

616-001.26/29

## RADIAČNÍ NEHODY V MÍRU

### Dozimetrická a zdravotnická problematika

#### Část II.: Určení dávky podle dozimetrie a laboratorních vyšetření

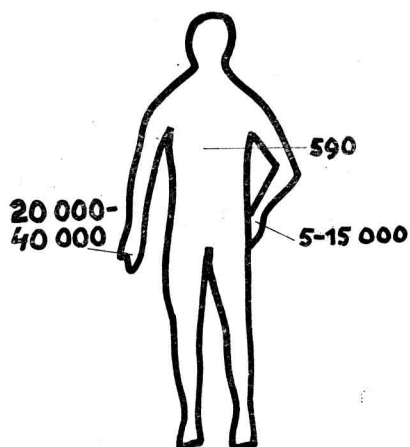
Podplukovník MUDr. Vlastimil HÁJEK, CSc.  
vojenská nemocnice Slovenského národního povstání v Ružomberku

Přesné určení dávky a její prostorové rozložení je základním problémem při každé radiační nehodě: její velikost určuje základní lékařský přístup, volbu terapie, délku hospitalizace a prognózu ozářených osob. Přes dosažený pokrok v měřicích technikách není určení dávky záření jednoduché. Hlavně první odhady jsou velice nepřesné a často značně převyšují skutečné hodnoty, a to i tam, kde jsou účastny kvalifikované osoby, samy postižené (24).

Při nehodách na kritické úrovni jsou pracovníci ozáření směsí paprsků gama o různé energii, neutrony a zářením jimi indukovaným, čas-

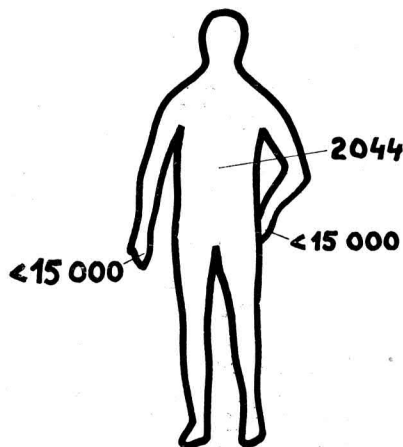
to velmi měkkými paprsky X, po určitou dobu působí záření z okolního materiálu, září i Na 24 v plazmě zasažených (přispívá však k celkové dávce jen nepatrným podílem, okolo jednoho procenta [7, 18]). Pro malé vzdálenosti bývá ozáření značně nerovnoměrné, vedle extrémně exponovaných částí těla mohou být i oblasti úplně kryté; při nehodě AL rozhodovala o dávce výška těžké vody v obalu reaktoru (28); osoby jsou vůči zdroji různě orientovány — při bočním ozáření je radiační zatížení kostní dřevě a střev o 15—18 % menší než při ozáření zepředu (7). Expozice je různě dlouhá; při nehodě LA — 3

Obr. 1 a



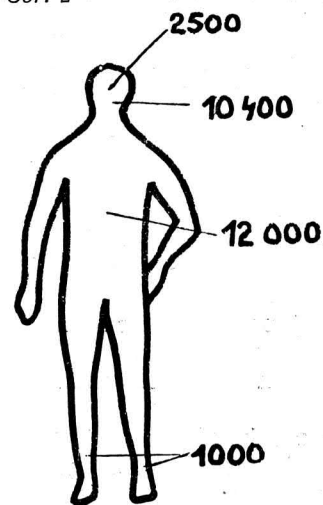
Rozložení dávky na těle smrtelně zasaženého při nehodě LA 1

Obr. 1 b



U smrtelně zasaženého při nehodě LA — 2. U obou jsou údaje v rem

Obr. 2



Rozložení dávky (v rad) u smrtelně zasaženého při nehodě LA — 3

trvala 200 mikrosekund [7], při nehodě AL okolo 10" [28]; během této doby se osoby pohybují v okolí zdroje, přibližují i vzdalují. Při mexickém incidentu trvalo ozařování dokonce asi 100 dní [15].

U zářičů gama není situace jednodušší: působí zde sice zdroje, jejichž charakteristiky jsou nám přesně známy a které se blíží bodovým, ale pro blízkost objektů dochází k značnému nerovnoměrnému ozáření pro prudký pokles intenzity se vzdáleností — při velkých kožních dávkách pak nacházíme poměrně malé celotělové ozáření. Hůře se zde určuje doba expozice [5].

Ukázky nerovnoměrného ozáření při různých typech radiačních nehod jsou uvedeny na obrázcích 1—5.

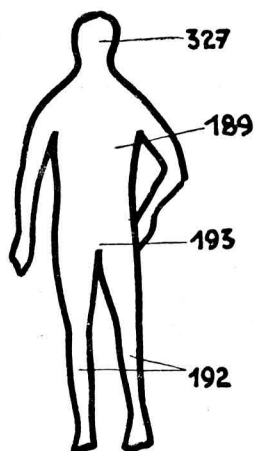
V současné době jsou všichni pracovníci ato-

mových zařízení opatřeni osobními dozimetry, i když při některých nehodách zjišťujeme u postižených poznámkou, že v době ozáření neměli dozimetr.

Zkušenosti s filmovými dozimetry ukazují, že většinou dochází k úplnému zčernání, které znemožní přesné určení dávky, postupuje-li se při vyhodnocování běžným způsobem. Nepoužitelné filmy byly při nehodě BK [7]. Už v roce 1952 byla určována dávka podle množství redukovaného stříbra po vyvolání [28]. Část zčernání při ozáření smíšeným zářením spadá na vrub indukované neutronové aktivity v kovových filtrech dozimetrů [33]. Naprosté vybití a nečitelnost se projeví i u ozářených tužkových komůrek [7].

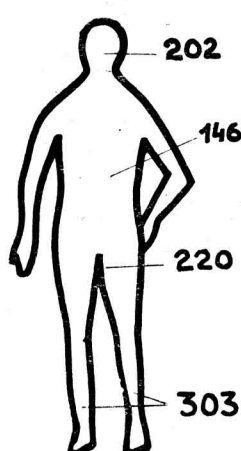
Moderní dozimetrické plakety pamatují na havarijní situace použitím speciálních filmů, vlož-

Obr. 3 a



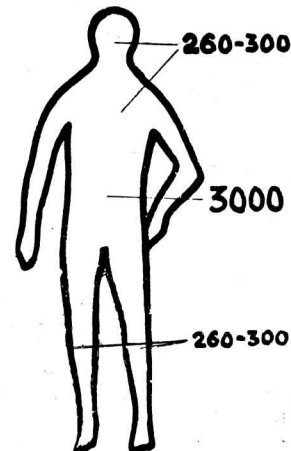
Ozáření dvou osob při nehodě AL (v rem)

Obr. 3 b



Ozáření dvou osob při nehodě AL (v rem)

Obr. 4 a



Rozložení dávky v R při ozáření Co 60 (USA — Co 1)

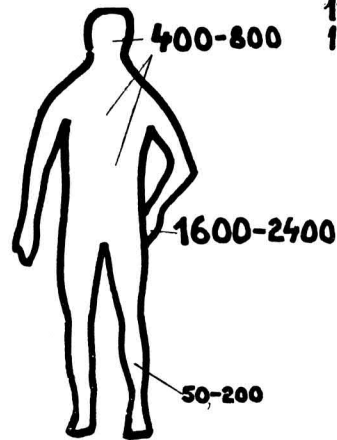
kami chemických dozimetrů, aktivního skla a prostředků neutronové dozimetrie (sírové pelety, zlaté a indiové fólie — 7).

Při nehodě RX byl využit pro kalkulace dávky méně citlivý film (8, 14); při československé nehodě CO 2 byly tužkové dozimetry nečitelné, z filmů se podařilo určit dávky v rozmezí 0,3 až 4,0 R, zatímco podle anamnézy měly dávky dosáhnout až 17,5 R (24). V jednom případě, při nehodě LA — 3, zčernaly dozimetry v 42 metry vzdáleném skladu dávkou  $670 \pm 90$  mR (7); tento údaj, použitý při rekonstrukci nehody, přispěl ke stanovení celkové dávky ozářeného operátora. Zkušenosti z dosavadních nehod vedly k návrhu umístit na různých místech a v určitém systému polostabilní dozimetrická zařízení, která by pomohla při stanovení geometrie nehody a při analýze jednotlivých složek smíšeného záření (7). Automatické hlásiče aktivity, spojené se zvukovým, popřípadě optickým zařízením, se osvědčily při několika nehodách (RX, LA-3, SL-1); při nehodě jugoslávského reaktoru (BK) byla jaderná exkurze zachycena přístrojem na měření aktivity vzduchu, vzdáleným 540 metrů, v podobě deset minut trvajícího vzestupu aktivity (30).

Při nehodě LI byla použita k předběžnému stanovení úrovně radiace na povrchu zdroje běžná MG trubice, která se však pro vysokou aktivitu a pulsní charakter radiační emise zahltila a dávala falešné, podstatně nižší výsledky (nižší o tři řády — 7).

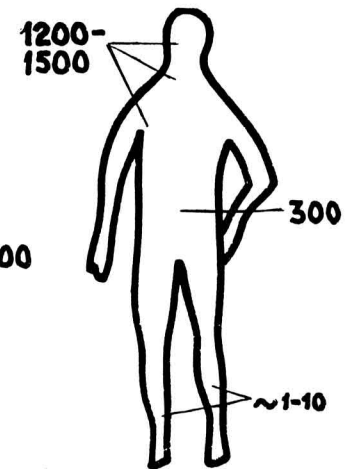
U smíšeného záření je velmi důležité určit podíl rychlých neutronů, protože malá odchylka může vést k značnému rozdílu při určení konečné, efektivní dávky: bylo-li o 5 % více neutronů s energií nad 5 MeV, celková dávka by se zvýšila o 45 % (7). Zde záleží také na tom, jak hodnotíme RBE neutronů pro celkový účinek a pro účinek na jednotlivé orgány (taková diferenciacce byla provedena při nehodě AL — 28); stanoví se v jednotlivých případech mezi 2 až 10 (7, 28). Nejlepší metodou k určení neutronového podílu je měření indukované radioaktivity v předmětech v okolí nehody (40), popřípadě kovových předmětů na obleku a těle ozářených (knoflíky [7, 14], kovové části plnicích per a zlaté obroučky brýlí [33], prsteny [33], zubní náhrady [18] atd. Přirozeně dochází i k indukci ozářených osob — jejich aktivita se dá měřit buď orientačně GM trubicí nad břichem [14], nebo přesněji celotělovým počítačem (2, 33). Hlavním zdrojem této aktivity je Na 24 v plazmě a jeho množství se určuje měřením pravidelně odebíraných vzorků; bylo použito i měření P 32 v moči při nehodě BK (2); radioaktivní sodík do moče přechází v malém množství (je-li zde prokázán, pak vznikl ozářením plného močového měchýře), jeho plazmatická hladina při několikahodinovém sledování kolísá (při odečtení poklesu aktivity rozpadem) v rozmezí 5 %, není tedy ovlivňována metabolismem (7), rovnováha je dosažena za 20 minut po ozáření (18). Značné přesnosti dosahuje určení P32 ve vlasech, kde vzniká aktivací síry (32). Radioaktivní chlor není vhodný pro

Obr. 4b



Rozložení dávky  
při ozáření Co 60  
u sovětské nehody

Obr. 5



Rozložení dávky  
při ozáření  
X-zářením  
při nehodě LI  
(v R)

půlhodinový poločas (18). Určíme-li neutronovou dávku, můžeme naopak dosti přesně určit i dávku záření gama, protože kritické reakce mají určitý známý poměr obou složek pro ten nebo onen typ (kolem 33 % neutronů a 66 % gama záření — 7, 14) — ovšem záleží na vzdálenosti, s odstupem se podíl neutronů zmenšuje (na 10 % při nehodě AL — 18). Vždy je nutné zjistit přesné postavení osob, jejich vzdálenost a činnost při nehodě a po ní. Dávky se pak stanoví pomocí rekonstrukce celé příhody, ozářením pokusných zvířat za stejných podmínek (osel u Y-12) (2, 7), kalibrací ozářením zdrojem o podobných vlastnostech (LI — použit terapeutický rtg přístroj o stejném výkonu [7], Co 60 zdroj u nehody LA-3 [7]). Při analýze nehody pokusného reaktoru Borise Kidriče (BK) byla celá nehoda zopakována a kolem zařízení byly rozestaveny figury, v jejichž povrchu byl solný roztok (2, 7).

Konečné hodnoty se neustále upřesňují: zpravidla byla první měření vyšší než skutečné dávky; ovšem nejistota a rozptýl hodnot je stále tak vysoký, že nutí spíše pro předpoklad vyšších hodnot, máme-li se rozhodnout pro léčebný postup nebo další zařazení do práce.

Na tabulce 1 jsou zpracovány dozimetrické údaje pro některé závažnější nehody; údaje se vztahují na průměrnou celotělovou dávku, neberou do úvahy lokální ozáření, kde jsou možné variace ještě vyšší.

Na tabulce 2 jsou podrobnější údaje pro jednotlivé postižené při nehodě BK v Jugoslávii. Na obou tabulkách jsou udány i metody, kterými se k výsledkům dospělo; u druhé tabulky jsou udány i orientační vzdálenosti od zdroje a seřazení zasažených podle klinického průběhu a laboratorních vyšetření.

Tab. 1

Dozimetrické údaje pro některé závažnější nehody a metody, kterými byly stanoveny

Nehoda a rok	První údaj	Další kalkulace v časovém sledu	
LA 1 1945	590 rad	1327 rad <sup>1</sup>	236-365 rad <sup>5</sup>
Y-12 1958	letální	298- 461 rad <sup>2</sup>	
LA 3 1958	10 000 rem	3900-4900 rad <sup>4</sup>	
LI 1960	180-500 R	200- 300 R <sup>6</sup>	
RX 1962	pod 93 rad	49-123 rad <sup>5</sup>	
Mexiko 1962	2940-5165 R	4700 R <sup>8</sup>	300-330 R <sup>7</sup>
	1995-2938	3500	
	1372-1872	2870	
	897-1818	3000	
	984-1716	1200	

Poznámky:

- 1 — 1960 — stanoveno fyzikálně (7)
- 2 — 1958 — indukce Na 24 při stejném ozáření pokusného zvířete (7)
- 3 — 1960 — fyzikálně (10)
- 4 — 1959 — podle neutronové indukce (7)
- 5 — 1962 — filmová dozimetrie a rozbor fyzikálních podmínek (14)
- 6 — 1960 — podle klinického průběhu (21)
- 7 — 1962 — podle dlouhodobého sledování (21)
- 8 — 1965 — podle kalkulací CNEN Mexiko (15).

Některé z údajů zde, ale i na jiných přehledech uvedených, jsou v rad, jiné v rem — vzájemné srovnání je obtížné, neznáme-li přesně podíl neutronů a jejich relativní biologický účinek. Dochází tak k rozdílu mezi fyzikální dávkou (rad) a biologickou (rem) — bude-li se podíl neutronů blížit 50 %, pak při RBE 2—3 bude biologická dávka 2× vyšší než fyzikální (7).

V mnoha případech není dozimetrické určení

dávky možné, chybí základní údaje o délce expozice a postavení ozářených osob, jsou různé stupně krytí a podobně. Jednotlivé organismy také reagují jinak na ozáření, reakce závisí na celkové dispozici, momentálním stavu a jiných, ještě neznámých faktorech. Přesné dozimetrické hodnocení pak trvá dlouho, často několik dní, v mnoha případech pro celý průběh onemocnění rozhodujících. Je proto důležitou složkou rozboru radiačních nehod srovnání biologické odpovědi, laboratorních výsledků s dozimetrií fyzikální a celkovým klinickým průběhem. Obě metody se navzájem doplňují a korigují.

Již od prvních let tohoto století jsou pozorovány změny v krevním obraze, hlavně v jeho bílé složce, vyvolané akutním nebo protražovaným ozařováním. Proto u všech nehod byla věnována velká pozornost vývoji morfologických i numerických změn v periferní krvi i v krvetvorné dřeni. Na tabulce 3. přinášíme některé údaje pro postižené různou úrovní radiace, od dávek na úrovni přípustných až po hodnoty supraletální.

Jak je vidět již na první pohled, se stoupající dávkou jsou změny závažnější, pokles hodnot je výraznější a minima se posunují blíže k nehodě. Zdá se však, že ani podrobnější studie nám neukáží nic víc než tento povšechný závěr. Většina autorů přijímá, že časná hematologie má malou cenu pro určení celkové dávky, tíže choroby a konečně i prognózy — na základě sledování postižených z nehod BK, Y-12, LI a dalších (11, 13). U postižených Jugoslávčů neukazoval krevní obraz na přežití nebo smrt jednotlivých zasažených (7). I rozbor nehod LA-1 a LA-2 vedl k závěru, že samotný krevní obraz neřekne mnoho jako biologický indikátor, vyjma počáteční pokles nebo extrémně nízké hodnoty lymfocytů (7). Při

Tab. 2

Srovnání klinických a dozimetrických údajů při havárii pokusného reaktoru v Jugoslávii v roce 1958

Osoba	Vzdálenost m	Pořadí podle		1958 <sup>1</sup>	Kalkulace dávky		1959 <sup>4</sup>	1962 <sup>5</sup>
		kliniky	laborator. výsledků		1958 <sup>2</sup>	1958 <sup>3</sup>		
V (+)	pod 4	1	2	1000—1200	do 683 rem	840 rem	640 rad	436 rad
M	4	2	3—4	700—1000		856 rem	580 rad	414 rad
G	6	5	3—4	700—1000		920 rem	600 rad	426 rad
D	pod 4	3	1	700—1000		1024 rem	500 rad	419 rad
H	6	4	5	600— 800		694 rem	420 rad	323 rad
B	nad 6	6	6	300— 500		408 rem	350 rad	207 rad

- Vysvětlivky: <sup>1</sup> odhad podle prvních klinických projevů v Paříži (22),  
<sup>2</sup> dávka stanovena změřením indukované radioaktivity kovových předmětů v okolí (40),  
<sup>3</sup> podle indukovaného Na 24 v plazmě (7),  
<sup>4</sup> revidované fyzikální údaje podle HURST-RITCHIE (2),  
<sup>5</sup> dávka stanovena při simulované nehodě podle indukce Na 24 v solném roztoku (2).

Tab. 3

Přehled hlavních hematologických hodnot pro osoby zasažené různou dávkou záření  
Údaj v závorce označuje den po nehodě

Přibližná dávka v rad	Nehoda	L	Ly	E	Trombocyty	Poznámka
50	PR	5400 (10)	1600 (5)		100 000 (8)	
100	PR	3400 (10)	1200 (10)		80 000 (22)	
200	LA-2		1000 (4)	anémie (40-70)		
200	USA-Co	1220 (34)	450 (1)			
200	Austrálie-Co		250 (1)		pod 100 000 (18)	intenzivní lokální záření
300	SSSR-2	700 (15)			36 000 (15)	
450	SSSR-1	160 (29)		2 800 000 (40)	20 000 (14)	
600	SSSR-2	175 (31)		2 900 000 (31)	6 000 (31)	
600	BK		132 (5)	3 100 000 (25)	19 000 (18)	+ 31. den
2000	LA-2	0 (7)	0 (2)		0 (8)	+ 9. den
4000	LA-3	14 000*	0 (1)			+ za 35 hod.
9000	UN	46 000*	0 (1)		bez změn	+ za 49 hod.

Poznámka: \* hodnoty před smrtí (zachycený iniciální vzestup)

srovnání obou nejtěžších postižených při LI a Y-12 (na trup okolo 300 R) jsou nápadně značně rozdílné jak v hraničních hodnotách, tak v celkovém průběhu křivky (12). Vycházíme-li z numerických hodnot lymfocytů, není pro naše závěry rozhodující absolutní pokles, ale rychlost, s jakou počet klesá k dolním hodnotám až k úplnému vymizení (7, 12). Je potřeba vyšetřovat KO denně (u LA-1 a LA-2 byl odebírán dvakrát denně) a sestavit křivky poklesu (12, 13, 14). Pokles lymfocytů je úměrný dávce jen do určité hodnoty, pak je již pokles stejný — závažné je, že k tomu dochází již při relativně malých dávkách, které jsou pod mezí, kdy se rozhoduje o přežití nemocného. U některých ozářených je výhodné doplnit prosté numerické údaje indexy, např. ony, které navrhuje a na australských ozářených ověřil SCHIELS (34).

Hodnocení leukocytů celkových a granulocytů je obtížné pro počáteční vzestup hodnot, který má dva vrcholy a trvá až 48 hodin, jak bylo ukázáno u nehody LA-1, LA-2, Y-12 a dalších (7); průběh změn je ovlivněn krytím dřeně a nekrozou ozářených tkání (7). Hodnocení změn červené složky nemá význam pro časovou diagnózu: u některých vyšetřovaných se objevil zřetelný pokles začátkem druhého měsíce, na kterém však má podíl především hojně odebírání vzorků krve pro diagnostické účely (Y-12, 7). Morfologické změny mají předcházet numerické, u leukocytů se objeví již po 8 R (5); hemogramy zasažených při nehodě BK poskytují pestrý pře-

hled tvarových anomálií buněk i jader, nezralých forem a podobně, hlavně u granulocytární řady (7). U menších dávek jsou však tyto změny subtilní (u nehody RX — 14). I tak, bereme-li v úvahu numerické a morfologické změny v krevním obraze z periferie, nemůžeme rozhodnout dříve než šestého dne, zda bylo ozáření vyšší nebo nižší než 400 R (12).

Náročným vyšetřením je určení počtu DNK-syntetizujících buněk cirkulujících v periferní krvi. Předpokládá inkubaci v prostředí s thymidinem, značkovaným tritiem a pak autoradiografický průkaz. Normální hodnota je 5—10 buněk na  $\text{mm}^3$ ; po ozáření počet klesá, jak ukázaly výsledky u ozářených při nehodě Y-12; dá se použít i u dřevných buněk, závěr je možný až za několik dní (7).

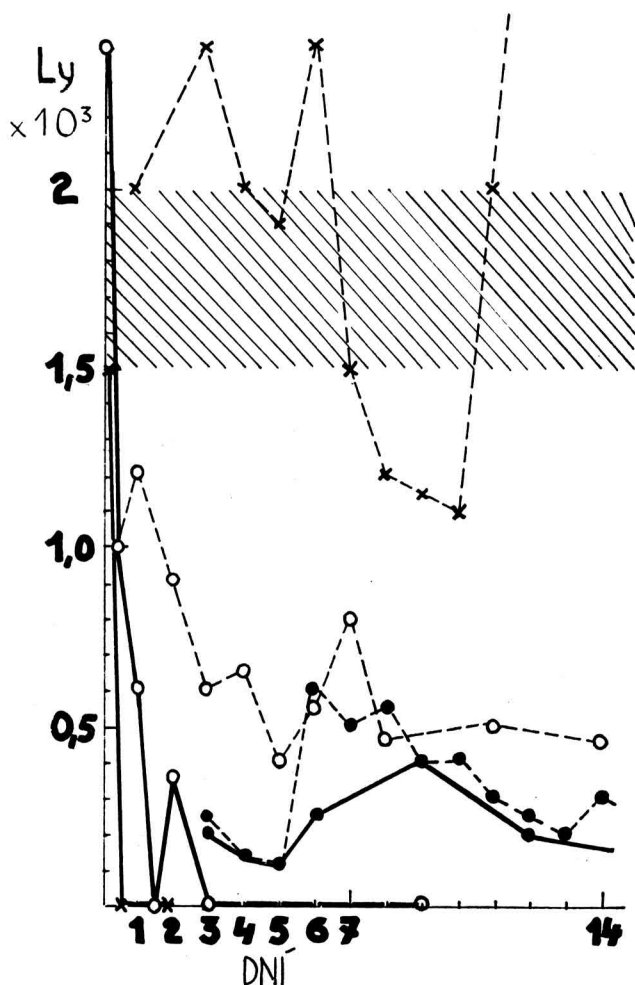
Vyšetření kostní dřeně bylo provedeno u většiny zasažených; i zde je nutno provádět sériová vyšetření a sledovat buňky z různých částí skeletu, předpokládáme-li nerovnoměrné ozáření (u LI-13). U postižených při Y-12 byl průkaz celulórního poklesu možný až 9. den, 24. den byly hodnoty neprůkazné (7). Cennějším se ukázalo sledování mitotického indexu podle Feulgena: u nehody Y-12 byl zaznamenán pokles z 8,8 ‰ na 1,0 ‰ při dávce 250 až 350 rad (7). Je úměrný dávce, ale je pozdní, až 4. dne po ozáření, vyžaduje praxi v hodnocení (11).

Klasické biochemické metody ukáží málo nebo vůbec nic (zkušenosti z nehod BK a Y-12 (7). Stejně negativní byly i výsledky u RX (14),

Graf 1

Ukázka kolísání počtu lymfocytů u ozářených osob během prvních 14 dnů po ozáření

- X ——— X PR I (okolo 100 R)  
 O ——— O Y — 12 II (okolo 300 rem)  
 ● ——— ● LI II (okolo 300 R)  
 X ——— X LA 3 (okolo 4000 rad)  
 O ——— O LA — 2 (okolo 2000 R)  
 ● ——— ● BK I (okolo 650 rad)



malé změny u zasažených při LA-1 a LA-2 (18). Jedině u smrtelně zasaženého pracovníka při nehodě LA-3 bylo prokázáno zvýšení sérových transamináz 6× (7).

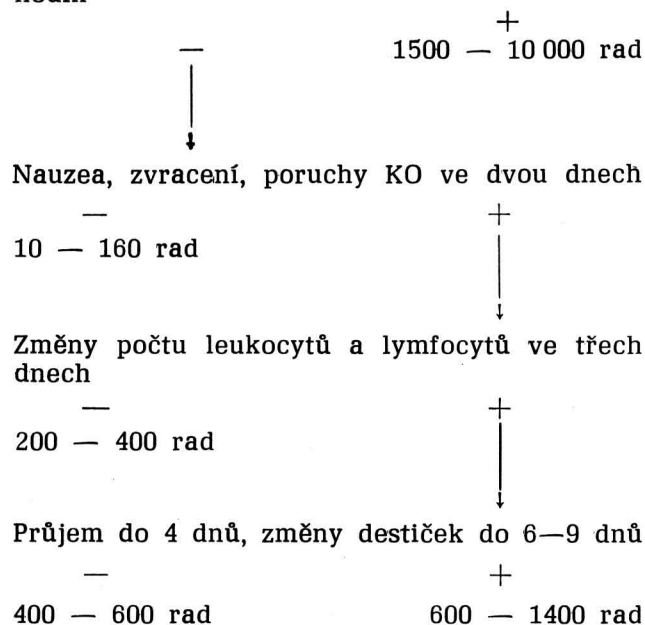
Možnost časného průkazu ozáření a orientačního údaje o dávce však přineslo sledování vylučovaných aminokyselin, popřípadě jejich derivátů, moči. Jejich průkaz se považuje za citlivější indikátor než sledování krevního obrazu (28). U nehody AL byla jejich hladina zvýšena 10krát, zvýšení však nebylo úměrné dávce (28). Podobně byl prokázán taurin a desoxyribonukleáza u zasažených Jugoslávců, ale ani zde nebyly hodnoty úměrné dávce (7). U supraletálně zasaženého LA-3 bylo zvýšeno vylučování kreatinu na 50násobek (7), protože nemohl být využit ozářeným svalem; byl pozorován i zvýšený odpad glycinu, který, jak ukázalo značkování izotopy v pokuse, pochází z rozpadlého kollagenu,

považovaného zatím za radiorezistentní (7). Zatímco u nehody RX nebyl žádný výraznější nález v moči (14), u LI se objevovaly aminokyseliny v moči při vlnách erytému, vedle glykosurie a ribosurie (7). Zvláštní pozornost je věnována zvýšenému vylučování kyseliny beta-aminoizomáslé (BAIBA). Vzniká především z thyminu, ale i thymidinu a DNK, u zvířete i z valinu. Je známa od roku 1950 a v roce 1958 nalezena v moči ozářených při nehodě Y-12, první a druhý den po expozici (7). Její mateřská látka, thymin, je buď pro ozáření nevyužitý materiál pro syntézu DNK, nebo vzniká z jader, ozářením rozpadlých. Není však specifickou pro ozáření, vylučování BAIBA je zvýšené po infekci, za horečnatých stavů, po operacích i krátkodobém hladovění (může mít tedy vliv i anorexie v iniciálním stadiu radiačního syndromu), konečně je její vylučování vrozené u 10–15 % normálních osob. Proto se má spíše hodnotit malé zvýšení jako projev malého ozáření. Byla sledována i u ozářených při LI, hodnoty se vrátily k normě ve 4 dnech (7).

Velmi nejisté a individuální jsou časně klinické projevy, hlavně zvracení, chceme-li je využít k určení dávky. Nad 100 R nám trvání a doba vzniku neurčuje prognózu (16). U LA-1 se objevilo za 24 hodiny, LA-2 už během převozu do nemocnice, Y-12 za 2–4 hodiny a trvalo 3 hodiny až dny (11).

Schéma hrubého třídění ozářených podle klinických známek a nástupu změn v krevním obraze

Zvracení, nauzea, průjem během minut, anorexie, šok, dezorientace, kóma během minut a hodin



Jen ve spojení s ostatními metodami a výsledky vyšetření můžeme provést hrubé třídění pro odsunové a základní terapeutické účely, jak ukazuje schéma na str. 127, upravené podle 35.

Na závěr této stati můžeme říci, že zkušenosti, získané při likvidaci následků atomových nehod, nepotvrzují zcela pozorování, získaná v pokusech nebo u nemocných léčených záření, pokud se týkají úzké souvislosti mezi velikostí dávky a

hematologickou, popřípadě jinou orgánovou, hlavně biochemickou odpovědí. Přes všechny nedostatky a neurčitosti jsou to stále dozimetrie, rekonstrukce nehody a zevrubná radiační anamnéza, které nám dají nejvíce informací o ozáření, jeho velikosti, prognóze zasažených a o potřebě léčení.

**Literatura uvedena na konci třetí části**