



## HODNOCENÍ NEBEZPEČNOSTI RADIOAKTIVNÍCH ZÁŘIČŮ PŘI ŘEŠENÍ HAVARIJNÍCH SITUACÍ

### THE ASSESSMENT OF THE DANGEROUSNESS OF RADIOACTIVE SOURCES IN CASE OF RESPONDING TO EMERGENCY SITUATIONS

Jozef SABOL<sup>1</sup>, Bedřich ŠESTÁK<sup>2</sup>, Leoš NAVRÁTIL<sup>3</sup>

#### SUMMARY:

*The paper deals with the classification of radioactive sources taking into account their impact on persons who may be exposed in case of radiological incidents, accidents or other emergency situations including the use of a radiological dispersive device. The quantification of the sources, which, in general, belong to one of the category of dangerous substances, is based on relevant international recommendations with special emphasis on the documents of the International Atomic Energy Agency.*

**KEYWORDS:** *classification of radionuclides, dangerous substances, radiation exposure, radiotoxicity*

#### ÚVOD

Je všeobecně známo, že radioaktivní látky patří mezi nebezpečné látky, kde se vyžaduje zvláštní pozornost při jejich využívání, skladování, likvidaci a přepravě. Přes veškerá striktní opatření, která se při manipulaci s těmito látkami dodržují, je zde vždy určitá, byť velice malá, pravděpodobnost nehody, havárie nebo jiné mimořádné události. V takových případech může dojít k nadměrnému ozáření pracovníků, záchranného personálu a také dalších osob z řad veřejnosti. Mohou se vyskytnout i situace, kdy je radioaktivní kontaminací zasaženo životní prostředí. Řešení mimořádných událostí si obvykle vyžaduje značné lidské úsilí i vysoké materiální a finanční prostředky. K tomu, aby se existující kapacity a prostředky mohly efektivně a optimálně využít, je třeba v jednotlivých specifických podmínkách volit diferencovaný přístup v závislosti na stupni nebezpečí radioaktivních látek, které v dané situaci představují hlavní hrozbu. Z těchto důvodů je nezbytné přihlídnout ke klasifikaci nebezpečnosti radioaktivních látek s ohledem na jejich radiotoxicitu.

V současné době nám zřejmě nehrozí nebezpečí, které by souviselo s úmyslným nebo neúmyslným použitím jaderných zbraní. Díky mezinárodním dohodám a relativnímu klidu mezi jadernými mocnostmi nelze předpokládat nasazení těchto zbraní hromadného ničení při řešení konfliktů. Určitou výjimkou, a také poněkud neznámým faktorem, mohou být úmysly KLDR a pak dlouholeté napětí mezi Indií a Pákistánem, kteří vlastní jaderný arzenál. V blízké budoucnosti určitou hrozbu může představovat i Írán, který podle všech indicií o takové zbraně usiluje.

V důsledku aplikace příslušných kontrolních mechanismů, které, v rámci programu zákazu šíření jaderných zbraní, vyvíjí Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE), jsou dnes tyto zbraně dostatečně zajištěny před případnou snahou teroristů o jejich zneužití. V tomto kontextu lze předpokládat, že mimořádná radiologická událost může nastat pouze v důsledku dvou situací: 1) havárií na jaderně energetických zařízeních a pracovištích s radioaktivními zdroji o velmi vysoké aktivitě (v důsledku technické závady, porušení předpisů či vlivem lidského faktoru), nebo 2) sabotáží na těchto zařízeních nebo

<sup>1</sup> Jozef Sabol, doc.Ing.DrSc., Fakulta bezpečnostního managementu PA ČR v Praze, +420 73331 843, jozef.sabol@gmail.com

<sup>2</sup> Bedřich Šesták, prof.Ing.DrSc., Fak. bezpečnostního managementu PA ČR v Praze, +420 608024302, sestav@polac.cz

<sup>3</sup> Leoš Navrátil, prof.MUDr.CSc., Fak. biomedicínského inženýrství ČVUT v Praze, +420 736623666, leos.navratil@fbmi.cvut.cz

pracovištích eventuálně cíleným použitím radiologické disperzní zbraně teroristy. Vzhledem k tomu, že různé radionuklidy se vyznačují velmi odlišnou radiotoxicitou, při posuzování jakékoli radiologické mimořádné události spojené s velkým únikem, resp. úmyslným rozptýlením radioaktivních látek o vysoké aktivitě, má velký význam kategorizace jednotlivých radionuklidů podle stupně jejich nebezpečí k vyvolání zdravotních účinků. V tomto směru byly pod patronací MAAE podniknuty příslušné kroky k tomu, aby se dospělo k všeobecně přijatelné kategorizaci radionuklidů s cílem efektivního řešení radiologické havarijní situace, včetně optimalizace postupů zaměřených na zmírnění důsledků takové mimořádné události [1,2].

V této souvislosti je vhodné zdůraznit změnu filozofie v oblasti radiační ochrany. Zatímco dříve byla akcentována ochrana člověka před zdroji ionizujícího záření (ochrana zdrojů – *safety of sources*), dnes tento přístup již není postačující, protože současné poměry jednoznačně vyžadují, aby byly zdroje záření dostatečně zabezpečeny před nepovolanými osobami (zabezpečení neboli ostraha zdrojů – *security of sources*), které by je mohly zneužít pro zlovolné nebo jiné zákeřné akce.

Přitom je třeba formálně rozlišovat mezi potenciální radiologickou nehodou či havárií a reálnou mimořádnou radiologickou událostí. V souladu s příslušnou platnou vyhláškou Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) [3] potenciální radiologická událost je situace, která by mohla vést ke vzniku radiologické události, pokud by nebyly faktory vedoucí k radiologické události včas odhaleny a odstraněny. Na druhé straně mimořádná událost je událost, důležitá z hlediska jaderné bezpečnosti nebo radiační ochrany, která vede nebo může vést k nepřípustnému ozáření zaměstnanců, popřípadě dalších osob, nebo nepřípustnému uvolnění radioaktivních látek do prostor jaderného zařízení nebo pracoviště nebo i do životního prostředí, případně ke vzniku radiační nehody nebo radiační havárie, a tím i ke vzniku radiační mimořádné situace.

## 1. HLAVNÍ PARAMETRY RADIOAKTIVNÍCH LÁTEK

Stěžejními vlastnostmi radioaktivních látek, které zásadně ovlivňují stupeň jejich nebezpečí, jsou zejména jejich aktivita neboli množství, poločas přeměny, druh emitovaného záření a fyzikální nebo chemická forma dané látky. Vzhledem k velké rozmanitosti těchto parametrů nebezpečnost jednotlivých

radioaktivních látek vykazuje značné odlišnosti, které mohou dosahovat i několik řádů.

Jak známo, představuje aktivita radionuklidu počet radioaktivních přeměn (rozpadů) za jednu sekundu. Tuto veličinu dnes kvantifikujeme pomocí jednotky becquerel (Bq), přičemž 1 Bq odpovídá jedné přeměně za sekundu, tj.  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ . Tato jednotka je pro běžná použití velmi malá, proto se užívají její násobky pomocí normalizovaných předpon, jako např. kilo, mega, giga atd. Dříve se vesměs používala starší jednotka curie (Ci), která byla naopak pro většinu aplikací příliš velká, a tak se často používaly její podíly, vyjádřené předponami jako mili, mikro, nano atd. Vztah mezi novou a starou jednotkou ( $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ ) – rozdíl více než 10 řádů – může někdy vyvolat chyby a omyly, které mohou vést ke katastrofálním důsledkům v posuzování radiační situace.

Poločas přeměny (obvykle označovaný symbolem  $T_{1/2}$ ) je časový interval, za který se přemění (rozpadne) polovina celkového počtu nestabilních jader v daném radionuklidu. Pro konkrétní radionuklid je tento parametr konstantní a specifický (neexistují žádné různé radionuklidy se stejným poločasem). Přitom hodnoty poločasu přeměny se pohybují od zlomku sekundy do miliard let. Je zřejmé, že radionuklid s velmi krátkým poločasem se rychle rozpadne, takže po určité době (odpovídající násobkům poločasu), již nepředstavuje prakticky žádné nebezpečí.

Míra nebezpečí radioaktivních látek bezprostředně závisí především na vlastnostech jimi emitovaného ionizujícího záření. Jedná se zde zejména o rozdíl mezi pronikavým zářením, jako je záření gama a neutrony, a nabitými částicemi (např. beta a alfa částice, těžké ionty), jejichž dosah je poměrně krátký, takže jako vnější zdroje v podstatě nepředstavují žádnou hrozbu. Jejich nebezpečí se projeví hlavně při vnitřním ozáření, kdy se radioaktivní látka dostane inhalací nebo ingescí do lidského těla. V této souvislosti je třeba rozlišovat mezi zdroji záření, které jsou uzavřené (a tedy stíněné vhodným obalem nebo pouzdem) a otevřené zářiče, které v důsledku nedostatečné manipulace a skladování mohou snadno kontaminovat okolní vzduch a další předměty.

Uzavřené zářiče představují nebezpečí vnějšího ozáření, zatímco otevřené zdroje záření působí na organismus člověka zevnitř, přičemž následky, kromě aktivity, závisí také

na fyzikálních a chemických vlastnostech radioaktivní látky.

## 2. KATEGORIZACE NEBEZPEČNOSTI RADIOAKTIVNÍCH ZÁŘIČŮ

Vzhledem k tomu, že ochrana před účinky radioaktivních látek si vyžaduje určité prostředky, musíme jejich vynaložení optimalizovat s ohledem na nebezpečnost příslušné radioaktivní látky. V tomto ohledu je účelné rozlišovat mezi jednotlivými látkami v souladu s jejich kategorizací založenou na posouzení jejich nebezpečnosti z hlediska vyvolání vnějšího, resp. vnitřního, ozáření.

V současné době se ve světě postupuje podle kategorizace MAAE, která je založena na hodnotách tzv. nebezpečných aktivit  $D$  (*dangerous activity*). Přitom v souladu s doporučeními MAAE [1,2], jakož i dalšími materiály (např. [4]), za nebezpečné je považováno takové množství radioaktivní látky, které může způsobit trvalé poškození osoby (vyžadující amputace končetin či jiný vážný lékařský zákrok jako důsledek, např. radiační popáleniny) nebo bezprostředně ohrozit její život, jestliže se zdrojem nenakládá bezpečně či zdroj není odpovídajícím způsobem odstíněn/chráněn. Za život ohrožující ozáření se přitom považuje takové ozáření, které může způsobit smrtelné nebo jiné závažné poškození tkání a orgánů. Typickým příkladem bezprostředního ohrožení života je jednorázová (v krátkém čase obdržená) vysoká dávka např. ozáření dávkou záření gama vyšší než 6 Gy (gray, symbol Gy, je jednotkou dávky a představuje energii 1 J předanou jednotkové hmotnosti látky, tj. 1 kg) je bez léčení považováno za fatální, ke smrti dochází v průběhu několika týdnů).

Pro každý radionuklid byly stanoveny dvě referenční hodnoty aktivity  $D_1$  a  $D_2$  (vyjádřené v jednotkách „TBq“, tzn.  $10^{12}$  Bq), pro které platí, že pokud nestíněný zdroj mající tuto aktivitu není pod kontrolou, může vyvolat trvalé poškození, které vede ke snížení kvality života ozářené osoby. Hodnota  $D_1$  se vztahuje k situaci, kdy dojde k vnějšímu ozáření člověka (zpravidla uzavřeným radioaktivním zdrojem). Hodnota  $D_2$  se vztahuje k případu, kdy dojde k ozáření osoby v důsledku rozptýlu radioaktivní látky ve formě prášku, kapaliny nebo těkavé látky do životního prostředí, což není případ typický pro běžná pracoviště. Pro některé vybrané radionuklidy jsou hodnoty  $D_1$  a  $D_2$  uvedeny v tab. 1. Nebezpečnost daného zdroje, pokud by se vymkl kontrole, je posuzována pomocí poměru  $A/D$ , kdy  $A$  je

aktivita tohoto zdroje a  $D$  hodnota aktivity odpovídajícího radionuklidu v tab. 1 (podle typu události a závažnější expoziční cesty se do poměru  $A/D$  dosazuje buď hodnota  $D_1$ , nebo  $D_2$ ).

Pro ilustraci, je-li pro danou radioaktivní látku poměr  $A/D > (10-1000)$ , pak takový zdroj, pokud s ním není zacházeno bezpečně (není chráněn/stíněn), může způsobit trvalé poškození osoby, která by s ním byla v kontaktu, a to již během krátké doby (minuty až hodiny). Toto poškození by mohlo být smrtelné, pokud by se daná osoba nacházela v blízkosti takového nestíněného zdroje po dobu hodin až dnů. Rozptýl takového množství radioaktivní látky do životního prostředí by mohl mít smrtelné následky. Účinek uvnitř budov nebo v jiných částečně uzavřených prostorech nebo místech se sníženou cirkulací vzduchu bude pochopitelně mnohem větší než na volném prostranství. Ve vzdálenosti několika set metrů, a to i ve směru větru nebo šíření takové látky od místa rozptýlu, je však riziko trvalého poškození zdraví již vysoce nepravděpodobné. Omezená plocha, pravděpodobně ne více než 1 km<sup>2</sup>, může být kontaminována tak, že to bude vyžadovat dekontaminaci nebo alespoň dlouhodobý monitoring daného místa (skutečná velikost plochy určené k dekontaminaci však závisí na řadě faktorů, na vlastnostech rozptýlené radioaktivní látky, vlastnostech kontaminované oblasti a na meteorologických podmínkách v době rozptýlu).

Čím je poměr  $A/D$  větší, tím jsou možné zdravotní důsledky zhoubnější a vliv na životní prostředí vyšší a naopak. Přitom je nutno přihlížet k charakteru a vlastnostem konkrétního zdroje, které mohou mít na výsledné ozáření vliv. Na tomto základě je založena kategorizace radioaktivních zdrojů, kde se rozeznává celkem pět kategorií:

- kat. 1 –  $A/D \geq 1000$ ;
- kat. 2 –  $1000 > A/D \geq 10$ ;
- kat. 3 –  $10 > A/D \geq 1$ ;
- kat. 4 –  $1 > A/D \geq 0,01$ ;
- kat. 5 –  $0,01 > A/D$ .

V tabulce 2 jsou uvedeny údaje o některých typických radionuklidech používaných zejména v průmyslu a medicíně s vyznačením kategorie, kam tyto zdroje patří. V těchto aplikacích, v závislosti na konkrétních podmínkách, leží aktivita příslušného radionuklidu v určitém rozmezí. Ve výše zmíněné tabulce se braly typické hodnoty aktivit a na základě poměru  $A/D$  se určila kategorie zářiče.

### 3. PODÍL VNĚJŠÍHO A VNITŘNÍHO OZÁŘENÍ NA EFEKTIVNÍ DÁVCE

Hodnoty  $D$  (resp.  $D_1$  a  $D_2$ ) postihují stupeň nebezpečí, které mohou potenciálně představovat radioaktivní zdroje v případě, že nejsou dostatečně zabezpečené nebo v mimořádných radiologických situacích. Ke stanovení ozáření osob od těchto radioaktivních zářičů v konkrétních podmínkách je třeba rozlišovat příspěvek od pronikavé složky vnějšího záření emitovaného uzavřeným zdrojem nebo zdrojem, který neuniká do okolí, a radioaktivními látkami, které kontaminovaly vzduch, případně vyvolaly plošné zamoření terénu v místě nehody nebo havárie. I zde vykazují jednotlivé radionuklidy značné rozdíly, proto je vždy nutno přihlédnout k tomu, o jaký druh radionuklidu nebo radioaktivní látky se jedná.

Při hodnocení příspěvku vnějšího záření a vnitřní kontaminace je třeba si uvědomit, že zatímco záření dopadající na lidské tělo zevně realizuje svůj podíl k efektivní dávce bezprostředně v průběhu samotného ozáření, vnitřní ozáření, jehož příspěvek je ve formě úvazku efektivní dávky, působí na člověka po dobu, která odpovídá přítomnosti příslušného radionuklidu v organismu. Takže výsledná efektivní dávka ( $E_{celk}$ ) sestává ze dvou složek, a to z osobního dávkového ekvivalentu -  $H_p(d)$ , resp. prostorového dávkového ekvivalentu -  $H^*(d)$  - v závislosti na tom, jestli údaje získáváme z osobního monitorování nebo monitorování pracoviště, a příslušného úvazku efektivní dávky -  $E(50)$ , tj.

$$E_{celk} = H_p(d) + E(50)$$

nebo

$$E_{celk} = H^*(d) + E(50)$$

Tabulka 1

Referenční aktivity  $D_1$  a  $D_2$  pro některé, v praxi často používané radionuklidy.

| Radionuklid               | $D_1$ (TBq) | $D_2$ (TBq) |
|---------------------------|-------------|-------------|
| Co-60                     | 0,03        | 0,3         |
| Sr-90 (Y-90)              | 4,0         | 1,0         |
| Zr-95 (Nb-95m/Nb-95)      | 0,02        | 10          |
| Mo-99 (Tc-99m)            | 0,3         | 20          |
| Ru-103 (Rh-103m)          | 0,1         | 30          |
| Ru-106 (Rh-106)           | 0,3         | 10          |
| I-125                     | 10          | 0,2         |
| I-131                     | 0,2         | 0,2         |
| Cs-134                    | 0,04        | 30          |
| Cs-137 (Ba-137m)          | 0,1         | 20          |
| Ce-144 (Pr-144m, Pr-144)  | 0,09        | 9,0         |
| Ir-192                    | 0,08        | 20          |
| Po-210                    | 0,0083      | 0,06        |
| Ra-226 (dceřiné produkty) | 0,04        | 0,07        |
| U přírodní                | bez omezení | bez omezení |
| U-235 (Th-231)            | 0,00008     | 0,00008     |
| Np-237 (Pa-233)           | 0,3         | 0,07        |
| Pu-239                    | 1,0         | 0,06        |
| Am-241                    | 8,0         | 0,06        |
| Cf-252                    | 0,02        | 0,1         |

## Kategorizace některých typických radioaktivních zdrojů

| Aplikace                                    | Radionuklid                         | Typická aktivita (TBq)                                                                       | Hodnota D (TBq)                                                                              | Kategorie |
|---------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Radioaktivní termo-elektrické generátory    | Sr-90<br>Pu-238                     | $7,4 \times 10^{-2}$<br>$1,0 \times 10^{-1}$                                                 | $1,0 \times 10^0$<br>$6,0 \times 10^{-2}$                                                    | 1         |
| Ozařovače (sterilizace a uchování potravin) | Co-60<br>Cs-137                     | $1,5 \times 10^5$<br>$1,1 \times 10^5$                                                       | $3,0 \times 10^{-2}$<br>$1,0 \times 10^{-1}$                                                 | 1         |
| Teleterapie                                 | Co-60<br>Cs-137                     | $1,5 \times 10^2$<br>$1,9 \times 10^1$                                                       | $3,0 \times 10^{-2}$<br>$1,0 \times 10^{-1}$                                                 | 1         |
| Defektoskopie                               | Co-60<br>Ir-192<br>Se-75<br>Yb-169  | $2,2 \times 10^0$<br>$3,7 \times 10^0$<br>$3,0 \times 10^0$<br>$1,9 \times 10^{-1}$          | $3,0 \times 10^{-2}$<br>$8,0 \times 10^{-2}$<br>$2,0 \times 10^{-1}$<br>$3,0 \times 10^{-1}$ | 2         |
| Brachyterapie s VPD <sup>1</sup>            | Co-60<br>Cs-137<br>Ir-192           | $3,7 \times 10^{-1}$<br>$1,1 \times 10^{-1}$<br>$2,2 \times 10^{-1}$                         | $3,0 \times 10^{-2}$<br>$1,0 \times 10^{-1}$<br>$8,0 \times 10^{-2}$                         | 2         |
| Měřiče úrovní                               | Cs-137<br>Co-60                     | $1,9 \times 10^{-1}$<br>$1,9 \times 10^{-1}$                                                 | $1,0 \times 10^{-1}$<br>$3,0 \times 10^{-2}$                                                 | 3         |
| Karotážní měření                            | Am-241/Be<br>Cs-137<br>Cf-252       | $7,4 \times 10^{-1}$<br>$7,4 \times 10^{-2}$<br>$1,1 \times 10^{-3}$                         | $6,0 \times 10^{-2}$<br>$1,0 \times 10^{-1}$<br>$2,0 \times 10^{-2}$                         | 3         |
| Brachyterapie s NPD <sup>2</sup>            | Cs-137<br>Ra-226<br>I-125<br>Ir-192 | $1,9 \times 10^{-2}$<br>$5,6 \times 10^{-4}$<br>$1,5 \times 10^{-3}$<br>$1,9 \times 10^{-2}$ | $1,0 \times 10^{-1}$<br>$4,0 \times 10^{-2}$<br>$2,0 \times 10^{-1}$<br>$8,0 \times 10^{-2}$ | 4         |
| Eliminátor statické elektřiny               | Am-241<br>Po-210                    | $1,1 \times 10^{-3}$<br>$1,1 \times 10^{-3}$                                                 | $6,0 \times 10^{-2}$<br>$6,0 \times 10^{-2}$                                                 | 4         |
| Hromosvody                                  | Am-241                              | $4,8 \times 10^{-5}$                                                                         | $6,0 \times 10^{-2}$                                                                         | 5         |
| Zdroj pro XRF analyzátor                    | Fe-55                               | $7,4 \times 10^{-4}$                                                                         | $8,0 \times 10^2$                                                                            | 5         |

Poznámka: VPD<sup>1</sup>- vysoký příkon dávky, NPD<sup>2</sup>- nízký příkon dávky.

Zdroj: [2]

### 3.1 Vnější záření

Účinek vnějšího ozáření je dán především aktivitou zářiče, typem emitovaného záření a jeho energií, a také vzdáleností mezi zdrojem a ozářenou osobou. Je zřejmé, že výsledný příspěvek vnějšího ozáření k celkové efektivní dávce bude kromě vzdálenosti záviset také na době ozáření a na druhu, resp. tloušťce stínícího materiálu. Vliv stínění, jak známo, se běžně vyjadřuje pomocí tzv. polotloušťky, což je pro daný druh záření (radionuklid) a materiál taková tloušťka, která zeslabí účinek záření na polovinu (vztaheno např. k dávce nebo fluenci).

Tabulka 3 názorně ilustruje, jak obrovský rozdíl je mezi schopností (a tedy i nebezpečností) jednotlivých uvedených radionuklidů způsobit ozáření vztažené na jednotkovou aktivitu ve stejné vzdálenosti. Přesněji řečeno udává se

zde příspěvek příkonu efektivní dávky v mSv/h ve vzdálenosti 1 m od bodového zářiče o aktivitě 1 kBq. Ve stejné tabulce jsou uvedeny i polotloušťky některých materiálů, kde je rovněž vidět velmi rozdílná účinnost různých látek zeslabit účinek záření. Prezentované výsledky se opírají o výpočetní stanovení tzv. vzduchové kermové konstanty [5,6] a použití metody Monte Carlo [7].

### 3.2 Vnitřní kontaminace

Ozáření v důsledku radioaktivní kontaminace vzduchu je možno stanovit na základě hodnot v tab. 4, kde jsou uvedeny konzervativní převodní faktory mezi jednotkovým příjmem radionuklidu (1 kBq) inhalací a příspěvkem této aktivity k úvazku efektivní dávky udaném v jednotkách mSv [8].

Tabulka 3

**Schopnost nejužívanějších radionuklidů vyvolat příspěvek k efektivní dávce  
od vnějšího záření od bodového zdroje ve vzdálenosti 1 m  
a zeslabovací účinek různých látek vyjádřený ve formě příslušné polotloušťky.**

| Radionuklid | Příspěvek k efektivní dávce<br>(mSv/h)/(kBq) | Polotloušťka (cm)     |      |      |
|-------------|----------------------------------------------|-----------------------|------|------|
|             |                                              | Vzduch                | Al   | Pb   |
| Na-22       | $2,2 \times 10^{-7}$                         | $7,94 \times 10^{+3}$ | 3,85 | 0,67 |
| K-40        | $1,6 \times 10^{-8}$                         | $1,02 \times 10^{+4}$ | 4,99 | 1,15 |
| Cr-51       | $3,4 \times 10^{-9}$                         | $4,98 \times 10^{+3}$ | 2,38 | 0,17 |
| Fe-55       | $3,2 \times 10^{-10}$                        | $1,02 \times 10^{+2}$ | 0,05 | 0    |
| Co-60       | $2,5 \times 10^{-7}$                         | $9,42 \times 10^{+3}$ | 4,65 | 1    |
| Ge-68       | $9,8 \times 10^{-8}$                         | $1,60 \times 10^{+2}$ | 0,08 | 0,01 |
| Se-75       | $3,9 \times 10^{-8}$                         | $3,74 \times 10^{+3}$ | 1,79 | 0,12 |
| Sr-89       | $1,4 \times 10^{-11}$                        | $8,05 \times 10^{+3}$ | 4    | 0,74 |
| Mo-99       | $1,6 \times 10^{-8}$                         | $6,48 \times 10^{+3}$ | 3,16 | 0,49 |
| Tc-99m      | $1,2 \times 10^{-8}$                         | $2,37 \times 10^{+3}$ | 1,13 | 0,07 |
| I-125       | $5,9 \times 10^{-9}$                         | $4,77 \times 10^{+2}$ | 0,23 | 0,01 |
| I-131       | $3,9 \times 10^{-8}$                         | $5,59 \times 10^{+3}$ | 2,67 | 0,25 |
| Cs-134      | $1,6 \times 10^{-7}$                         | $7,19 \times 10^{+3}$ | 3,5  | 0,57 |
| Cs-137      | $6,2 \times 10^{-8}$                         | $6,92 \times 10^{+3}$ | 3,35 | 0,53 |
| Pm-147      | $2,9 \times 10^{-13}$                        | $2,08 \times 10^{+3}$ | 0,99 | 0,06 |
| Yb-169      | $2,9 \times 10^{-8}$                         | $1,81 \times 10^{+3}$ | 0,87 | 0,06 |
| Ir-192      | $8,3 \times 10^{-8}$                         | $5,52 \times 10^{+3}$ | 2,64 | 0,24 |
| Au-198      | $8,8 \times 10^{-13}$                        | $5,75 \times 10^{+3}$ | 2,74 | 0,29 |
| Po-210      | $8,8 \times 10^{-13}$                        | $7,58 \times 10^{+3}$ | 3,73 | 0,65 |
| Ra-226      | $6,2 \times 10^{-10}$                        | $2,93 \times 10^{+3}$ | 1,4  | 0,09 |
| Th-232      | $2,1 \times 10^{-10}$                        | $2,48 \times 10^{+2}$ | 0,12 | 0,01 |
| U-238       | $2,3 \times 10^{-10}$                        | $2,36 \times 10^{+2}$ | 0,11 | 0,01 |
| Pu-238      | $3,0 \times 10^{-9}$                         | $2,37 \times 10^{+2}$ | 0,11 | 0,01 |
| Am-241      | $3,1 \times 10^{-9}$                         | $7,27 \times 10^{+2}$ | 0,35 | 0,02 |
| Cf-252      | $2,1 \times 10^{-10}$                        | $2,61 \times 10^{+2}$ | 0,12 | 0,01 |

**Schopnost některých radionuklidů vyvolat příspěvek k úvazku efektivní dávky od jednotkového příjmu.**

| Radionuklid | Příspěvek k úvazku efektivní dávky (mSv)/(kBq) | Radionuklid | Příspěvek k úvazku efektivní dávky (mSv)/(kBq) |
|-------------|------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------|
| Na-22       | $2,0 \times 10^{-3}$                           | Ir-192      | $6,2 \times 10^{-3}$                           |
| Cr-51       | $3,6 \times 10^{-5}$                           | Po-210      | $3,0 \times 10^0$                              |
| Co-60       | $2,9 \times 10^{-2}$                           | U-238       | $7,3 \times 10^0$                              |
| Sr-90       | $1,5 \times 10^{-1}$                           | Pu-238      | $4,3 \times 10^1$                              |
| Tc-99m      | $7,7 \times 10^{-6}$                           | Am-241      | $3,9 \times 10^1$                              |
| Cs-137      | $6,7 \times 10^{-3}$                           | Cf-252      | $1,8 \times 10^1$                              |

## ZÁVĚR

K účinné kontrole radioaktivních záříčů je třeba vynaložit jisté prostředky, které jsou vždy určitým způsobem limitovány. Proto je potřeba tyto prostředky, a to jak lidské zdroje, tak i

finance, které jsou k dispozici, vynaložit efektivně s přihlédnutím na rozdílné nebezpečí pocházející od jednotlivých radioaktivních látek. K tomu může napomoci specifický přístup ke konkrétním zdrojům záření s ohledem na jejich kategorizaci.

*Práce byla částečně podpořena Grantem NVP II 2B08001 MŠMT ČR v rámci projektu Biodozimetrie.*

## LITERATURA

- [1] Prouza, Z.: *Klasifikace zdrojů ionizujícího záření a pracovišť s nimi*. Webová stránka: <http://www.techportal.cz/1/1/0/klasifikace-zdroju-ionizujiciho-zareni-a-pracovist-s-nimi-cid-209404/>.
- [2] Sabol, J. and Weng, P.S.: *Introduction to Radiation Protection Dosimetry*, World Scientific Publishing Co., Singapore, 1995.
- [3] Tschurlovits, M., Leitner, A. and Daverda, G.: *Dose rate constants for new dose quantities*. Radiation Protection Dosimetry Vol. 42, No. 2, (1992) 77-82.
- [4] *Categorization of radioactive sources*, IAEA-TECDOC-1144, IAEA, Vienna, 2003.
- [5] *Categorization of radioactive sources*, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.9, IAEA, Vienna, 2005.
- [6] *Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency*. IAEA-TECDOC-1162, IAEA, Vienna, 2000.
- [7] *International Basic Standards for Protection against Harmful Effects of Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*, IAEA, Vienna, 1996.
- [8] Vyhláška SÚJB 318/2002 Sb., o podrobnostech k zajištění havarijní připravenosti jaderných zařízení a pracovišť se zdroji ionizujícího záření a o požadavcích na obsah vnitřního havarijního plánu a havarijního řádu.