snížení či odvrácení expozice obyvatelstva.

Při havárii jaderného zařízení se nejsnáze do ovzduší dostávají vzácné radioaktivní plyny, které jsou zdrojem zevního ozáření a v menší míře vnitřního ozáření inhalační cestou. Dále se uvolňují těkavé radionuklidy, z nichž nejvýznamnější jsou radioizotopy jódu. Ty se dostávají k člověku všemi uvedenými cestami, a protože jde o prvek biogenní, který se kumuluje ve štítné žláze člověka i všech savců, jsou z hlediska expozice člověka obvykle nejdůležitější.

Z dalších těkavých radionuklidů jsou důležité radioizotopy cesia. Cesium je homologem draslíku, který je obsažen ve všech živých organismech a chová se proto v živých organismech obdobně. Pro dlouhý poločas rozpadu ^{137}Cs (30 let) je tento radionuklid z hlediska ozáření člověka velmi významný.

Méně pravděpodobný je při haváriích jaderných zařízení únik netěkavých štěpných

produktů jako je stroncium či transurany. Tyto radionuklidy byly však – z hlediska dávky člověku – velmi významné při zkouškách jaderných zbraní v atmosféře, kdy se do ovzduší dostaly veškeré štěpné a aktivační produkty, vzniklé při výbuchu.

Jak se chránit

Uniknou-li při radiační havárii radioaktivní látky do životního prostředí, potom ozáření obyvatel může být pouze omezováno opatřeními, která zasahují do normálního způsobu života lidí. Jednotlivá opatření se uvádějí v život na základě jejich předpokládané účinnosti. Uvažují se přitom nepříznivé průvodní jevy těchto opatření včetně zdravotních rizik.

Ukrytí záleží v pobytu osob uvnitř domů za současného uzavření oken a dveří a při vypnutí případné nucené ventilace. Podle okolností je při ukrytí vhodná ještě improvizovaná ochrana dýchacích cest. Účelem ukrytí je ochrana proti zevnímu záření gama z radioaktivního mraku a z depozitu radioaktivních látek na zemi a ochrana proti inhalaci jódu a radioaktivních aerosolů.

Přípravky stabilního (neradioaktivního) jódu jsou jediným profylaktickým prostředkem, jehož hromadné podávání obyvatelstvu má v případě radiační havárie jaderně energetického zařízení praktický význam. Stabilní jód podávaný nejčastěji jako jodid draselný (KI) ve formě tabletky nasytí štítnou žlázu jódem, takže radioaktivní jód, který je významnou součástí radioaktivního mraku, do ní pronikne jen omezeně.

Ochrana povrchu těla má význam při nutnosti pobytu na volném prostranství. K ochraně proti zevnímu ozáření částicemi beta deponovanými na kůži slouží plášť nebo pláštěnka, boty, rukavice a ochrana hlavy (čepice, klobouk). Ústa a nosní vchody se chrání alespoň navlhčenou rouškou, kapesníkem, čímž se omezí inhalace radioaktivních aerosolů.

Evakuace je účinné ale náročné opatření a zajišťuje se zpravidla jen pro malé skupiny lidí v bezprostřední blízkosti havarovaného jaderně energetického zařízení.

Opatřením omezujícím dávky z ingesce (požití) je usměrňování konzumu poživatin. Zákaz se týká především konzumu čerstvých poživatin z lokálních zdrojů (mléka, zeleniny, pitné vody) dokud není ověřena jejich nezávadnost. Převedení výkrmu dobytka na skladovanou píci (seno, siláž) je významné zejména u dojnic a ovcí a to především v místech, kde lze vlivem dešťových srážek očekávat vyšší hodnoty depozice radioaktivních látek.

Co se vlastně stalo ...

Dne 26. dubna 1986 v časných ranních hodinách místního času došlo na 4. bloku černobylské jaderné elektrárny k největší havárii jaderného zařízení v historii. Po výbuchu reaktoru a během následného požáru, který trval až do 10. května 1986, uniklo do životního prostředí velké množství radionuklidů. Stopová množství byla měřitelná téměř na celé severní polokouli. To, že havárie nebyla ihned oficiálně ohlášena sovětskými orgány a pozdější informace byly velmi kusé, způsobilo v některých zemích u obyvatelstva značné obavy, hraničící s panikou, která se — bohužel — v jisté míře přenesla až do současnosti.

Černobylská jaderná elektrárna ležící asi 130 km severně od hlavního města Ukrajiny Kyjeva sestávala ze čtyř provozních bloků, z nichž v každém pracoval jaderný reaktor typu RBMK 1000. Čtvrtý blok jaderné elektrárny Černobyl byl uveden do provozu v prosinci 1983 jako poslední v řadě.

Reaktor RBMK byl používán v bývalém SSSR od roku 1954, kdy jím byla vybavena jaderná elektrárna v Obninsku. Před havárii bylo provozováno v sovětských jaderných elektrárnách celkem 14 takových bloků s reaktorem RBMK 1000. Štěpná řetězová reakce v reaktorech RBMK 1000 probíhá v palivu, jehož základem je kysličník uranu (UO_2) obohacený na 2 % izotopem ^{235}U. Palivové články z tohoto materiálu jsou umístěny v tlakových kanálech jimiž prochází chladicí voda. Všechny tlakové kanály jsou umístěny v grafitovém moderátoru, v němž se vysokoeneregetické neutrony ze štěpení zpomalí na energii nižší, s níž jsou poté schopny vyvolat další štěpení paliva. Tomuto konstrukčnímu celku říkáme aktivní zóna. U černobylského reaktoru byla vysoká 7 m, v průměru měla 12,2 m a byla osazena 1661 tlakovými kanály s palivem a 211 absorbčními tyčemi regulace výkonu a havarijní ochrany.

Nominální výkon reaktoru je 1000 MWe resp. 3200 MWt při tlaku chladiva 7 MPa a výstupní teplotě chladiva — parovodní směsi — z reaktoru 285 °C. Chlazení reaktoru je jednookruhové. Parovodní směs z kanálů je vedena do separátorů, kde je parní složka oddělena a pára je přiváděna přímo do turbín 2 x 500 MWe. Voda ze separátorů, ochlazovaná napájecí vodou dodávanou napájecími čerpadly z kondenzátoru, je čerpána hlavními cirkulačními čerpadly (6 pracovních a 2 záložní) do reaktoru.

Podstatným rysem reaktoru RBMK-1000 je kladný dutinový (parní) teplotní koeficient reaktivity. V praxi to znamená, že s rostoucím množstvím páry se zvyšuje množství neutronů v aktivní zóně a tím i počet štěpení jader atomů uranu, roste výkon a opět se tak zvyšuje teplota i množství páry. Aby se tento proces nekontrolovaně nerozvíjel, je třeba regulačními tyčemi (jsou schopny absorbovat ve zvýšené míře vznikající neutrony) celý proces řídit tak, aby bylo při dosažení provozního výkonu reaktoru dosaženo rovnováhy mezi vznikem neutronů a jejich spotřebou pro udržení reaktoru v nepřetržitém chodu. Hovoříme o tom, že kladná reaktivita, která vzniká v aktivní zóně reaktoru, je kompenzována velkým počtem absorbčních tyčí systému regulace výkonu.

Sled událostí

25. dubna 1986 bylo zahájeno odstavení 4. bloku z provozního výkonu s ohledem na plánovanou opravu. Před odstavením reaktoru měl být proveden celkem běžný experiment, který měl vyzkoušet funkci nového regulátoru magnetického pole rotoru

a ověřit, jestli bude turbogenerátor po rychlém uzavření přívodu páry do turbíny schopen při svém setrvačném doběhu ještě zhruba 40 vteřin napájet proudem čerpadla havarijního chlazení. Experiment měl proběhnout podle následujícího schématu:

a) snížení výkonu reaktoru na 25—30 % (700—1000 MWt), což je nejnižší výkon, při kterém je povolen provoz tohoto typu reaktoru,
b) odstavení prvního ze dvou turbogenerátorů připojených k reaktoru,
c) odpojení systému havarijního chlazení (pokud by nebylo odpojeno a začalo v souladu s předpisy působit v průběhu testu, byly by výsledky měření nevěrohodné),
d) přerušení přívodu páry ke druhé turbíně; tento krok měl zároveň být signálem pro systém havarijní ochrany k automatickému odstavení reaktoru.

Experiment byl od počátku pojímán jednoznačně jako elektroenergetická záležitost, nevýznamná z hlediska jaderné bezpečnosti, a řídili jej elektrotechnici, nikoli specialisté na provozní režimy a jadernou bezpečnost. Na rozdíl od plánu probíhal experiment následovně: Snižování výkonu reaktoru začalo 25. dubna ve 13 hodin. Ve 13:05 byl výkon snížen na polovinu a byl odstaven první turbogenerátor. Krátce poté byl odpojen systém havarijního chlazení. Pak bylo na neplánovanou žádost energetického dispečinku další snižování výkonu pozastaveno téměř na devět hodin. Během této doby zůstal systém havarijního chlazení odpojen. Průběh dalších událostí to sice příliš neovlivnilo, ale svědčí to o postoji provozního personálu k dodržování provozních předpisů. Ty samozřejmě delší provoz bez připraveného havarijního dochlazování nepovolují. Časový odklad způsobil, že experiment převzala k provedení nová směna, která na něj nebyla připravena.

Od 23:10 pokračovalo další snižování výkonu přitom však došlo k další neobvyklé události. Chybou operátora došlo k prudkému pokles výkonu reaktoru až na 30 MWt — to znamená že došlo prakticky k úplnému zastavení štěpné řetězové reakce. Při provozu na tak nízkém výkonu dochází k prudkému nárůstu koncentrace jader ^{135}Xe (hovoříme o tzv. xenonové otravě reaktoru) a reaktoru hrozí nebezpečí „pádu do jódové jámy". To je stav, v němž při absenci štěpení převládá v palivu v důsledku jeho radioaktivních přeměn tvorba parazitních radionuklidů absorbujících přítomné neutrony v takové míře, že štěpnou reakci nelze po jistou dobu obnovit. V tu chvíli měli operátoři experiment bezpodmínečně ukončit a reaktor definitivně odstavit. Dostali jej totiž do značně nestabilního stavu mimo oblast povoleného provozu. I přes tuto první hrubou chybu se však rozhodli pokračovat v experimentu. Značné otravě reaktoru se systém regulace výkonu bránil vytahováním regulačních tyčí z aktivní zóny, což způsobovalo růst výkonu reaktoru a současné snižování operativní zásoby reaktivity. Půl hodiny před havárii se výkon reaktoru stabilizoval na 200 MWt. V takovém stavu byl však provoz reaktoru zakázán. Reaktor byl v nestabilním stavu, operátoři však pokračovali dál v přípravě experimentu. Dostali se přitom do velkých problémů s udržením správných hodnot tlaku a obsahu páry v reaktoru. Snížený vývin páry v reaktoru měl za následek pokles tlaku a hladiny vody v separátorech. Snížení hodnot těchto parametrů je signálem pro zafungování antihavarijní ochrany I. stupně (z důvodu nevyhovujícího chlazení aktivní zóny), a za normálních okolností by v této době zasáhly odpovídající systémy automatické ochrany. Operátor však tuto ochranu zablokoval, aby zabránil odstavení reaktoru a mohl pokračovat v experimentu. Tím se dopustil druhé osudové chyby. Reaktor v té době pracoval podle plánu pouze s jedním připojeným turbogenerátorem, jehož odstavení se připravovalo v úplném závěru experimentu.

V 01:22 (26. dubna) si operátoři nechali vypsat počítačové vyhodnocení stavu reaktoru. Viděli, že počet regulačních tyčí v aktivní zóně odpovídá necelé polovině povolené hodnoty. Po tomto zjištění měli okamžitě odstavit reaktor, ještě stále to bylo i přes předchozí hrubé chyby možné. Opět se však rozhodli pokračovat. K šesti dosud pracujícím hlavním cirkulačním čerpadlům i obě záložní. Přitom šest pracujících čerpadel plně postačí pro chlazení aktivní zóny i při práci reaktoru na nominálním výkonu 3200 MWt. Připojení obou záložních hlavních cirkulačních čerpadel bylo motivováno snahou operátora zajistit dostatečné chla-

zení aktivní zóny i po skončení plánovaného experimentu, při kterém měly 4 hlavní cirkulační čerpadla sloužit jako elektrická zátěž dobíhajícího turbogenerátoru. Zvýšený průtok chladiva aktivní zónou měl však za následek snížení obsahu páry v chladivu a tím další pokles reaktivity, na který systém regulace výkonu reagoval dalším vytahováním regulačních tyčí. Provozní zásoba reaktivity reaktoru poklesla na hodnotu 6 až 8 tyčí, což bylo v naprostém rozporu s předpisy požadovanou zásobou 30 tyčí. Otrávený reaktor o teplotě chladiva jen o málo větší než je teplota sytosti je velmi nestabilní. I velmi malá změna teploty nebo tlaku chladiva vyvolává v takovém stavu velké změny v obsahu páry a tím i velké změny výkonu. Vytažená absorbční tyč je při tom málo účinná při regulaci reaktoru, protože zasahuje pouze do oblastí s nejnižším neutronovým tokem a relativně velká změna její polohy ovlivní výkon reaktoru pouze málo.

Jednu minutu před začátkem experimentu operátor prudce snížil průtok napájecí vody, což mělo za následek zvýšení teploty vody na vstupu do reaktoru. Cílem bylo snad snížení budoucího přívodu teplé vody do separátoru po chystaném otevření přepouštěcí stanice do kondenzátoru.

V 01:23 se operátoři dopustili poslední osudové chyby. Zablokovali havarijní signál, který by po uzavření přívodu páry na turbínu automaticky odstavil reaktor. Chtěli si totiž v rozporu s plánem zajistit opakování experimentu, kdyby se neprokázalo prodloužení doby dodávky elektrické energie od turbogenerátoru. Kromě toho byl stále vypnut i systém havarijního chlazení aktivní zóny s cílem vyhnout se jeho zásahu do průběhu experimentu.

Uzavřením rychlouzavíracího ventilu turbogenerátoru začal plánovaný experiment. Reaktor pracoval dál na výkonu 200 MWt. Snížení výkonu 4 hlavních cirkulačních čerpadel od dobíhajícího turbogenerátoru vedlo k podstatnému snížení průtoku chladící vody reaktorem, rostla její teplota i tlak. To mělo spolu s nestabilním stavem reaktoru za následek zvýšený vývin páry a tím i zvýšení reaktivity a výkonu reaktoru. Reaktor byl v nestabilním stavu s rostoucí reaktivitou — díky kladnému dutinovému teplotnímu koeficientu reaktivity. Systém regulace výkonu zpočátku bránil vzrůstu výkonu zasouváním absorbčních tyčí. Po jejich úplném zasunutí pokračoval vzrůst výkonu naprosto nekontrolovatelně a dosáhl výkon cca 1600 MWt. Pokračující pokles průtoku chladiva a vzrůst množství páry vedl ke krizi varu, přehřátí paliva a destrukci pokrytí paliva. V tlakových kanálech rostl tlak do té míry, že nakonec překonal výtlak pracujících hlavních cirkulačních čerpadel a zcela zabránil chlazení aktivní zóny. Vzrůst tlaku vedl nakonec k destrukci tlakových kanálů i k narušení geometrie aktivní zóny.

V 01:23:40 se katastrofa již neodvratně blížila. Operátoři dali tlačítkem signál havarijní ochrany I. stupně k havarijnímu odstavení reaktoru zasunutím regulačních tyčí. Ty však byly téměř všechny úplně vytažené z aktivní zóny a jejich účinek byl proto příliš pomalý na to, co se v reaktoru dělo. Havarijní tyče se začaly rychlostí cca 0,4 m/s zasouvat do aktivní zóny, ale „po několika sekundách bylo slyšet údery" a tyče se zastavily před dolní polohou. Přesto se v tomto okamžiku zřejmě zastavila řetězová reakce. Při uvedené rychlosti se za 10 sekund tyče zasunou o 4 m, takže v čase 01:23:50 musela tedy již být narušena geometrie uprostřed aktivní zóny.

Přibližně v 01:24, to znamená pouhou jednu minutu po zahájení experimentu, došlo postupně ke dvěma výbuchům. Náhlý vzrůst produkce tepla způsobil porušení palivových článků a reakcí vody s malými částicemi horkého paliva došlo k výbuchu páry. Reaktor byl přetlakován tak, že pára při první explozi zvedla a odsunula horní betonovou desku reaktoru o váze 1000 t. Ke druhé explozi došlo o dvě až tři sekundy později.

Nebylo jednoznačně objasněno zda tato exploze byla způsobena reakcí vodíku vzniklého chemickými reakcemi mezi unikající párou a zirkoniem (které je obsaženo v trubkách tlakových kanálů) nebo reakce mezi párou a grafitem se vzduchem nebo to byl důsledek druhé výkonové exkurze. Exploze rozmetaly část aktivní zóny, včetně paliva a hořícího grafitu, způsobily destrukci horní části budovy reaktoru a poškození a obnažení aktivní zóny a vedly ke vzniku požáru na střeše turbínové haly a v prostorách reaktorové haly.

V 02:20 byl požár na 4. bloku lokalizován, o 3 hodiny později uhašen za cenu životů hasičů, kteří tak zabránili rozšíření požáru na další bloky elektrárny.

Likvidace následků havárie

Prvním krokem likvidace následků havárie bylo hašení požárů v reaktorové hale a na střeše turbínové haly čtvrtého bloku. Hašení provádělo především 29 mužů speciálního požárního útvaru. V 05:00 hodin byl požár zlikvidován. Následkem požáru došlo ke zhroucení zavážecího stroje a části střechy reaktorové haly na obnaženou aktivní zónu.

Fotografie pořízené z vrtulníků 3 dny po havárii ukázaly, že téměř čtvrtina grafitových bloků hoří. Hoření grafitu probíhalo při teplotě kolem 5000 °C, takže palivo a jeho okolí se určitě roztavilo (teplota tavení UO_2 je cca 3100 °C). Hoření grafitu však pravděpodobně probíhalo pouze na povrchu aktivní zóny. Uvnitř aktivní zóny se vyvíjelo pouze zbytkové teplo rozpadem štěpných produktů a teplota paliva nepřesáhla podle sovětských odhadů 2000 °C, takže nemohlo dojít k jeho tavení. Při této teplotě se však z paliva uvolňovaly vzácné plyny a těkavé štěpné produkty, především Xe, Kr, J, Te a Cs a dostávaly se do atmosféry.

Aby se zabránilo dalším únikům, byl reaktor postupně zasypán 5000 t sloučenin bóru, dolomitu, písku, hlíny a olova shazováním z výšky kolem 200 m z rychle přelétajících vrtulníků. Reaktor byl tak překryt vrstvou sypkých materiálů, které uhasily požár grafitu a částečně absorbovaly unikající radioaktivní aerosoly. Podle sovětských zpráv byl do 6. května únik aktivity prakticky zastaven. Od 7. května byla aktivní zóna chlazena tekutým dusíkem a 8. května klesla teplota v ní na cca 300 °C. Do 17. května (tj. do 20 dnů po havárii) poklesla teplota v aktivní zóně na 200—250 °C a stabilizovala se při přirozeném chlazení proudícím vzduchem.

Dva týdny po havárii bylo rozhodnuto zakonzervovat celý havarovaný blok včetně strojovny do betonové obálky s vestavěným chladícím systémem — tzv. „sarkofágu". Tento chladící systém musí odvádět zbytkové teplo vyvíjené v aktivní zóně po dobu několika set let.

Příčiny vzniku havárie

O příčinách havárie se polemizovalo od samého jejího začátku a polemizuje se dodnes. S odstupem času s využitím výsledků odborných analýz mnoha světových specialistů i díky detailnějším informacím ze strany ruských a ukrajinských oficiálních míst, je zřejmé, že havárie na 4. bloku byla souhrnem mnoha faktorů zasahujících do všech oborů a stupňů využívání jaderné energie. Z nich je třeba uvést zejména:

a) zásadám bezpečného provozu ne zcela vyhovující projekt reaktoru RBMK, zejména v oblasti reaktorové fyziky (kladný dutinový teplotní koeficient reaktivity, zastaralý projekt těchto reaktorů, které vznikly úpravou z vojenských reaktorů na výrobu štěpných materiálů pro sovětský jaderný program, nízká úroveň automatizační techniky);
b) selhání lidského faktoru na všech úrovních; na úrovni provozního personálu způsobené „provozní slepotou", navozující pocit absolutní profesionality a zbytečnosti jakýchkoliv bezpečnostních omezení ve formě předpisů, operativních programů apod.; na úrovni vedení elektrárny a resortu způsobené ztrátou pocitu odpovědnosti za jadernou bezpečnost, vyvolanou direktivními, často politicky motivovanými rozhodnutími vyšších složek řízení, ovlivněnou nesmyslným utajování všech faktů z oblasti jaderné energetiky a současně nedostatečným, politicky ovlivněným výkonem státního dozoru.

V kontrastu s těmito nedostatky vystupují do popředí doslova hrdinské činy prostých lidí zejména hasičů, vojáků a v pozdější době stavitelů sarkofágu, kteří nasazením vlastních životů přispěli ke snížení následků havárie.

Šíření radioaktivních látek z havarovaného reaktoru

První signály úniku radionuklidů zachytilo Švédsko 27.4.1986. Mírné opoždění zpráv

z Finska bylo způsoben stávkou personálu monitorovacích stanic, která byla však po oznámení podezření na havárii přerušena a personál se vrátil do práce. Po prošetření, že nejde o havárii na žádné ze švédských jaderných elektráren se pozornost zaměřila na blízké sovětské elektrárny, kde podle směru větru připadala v úvahu zejména jaderná elektrárna Ignalino v Litvě. Ke zjištění, že jde o černobylskou jadernou elektrárnu, napomohlo vyhodnocení amerických družicových snímků. Z těchto snímků byla později, podle oblasti spáleného lesa, odhadnuta i dávka, která může takovýto efekt způsobit a tedy i velikost úniku. Švédští odborníci již 28. dubna 1986 na základě vlastních měření odhadli o jak velkou nehodu se jedná.

Podle směru proudění vzduchu sovětské orgány pravděpodobně očekávaly, že se radioaktivní oblak dostane na východ a že tedy v severní a západní Evropě se černobylská havárie neprojeví. Ve dnech havárie byl v Černobylu vítr velmi slabý a jeho rychlost se stále měnila. Výbuch černobylského reaktoru vynesl radioaktivní látky do výše asi 1500 m a v této výšce proudil vzduch z jihovýchodu rychlostí 8 až 10 m/s. Vlivem výbuchu a vysokých teplot z následného požáru se do této výšky dostaly i radioaktivní látky, které byly unášeny přes západní část SSSR směrem na Finsko a Švédsko. Dne 30. dubna 1986 se změnil směr větru, vzduch proudil ze severovýchodu. Do střední Evropy, a tedy i na území tehdejšího Československa, se dostaly kontaminované vzdušné masy více směry, severní stopa nad Skandinávií se obrátila a se zpožděním se dostala i na naše území.

Celkové množství uniklých radioaktivních látek z černobylského reaktoru (tzv. zdrojový člen) bylo odhadováno odborníky mnoha zemí na základě měření kontaminace ovzduší, atmosférického spadu a s použitím modelů šíření v atmosféře. První odhady úniků byly provedeny na základě měření spadu na území tehdejšího SSSR a celkový únik poněkud podhodnocovaly, protože nebyl vzat v úvahu spad z ostatních evropských zemí. Další odhady pak berou v úvahu veškeré uniklé množství radionuklidů a jsou tedy pro některé, zejména těkavé radionuklidy poněkud vyšší. Rovněž analýzy složení spadu přímo na místě havarovaného reaktoru přispěly k upřesnění odhadů. Velká pozornost, která se upřesnění odhadu zdrojového členu věnuje, je vyvolána mimo jiné tím, že takto lze též realističtěji odhadnout dávky obyvatelstvu, zejména na územích poblíže Černobylu.

Pokud se týká chemicko-fyzikální formy uniklých radionuklidů, jednalo se o radioaktivní vzácné plyny, zejména izotopy xenonu a kryptonu, jichž uniklo z havarovaného reaktoru téměř 100 %, dále to byly radioizotopy jódu v plynné fázi, ve formě aerosolů a ve formě organické. Poměry mezi jednotlivými formami jódu se lišily v závislosti na čase a místě, kde byly měřeny. Na našem území ve dnech 30.4. a 1.5.1986, tedy v období, kdy byly objemové aktivity ^{131}I ve vzduchu nejvyšší, bylo 30 % jódu ve formě aerosolu, asi 35 % elementárního v plynné formě a asi 35 % organicky vázaného. Celkově z paliva uniklo asi 50 až 60 % jódu.

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

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

Částečky rozprášeného paliva, obsahující netěkavé štěpné produkty se vyskytovaly též ve formě tzv. horkých částic. Jejich množství bylo největší v místech poblíže Černobylu, nicméně byly nalezeny i ve Skandinávii a v jihovýchodní Evropě. Jiný druh horkých částic vznikl kondenzací těkavých radionuklidů, byly identifikovány částice obsahující takřka výhradně cesium či ruthenium. Některé částice obsahovaly nerozpustné křemičitany, pocházející pravděpodobně z betonu, byly

nalezeny horké částice, které kromě štěpných produktů obsahovaly i produkty aktivační jako ^{60}Co, což znamená, že obsahovaly materiál reaktoru i vlastní stavby.

Radionuklidové složení částic i jejich fyzikální a chemická forma se lišily rovněž v závislosti na fázích havárie — nejdříve došlo k výbuchu, při němž se do ovzduší dostalo rozprášené palivo, pak reaktor hořel a při vysokých teplotách unikaly těkavé radionuklidy, při hašení byl reaktor zasypáván borem, olovem a dolomitem, což se mohlo též projevit na složení úniků. Vlivem měnících se meteorologických podmínek se tak do různých částí Evropy dostávaly kontaminované vzdušné masy, vzniklé v různých fázích havárie a tedy s různým složením. Velikost depozice pak ovlivňovaly nejvíce dešťové srážky, které se na daném území v době přechodu vzdušných kontaminovaných mas vyskytly.

Nerovnoměrné rozložení spadu je nejvýraznější na vysoce kontaminovaných územích Ukrajiny, Běloruska a Ruské federace. Depozice radionuklidů na povrchu je nejdůležitější zdroj kontaminace potravin a je významná z hlediska zevního ozáření obyvatel, nelze z ní ale jednoznačně odvozovat dávky obyvatelstvu, protože např. inhalační složka vnitřní kontaminace mohla být významná právě v oblastech, kde nepršelo. Měřitelná povrchová kontaminace se projevila na území celé Evropy. První přehled depozice byl vypracován Vědeckým výborem OSN pro účinky atomového záření (UNSCEAR, 1988). Zpřesněné údaje byly připraveny Evropskými společenstvími.

Co bylo u nás ...

V Československu byl v době černobylské havárie státní dozor nad radiační ochranou v kompetenci ministerstev zdravotnictví České republiky a Slovenské republiky a byl realizován činností hlavních hygieniků obou republik a hygieniků krajských. Příslušní odborníci působili jednak v Centru hygieny záření Institutu hygieny a epidemiologie (CHZ IHE) v Praze, na Slovensku ve Výskumném ústavu preventívneho lekárstva v Bratislavě, dále pak v odborech hygieny záření Krajských hygienických stanic (KHS) a ve specializovaném Ústavu hygieny práce v uranovém průmyslu. Odborníci hygieny záření byli dobře seznámeni s problematikou radiačních nehod a s mezinárodními dokumenty k těmto otázkám, k nimž patřily zejména publikace Mezinárodní agentury pro atomovou energii, Světové zdravotnické organizace a Mezinárodní komise pro radiologickou ochranu (ICRP). Soustavné úsilí odborníků radiační ochrany a jaderné bezpečnosti vedlo u příležitosti spuštění jaderné elektrárny V1 v Jaslovských Bohunicích na Slovensku k vydání Pomůcky pro civilní ochranu „Ochrana obyvatelstva a opatření v národním hospodářství při radiační havárii JEZ" (CO-51-6) již v r. 1980. Tato pomůcka počítala s možností nadprojektové havárie a obsahovala mj. úrovně dávek, při nichž jsou doporučena protiopatření na ochranu obyvatelstva. Tyto úrovně jsou totožné s úrovněmi, které jsou uvedeny ve Vyhlášce Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o požadavcích na zajištění radiační ochrany 184/1997Sb, platné v současné době. Komise vlády ČSSR pro koordinaci opatření při radiační havárii JEZ (Vládní havarijní komise – VHK) schválila Směrnici o zásadách monitorování při radiační havárii JE v únoru 1986. Tato směrnice však nepočítala s dopadem velké havárie jaderného zařízení ležící v zahraničí na naše území, při černobylské havárii proto nebyla zcela dokonalým vodítkem, nicméně připravený systém mohl být okamžitě uveden v činnost. V jeho rámci byla pozornost věnována shromažďování a vyhodnocování výsledků měření a dalších získaných informací v následujících oblastech:

a) monitorování radiační situace na území Československa (České a Slovenské republiky),
b) sledování obsahu radionuklidů v potravinách,
c) speciální sledování obsahu radionuklidů v dětské mléčné výživě,
d) odhad povrchové kontaminace území České republiky v důsledku černobylské havárie,
e) vnitřní kontaminace obyvatelstva stanovená celotělovým měřením,
f) odhad efektivního dávkového ekvivalentu od zevního ozáření a úvazku efektivního dávkového ekvivalentu od vnitřního ozáření,
g) výskyt radioizotopů cesia v přírodních ekosystémech,
h) využití výsledků pohavarijního monitorování k ověřování modelů šíření (program MAAE VAMP),
i) srovnání vlivu černobylské havárie s vlivem zkoušek jaderných zbraní,
j) opatření na ochranu obyvatelstva po černobylské havárii,
k) posouzení zdravotních následků černobylské havárie.

Stručná charakteristika situace v České republice po černobylské havárii plynoucí z vyhodnocení výsledků ve shora vymezených oblastech je následující:

První signály o příchodu vzdušných kontaminovaných mas na naše území zachytily

v průběhu noci z 29. na 30. dubna 1986, stejně jako v jiných zemích, jaderné elektrárny v rámci prováděných kontrolních měření. V ranních hodinách započalo měření i na některých odborech hygieny záření KHS a v Centru hygieny záření IHE, které v průběhu dne bylo VHK pověřeno sběrem a vyhodnocováním dat o radiační situaci. Dne 30.4.1986 zahájila VHK činnost a až do 8.5.1986 zasedala každodenně, později pak již s menší frekvencí. Odborné hodnocení bylo zajišťováno odborníky tehdejšího Centra hygieny záření IHE.

Na základě měření aktivity radionuklidů v ovzduší a ve spadu a měření dávkových příkonů byly nejdříve provedeny odhady dávek obyvatelstvu a predikce jejich časového vývoje. Dávky byly odhadovány značně konzervativně, přesto ležely hluboko pod hodnotami, pro něž byly v citovaných mezinárodních i čs. dokumentech doporučována protiopatření.

S vývojem situace byla stále větší pozornost věnována omezování průniku radioaktivních látek do potravin. Nejvýznamnější kontaminace ^{131}I se očekávala u mléka a čerstvé listové zeleniny. Nejprve byla přijata některá preventivní opatření zejména v krmení dojnic. Taková opatření byla odborníky navržena na zasedání komise 3.5. 1986 a na tomto jednání také přijata a zemědělství a potravinářskému průmyslu uloženo je realizovat Doporučení, aby byl dobytek krmen suchým krmivem však mohlo být realizováno pouze tam, kde dostatek loňského krmiva ještě byl. V některých oblastech se ukázalo, že tato doporučení, která šla výhradně vnitřní cestou, to znamená, že nebyla zveřejněna ve sdělovacích prostředcích, byla ovlivněna pokyny stranických tajemníků, kteří pokyn obrátili a producentům došel pokyn, že nemají používat staré krmivo. V důsledku takto nesmyslných pokynů mohlo dojít ke zbytečným překročením zásahových úrovní pro obsah ^{131}I v mléce a v některých mlékárnách bylo mléko vylito.

Sledování obsahu radionuklidů v mléce a mléčných produktech bylo v počátečním období po přechodu vzdušných kontaminovaných mas přes území státu velmi rozsáhlé, protože tyto produkty byly nejvýznamnějším zdrojem příjmu ^{131}I, ^{137}Cs a ^{134}Cs potravinovým řetězcem. Tato expoziční cesta byla považována za významnější než inhalační příjem; přitom je celkem snadno regulovatelná. Hlavní pozornost byla zaměřena na 25 vybraných mlékáren, více méně geograficky rovnoměrně rozložených po území Československa. Produkce těchto mlékáren pokrývala 30 % veškeré přímé spotřeby mléka. Mimo to bylo v květnu, červnu a prosinci 1986 provedeno několik celostátních průzkumů, které zahrnovaly všechny mlékárenské závody ve státě. Účelem bylo najít dosud nezachycená místa s vyšší kontaminací, na něž by se případně měla aplikovat regulační opatření, zjistit reprezentativnost zvolených mlékáren a zjistit, zda existuje vztah mezi výší kontaminace mléka a spadem v dané svozové oblasti. Aktivita ^{131}I v mléce z mlékáren po 15.5. 1986 již na žádném místě nepřesáhla zásahovou úroveň 1000 Bq/l a mléko ze zvolených mlékáren bylo dostatečně reprezentativní pro celý stát.

Pro regulaci expozice obyvatelstva z příjmu radionuklidů potravou bylo zavedeno několik dalších opatření. Podle doporučení porady expertů Regionální úřadovny pro Evropu Světové zdravotnické organizace se mělo vyřadit mléko s objemovou aktivitou nad 2000 Bq/l. Vzhledem k tomu, že u nás se v mléce vyskytovaly hodnoty nižší a navíc v tuto dobu byla nadprodukce mléka, bylo vyřazeno z přímé konzumace mléko s objemovou aktivitou ^{131}I vyšší než 1000 Bq/l. Dále byla přijata opatření ke snížení obsahu radionuklidů v dětské mléčné výživě, kde byly změněny svozové oblasti mléka a výroba přesunuta ze závodů Opočno a Zábřeh do výrobny Nový Bydžov, čímž se podařilo snížit obsah radionuklidů 3 až 6 krát a omezil se očekávaný nárůst aktivity ^{137}Cs a ^{134}Cs v zimním období.
Mléko s vyšším obsahem ^{131}I bylo možno použít na výrobky, které se požívají později, např. na výrobu dlouhozrajících sýrů. Vyšší objemová aktivita ^{131}I se nacházela v ovčím mléce, proto byl na Slovensku vydán pastevcům ovcí v Nízkých Tatrách neaktivní jód, který blokuje štítnou žlázu. U této skupiny se jódová profylaxe organizovaně uskutečnila z důvodu tradičně vysoké spotřeby ovčího mléka a výrobků z něho. Bylo rovněž doporučeno uvolnit a spotřebovat přednostně všechny zásoby sušeného a kondenzovaného mléka.

Kulminace obsahu radiocesia v potravinách se očekávala později a podle předpokladů se měla projevit kromě mléka především v mase. Výsledky měření předpoklady plně potvrdily, jako opatření byla vzhledem k naměřeným hodnotám provedena jen určitá regulace spotřeby zvěřiny. Predikce dalšího vývoje radiační situace bylo možno založit na extenzivním průzkumu kontaminace půd, provedeném v polovině června roce 1986. Na území dnešní České republiky bylo odebráno celkem 800 vzorků a na základě stanovení plošné aktivit radionuklidů v nich byly odhadnuty prostorové distribuce a celkové aktivity radionuklidů, které se z černobylského havarovaného reaktoru prostřednictvím vzdušných kontaminovaných mas dostaly na naše území.

Byla přijímána i další, méně významná opatření, jako například zvýšené kropení ulic počátkem května 1986, nebo doporučení zvýšené opatrnosti při výměně filtrů ve velkých ventilačních zařízeních. Kontrola provádění těchto opatření ale nebyla důsledná a pokyny na mnoha místech nepronikly k těm, kterých se měly opravdu týkat. Nakolik byl realizován pokyn k častějšímu kropení ulic ve městech nelze ověřit, nicméně dávka inhalací z resuspenze nebyla dominantní.

Přechodně byla zastavena výroba léků z čerstvých hovězích štítných žláz.

Šlo vesměs o opatření, která neomezovala normální život občanů a nevyžadovala jejich aktivní spoluúčast. Současně byla připravena i řada dalších opatření v oblasti konzumace zeleniny a dalších potravin, která však nemusela být realizována. Odhad průměrné efektivní dávky obyvatelstvu byl odhadnut pro rok 1986 na 0,6 mSv, konzervativní predikce celkové efektivní dávky byla 0,8 mSv. Na základě měření byly odhady postupně upřesňovány; současný odhad dávky za r. 1986 je 0,26 mSv, což je asi desetina dávky obdržené průměrným naším občanem z tzv. přírodního radioaktivního pozadí za rok. V dalších létech se roční dávky našim občanům z radionuklidů uvolněných při Černobylské havárii dále snižovaly. Nyní, 15 let po černobylské havárii, se odhaduje průměrná efektivní dávka v důsledku této havárie 0,5 mSv.

Návrhy na taková opatření jako například omezení vycházek těhotným, omezování cestování nebo pobytu v přírodě a podobně byla odborníky odmítnuta jako zcela nezdůvodněná a vedoucí ve svých důsledcích ke zhoršení zdraví. Také hromadná distribuce jódových preparátů byla výslovně odmítnuta kromě výše uvedené skupiny pastevců ovcí na Slovensku.

Obecně lze přijatá opatření hodnotit jako adekvátní, protože při nízké úrovni ozáření obyvatelstva u nás nebylo třeba přijímat opatření, která by zasahovala do běžného způsobu života lidí. Z hlediska vlastní ochrany zdraví byla u nás podniknuta včas nejspíše všechna rozumná opatření. Toto hodnocení bylo potvrzeno i v mezinárodních odborných kruzích. Nevyskytl se jasně formulovaný návrh nějakých dalších opatření, která by prokazatelně mohla přispět ke snížení dávek obdržených v důsledku černobylské havárie. Nepochybně však nebyla u nás podniknuta odborníky doporučená dostatečná opatření k omezení vzniku obav obyvatelstva, zejména opatření k jeho včasnému, dostatečnému a srozumitelnému informování.

Patnáct let od havárie Černobylu – bilance zdravotních důsledků

Úvod

Patnáct let od černobylské katastrofy je příležitostí znovu bilancovat zkušenosti, které z této tragické události může lidský rod čerpat. Zvláštní výzvou tohoto časového intervalu je znovu zhodnotit podrobně poznatky o jejích zdravotních důsledcích. V prvním období po nehodě byla do značné míry zodpovězena řada otázek technologických a posouzena podrobně radiologická situace v zasažených územích. Nikdo však nemohl odpovědět na otázku, jaké budou zdravotní následky havárie, neboť vzhledem k dlouhé době latence zhoubných nádorů indukovaných zářením si odborníci uvědomovali nutnost trpělivého vyčkávání na odpověď po dobu nejspíše desítek let. V současné době jsou o výskytu rakoviny štítné žlázy a osudech lidí postižených akutní nemocí z ozáření k dispozici informace zahrnující období do roku 1998. Pokud jde o leukémii, ostatní zhoubné nádory a účinky na potomstvo pokrývají dostupné zprávy období sběru dat do roku 1993 až 1994. Uváží-li se, že jako minimální doba latence pro vznik leukémie se uvádějí dva roky od expozice a pro ostatní zhoubné nádory zpravidla období pěti let, potom v současné době by se pozdní účinky měly zřetelně projevit, nebo v opačném případě negativní zjištění bude výzvou k přehodnocení některých pohledů na nehodu a její důsledky. Nejprve bude věnována pozornost osobám vážně postiženým akutní nemocí z ozáření bezprostředně nehodě. Pokračující sledování této nevelké skupiny přežívajících osob poskytuje řadu zajímavých informací. Těžiště zájmu odborníků i veřejnosti jsou pozdní účinky ozáření. Pro dobré porozumění výsledkům epidemiologických studií a jejich hodnocení je nutné seznámení s metodikou a podmínkami těchto šetření, jejichž základem je sběr původních dat. Podrobně je pojednáno o závěrech epidemiologických studií zaměřených na sledování výskytu nádorů. Vedle toho je věnována pozornost i následkům genetickým. Informace o následcích Černobylu by nebyla úplná bez zmínky o mimořádně významných důsledcích psychologických a sociálních.

Poučení ze sledování skupiny osob postižených akutními projevy ozáření

V prvních měsících po nehodě shromáždili biologové a lékaři především nová původní data o bezprostředních následcích ozáření, které se klasifikují jako účinky deterministické, podmíněné překročením dávkového prahu pro ten který účinek. Nejcennějším přínosem byl podrobný rozbor podmínek rozvoje a klinického obrazu akutní nemoci z ozáření. Pro akutní nemoc z ozáření onemocnělo a bylo ošetřováno podle předběžného hodnocení celkem 237 osob. Po konečném zhodnocení všech případů se tato diagnóza prokázala u 134 osob, z nichž 28 zemřelo v průběhu prvních čtyř měsíců po expozici. U 13 pacientů ozářených v rozmezí 5,6—13 Gy byla provedena transplantace kostní dřeně s nezřetelným efektem. Pouze dva z nich se z akutní nemoci z ozáření zotavili, na neúspěchu u dalších obětí se podílely rozsáhlé popáleniny (n=5), plicní komplikace (n=3) a imunologické reakce (n=2). Celý širší soubor 237 osob je lékařsky sledován, v průběhu let však nebylo možno zajistit úplnost dat.

V průběhu let 1987—1998 zemřelo z užšího souboru (n=134) celkem jedenáct osob ozářených v rozmezí 1,3—5,2 Gy. Gangréna plicní jako příčina smrti u jednoho pacienta v r. 1987 mohla být dozvukem plicních komplikací v akutní fázi. S ozářením kostní dřeně mohou souviset dva případy myelodysplastického syndromu (1993, 1995) a jeden případ akutní myeloidní leukémie (1998). Jinak se jednalo ve třech případech o koronární chorobu srdce, dvakrát o cirhózu jater, zbývající dva případy přísluší plicní tuberkulóze a tukové embolii. Nejvýznamnější důvody strádání u osob přeživších akutní nemoc z ozáření se týkají poruchy zraku v důsledku zákalu čočky a jizevnatých změn či vředů na kůži jako výsledného stavu po kožních popáleninách. Rozsáhlé kožní léze jsou v souladu s odhadem lokálních dávek, které mohly dosahovat 400—500 Gy; na ozáření se významně podílely vysoce energetické částice beta z radionuklidů ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{106}Ru, ^{90}Y, ^{90}Sr. Alespoň u patnácti z takto postižených osob byl v průběhu let 1990—1996 proveden nápravný chirurgický zákrok. Řada osob přeživších akutní nemoc z ozáření zplodila zdravé potomky.

V prvních pěti letech po havárii bylo mezi nimi zaznamenáno 14 porodů normálních dětí, v jedné z těchto rodin zemřelo první dítě na sepsi, druhé je zdravé. Jsou k dispozici také data o postupné obnově krvetvorby po akutním syndromu, kde k regeneraci dochází v průběhu týdnů a měsíců, zatímco imunologické odchylky — i když nevyvolávají klinické projevy — se udržují někdy i roky po ozáření.

Data týkající se období bezprostředních zdravotních projevů po ozáření černobylských obětí jsou v podstatě uzavřena a byla shrnuta zejména ve zprávě Vědeckého výboru Spojených národů pro účinky atomového záření (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation — UNSCEAR) z roku 1988. Na odborných konferencích pořádaných v roce 1996 k desátému výročí Černobylu byly tyto informace rekapitulovány a doplněny. Údaje o dalších osudech členů zmíněné malé vysoce exponované skupiny přesahující do posledního pětiletí lze čerpat se souhrnné zprávy UNSCEAR z roku 2000.

Průzkum pozdních zdravotních následků ozáření - zkreslující informace médií.

Vedle zájmu poučit se z případů akutního radiačního poškození si kladli zdravotničtí odborníci už v roce 1986 další otázky:

Povede ozáření tak velikého počtu lidí k pozorovatelným pozdním zdravotním následkům?

O jaké nové poznatky přispívající k upřesnění kvantitativních vztahů mezi dávkou záření a vznikem nádoru se obohatíme?

Získáme konečně přímé doklady o vlivu ionizujícího záření na potomstvo člověka, kde zatím spoléháme jen na extrapolaci experimentálních dat ze zvířat na homo sapiens?

Čtenáři, který měl možnost se seznámit s hlavními pojmy radiobiologie člověka a radiační ochrany je zřejmé, že tato tématická oblast se týká účinků stochastických, pro které je v prvním přiblížení předpokládán lineární bezprahový vztah mezi dávkou a účinkem. Do této skupiny patří zhoubné nádory a účinky genetické. Jejich charakteristickým rysem je spontánní výskyt v běžné populaci. Může být jimi postižen každý jedinec i bez přídatného působení ozáření. Ozáření člověka nebo jeho jednotlivých tkání zvyšuje pravděpodobnost vrozených poruch v následných generacích a výskytu nádorů u ozářených jedinců. Označení stochastický souvisí s náhodným charakterem postižení jednotlivců v ozářené populaci. Nádory ani dědičné následky vyvolané ionizujícím zářením nemají charakteristické rysy, které by umožnily u postiženého jedince s určitostí konstatovat, že jde o následek ozáření a nikoli o onemocnění takříkajíc spontánně vzniklé. Cestou ke zjišťování vyššího výskytu stochastických účinků po ozáření jsou skupinová šetření, kdy se epidemiologickými metodami srovnává a hodnotí výskyt nádorů či genetických změn v populacích lišících se mírou ozáření.

Na otázky položené v úvodu předchozího odstavce lze odpovědět — vzhledem dlouhé době latence vzniku zhoubných nádorů a vzhledem k rozložení realizace potomstva ozářených osob v čase — až po dlouhé řadě let. Zvýšený výskyt rakovin štít-

né žlázy u dětí, jak o tom bude ještě pojednáno, se začal projevovat už od roku 1990, tj. čtyři roky po havárii. Otázka existence dalších případných pozdních následků černobylské katastrofy však zůstala otevřena. Ani v době desetiletého výročí události nebyla zveřejněna data potvrzující výskyt jiných pozdních projevů. Převládalo přesvědčení, že ještě je třeba vyčkat. *Zdá se však, že v současné době, tj. patnáct let od expozice, je načase postoupit k dalším závěrům. Je třeba se zabývat tím, zda přece jenom se neobjevují v některých studiích náznaky zvýšeného výskytu stochastických následků a pokud se toto nepotvrdí, zamyslit se nad tím, jak lze vysvětlit negativní nálezy.*

K tomuto cíli je třeba nejen citovat statistická čísla, ale je třeba rekapitulovat, co je známo o dávkách, které jednotlivé kategorie populace v důsledku nehody obdržely a kriticky projít podmínkami jednotlivých studií, tedy jejich metodikou.

Dříve než se budeme takovou racionální analýzou zabývat, připomeňme si nehoráznost informací, jimiž je běžný občan sycen prostřednictvím neodpovědných medií. Uvedeme jen některé z extrémně přehnaných odhadů, provedených naprosto nekvalifikovaně. V září 1995 agentura Reuter vydala zprávu, že v Bělorusku je Černobylem postiženo údajně 800 tisíc dětí, což lze přirovnat k následkům jaderného útoku. Dne 23. prosince 1995 sdělila agentura UNIAR v Kyjevě, že havárií bylo postiženo 3 miliony a 200 tisíc lidí, z toho milion dětí ve 2 294 sídlištích, a že z nich na následky Černobylu zahynulo do té doby 125 tisíc lidí. Způsob výpočtu tohoto odhadu není znám, pravděpodobně všechna úmrtí na nejrůznější příčiny v uplynulém období na Ukrajině byla připsána ozáření. Jinou perličkou byla zpráva v ukrajinském tisku, že v důsledku poškození mozkových ganglií vznikly deprese vedoucí k sebevraždám. Zvláště je hodno politování, že významné zkreslení reálné situace proniklo i do oficiálních dokumentů agentury Spojených národů, a to nedávno - v roce 2000. Úřad OSN pro koordinaci humanitární pomoci (UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs — OCHA) vydal publikaci nazvanou "Chernobyl — a continuing catasthophe" kde se uvádí řada nepodložených tvrzení, např. se hovoří o 11 tisících případech rakoviny štítné žlázy, zatímco shrnutí dosavadních informací ve zprávě UNSCEAR ukazuje na necelých 1800.

Předseda UNSCEAR Lars-Erik Holm reagoval na tuto neuváženou aktivitu OCHA dopisem generálnímu sekretáři OSN Kofi S. S. Annanovi ze dne 6.6.2000. Pokud se český novinář opírá o takovéto zahraniční zdroje a nepostřehne potřebu konsultovat se s domácími odborníky, není divu, že i z informací v českém tisku bývá občan více poděšen než poučen. Na druhé straně se nezdá dost uvážené korigovat přehnané hodnocení následků tak silnými slogany jako je „černobylská lež", „plíživá paranoia" aj., které se objevily např. počátkem ledna 2001 na čelném místě populárního polského magazínu WPROST v článku M. Rotkiewicze a spol. „Černobylský bluf". Takový přístup má snad jen tu funkci, že svou dramatičností připoutá pozornost čtenářů, které by asi nezaujal nadpis sdělující, že i po patnácti letech jsou výsledky epidemiologických studií v mnohém směru skrovné popřípadě negativní. Zdrženlivost k silným slovům je namístě proto, že psychologické a sociální následky, i když patří do jiné kategorie než přímé následky zdravotní, způsobily desetitisícům a snad i stotisícům lidí velké utrpení.

Metodické aspekty epidemiologických studií — podmínky sběru dat

Vrátíme se k otázce kritického posouzení dat a dalších informací o pozdních zdravotních následcích ozáření. I neodborníkovi je jasné, že věrohodné závěry budou záležet na vysokém metodickém standardu skupinových šetření. Ideálem je získat pro jednotlivce co nejpřesnější odhad dávky a její prostorové i časové distribuce v těle. To ve všech studiích není možné — potom je žádoucí znalost alespoň středních dávek *per capita* nebo odhad dávky kolektivní. Důležitá je úplnost sběru dat o výskytu sledovaných ukazatelů, *morbidity*, pokud se sleduje záchyt onemocnění, nebo *mortality*, pokud se sleduje úmrtnost. Jen vzácně bývá možné získat úplné patologické nálezy včetně histologie. Úplnost dat znamená v případě nádorů jejich dlouhodobé sledování — nejlépe až do dožití sledované

skupiny. Významný je výběr kontrolní populace.

Zkoumáme-li splnění těchto požadavků ve studiích organizovaných v SSSR, a později ve třech následnických státech postižených spadem radioaktivních látek, nabízí se srovnání s výzkumem následků u japonského obyvatelstva ozářeného v r. 1945 v Hirošimě a Nagasaki. V Japonsku byl výzkum pozdních následků velkoryse založen brzy po skončení války a zůstal přes změny organizační struktury badatelského pracoviště prakticky v jedněch rukou. Projekt byl příkladem tzv. studie v uzavřené populaci a mezi konečné podmínky pro výběr lidí do Master Sample (asi 100 tisíc osob) patřila mj. expozice v okruhu 10 km od hypocentra výbuchu. V průběhu let byly v několika průřezových studiích upřesňovány dávky, které obdrželi členové souboru.

Organizace výzkumu pozdních následků Černobylu trpěla v SSSR řadou nedostatků, které se do jisté míry ještě prohloubily převedením registrů do působnosti jednotlivých následnických států. Ztratila se tím jednotnost přístupu, protože míra koordinace studií je nedostatečná z důvodů zřejmě nejen organizačních ale i politických. V roce 1987 byl založen Všesvazový klinicko-dozimetrický registr, jehož koordinací bylo pověřeno Radiologické výzkumné centrum v Obninsku. Registr byl hierarchicky organizován podle územního principu: *republika — oblast — okres*.

Do roku 1991 registr zahrnul celkem 659 292 osob, které patřily do některé ze čtyř skupin určených k sledování:

1. účastníci záchranných prací („likvidátoři") — 43 %
2. evakuovaní z nejvíce kontaminovaných zón (depozice $^{137}Cs > 1480$ kBq m^{-2}) — 11 %
3. rezidenti ve významně kontaminovaných zónách (> 555 kBq m^{-2}) — 45 %
4. děti rodičů (skupin 1-3) narozené po havárii — 1 %.

Registr byl pojat jako otevřený, tzn. během let narůstal počet registrovaných případů, a to velmi podstatně. Tak například v Ruské federaci stoupl od roku 1987 do roku 1995 počet registrovaných ve všech skupinách asi čtyřnásobně, v Bělorusku v tomtéž období počty registrovaných likvidátorů asi trojnásobně. Zdá se, že obyvatelé mají zájem o registraci v těchto souborech vzhledem k sociálním výhodám. Při zpracování získaných dat se projevuje řada nedostatků, kódování poruch zdravotního stavu je nejednotné, není vždy respektována mezinárodní klasifikace Světové zdravotnické organizace, nejsou uplatňovány standardní postupy verifikace kvality a úplnosti registrace (zajišťování kvality — Quality Assurance) a překážkou je i absence individuální kódované identifikace obyvatel (rodných čísel), neboť identifikace podle jmen způsobuje obtíže např. pro nejednotnost pravopisu, přepis jména do ruštiny z jazyka národnostní menšiny apod.

Výzkum pozdních účinků Černobylu se neopírá jen o popsaný základní registr. Řada dat, o nichž bude zmínka, je výsledkem sledování v jiných užších skupinách populace. Specializované registry se týkají především nádorových onemocnění, samostatně se sledují např. leukémie a nádory štítné žlázy. Registr profesionálních pracovníků se zdroji ionizujícího záření — účastníků záchranných prací — je zřízen v Ruské federaci a zahrnuje nyní 18 600 osob, z nichž asi u poloviny jsou stanoveny osobní dávky. Vojenská akademie v Petrohradu spravuje registr likvidátorů z řad armády, sleduje zdravotní stav asi 15 tisíc osob, dalších 40 tisíc je sledováno v civilní zdravotnické síti. Institut leteckého zdravotnictví organizuje výzkum pilotů a posádek helikoptér nasazených v době radioaktivních úniků při havárii.

Vedle informace o vzniku pozdních nádorů se od dlouhodobých studií očekávají i závěry o vlivu ozáření rodičů na potomstvo. Tato šetření jsou ztížena tím, že registrace vrozených poruch a malformací byla v bývalém SSSR na nízké úrovni. K doplnění představy o organizaci a rozsahu zdravotnických šetření je třeba se zmínit o řadě bilaterních projektů převážně se státy západní Evropy, z nichž u mnohých byla významnou složkou nabídka zdravotnických služeb v rámci humanitární pomoci. Proběhly také dva větší mezinárodní projekty, v letech 1990—1991 International Chernobyl Project, sponsorovaný Mezinárodní agenturou pro atomovou energii, a v letech

1992—1995 International Programme on the Health Effects of Chernobyl Accident — IPHECA — který byl koordinován Světovou zdravotnickou organizací. Žádný z nich není možno pokládat za reprezentativní a souhrnné zpracování problematiky zdravotních následků.

Přehled o dávkách v exponovaných skupinách

V další části věnujeme pozornost přehledu o počtu osob v jednotlivých skupinách, tříděných podle různých hledisek, a posouzení dávek, jimž byly vystaveny. Pro čtenáře méně obeznámeného s významem dávek záření je třeba uvést, že dávky uváděné v Gy a efektivní dávky uváděné v Sv jsou pro naše úvahy vzájemně zaměnitelné (převodní faktor 1). Dávky v úrovní 3—5 mSv odpovídají ozáření každého běžného občana z okolního prostředí za rok, dávka 20 mSv je ročním limitem pro pracovníka ze zářením, akutní deterministické účinky se projevují po dávkách v úrovni jednotek Gy. V tab. 1 jsou uvedeny počty postižených či ohrožených osob, je poznamenán i nárůst v kategorii likvidátorů do roku 1990.

Zvláštní pozornosti zasluhuje skupina likvidátorů. Patří k nim lidé, kteří pracovali v rámci nápravných opatření na elektrárně během prvních dnů, ale také ti, kteří vystřídali v následujících dnech první směny; dále i ti, kteří později pracovali na vzdálených místech při dekontaminaci techniky, území apod. Přehled o jejich počtech a průměrných dávkách uvádí tab. č. 2.

Jsou k dispozici i distribuce dávek v jednotlivých kategoriích. Významně exponovanou skupinou jsou vedle pracovníků elektrárny a přisunutých pracovníků sesterských pracovišť také vojáci. V roce 1986 byla zjištěna u nich tato distribuce dávek:

62 % < 200 mSv;
19% 200-250 mSv;
19% 250-500 mSv.

Důležitou skupinou sledovaných osob je populace kontaminovaných oblastí. Počty obyvatel podle pásem významnosti kontaminace jsou uvedeny v tab. 3 spolu s vyznačením průměrných dávek pro jednotlivé

Tab. 1 — Počty postižených či ohrožených osob — rok 1986 a 1987

30	úmrtí bezprostředně (28 na nemoc z ozáření)
116 000	evakuovaných osob v časném období z okolí elektrárny
220 000	později relokovaných osob z kontaminovaných oblastí Běloruska, Ukrajiny, Ruské federace
240 000	likvidátorů — pracovníků záchranných a asanačních čet z let 1986 a 1987; do roku 1990 získalo tento status 600 000 pracovníků

Tab. 2 — Odhad efektivních dávek ze zevního ozáření při likvidačních pracích v zóně 30 km za rok 1986 a 1987

Skupina	Počet pracovníků		Průměrná dávka (mSv)	
	1986	1987	1986	1987
Pracovníci závodu	2 358	4 498	210	70
Stavebnictví	21 500	5 376	82	25
Doprava, ostraha	31 021	32 518	6,5	27
Vojáci	67 762	63 751	110	63
Pomoc z jiných elektráren	—	3 458	—	9,3
Celkem / Průměr	116 641	109 601	77	47

Tab. 3 — Populace pobývající v roce 1995 v oblastech kontaminovaných při černobylské havárii

Pásma depozice ^{137}Cs (kBq m^{-2})	Populace			
	Bělorusko	Ruská federace	Ukrajina	Celkem
37 — 185	1 543 514	1 654 175	1 188 800	4 386 389
185 — 555	239 505	233 626	106 700	579 831
555 — 1 480	97 593	95 474	300	193 367
Celkem	1 880 612	1 983 275	1 195 600	5 159 487
Průměrná zevní dávka (per caput)	**8 mSv**	7 mSv	7 mSv	města: 7 mSv venkov: **12 mSv**

země a celé postižené území dohromady. Jak známo, byla pásma významnosti kontaminace hodnocena podle plošné aktivity deponovaného ^{137}Cs , od hodnoty 37 kBq m^{-2} (1 Ci km^{-2}) výše se území obvykle pokládá za kontaminované.

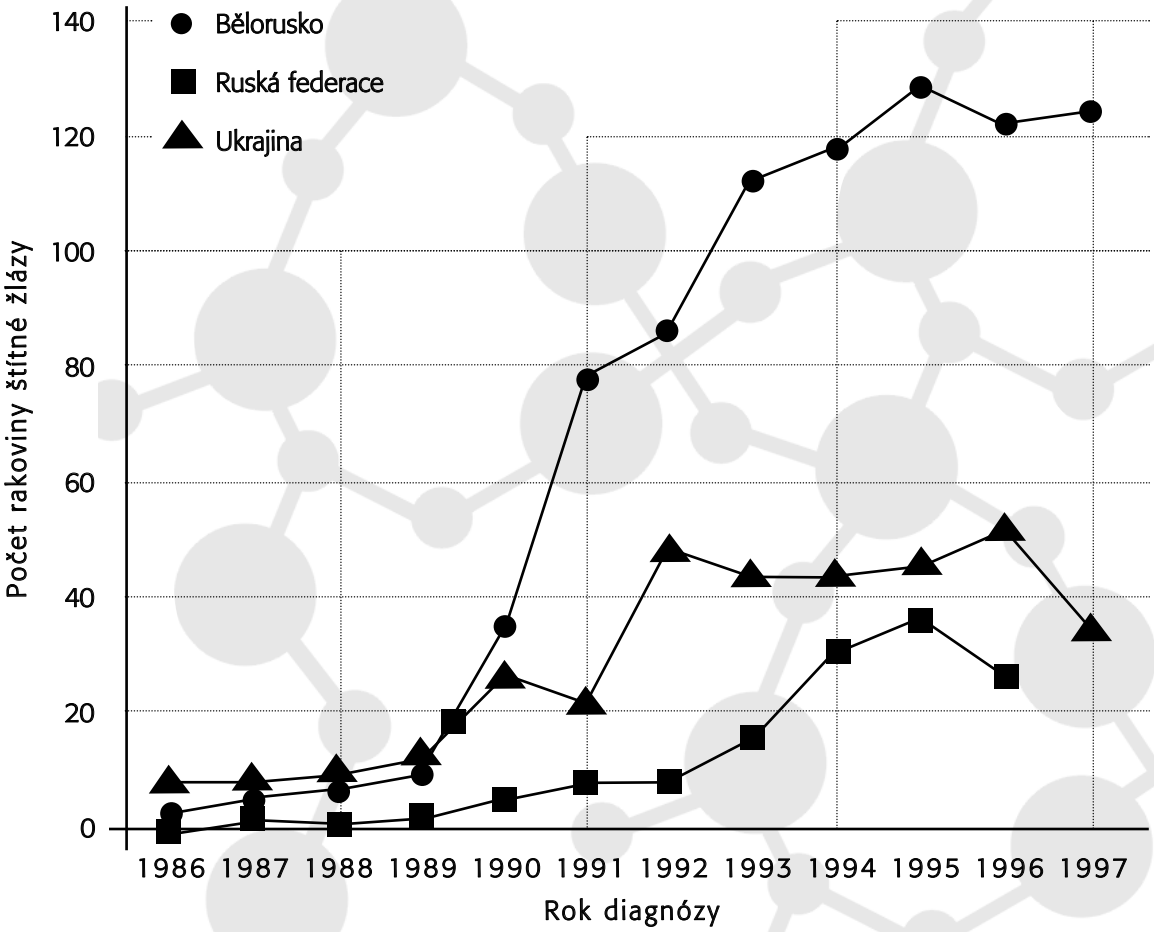
Uvedená data o počtech osob v jednotlivých skupinách a o odhadnutých dávkách mají poskytnout orientaci o základních charakteristikách populací, které jsou objektem analýzy zdravotního stavu. Pro epidemiologické studie je často výhodné vycházet z kolektivní dávky ve skupině. Při znalosti počtu členů jednotlivých skupin a jejich průměrných dávek lze prostým násobením získat dávky kolektivní, takže je zde není třeba explicitně uvádět. Hodnocení biologických účinků, o nichž je dále pojednáno, není vždy vztaženo právě k těm skupinám, jejichž charakteristiky byly popsány. Souvisí to s nejednotnou a nedostatečně integrovanou organizací sledování zdravotního stavu, na což bylo už výše poukázáno.

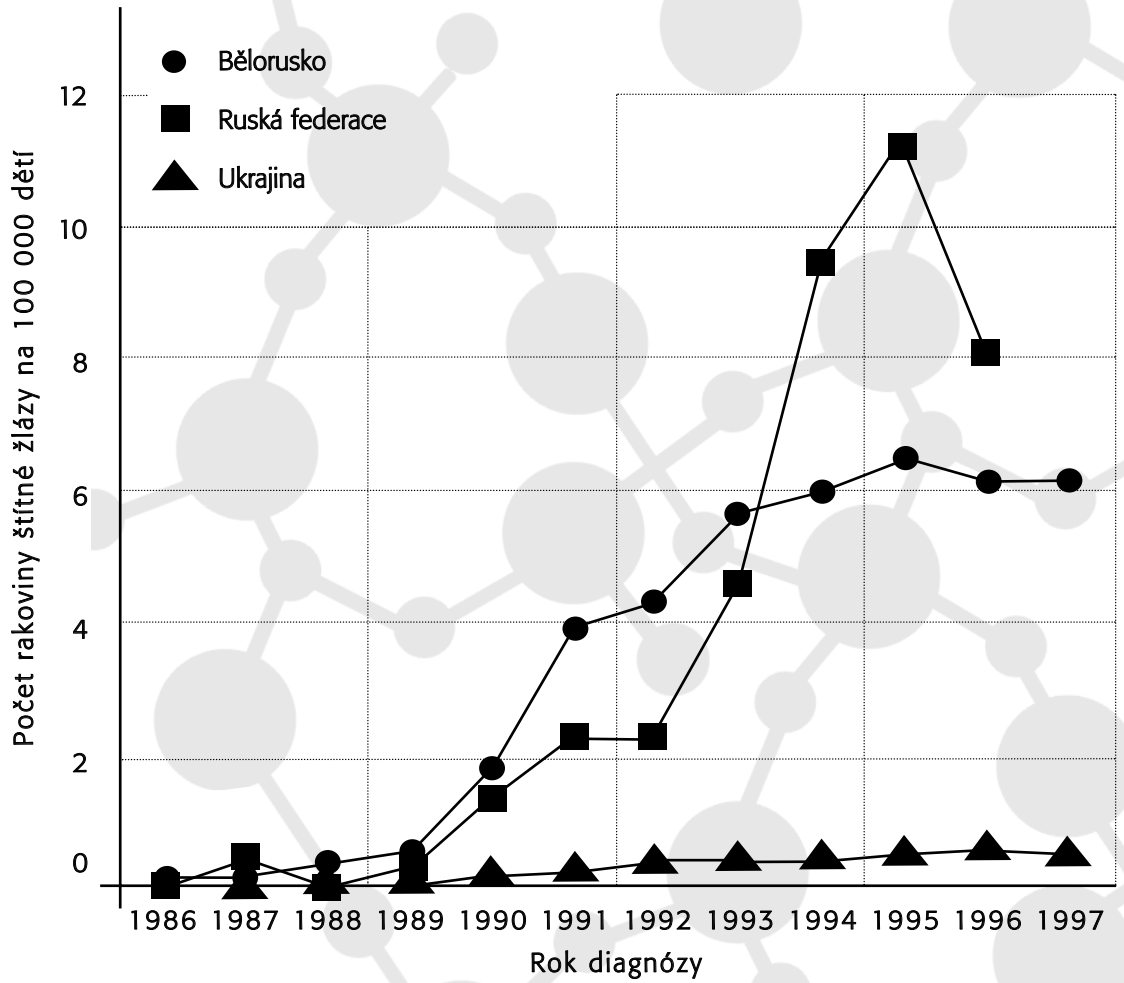
Vyhodnocení šetření o výskytu nádorových onemocnění

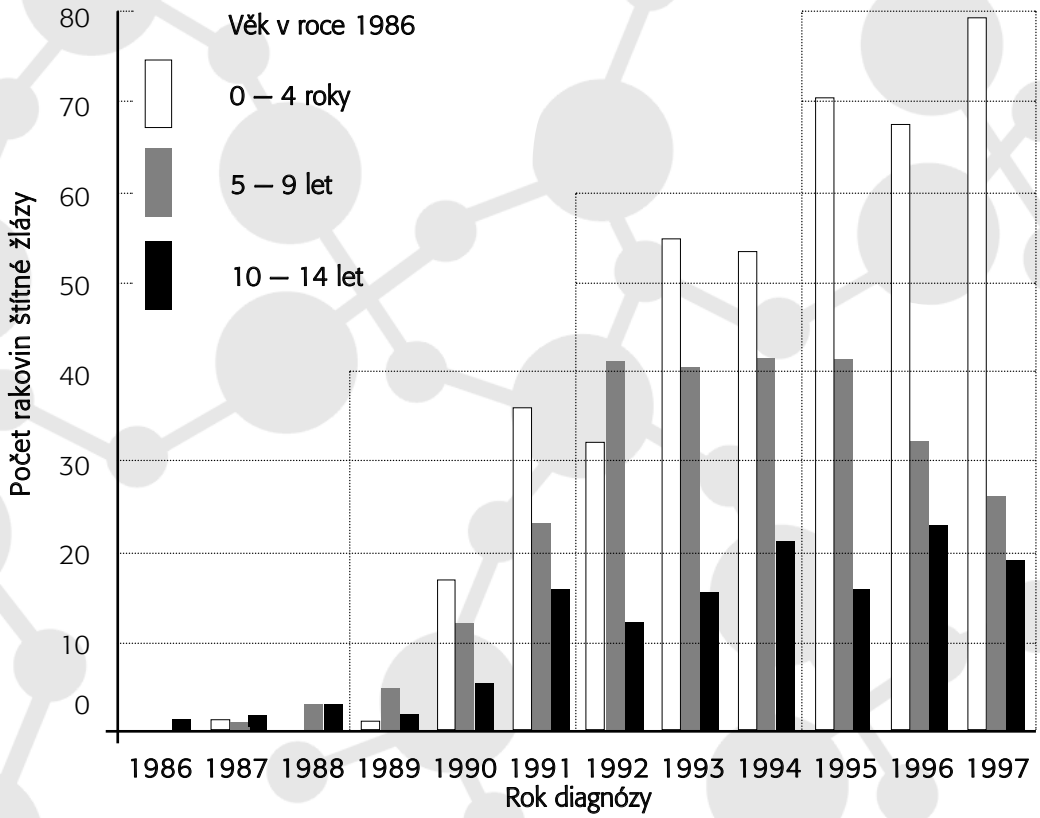
Už v roce 1990 se objevily první zprávy o zvýšeném výskytu rakoviny štítné žlázy u dětí v územích Běloruska postižených vysokou kontaminací. Tyto informace způsobovaly zprvu určité rozpaky, neboť od expozice uplynuly v té době pouhé čtyři roky a tak krátká doba latence se na základě zkušeností z dřívějších studií nepředpokládala. Později byl zvýšený výskyt hlášen i z Ukrajiny a postižených oblastí v Ruské federaci a vzestupný trend pokračoval i v dalších letech. V té době byla formální asociace vyšší incidence rakoviny štítné žlázy u dětí s ozářením štítné žlázy statisticky pevně prokázána a epidemiologové přistoupili k další fázi zkoumání, totiž ke kritickému posouzení vlivu možných rušivých faktorů (confounders) neradiační povahy, které by mohly být důvodem zvýšené incidence. Především byl zkoumán možný vliv cíleného vyhledávání zhoubných nádorů v rámci depistážních akcí. Tento vliv jistě mohl přispět k úplnějšímu záchytu onemocnění, avšak nebyl podstatný a řada dalších okolností, např. dynamika výskytu v čase, průkaz nejvyšší vnímavosti v nejnižších věkových skupinách v době ozáření aj. umožnily závěr, že rozhodující příčinou vzniku těchto nádorů je skutečně ozáření štítné žlázy zejména v důsledku kontaminace radioaktivním jódem.

Na obr. 1 (vpravo nahoře) je znázorněn počet diagnostikovaných rakovin štítné žlázy v jednotlivých letech po nehodě ve třech následnických státech u dětí ozářených před dosažením 14 let věku.

Na obr. 2 (vpravo dole) jsou vyjádřena tato data v relativním ukazateli, jako počet případů na 100 000 dětí příslušné věkové


Bělorusko
Ruská federace
Ukrajina
Počet rakoviny štítné žlázy
140
120
100
80
60
40
20
0
1986 1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997
Rok diagnózy


Bělorusko
Ruská federace
Ukrajina
Počet rakoviny štítné žlázy na 100 000 dětí
12
10
8
6
4
2
0
1986 1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997
Rok diagnózy



skupiny.

Obr. 3 ukazuje na příkladě situace v Bělorusku závislost vzestupu incidence na věku dítěte v době expozice, tj. prakticky v roce 1986.

Je přesvědčivě doložena mimořádně vysoká vnímavost u dětí ozářených ve věku do 4 let. Pokud jde o celkové počty zjištěných nádorů, uvádí jich zpráva UNSCEAR 2000 celkem 1791. Zahrnuty jsou případy diagnostikované v období 1990—1998 u dětí a mladistvých, kteří v roce 1986 nepřesáhli 18 rok věku. Přitom se poznamenává, že údaje u Ruské federace mohou být neúplné. Pro zvýšený výskyt rakovin štítné žlázy u dospělých nejsou zatím přesvědčivé důkazy. Studie zaměřené tímto směrem ukazují jen v některých případech na zvýšenou incidenci.

Vzhledem k tomu, že štítná žláza mohla být u jednotlivců ozářena dávkami, které by případně překročily práh pro vyvolání deterministických účinků, zaměřují se šetření zdravotního stavu i na posouzení funkčních odchylek, které by mohly být tímto mechanismem vyvolány. Likvidace buněčných struktur štítné žlázy vlivem ozáření by způsobila především pokles její funkce, hypothyreózu, která bývá provázena zřetelnými klinickými projevy a laboratorními odchylkami. Zvýšený výskyt těchto onemocnění nebyl v ozářených populacích prokázán. Častěji se nevyskytují ani případy hyperthyreózy, tedy zvýšené funkce, ani nálezy strumy.

Pozorně je v dlouhodobých studiích sledován také výskyt ostatních zhoubných onemocnění. Mezi nimi má zvláštní postavení leukémie, neboť krvetvorné orgány jsou na vznik zhoubného bujení po ozáření velmi vnímavé a doba latence mezi ozářením a vznikem leukémie je krátká. Předpokládá se, že první případy by se mohly projevit už dva roky po ozáření. Bývá citován odhad Cardisové z roku 1996, že mezi 100 000 likvidátory, ozářenými dávkou 100 mSv by se mělo do deseti let projevit 150 případů tohoto onemocnění. Dosavadní výsledky takové očekávání nepotrvrzují. V Ruské federaci zpracoval Ivanov data z registru čítajícího 142 000 likvidátorů za období 1986—1993. Výskyt leukémií u exponovaných byl statisticky významně vyšší v porovnání v porovnání s celoruskou statistikou. Mezi pozitivní případy počítal však i chronické lymfatické leukémie, u nichž není prokázán vztah k předchozímu ozáření. Námitky se týkají i vlivu aktivní depistáže

a možného podcenění incidence v celonárodní statistice. Týž autor provedl i retrospektivní studii typu "case-control study". Porovnával 34 dobře klasifikovaných leukémií s čtyřnásobným počtem párových kontrol. V této studii však žádná asociace statisticky prokázána nebyla. Pokud jde o leukémie, zůstává tedy otázka nadále otevřena. Očekávání přínosu z dalšího sledování není však příliš slibné, neboť jak vyplývá z epidemiologických šetření v jiných kolektivech po patnácti letech od expozice začíná význam ionizujícího záření jako faktoru indukce leukémií klesat.

Šetření v exponovaných kolektivech se zaměřila i na sledování výskytu nádorů dalších orgánových lokalizací, označovaných také jako solidní tumory. Zpráva UNSCEAR 2000 shrnuje údaje v části týkajících se ostatních nádorů v tom smyslu,že mimo zvýšený výskyt rakoviny štítné žlázy nebyla dosud vyšší incidence ostatních nádorů v důsledku ozáření z černobylské nehody prokázána. Důvodem tohoto negativního zjištění mohou být odborné slabiny dílčích vědeckých studií, neurčitosti v odhadu dávek, dlouhá doba latence a rozložení dávek v dlouhém časovém období. Byla už zmínka o možnosti nedostatečné registrace nádorů v kontrolních skupinách a o vlivu aktivní depistáže. Určitý vzestup incidence solidních nádorů by bylo možno očekávat v budoucnu ve skupině nejvíce ozářených likvidátorů.

Vyhodnocení šetření o vlivu na potomstvo

Studium vlivu ionizujícího záření na potomstvo se týká v podstatě tří mechanismů, které mají rozdílnou patogenezu. Z nich lze ponechat stranou vliv na fertilitu, ten by se v případě Černobylu mohl týkat jen osob postižených akutní nemocí z ozáření. Statistické vyhodnocení ztráty fertility po Černobylu není k dispozici a bylo by z povahy věci obtížné. Byla však výše uvedena informace o 14 případech rodičovství v prvních pěti letech po nehodě u lidí, kteří přežili akutní nemoc z ozáření a kteří se zřejmě dočkali úspěšné regenerace fertility. Jiným vlivem ionizujícího záření je působení na vyvíjející se zárodek či plod (po 3. měsíci těhotenství) v těle matky. Základ budoucího jedince vznikne spojením neporušené spermie a vajíčka a jeho vývoj až do doby ozáření proběhne přirozeným způsobem.

Ozáření může zasáhnout nepříznivě do tohoto vývoje. Ve skupině běloruských dětí narozených matkám s dávkami na dělohu v rozpětí 8—21 mSv nebyl prokázán vztah mezi defekty zjištěnými při porodu a pobytem v kontaminovaných oblastech. Nebyla prokázána ani korelace mezi zjištěním chromosomových a chromatidových aberací u plodu a úrovní kontaminace prostředí.

Třetí kategorie poruch s důsledky u potomstva se týká vlastních dědičných změn podmíněných mutacemi, jejichž nositelem je spermie nebo vajíčko angažované v procesu početí. Vliv ionizujícího záření na geneticky podmíněné poruchy zdraví se předpokládá i u člověka, a to na podkladě výsledků pokusů na zvířatech, zejména na malých hlodavcích. Je k dispozici několik modelů pro přenos kvantitativních vztahů z experimenálních zvířat na člověka. Je zde namístě výslovně uvést, že v žádném ozářeném lidském kolektivu či populaci nebyl zvýšený výskyt geneticky podmíněných poruch prokázán (týká se i obětí atomového útoku v Japonsku). Pokud jde o následky Černobylu, je pozornost badatelů celosvětově zaměřena na možný přínos probíhajících studií k této problematice. Jsou sice k dispozici výsledky několika dílčích studií, ale na jejich podkladě nelze dospět k žádnému průkazu zvýšeného výskytu dědičně podmíněných poruch.

Psychologické a sociální následky havárie

Problematika psychologických a sociálních následků černobylské havárie přesahuje rámec zdravotních následků. Bylo ukázáno, co je známo o zdravotních účincích deterministického a stochastického typu. Oba tyto typy účinků přímo souvisejí s reálným ozářením, bez ohledu na to, zda si to lidé uvědomují a jak subjektivně vnímají riziko. Těmto účinkům lze předejít nebo je omezit racionálními protiopatřeními k minimalizaci ozáření obyvatel. Zkušenost však ukázala, že psychosociální důsledky havárie mohou daleko převyšovat všechny přímé účinky. Rozruch mezi obyvatelstvem je realitou s přímým dosahem na jejich celkovou po-

hodu. Ukazuje se, že míra strachu veřejnosti a pesimismu kolem černobylské havárie byly naprosto neúměrné zdravotním účinkům v důsledku ozáření.

Důvody zjitřených emotivních postojů byly v různých dokumentech mnohokrát diskutovány a nelze je jednoznačně vymezit. Pro úplnost lze připomenout tradičně uváděné důvody: nepostihnutelnost záření lidskými smysly, podvědomé propojení účinků s následky výbuchu jaderné zbraně, nedostatečné chápaní fyzikálních aspektů a biologických mechanismů poškození, zkreslené a rozporné informace o aktuální situaci.

Psychosociálními důsledky byly postiženy desetitisíce až statisíce lidí a určité strádání může pokračovat v závažné míře po mnoho let. Tyto následky nejsou korelovány s reálným ozářením, ke kterému třeba ani nedošlo, ale se subjektivním vnímáním rizika. Protiopatření směřující k omezení ozáření mohou být dokonce ve vztahu k psychosociálním účinkům kontraproduktivní. Problém jak se nejlépe vypořádat s těmito účinky a jak je minimalizovat není vyřešen, významným preventivním krokem je včasná a přesná informace o aktuální radiační situaci a věrohodné doporučení, jak se chovat.

V rámci tohoto pojednání není prostor pro popis a statistickou analýzu psychosociálních následků černobylské katastrofy.

Postiženo je zejména přesídlené obyvatelstvo, zvláště bylo-li přesunuto nedobrovolně. Lidé trpí steskem po domově, rozvratem sociálního a kulturního prostředí a často i nepřátelskými projevy ze strany původních obyvatel nové sídelní oblasti. Zejména starší lidé špatně snáší důsledky přesídlení.

Závěry

Akutní nemoc z ozáření se projevila u poměrně malé skupiny osob, nepřesahující 200—300 jedinců; 28 z nich na toto onemocnění zemřelo. Sledování přežívající skupiny ukázalo, že mezi příčinami smrti 11 osob zemřelých do roku 1998 se vyskytují různorodé diagnózy, z nichž většina nesouvisí s ozářením. Několik přežívajících osob se stalo rodiči.

Za jednoznačně prokázaný pozdní účinek černobylské havárie je třeba pokládat výrazně zvýšený výskyt rakovin štítné žlázy u jedinců ozářených v dětském věku. Do roku 1998 bylo evidováno 1791 těchto případů, z nichž převažující většina byla úspěšně vyléčena. Pozornost byl zaměřena i na sledování výskytu leukémií a ostatních nádorů. V některých dílčích zprávách se prokázala formální asociace výskytu těchto zhoubných nádorů s ozářením lidí. Další kritická šetření dosud nepotvrdila obecnou platnost těchto zjištění ani nemohla doložit jejich kausální asociaci s ozářením.

U člověka nebyl prokázán žádný vliv černobylské havárie na výskyt vrozených vad či jiných geneticky podmíněných odchylek. Vzhledem ke krátkému období sledování zůstává otázka možné budoucí manifestace pozdních stochastických účinků nadále otevřená.

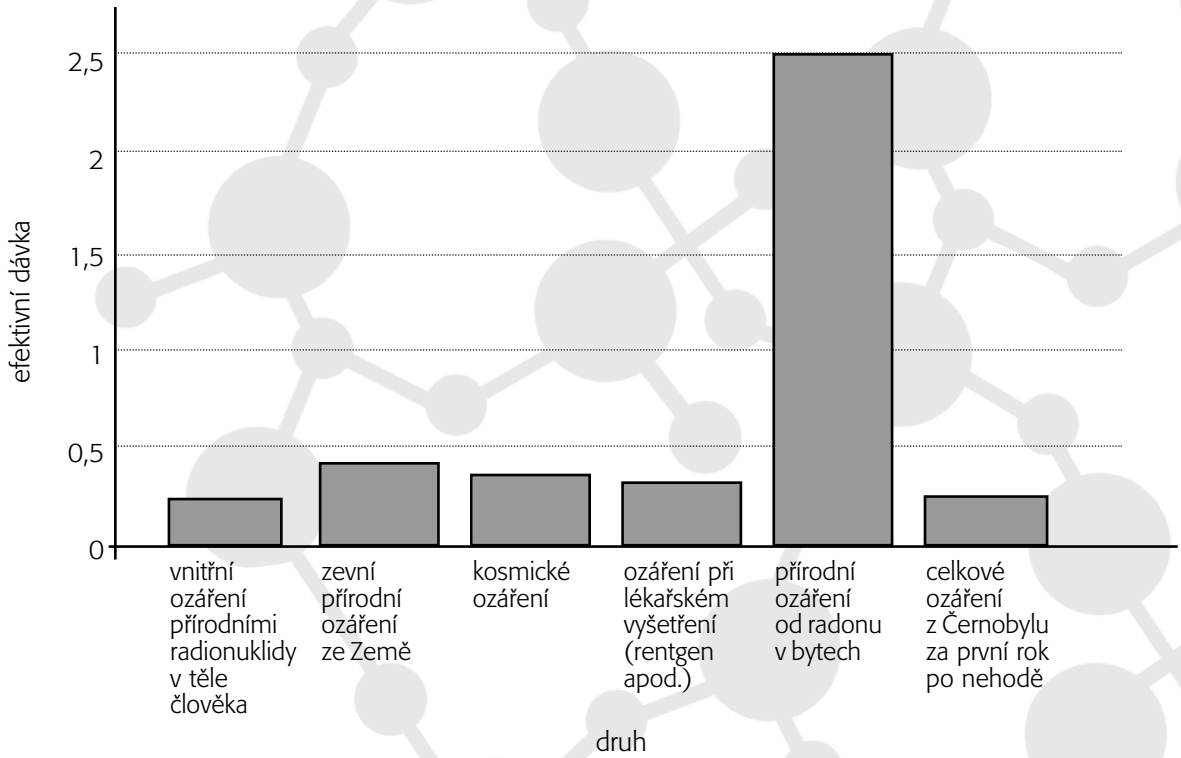
Populace na rozsáhlých kontaminovaných územích a přesídlené obyvatelstvo bylo postiženo závažnou psychologickou sociální újmou, která dalekosáhle přesahovala přímé zdravotní účinky ozáření.

Grafy podílů jednotlivých typů ozáření

Podíl jednotlivých typů ozáření průměrného obyvatele ČR v roce 1986

typ ozáření	1986
vnitřní ozáření přírodními radionuklidy v těle člověka	0,24
zevní přírodní ozáření ze Země	0,46
kosmické ozáření	0,38
ozáření při lékařském vyšetření (rentgen apod.)	0,30
přírodní ozáření od radonu v bytech	2,50
celkové ozáření z Černobylu za první rok po nehodě	0,26

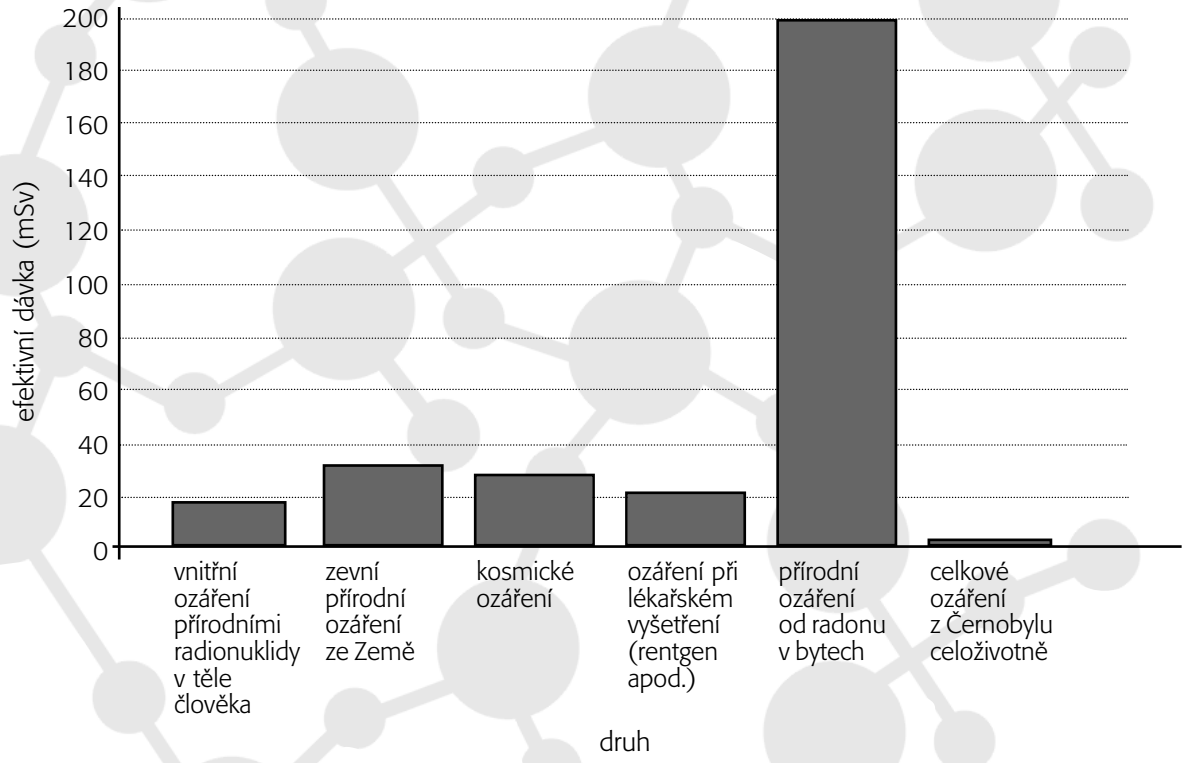
Podíl jednotlivých typů ozáření průměrného obyvatele ČR v roce 1986



Podíl jednotlivých typů ozáření na celoživotní dávce průměrného obyvatele ČR

typ ozáření	celoživotní – při střední délce života – 75 let
vnitřní ozáření přírodními radionuklidy v těle člověka	18,00
zevní přírodní ozáření ze Země	34,00
kosmické ozáření	29,00
ozáření při lékařském vyšetření (rentgen apod.)	23,00
přírodní ozáření od radonu v bytech	200,00
celkové ozáření z Černobylu za první rok po nehodě	0,46

Podíl jednotlivých typů ozáření na celoživotní dávce průměrného obyvatele ČR



Závěrem

Rozsah černobylské havárie byl i pro odborníky šokem. Ačkoliv možnost nadprojektové havárie v zásadě nevylučovali, považovali ji za velmi nepravděpodobnou. Havárie způsobila zvýšení nedůvěry a strach z jaderných elektráren, logicky došlo k aktivizaci hnutí proti jaderným elektrárnám po celém světě. Téměř všechny státy využívající jadernou energii však odmítly zastavit své jaderné programy poukazujíc na větší bezpečnost svých jaderných elektráren.

Sovětské orgány a později i orgány následnických států SSSR přijaly po několikaletém váhání rozhodnutí zastavit výstavbu dalších jaderných elektráren s reaktory RBMK. U provozovaných se realizovala rozsáhlá technická opatření ke zvýšení jejich bezpečnosti a tam, kde to nebylo možné, byla přijata rozhodnutí o uzavření a vyřazení z provozu (viz právě Černobyl). Přísná opatření směřovala také ke zvýšení úrovně a odpovědnosti provozního personálu.

Ve všech státech — včetně ČR — byla přijata a platí přísná opatření ke zvýšení jaderné a radiační bezpečnosti a přípravy odborného personálu. Na podstatně vyšší kvalitativní úroveň s přísnějšími bezpečnostními požadavky byly upraveny provozní předpisy a normy pro výstavbu jaderných elektráren. Byly zdokonaleny havarijní plány na ochranu personálu jaderných elektráren a obyvatelstva. Všichni provozovatelé jaderných zařízení začali brát vážně veřejné mínění o jaderné energetice.

MAAE kromě přímé pomoci postižené oblasti, nasazením mezinárodních týmů specialistů za účelem snížení následků havárie a dalších aktivit, reagovala na havárii přijetím dohody o systému včasného předávání informací v případě havárie jaderného reaktoru a mezivládní úmluvu o pomoci při haváriích.

Při současné moderní technice umožňující měřit nejen celkové příkony zevního záření, ale selektivně také mnohem citlivěji spektrometricky kontaminaci jednotlivými radionuklidy, se měřitelný vliv černobylské havárie projevil na území mnoha států. Bylo nutné seriózně tato měření vyhodnotit, posoudit jejich zdravotní význam a navrhnout případná protiopatření. Ukázalo se, že zatímco specialisté na ochranu před zářením byli na tyto úkoly vcelku dobře připraveni a dobře je zvládli, již daleko méně byli na ně připraveni jiní, včetně odborníků z blízkých fyzikálních i medicínských oborů. Proto v prvním období po havárii v některých státech převládala nejasnost koncepcí a nejednotnost přístupů k řešení situace. U nás se tato nejednotnost neprojevila díky existenci odborně fundované organizace v ochraně před zářením, která byla rozhodnutím na vládní úrovni včas pověřena hodnocením situace a návrhem patřičných doporučení.

Velmi často si naše i zahraniční veřejnost klade otázku, zda může k podobné havárii dojít na reaktorech provozovaných v jaderných elektrárnách v ČR.

U nás jsou provozovány 4 tlakovodní reaktory VVER 440 v JE Dukovany a 2 reaktory VVER 1000 jsou připravovány ke spuštění v JE Temelín. Zkratka VVER (vodovodní energetický reaktor) napovídá o prvním zásadním rozdílu od reaktoru Černobylského. Naše reaktory neobsahují grafit a k moderaci neutronů využívají „obyčejné" vody. Ta současně slouží jako chladivo, tzn. že v případě nadprojektové havárie neobsahují žádný jiný zdroj hoření kromě potenciálně

roztaveného paliva. Aktivní zóna je několikanásobně menší, kompaktní a uzavřená do tlakové nádoby, která se s celým primárním okruhem nachází v hermetických boxech (u starších typů) případně v kontejnmentu (u novějších typů). Chlazení je dvouokruhové s přísným oddělením primárního okruhu obsahujícího radioaktivní média od okruhu sekundárního, v němž je na turbinu přiváděna pouze čistá, nekontaminovaná pára. Tím vším je naplněna zásada tří nezávislých bariér oddělení radioaktivních důsledků potenciální nehody od běžného životního prostředí. Všechna tato bezpečnostní opatření na černobylském reaktoru nebyla principiálně realizována.

Z hlediska celkové bezpečnostní koncepce a z hlediska reaktorové fyziky existuje zásadní rozdíl v tom, že teplotní koeficient reaktivity moderátoru, který je obdobou kladného dutinového koeficientu reaktivity na RBMK, má principiálně zápornou hodnotu. V praxi to znamená, že se zvyšující se teplotou (ať už je její růst způsoben ztrátou chladiva nebo náhlým zvýšením výkonu) je do reaktoru vnášena záporná reaktivita způsobující až zastavení štěpné řetězové reakce. Tato vlastnost posílená o další záporné koeficienty reaktivity od výkonu a teploty paliva, je důvodem vysoké provozní stability a existence samoregulační schopnosti tlakovodních reaktorů.

S přihlédnutím k výše uvedenému a dále pak ke zcela odlišnému projektovému řešení tlakovodních reaktorů, k dvoj- až trojnásobnému zálohování všech antihavarijních a bezpečnostních systému, k využití pasivních antihavarijních systémů, odlišnému systému řízení a regulace a v neposlední řadě s přihlédnutím k podstatně vyšší kultuře bezpečnosti a způsobu provozování lze na tlakovodních reaktorech prakticky vyloučit možnost havárie se stejnými následky jako v Černobylu.

Žádná lidská činnost však není zcela bezpečná a proto s vědomím tohoto faktu a především s úplným potlačením pocitu „nám se nic takového nemůže stát", je třeba všemi dostupnými prostředky a na všech stupních dbát toho, aby jaderná energie byla využívána s maximální mírou bezpečnosti a nepřipustit ani teoretickou možnost selhání byť jednoho jediného článku v procesu přeměny energie atomu na energii elektrickou.

Autoři publikace a editor děkují touto cestou všem, kdož se jakýmkoliv způsobem podíleli na zpracování informací uvedených jak v této publikaci, tak na přiloženém kompaktním disku. Na tomto nosiči jsou uloženy archivním způsobem všechny zprávy a informace, které byly k otázce černobylské havárie shromážděny za dobu uplynulých 15 let. Státní úřad pro jadernou bezpečnost vyjadřuje své přesvědčení, že soubor těchto údajů bude v budoucnu užitečný jak pro odborníky, tak pro zájemce z řad veřejnosti a že přispěje k vytvoření objektivního náhledu na celou problematiku hodnocení následků černobylské havárie.

15 LET OD HAVÁRIE ČERNOBYLU

SÚJB

© státní úřad pro jadernou bezpečnost, praha •
http://www.sujb.cz/ • sujb@sujb.cz •
© státní ústav radiační ochrany, praha •
http://www.suro.cz/ • suro@suro.cz •
kolektiv autorů • editor: pavel.pittermann@sujb.cz
ve vydavatelství: janik@japhila.cz •
minimální konfigurace pc: 486 • win 95/98/me/nt •
rozlišení 640x480/256 barev • 32mb ram • cd rom •
praha 2001 •