Ing. Otakar Neruda, CSc.
plukovník docent MUDr. Pavel Petýrek, CSc.
Ing. František Podzimek, CSc.

Zavřeno

ZÁVAŽNOST RŮZNÝCH ZPŮSOBŮ OZÁŘENÍ Z RADIOAKTIVNÍCH PRODUKTŮ JADERNÉHO VÝBUCHU

Následkem použití jaderných zbraní dochází k radioaktivnímu zamoření atmosféry, terénu, atd. radioaktivními produkty. Osoby jsou ohrožovány zevním ozářením (radionuklidy se nalézají mimo osobu), ozářením z povrchové kontaminace (radionuklidy jsou na povrchu osoby – kůže, oděv) a ozářením z vnitřní kontaminace (radionuklidy se nacházejí uvnitř organismu).

V předpisech zabývajících se vyhodnocováním radiační situace a určováním radiačních ztrát vojsk a obyvatelstva se operuje prakticky pouze s dávkami ze zevního ozáření zářením gama.

Řada dalších předpisů a pomůcek souvisí z různých hledisek s povrchovou a vnitřní kontaminací (problematika individuálních prostředků ochrany, očisty, expertizy vody a potravin, režimů činnosti a opatření v zamořených prostorech nebo při manipulacích se zamořenými předměty a osobami). O této problematice se mnohdy pojednává souběžně, jak pro radioaktivní, tak pro chemické i biologické zamoření. Odtud pramení názory, které nesprávně zveličují závažnost kontaktního povrchového a vnitřního radioaktivního zamoření vůči distančnímu zevnímu ozáření zářením gama.

Tyto názory mají odraz i ve výcviku vojsk. V optimálních proporcích nebývá popisována, zabezpečována a cvičena ochrana vojsk před uvedenými způsoby ozáření s uvážením maximálního využívání a zachovávání pracovní a bojové výkonnosti. Cílem našeho článku je posouzení závažnosti jednotlivých způsobů ozáření z hlediska akutních poškození, která vedou k vyřazení osob, a dále formulace některých závěrů o významu a účelnosti opatření na ochranu vůči jednotlivým způsobům ozáření.

Způsoby ozařování

Při zevním ozáření je nejzávažnějším faktorem vyvolávajícím radiační poškození záření gama. Vzhledem k jeho vysoké pronikavosti je osoba v otevřeném terénu ozařována zářením gama uvolňovaným radionuklidy, které jsou v okolí především do vzdálenosti několika desítek metrů.

Při zevním ozáření záření gama je dávka v organismu rozdělena poměrně rovnoměrně. Kritické je poškození zejména krvetvorné kostní dřeně, střevní sliznice a po velmi vysokých dávkách i centrální nervové soustavy.

Při povrchové kontaminaci je nejzávažnější málo pronikavé záření beta (dolet v tkáni desetiny až jednotky mm), které předává kůži dávky desetkrát až stokrát větší, než předává záření gama hlouběji uloženým tkáním. Kritické je proto radiační poškození kůže.

Jsou-li radionuklidy spolknuty, závisí ozařování jednotlivých vnitřních orgánů především na stupni vstřebávání radionuklidu. Pokud radionuklid přísluší málo vstřebatelnému prvku nebo je pevně vázán na nevstřebatelnou látku, pasážuje pouze střevem a do vyloučení stolicí předává dávku zejména střevní stěně. Vstřebatelné radionuklidy ozařují zejména ty tkáně, v kterých jsou zadržovány (radiojódy – štítná žláza, radiostroncia – kost, atd.).

Při inhalační kontaminaci je důležitá velikost radioaktivních aerosolů (částic). Vdechnutí částic větších než 100 μm je málo pravděpodobné (vysoká rychlost sedimentace, nízké zvířování). Vdechnuté částice větší než přibližně 20 μm se zachytí v horních cestách dýchacích a jsou buď spolknuty nebo odstraněny z organismu (smrkání apod.). V plicích se retinují částice velikostí desetin až 20 μm.

Z toho pak vyplývá, že vztah mezi přijatou aktivitou a stupněm poškození obecně závisí na druhu radionuklidu a jeho fyzikálně chemické a chemické formě. Jelikož radioaktivní produkty jaderného výbuchu stáří do 30 dnů obsahují radionuklidy vesměs málo vstřebatelné a mohou být obvykle v nerozpustných částicích větších než 20 μm, zhruba platí, že z hlediska akutních účinků je zevní ozáření dávkou 1 cGY (1 R) ekviefektivní jednorázovému příjmu 12 až 37 MBq (0,3 až 1 mCi).

Radioaktivní částice

Relativní závažnost jednotlivých způsobů ozařování je výrazně ovlivněna charakteristikami látek, do nichž jsou radionuklidy včleněny. Např. pokud by byly radionuklidy pevně fixovány ve skleněných kuličkách o průměru 1 cm, je zřejmé, že povrchová a vnitřní kontaminace nepřichází v úvahu a jediným způsobem ozařování je zevní ozařování zářením gama. Naopak, je-li zdrojem zamoření oblak malých (např. 1 μm) radioaktivních částic s nízkou sedimentační rychlostí, vysokou schopností ulpívání na površích a obsahujících vyluhovatelné a vstřebatelné radionuklidy, je význam vnitřní a povrchové kontaminace vyšší. Tomuto případu odpovídalo zamoření ČSSR následkem havárie reaktoru v Černobylu.

Jaké vlastnosti má radioaktivní kontaminant z jaderných výbuchů?

Na 1 kt mohutnosti jaderného výbuchu vznikne několik desítek gramů radioaktivních produktů (směs štěpných produktů a indukované radionuklidy), představovaných přibližně třemi sty různými radionuklidy, které přísluší asi stu různým prvkům. Naprostá většina radioaktivních produktů je v ohnivé kouli nejprve ve stavu plazmy, posléze v plynném skupenství. K tomu, aby mohly vysedimentovat na zemský povrch, musí být včleněny do částic (opomíjíme hlubší podzemní a podvodní výbuchy).

Částice, do nichž se radionuklidy v závislosti na svých chemických vlastnostech a dalších činitelích včleňují, vznikají kondenzací a tuhnutím vypařených látek v ohnivé kouli. U vzdušných výbuchů to jsou především materiály munice. U pozemních výbuchů jsou do ohnivé koule a stoupajícího oblaku nasáty až desítky tun zeminy (horniny) na 1 kt mohutnosti. Zemina se částečně vypaří, úplně či částečně roztaví nebo alespoň rozruší.

U vzdušného výbuchu se většina radioaktivních produktů nachází v částicích o průměrech desetin až několika málo desítek μm. Sedimentační rychlost částice o průměru 1 μm činí 0,24 m/h; 10 μm – 32 m/h; 100 μm – 2,3 km/h (0,67 m/s). Z výšek vznosu radioaktivního oblaku se většina radioaktivních produktů objeví v přízemní vrstvě vzduchu a na zemském povrchu za relativně dlouhé časové období. Mezitím se částice horizontálně rozptýlí a jejich aktivita poklesne. Radioaktivní zamoření nedosahuje nebezpečných hodnot z hlediska akutních poškození.

Následkem vyšší hmotnosti látek, které jsou u pozemního výbuchu přítomny v ohnivé kouli a mraku, vznikají větší částice. Převážná část radioaktivních produktů se včlení do částic velikosti desítky μm až jednotky mm. Jejich rychlost vypadávání je taková, že se vytváří lokální spad.

Informace o rozdělení aktivity v závislosti na velikosti částic, o dalších charakteristikách částic pro všechny vzniklé částice i pro ty, které vypadávají v různých časech (vzdálenostech), a to v závislosti na parametrech jaderných výbuchů a meteorologické situaci jsou uvedeny v odborné literatuře.

Ve vzdálenosti odpovídající pásmu D a C je převážná většina aktivity na částicích velikostí větších než desetiny mm (stovky μm). Vypadávání radioaktivních částic i jejich vrstva (desítky mg/cm^2 a více) jsou postřehnutelné zrakem. Teprve ve vzdálenostech odpovídajících pásmu A, a především ještě za pásmem A, je podstatnější část aktivity vázána na částice řádově desítky μm a menší.

Existující též informace o chování radioaktivních částic při depozici (pevnost adheze, přemísťování částic atd.), a to v závislosti na velikosti částic, na povrchových vlastnostech, tvarech a sklonech povrchů i na dalších činitelích (sucho, respektive sedimentace s deštěm, či vlhké povrchy atd.). Tyto informace představují důležité podklady pro kalkulace a odhady závažnosti povrchové a vnitřní kontaminace v relaci se závažností zevního ozáření.

Chování radioaktivních částic není přítomností radionuklidů nijak ovlivněno. Částice větší než 100 μm mají malou pravděpodobnost, že po vypadnutí se zadrží na skloněných površích. Částice jsou přemísťovány pohybem povrchů, smývány deštěm. Postupně jsou zapracovány do normálního prachu a zeminy. Ve vodě částice sedimentují.

Z mnoha důvodů (kontaminace vody, včlenění radionuklidů do biocyklů, vstřebávání radionuklidů ze střeva po vnitřní kontaminaci, atd.) je důležitý stupeň vyluhovatelnosti radionuklidů z částic působením vody. Jelikož většina částic má sklovitou, struskovitou povahu, je vylučování nízké. Z částic větších než 0,5 mm (= 500 μm) se vyluhují řádově desetiny procent aktivity a do 3 % z částic velikostí 30 až 500 μm. Teprve z částic menších než 10 μm (troposférický a globální spad) se vyluhují řádově desítky procent radionuklidů.

Závažnost jednotlivých způsobů ozařování

Předpovědi pravděpodobných dávek a dávkových příkonů (úroveň radiace) **zevního ozařování zářením gama** v radioaktivní stopě, plošné rozsahy jednotlivých pásem v závislosti na parametrech jednotlivých výbuchů a na meteorologické situaci jsou uváděny v různých předpisech. V situaci po úderu je možné přímo měřit skutečné dávkové příkony a dávky. Tyto informace podávají zřetelný obraz o závažnosti zevního ozáření.

K **povrchové kontaminaci** může docházet:

- při prvotním vypadávání radioaktivních částic,
- při sedimentaci zvířených radioaktivních částic,
- následkem přenosu radioaktivních částic (látek) po kontaktu osoby se zamořeným povrchem (látkou).

Pobývá-li osoba v otevřeném zamořeném terénu a její kůže má stejnou plošnou aktivitu jako terén, potom dávkový příkon záření beta v kůži je zhruba šedesátkrát větší něž dávkový příkon ozařování celého těla zářením gama. Poměr prahových dávek v kůži a dávek celému tělu pro manifestaci poškození, které je možné označit jako stejně závažné, je přibližně deset. Srovnatelná plošná aktivita povrchu těla (kůže) a okolního prostředí vede k vážným poškozením kůže i v případě méně závažných projevů ozáření celého těla. Povrchová kontaminace přestává být vůči zevnímu ozařování zářením gama závažnou tehdy, je-li poměr plošné aktivity povrchu těla a plošné aktivity okolního prostředí osoby menší než 0,05 až 0,1.

Tabulka

Podmínky	Pásmo zamoření			
	A	B	C	D
Vypadávání za sucha	0,12	0,08	0,03	0,002
Vypadávání s deštěm	0,12	0,08	0,05	0,02

V tabulce jsou uvedeny střední hodnoty poměru plošné aktivity povrchu (oděvu) nechráněných osob a plošné aktivity terénu, jsou-li tyto osoby zasaženy prvotně vypadávajícími částicemi při vytváření radioaktivní stopy. Nízká adhese relativně velkých částic v pásmu D způsobuje, že prvořadé je zevní ozařování. Ve srovnání se zevním ozářením je povrchová kontaminace závažnější v pásmu B a především A zasažených menšími částicemi.

Nechráněným osobám vypadávající částice ve zvýšené míře ulpívají např. ve vlasech, ušních boltcích, očních koutcích, za krkem, posléze za opaskem, v záhybech oděvu atd. Pokud nejsou uplatněna ochranná opatření, je nutné povrchovou kontaminaci následkem prvotního vypadávání radioaktivních částic považovat za závažnou.

Větrem a pohybem techniky jsou zvířovány obvykle částice menší než 100 μm. Za mokra ke zvířování nedochází. Pouze v pásmu A se podstatnější část aktivity nalézá na částicích menších než 100 μm. Ve vytvořené radioaktivní stopě nevznikají následkem sedimentace zvířených radioaktivních částic tak vysoké poměry plošných aktivit povrchu těla a terénu, aby povrchová kontaminace byla závažnou ve srovnání se zevním ozařováním.

Variabilní a těžko předpověditelná je povrchová kontaminace přenosem radioaktivních částic kontaktem.

K **vnitřní kontaminaci** může docházet:

- inhalací – prvotně vypadávajících radioaktivních částic,
  – zvířených radioaktivních částic,
- ingescí – potravin zamořených po jejich bioprodukci,
  – v průběhu jejich bioprodukce,
  – zamořené vody.

Při prvotním vypadávání radioaktivních částic dochází současně k inhalaci (osoba bez ochranné masky) a k zevnímu ozařování. Relativní závažnost těchto dvou způsobů ozařování lze dobře posoudit. V pásmu C a především D, kde za interval vypadávání částic celková expozice může být z hlediska akutních poškození vysoká, je podíl inhalace zanedbatelný (velké částice). Podíl inhalace je zanedbatelný v pásmu A a ještě větších vzdálenostech. Zde ovšem celková expozice za časový interval vypadávání je hluboko pod prahem akutních poškození. Inhalace zvířených radioaktivních částic je zanedbatelný způsob ozařování vůči zevnímu ozařování gama.

Osoba pobývající v zamořeném prostředí (terénu) je zevně ozařována a současně v potravinách, vodě, atd., může pozřít denně aktivitu radioaktivních produktů z jisté plochy P(cm^2) dotyčného prostředí. Celodenní zevní ozařování bude svými účinky ekvivalentní vnitřní kontaminaci tehdy, když člověk přijme denně radioaktivní produkty přibližně z plochy P = 900 cm^2 okolního prostředí. Takové příjmy jsou zcela nereálné. (Např. z havarovaného černobylského reaktoru vypadlo v průměru na území ČSSR 4 200 Bq/m^2 ^{137}Cs. Průměrný příjem ^{137}Cs za první rok činil přibližně 4 000 Bq. Všemi způsoby vnitřní kontaminace bylo proto denně v průměru přijato ^{137}Cs z plochy P = 2,6 cm^2. Zcela převládal příjem v potravinách zamořených v průměru bioprodukce.)

Potraviny po jejich bioprodukci a transportu k prvotnímu zpracování nejsou na volných prostorách, navíc jsou opatřeny jedním nebo několika obaly. To vytváří účinné bariéry vůči kontaminaci vypadávajícími částicemi. Poškození bariér a obvykle i přítomnost kontaminantu je postřehnutelná. Zavlečení radioaktivních částic do stravy při přepravě potravin, její přípravě, výdeji a konzumaci nelze plně vyloučit, ale běžně uplatňovaná hygienická opatření vedou k tomu, že tento způsob ozáření je zcela nezávažný.

Vztah mezi plošnou aktivitou radioaktivních částic a měrnými aktivitami rostlinné produkce závisí na:

– velikost částic, ta ovlivňuje jejich retenci na listech i vyluhovatelnost radionuklidů, a tím i jejich včlenitelnost do rostlin,

– na vegetačním klidu rostlin v době vypadnutí částic a na druhu rostlinné produkce atd.

O měrných aktivitách živočišné produkce rozhoduje zamoření krmiva. K zamoření živočišné produkce, které by bylo nebezpečné z hlediska akutních účinků, nemůže docházet.

Zabrání tomu to, že kontaminovaná (a též zevně ozářená) zvířata přestávají přijímat krmivo a hynou.

Vzhledem k variabilitě činitelů ovlivňujících měrné aktivity produkovaných potravin se omezíme pouze na globální posouzení závažnosti tohoto způsobu ozáření. Od padesátých let bylo uskutečněno 545 Mt pokusných atmosférických jaderných výbuchů. Jejich troposférický a globální radioaktivní spad, který představuje hlavní vstup do potravních řetězců, zasáhl obydlené a zemědělské produkční oblasti především mírného severního pásma. Z dlouhodobého hlediska převažujícím způsobem ozařování byl a zůstává příjem radionuklidů v potravě kontaminované při její bioprodukci. Celkové průměrné ozáření obyvatele mírného pásma severní polokoule do roku 2 000 je odhadnuto na 4,5 mSv. To představuje ozáření z přirozeného pozadí za čtyři roky. I jaderný konflikt s desetkrát či dvacetkrát vyšší celkovou mohutností by nevedl k dlouhodobějším průměrným měrným aktivitám bioproduktů, které by byly závažné z hlediska akutních poškození.

Jak budou zamořeny možné zdroje pitné vody? Radioaktivní částice po vypadnutí do vody vysedimentují. Sedimentační rychlost částice o průměru 100 μm je přibližně 15 m/h. Ve vodě budou přítomny vyluhované radionuklidy. Uvážíme-li 1 % vyluhovatelnosti radionuklidů, hloubku 1 m stojatého vodního zdroje, potom denní příjem vody (1,5 l) by obsahoval 37 MBq (přípustný jednorázový denní příjem) tehdy, pokud by se vodní zdroj nacházel v oblasti s úrovní radiace 750 cGy/h (750 R/h). Sorpční vlastnosti půdy jsou natolik vysoké, že spodní vody budou prakticky nekontaminované. I povrchové vody mají velkou samočisticí schopnost. Vážnější příjem aktivit může nastat pouze tehdy, když v oblastech nebezpečného zamoření by byla požívána zakalená voda z mělkých povrchových zdrojů, zvláště po deštích spojených s vymýváním radioaktivních částic z atmosféry.

I když území ČSSR bylo z havarovaného černobylského reaktoru zasaženo rozpustnými radionuklidy, byl příjem radionuklidů používáním vody zanedbatelný ve srovnání s jinými způsoby ozařování.

Racionálním režimem v radioaktivní stopě rozumíme uplatňování takových ochranných opatření, které minimalizují celkové ozáření a především regulují ozáření pod práh akutních účinků, současně však jen přijatelně omezuje plnění úkolů.

Z hlediska racionální ochrany je nutno mít na zřeteli, že nejdůležitější způsob ozáření je zevní ozáření zářením gama. Dávkový příkon (úroveň radiace) strmě klesá s časem, takže akutní účinky mohou být způsobovány především ozařováním v prvních hodinách po vypadnutí radioaktivních částic. Nejúčinnější ochranná opatření jsou:

- přesun a zkracování doby pobytu v oblastech a místech s vysokými dávkovými příkony,
- příprava a vytypování stíněných prostor a pobyt v nich.

Tato opatření v sobě zahrnují i ochranu vůči zevní a vnitřní kontaminaci.

Prostředky protichemické ochrany jednotlivce (ochranná maska, protichemický oděv, rukavice, přezůvky, pláštěnka) neposkytují ochranu před zevním zářením gama. Chrání před povrchovou kontaminací, neboť omezují ulpívání radioaktivních částic, zabraňují jejich vniknutí na kůži a usnadňují očistu. Ochranná maska také chrání vůči vnitřní kontaminaci inhalací. Tyto prostředky však zatěžují osobu, omezují a narušují výkonnost, zhoršují plnění úkolu a prodlužují dobu jejich plnění. To může vést k prodlužování doby pobytu v místech a oblastech s vyššími dávkovými příkony záření gama. Prodloužení expozice a tím i zvýšení dávky zevního ozáření obvykle není vykompenzováno ochrannými účinky PCHOJ vůči povrchové a vnitřní kontaminaci. Použití PCHOJ tak má negativní efekt.

Není proto správné vázat jejich použití na dosažení jistých hodnot úrovní radiace (0,5 cGy/h, respektive 5 cGy/h), ale přizpůsobovat používání PCHOJ stupni aktivní činnosti, jejímu druhu a uvažovat aktuální riziko povrchové kontaminace a inhalace v příslušné situaci.

Použití PCHOJ je např. racionální v období vypadávání radioaktivních částic a u osob, které z určitých důvodů musí zůstat v zasahované oblasti na otevřeném terénu a současně, pokud použití PCHOJ výrazně nezhorší plnění úkolů. Neracionální je např. použití všech součástí PCHOJ při záchranných a likvidačních pracech v oblasti epicentra. PCHOJ snižuje výkonnost. V oblasti epicentra je relativní riziko povrchové kontaminace a inhalace vůči

zevnímu ozáření velmi malé (velké částice s nízkou měrnou aktivitou). Podobné zkušenosti byly získány při likvidačních pracích na havarovaném černobylském reaktoru.

Ochranným opatřením po kontaminaci je očista osob. Nejdůležitějším požadavkem na očistu je, aby byla vykonána co nejdříve po ní. K odstranění radioaktivního prachu jsou účinné relativně prosté postupy (oprášení, otření, opláchnutí). Závažnější zamoření jsou obvykle spojena s vizuálně postřehnutelným znečištěním.

Náročnější postupy úplné speciální očisty osob uskutečněné až za více než 6 až 8 hodin po zasažení osob prvotně vypadávajícími radioaktivními částicemi jsou málo účelné. Vzhledem k rychlému poklesu aktivity již kůže obdržela převážnou část dávky, která způsobuje poškození.

Použití ochranné masky vůči inhalaci radioaktivních částic není nezbytné ani při prvotním vypadávání. Nemá opodstatnění v zamořeném terénu po vypadnutí částic, zvláště v neprašném prostředí v okolí epicentra a v pásmech D a C.

Dostatečnou ochranou vůči vnitřní kontaminaci následkem příjmu radionuklidů ve stravě je zachovávání běžných základních hygienických opatření pri manipulaci s potravinami, přípravě stravy a její konzumaci.

□

Byly popsány způsoby ozáření osob v oblastech zasažených radioaktivními produkty jaderných výbuchů. Byla posouzena závažnost těchto způsobů ozáření a účelnost ochranných opatření. Nejzávažnějším způsobem ozáření je zevní ozařování zářením gama. Především vůči tomuto způsobu ozařování musí být zaměřena ochrana osob. Z některých předpisů a pomůcek vyplývá nesprávně nadceněný význam povrchové a především vnitřní kontaminace. Jsou též zabezpečována a uváděna ochranná opatření, která postrádají racionální zdůvodnění a mohou mít dokonce negativní celkový efekt.

... přípravu a řízení prvního jaderného úderu frontu, obnovení bojeschopnosti vojsk ...

(Směrnice pro operační a mobilizační přípravu ve výcvikovém roce 1988–1989)