

Experimentální určení dezaktivací účinnosti činidel Hvězda S.C.H. a Neodekont

-

protokol č.2 (kontaminace za mokra)

Datum experimentu: 16. a 26 září 2005, 7. října 2005

Experiment odborně navrhl:

Doc.Ing. Jan Severa, CSc. (Decomkov Praha s.r.o.)

Experiment provedli:

Ing. Karel Karásek (VF, a.s.)

Jiří Smola (VF, a.s.)

Experimentu byl přítomen:

Mgr. Tomáš Marek (Decomkov Praha s.r.o.)

Zpracoval a zapsal: Mgr. Tomáš Marek

Recenzoval: Doc.Ing. Jan Severa, CSc.

OBSAH

1. Zadání experimentu	3
1.1 Obecný cíl.....	3
1.2 Cíl protokolu č.2	3
2. Materiální zabezpečení	3
2.1 Izotopy.....	3
2.2 Přístroj na měření aktivity	4
2.3 Pomůcky k přípravě povrchu.....	4
2.4 Pomůcky ke kontaminaci roztokem.....	4
2.5 Pomůcky k dekontaminaci	4
2.6 Ostatní pomůcky	5
2.7 Dekontaminační činidla.....	5
2.8 Vzorčky povrchů	5
3. Podmínky experimentu	5
4. Proces kontaminace	6
4.1 Značení vzorků	6
4.2 Příprava povrchů.....	6
4.3 Proces kontaminace roztokem.....	7
5. Dekontaminace	7
5.1 Popis dekontaminačního procesu.....	7
5.2 Měření aktivit – teoretický rozbor neurčitostí	8
5.3 Naměřené aktivity	9
6. Vyhodnocení dekontaminační účinnosti	9
6.1 Dekontaminační faktor - teoretický úvod.....	9
6.2 Statistická analýza dat	10
6.3 Výsledky.....	12
7. Kritické zhodnocení.....	14
8. Závěr	15
9. Odkazy	16
10. Seznam příloh	16

1. Zadání experimentu

1.1 Obecný cíl

Cílem experimentu bylo určení dezaktivací účinnost činidla Hvězda S.C.H., které je vyvíjeno v rámci projektu „Činidla, prostředky a metody k dekontaminaci“ (dále jen ČaP). Pro srovnání byla určena dezaktivací účinnost standardních činidel. Projekt ČaP finančně podporuje Ministerstvo průmyslu a obchodu pod evidenčním číslem FF-P2/115.

Dezaktivací účinnost byla zkoušena pro izotopy kobalt 60 (^{60}Co), cesium 137 (^{137}Cs), stroncium 90 (^{90}Sr) a americium 241 (^{241}Am). První dva izotopy byly ve formě chloridu, druhé dva ve formě dusičnanu. Stroncium bylo navíc v rovnováze s ytriem, které vzniká jeho přirozeným rozpadem.

Uvedenými izotopy byly kontaminovány plíšky se vzorkem standardního vojenského nátěru. Nátěr byl nový, nepoškozený, nepoužitý k obdobným činnostem. Kontaminace byla provedena roztokem.

Dekontaminační účinnost byla testována postupy v souladu s návodem „Metoda ověření účinnosti dekontaminačního prostředku“, který je přiložen.

1.2 Cíl protokolu č.2

V tomto protokolu č.2 jsou zaznamenány skutečnosti z druhé zkoušky dekontaminační účinnosti. **Cílem druhé zkoušky bylo zjištění dekontaminační účinnosti kontaminace, která vznikla při kontaktu povrchů s roztoky (tzv. kontaminace za mokra).**

Pokud zde není uvedeno jinak, pracovní postupy byly shodné s postupy popsány v protokolu č.1.

2. Materiální zabezpečení

2.1 Izotopy

Parametry použitých izotopů shrnuje tab.1.

Tab.1: Použité izotopy				
Izotop	^{60}Co	^{137}Cs	^{90}Sr	^{241}Am
Poločas rozpadu [1]	1925,1 dne	30,07 let	28,79 let	432,2 let
Chemická Forma	$^{60}\text{CoCl}_2$	$^{137}\text{CsCl}$	$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ Pozn.(a)	$\text{Am}(\text{NO}_3)_3$
Referenční datum	13.března1985	prosinec 1997	2.prosince 1982	13.února.1998
Aktivita k referenč. datu	9,66 MBq	30 kBq/ml	4,963 MBq	188 MBq
Objem roztoku	20 ml	—	100 ml	10 ml (pracovalo se se 3 malými

				částmi)
Aktivita 16.9.2005	0,651 MBq	—	3,561 MBq	186 MBq
Objem. aktivita 16.9.2005	32,5 kBq/ml	25 kBq/ml	35,61 kBq/ml	18,6 MBq/ml
Pozn.(a): Sroncium bylo v přirozené rozpadové rovnováze s ytriem-90, přičemž roztok obsahoval i neaktivní sroncium a yttrium jako nosič. Celkové složení je 20 mg $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ + 20 mg $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ + 3g HNO_3 v 1 litru 0,4 molární kyseliny dusičné.				

2.2 Přístroj na měření aktivity

Analyzátor, sonda a nastavení analyzátoru jsou zaneseny v tab.2.

Tab.2: Analyzátor, sonda a nastavení při měření aktivit			
Izotop, měřené záření	Analyzátor	Sonda	Nastavení
^{60}Co , gama ^{137}Cs , gama	TEMA MC 1256, výr.č. 200 124	SKG, NaI(Tl), výr.č.821 823, napětí 770 V	Zesílení 10x, kanály č. 8-230
^{90}Sr , beta		SPF 35, U4 beta, výr.č. 2360, napětí 1320 V	Zesílení 20x, kanály č.22-240 (měření I_0), č. 30-240 (měření I_v , I_d). Pozn.(b)
^{241}Am , gama		SKG, NaI(Tl), výr.č.821 823, napětí 770 V	Zesílení 50x, kanály č. 10-230
Pozn.(b): Během měření I_v dne 7.10.2005 došlo k postupnému narůstání pozadí tak, že se pozadí téměř zdesetinásobilo během cca 2 hodin. Měření I_v bylo proto zopakováno s rozsahem 30-240 kanálů, a tento rozsah byl použit i pro měření I_d .			

2.3 Pomůcky k přípravě povrchu

- Stříčka s destilovanou vodou
- Lihobenzín, lékárenský (místo doporučené směsi benzín+izopropanol)
- Savé tampony
- Parafínová svíčka
- Rychlovarná konvice

2.4 Pomůcky ke kontaminaci roztokem

- Mikropipeta 10 μl
- Fotografická miska pro uložení kontaminovaných vzorků
- Fix – tužka pro popis vzorků

2.5 Pomůcky k dekontaminaci

- Stříčka s destilovanou vodou
- Tampony ze stáčené gázy, vyrábí fa. Batist, Červený Kostelec (tzv. „gázové tampony“)

- Tampony vzniklé srolováním pruhu tkaniny Pervin širokého 4 cm a dlouhého 47,5 cm (tzv. „tampony z pervinu“)
- Kádinky na dekontaminační roztoky
- Mechanický ruční pěnovač fy. Airspray, typ F 2
- Velká fotografická miska
- Větší množství netkané textilie Pervin
- Bílá vazelína Vaselinum Album (zakoupena v lékárně)

2.6 Ostatní pomůcky

- pryžové rukavice
- laboratorní pinzety
- digestoř
- digitální teplo- a vlhkoměr (pro měření vzduchu)

2.7 Dekontaminační činidla

- Hvězda S.C.H, vzorky 06.10.2005 / 1 a 06.10.2005 / 1. Způsob přípravy tenzidické komponenty je na samostatném protokolu. Použita byla jen směs 06.10.2005 / 1.
- Neodekont, rok výroby 2005 (trvanlivost do 30.11.2006)
- Neodekont bez abraziva, datum dodávky 25.11.2005,
- Destilovaná voda

2.8 Vzorky povrchů

Ocelové plíšky 5x5 cm na jedné straně opatřené standardním vojenským nátěrem khaki.
Dodal: VTUO Brno. Charakteristika laku přiložena.

3. Podmínky experimentu

Teplota a vlhkost vzduchu je uvedena v tabulce 3.

Tab.3: Vzduch v laboratoři				
Datum	Čas	Teplota	Rel. vlhkost	Prováděná činnost
16.9.2005	15:00	27,2°C	45,6 %	Kontaminace vzorků izotopy ^{60}Co a ^{137}Cs
	17:19	27,7°C	47,5 %	
	18:11	27,6°C	47,3 %	
	19:14	27,6°C	50,3 %	
26.9.2005	14:55	27,3°C	41,9 %	Kontaminace vzorků izotopy ^{90}Sr a ^{241}Am
	16:01	27,1°C	41,5 %	
	17:10	27,0°C	41,7 %	
7.10.2005	15:00	27,2°C	—	Dekontaminace

4. Proces kontaminace

4.1 Značení vzorků

Vzorky byly připraveny v souladu s návodem „Metoda ověření účinnosti dekontaminačního prostředku“. Vzorky byly na rubu očíslovány nesmyvatelnou fix-tužkou a měly označený pravý horní roh. Protilehlý roh byl označen na lícové straně (na vzorku nátěru). Celkem bylo připraveno 96 vzorků. Systém číslování vzorků ve vztahu k použitému izotopu a dekontaminačnímu prostředku uvádí tab.4.

Tab. 4: Čísla vzorků ve vztahu ke kontaminujícímu izotopu a dekontaminačnímu činidlu						
Dekontaminační činidlo	Kontaminující izotop					
	¹³⁷ Cs			⁶⁰ Co		
Hvězda S.C.H. – pěna	21	29	37	45	53	61
	22	30	38	46	54	62
Hvězda S.C.H. – roztok	23	31	39	47	55	63
	24	32	40	48	56	64
Neodekont bez abraziva	25	33	41	49	57	65
	26	34	42	50	58	66
Neodekont (běžný)	27	35	43	51	59	67
	28	36	44	52	60	68
Dekontaminační činidlo	Kontaminující izotop					
	⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y			²⁴¹ Am		
Neodekont bez abraziva	69	77	85	93	101	109
	70	78	86	94	102	110
Neodekont (běžný)	71	79	87	95	103	111
	72	80	88	96	104	112
Hvězda S.C.H. – roztok	73	81	89	97	105	113
	74	82	90	98	106	114
Hvězda S.C.H. – pěna	75	83	91	99	107	115
	76	84	92	100	108	116

4.2 Příprava povrchů

Ukázalo se, že povrch vzorků je naprosto nesmáčivý. Příprava vzorků proto probíhala podle následujícího schématu, do kterého bylo navíc zařazeno sprchování vodou z vodovodního řádu:

- Osprchování vzorků vlažnou vodou z vodovodního řádu.
- Opláchnutí povrchu vzorků destilovanou vodou ze stříčky.
- Zbylé kapky vody byly odsáty tamponem z buničiny.

- Následně byl povrch otřen gázovým tampónem smočeným v lihobenzínu. Přitom byl vzorek otřen několika tahy shora dolů tak, aby nedošlo ke smytí značek pro orientaci vzorků, které byly na jednom z rohů.
- Velké kapky byly odsáty tampónem z buničiny.
- Po odpaření lihobenzínu byly okraje vzorků pokryty voskem (parafínem). Parafín byl vložen do kádinky s horkou vodou. Po roztavení vytvořil na hladině mocný film, do kterého byly hrany namáčeny.

Nakonec byly vzorky pinzetou přeneseny a uloženy na fotografickou misku.

4.3 Proces kontaminace roztokem

Na geometrický střed vzorků byly mikropipetou naneseny kapky roztoků podle tab.1. Kapky měly objem 10 μl nebo 25 μl . Kapky byly naneseny tak, aby nedošlo k jejich slití. Množství kontaminantu uvádí tab.5. Vzorky byly ponechány zcela zaschnout po dobu 1 až 2 hodin. Následně byla změřena aktivita I_0 . Pak byly opláchnuty 3 porcemi destilované vody ze stříčky. V průměru byl každý vzorek opláchnut celkem 10 ml destilované vody (spotřeba na 24 vzorků představovala cca 250 ml). Byla změřena aktivita opláchnutých vzorků I_v . Takto připravené vzorky byly uloženy na velkou fotografickou misku, která byla neprodyšně překryta polyetylenovou fólií. Fólie byla napnutá tak, aby se nedotýkala vzorků. Vzorky byly uloženy do 7. října 2005, tedy zralý 11 dní (Sr, Am), resp. 21 dní (Co, Sr).

Tab.5: Míra kontaminace vzorků			
Kontaminant, čísla vzorků	Datum kontaminace	Počet krát objem kapek	Celková aktivita 1 vzorku
^{137}Cs , č. 21 – 44	16.9.2005	9 x 10 μl	2,3 kBq
^{60}Co , č. 45 – 68	16.9.2005	10 x 10 μl	3,3 kBq
$^{90}\text{Sr} + \text{Y}$, č. 69 – 92	26.9.2005	4 x 25 μl	3,6 kBq
^{241}Am , č. 93 – 116	26.9.2005	1 x 10 μl	190 kBq

5. Dekontaminace

5.1 Popis dekontaminačního procesu

Dekontaminace byla prováděna v souladu s dokumentem „Metoda ověření účinnosti dekontaminačního prostředku“, který je přiložen. Poté, co byl vzorek kontaminován a předzpracován podle odstavce 4.2, byla provedena dekontaminace testovaným činidlem. Pokud bylo činidlo ve formě roztoku nebo pasty (obě varianty Neodekontu, roztok Hvězda S.C.H.), dekontaminace se prováděla takto:

- Tampon byl uchopen do pinzety a dostatečně smočen v činidle.
- Vzorek byl uchopen do druhé pinzety.
- Vzorek byl otřen jedním koncem tamponu třikrát ve směru shora dolů, a druhým koncem třikrát zleva doprava.
- Vzorek byl opláchnut destilovanou vodou ze stříčky tak, aby se odstranily zbytky činidla. (Vzhledem k pastovité konzistenci Neodekontů byla spotřeba vody cca 30 ml na jeden vzorek).
- Po oschnutí vzorku byla změřena aktivita I_d .

V případě vzorků č. 21-44, 45-68 a 93-116 (izotopy ^{60}Co , ^{137}Cs a ^{241}Am) byly použity gázové tampony, v případě vzorků č. 69-92 byly použity tampony z Pervinu (více v odst. 2.5).

Pokud bylo činidlo ve formě pěny, situace byla komplikovanější, neboť tekutina po rozpadu pěny nesmí sáknout na rubovou stranu vzorku, protože může způsobit sekundární kontaminaci. Toho bylo docíleno takto:

- Na velkou fotografickou misku bylo položeno 8 vrstev netkané textilie Pervin. Tak vznikla dostatečně mocná savá vrstva.
- Dále bylo nastříháno dostatečné množství čtverečků textilie Pervin o rozměrech 6 x 6 cm. Tyto čtverečky byly natřeny mocnou vrstvou vazelíny (Vaselinum Album, spotřeba cca 100 g na 24 čtverečků).
- Čtverečky byly položeny na savou vrstvu, vazelínou vzhůru tak, aby mezi nimi byla volná místa.
- Vzorky byly položeny na čtverečky a zatlačeny do vazelíny.
- Na takto připravené vzorky byla nastříkána pěna Hvězda S.C.H. z ručního mechanického pěnovače fy. Airspray, typ F 2. Tekutina vzniklá rozpadem pěny obtékala vazelinu a vsakovala do vrstev textilie Pervin.
- Po expozici, která trvala 5 a více minut, byl každý vzorek uchopen do pinzety společně s přilepeným čtverečkem Pervinu a opláchnut destilovanou vodou ze stříčky. Pak byl Pervin sejmut a vaselina byla odstraněna skleněnou tyčinkou. Vzorek byl položen na čistý čtvereček Pervinu, aby nedocházelo ke znečišťování přístroje mastnotou při měření aktivity I_d .

Postupem uvedeným v odst. 4.2 a zde byly určeny aktivity kontaminantu, které jsou postačující pro vyčíslení dekontaminačního faktoru:

- Aktivita po kontaminaci I_o ,
- aktivita po opláchnutí destilovanou vodou I_v ,
- aktivita po dekontaminaci testovaným činidlem I_d .

5.2 Měření aktivit – teoretický rozbor neurčitostí

Naměřené hodnoty nebyly přepočítány na referenční čas, neboť poločas rozpadu použitých izotopů je dostatečně dlouhý. Nejkratší poločas má kobalt 60. Jeho přirozený rozpad způsobí chybu v určení dekontaminačního faktoru menší než 1 %, což je o poznání méně, než neurčitost způsobená statistickou chybou měření.

Aktivity byly měřeny vždy tak, že vzorky byly vkládány na 1. pozici přístroje TEMA MC 1256. Vzorky byly pokládány hranou na čáru vyznačenou na podložce. Vzorky byly orientovány hlavou doprava. Přístroj TEMA pracuje jako čítač impulsů ve zvoleném okně spektra, viz tab.2. Doba měření, dále uvedená v tabulkách a následujících odstavcích, je doba, po kterou byly impulsy počítány. Dále uváděná hodnota M je celkový naměřený počet impulsů. Tato hodnota je součtem dvou hodnot – přirozeného pozadí B a zjišťované aktivity izotopu N. Tedy

$$(1) \quad N = M - B$$

Pokud není měření zatíženo systematickou chybou, veličiny M, B a N mají Poissonovské rozdělení. Neurčitosti měření těchto hodnot lze určit jako standardní odchylky Poissonova rozdělení. Takové odchylky budeme dále značit $\sigma(M)$, $\sigma(B)$ a $\sigma(N)$. Lze je spočítat:

$$(2) \quad \sigma(M) = \sqrt{M}$$

$$(3) \quad \sigma(B) = \sqrt{B}$$

$$(4) \quad \sigma(N) = \sqrt{M+B}$$

Měření spekter γ (izotopů ^{60}Co , ^{137}Cs a ^{241}Am) nebylo zatíženo jinými známými systematickými chybami. Při měření spekter β dvojice izotopů $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ byly identifikovány systematické chyby popsané níže.

5.3 Naměřené aktivity

Naměřené aktivity I_0 , I_v a I_d pro všechny izotopy ^{60}Co , $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, ^{137}Cs a ^{241}Am jsou uvedeny v tabulkách č.P1/1 až P1/6 v příloze 1.

Při měření aktivit β izotopů $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ byly identifikovány tyto systematické chyby:

1. Došlo k nárůstu pozadí v důsledku vzrůstu šumu měřicí sondy. Dolní energetický okraj měřicího rozsahu byl proto zvýšen při měření veličin I_v a I_d zmíněné dvojice izotopů. Dekontaminační faktor vody DF_v a celkový dekontaminační faktor DF této dvojice izotopů bude proto systematicky mírně nadhodnocen, cca v poměru počtu měřících kanálů, tedy o cca 5%.
2. Další systematická chyba souvisí s narušením rovnováhy mezi izotopy ^{90}Sr a ^{90}Y . Při měření kontaminace I_0 byly izotopy v rovnováze, tudíž polovina aktivity připadala na ^{90}Sr a druhá polovina na ^{90}Y . Měření aktivit I_v a I_d bylo provedeno bezprostředně po oplachu vodou resp. po dekontaminaci. Díky tomu se poměr aktivit izotopů porušil. Po uplynutí dostatečné doby (několika dní) by se poměr obnovil. Nová rovnovážná aktivita by naměřené hodnoty jistě nepřevyšovala více než 2x (je to logický důsledek přirozeného rozpadu ^{90}Sr na ^{90}Y).

6. Vyhodnocení dekontaminační účinnosti

6.1 Dekontaminační faktor - teoretický úvod

Pro porovnání kvality dekontaminačních činidel se používají dvě veličiny:

- **Dekontaminační účinnost**, která vyjadřuje procento odstraněné kontaminace. Spočte se podle vzorce

$$(5) \quad DU = \frac{A_0 - A_d}{A_0} \cdot 100\%$$

- **Dekontaminační faktor**, což je poměr, ve kterém byla snížena kontaminace. Vypočte se podle vzorce

$$(6) \quad DF = \frac{A_0}{A_d}$$

Ve vzorcích (5) a (6) značí A_0 původní aktivitu vzorku (případně plošnou aktivitu, četnost impulsů apod.), a A_d značí aktivitu vzorku po provedení dekontaminace (případně plošnou aktivitu, četnost impulsů apod.).

Přepočet dekontaminačního faktoru DF na dekontaminační účinnost DU je triviální. Nadále budeme pracovat s veličinou dekontaminační faktor DF, neboť tato veličina může odděleně postihnout vliv oplachu vodou a vliv dekontaminačního činidla. V notaci veličin I_o , I_v a I_d změřených při experimentu a popsaných výše totiž platí:

$$(7) \quad DF = \frac{I_o}{I_d}$$

Vztah (7) můžeme upravit s ohledem na měřenou veličinu I_v :

$$(8) \quad DF = \frac{I_o}{I_v} \cdot \frac{I_v}{I_d}$$

Zde je patrná výhoda konceptu dekontaminačního faktoru DF, který je součinem dekontaminačního faktoru vody DF_v a dekontaminačního faktoru činidla DF_d :

$$(9) \quad DF = DF_v \cdot DF_d$$

$$(10) \quad DF_v = \frac{I_o}{I_v}, \quad DF_d = \frac{I_v}{I_d}$$

Díky tomu zavedený formalismus umožňuje kvalifikovaně posoudit rozdíly v účinnosti oplachu vodou a pak jednotlivých dekontaminačních činidel.

6.2 Statistická analýza dat

Vzhledem k tomu, že aktivity vzorků po oplachu vodou I_v a ještě více po dekontaminaci I_d jen málo převyšovaly přirozené pozadí (v některých případech byly dokonce neměřitelné), je vyčíslení dekontaminačních faktorů obtížné, neboť výpočet má charakter dělení nulou. Stejně tak výpočet standardní odchylky obvyklými způsoby vede k výsledkům, které nemají vypovídající schopnost.

Celkové dekontaminační faktory DF a vody DF_v byly proto určeny jako hodnoty na hladině spolehlivosti 95%. Zjednodušeně řečeno, dekontaminační faktory jsou ve skutečnosti téměř jistě větší než vyčíslené hodnoty. Pro odlišení se tyto faktory v dalším textu označují $DF(95\%)$, resp. $DF_v(95\%)$.

Analýza byla prováděna takto:

- Byly spočteny aritmetické průměry hodnot I_o , I_v a I_d , označované jako μ_o , μ_v a μ_d .
- Byly spočteny standardní odchylky těchto průměrů σ_o , σ_v a σ_d .
- Byly spočteny hodnoty $DF(95\%)$, resp. $DF_v(95\%)$.

Aritmetické průměry μ_o a μ_v byly počítány vždy ze 24 vzorků pro každý izotop. Aritmetické průměry μ_d byly vždy počítány ze 6 vzorků, které byly kontaminovány stejným izotopem a dekontaminovány stejným činidlem. Aritmetické průměry byly počítány podle obvyklého vztahu

$$(11) \quad \mu_o = \frac{1}{N} \sum_1^N I_o$$

Obdobně pro μ_v a μ_d . Zde N je uvažovaný počet vzorků (24 nebo 6).

Po určení aritmetických průměrů μ aktivit kontaminovaných vzorků byly standardní odchylky spočteny podle obvyklého vztahu

$$(12) \quad \sigma_o = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^N (I_o - \mu_o)^2}$$

Obdobně pro σ_v a σ_d . Dále pracujeme s veličinami I_o , I_v a I_d , jako kdyby měly normální Gaussovo rozdělení (malé hodnoty σ v porovnání s přirozeným pozadím nás k tomu opravňují) a určíme minimální hodnotu dekontaminačního faktoru jistou na hladině spolehlivosti 95%, tj. DF(95%). Nejprve ale spočteme hustotu rozdělení pravděpodobnosti:

$$(13) \quad p(DF) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sigma_o} \exp\left(-\frac{(I_o - \mu_o)^2}{2\sigma_o^2}\right) \frac{1}{\sigma_d} \exp\left(-\frac{(I_d - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right) \delta\left(DF - \frac{I_o}{I_d}\right) dI_o dI_d$$

Integrace se provádí přes celý obor reálných čísel, tj. v mezích od minus do plus nekonečna. Pro snazší integraci upravíme Dirakovu δ -distribuci:

$$(14) \quad \delta\left(DF - \frac{I_o}{I_d}\right) = \frac{I_o}{DF^2} \delta\left(I_d - \frac{I_o}{DF}\right)$$

Po integraci získáme dílčí výsledek:

$$(15) \quad p(DF) = \sqrt{\frac{1}{2\pi(DF^2\sigma_d^2 + \sigma_o^2)}} \cdot \frac{DF\mu_o\sigma_d^2 + \mu_d\sigma_o^2}{DF^2\sigma_d^2 + \sigma_o^2} \cdot \exp\left(-\frac{(DF\mu_d - \mu_o)^2}{2(DF^2\sigma_d^2 + \sigma_o^2)}\right)$$

Vztah (15) byl dále numericky integrován s cílem získat hladinu spolehlivosti P(DF) podle schématu

$$(16) \quad P(DF) = 1 - \int_{-\infty}^{DF(P)} p(DF) d(DF)$$

Jelikož však horní integrační mez DF(P) odpovídající hladině spolehlivosti P není známa (je hledána), integrace byla provedena numericky v MS office pro různé hodnoty DF(P) a byla vytvořena tabulka závislosti DF vs. P(DF). Integrační krok byl vždy dostatečně jemný, aby bylo možno spolehlivě určit hodnotu DF(95%).

Náhradou μ_d za μ_v a σ_d za σ_v byl dále určen dekontaminační faktor oplachu vodou $DF_v(95\%)$ na hladině spolehlivosti 95%.

6.3 Výsledky

Naměřené hodnoty byly zpracovány podle (11) a (12) do tabulky 6. Dále s pomocí vztahů (13) až (16) byly vyčísleny celkové dekontaminační faktory $DF(95\%)$ a dekontaminační faktory vody $DF_v(95\%)$ na hladině statistické spolehlivosti 95%. Dekontaminační faktory zkoumaných činidel byly spočteny dvojím způsobem: jednak jako poměr středních hodnot μ_v a μ_d (určených podle (11)) a jednak jako poměr hodnot dekontaminačních faktorů celkových a vody, tj. $DF(95\%)$ a $DF_v(95\%)$. Takto zpracované výsledky jsou uvedeny v tab. 7. Z tabulky je patrné, že výsledky získané těmito dvěma způsoby se shodují, a v některých případech doplňují.

Pro lepší porovnání dekontaminačních činidel byla zpracována tab. č. 8, ve které jsou dekontaminační faktory $DF(95\%)$ porovnány s hodnotou docílenou s použitím běžného Neodekontu. Přitom byl pro každý izotop dekontaminační faktor $DF(95\%)$ Neodekontu položen 100%.

Tab.6: Aktivita (kontaminace) vzorků po odečtení pozadí. Průměrné hodnoty a odchylky spočteny podle (11) a (12).				
Dekontaminační činidlo	Izotop	I_o = $(\mu_o \pm \sigma_o)$	I_v = $(\mu_v \pm \sigma_v)$	I_d = $(\mu_d \pm \sigma_d)$
		impulsů / 100s	impulsů / 100s	impulsů / 100s
Hvězda S.C.H. - pěna	^{137}Cs	$20\,610 \pm 930$	122 ± 65	-14 ± 29
Hvězda S.C.H. - roztok				6 ± 19
Neodekont bez abraziv				2 ± 32
Neodekont				39 ± 47
Hvězda S.C.H. - pěna	^{60}Co	$52\,000 \pm 20\,000$	940 ± 300	600 ± 360
Hvězda S.C.H. - roztok				550 ± 150
Neodekont bez abraziv				460 ± 170
Neodekont				490 ± 60
Hvězda S.C.H. - pěna	$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ v rovnováze Pozn. ^(a)	$223\,000 \pm 8\,000$	64 ± 34 Pozn. ^(a)	37 ± 19 ^(a)
Hvězda S.C.H. - roztok				38 ± 11 ^(a)
Neodekont bez abraziv				29 ± 14 ^(a)
Neodekont				23 ± 9 ^(a)
Hvězda S.C.H. - pěna	^{241}Am	$1\,124\,000 \pm 34\,000$	980 ± 350	370 ± 130
Hvězda S.C.H. - roztok				400 ± 110
Neodekont bez abraziv				400 ± 60
Neodekont				450 ± 110
Pozn. ^(a) : Při měření I_v a I_d byla rovnováha porušena. Rovnovážné hodnoty I_v a I_d jsou nejvýše dvojnásobné.				

Tab. 7: Vyčíslené dekontaminační faktory.					
Dekontaminační činidlo	Izotop	DF(95%) celkem	DFv(95%) oplach vodou	DFd činidlo	DFd činidlo
		Na hladině spolehlivosti 95%		Poměr $\frac{DF(95\%)}{DFv(95\%)}$	Poměr středních hodnot μ_v / μ_d
Hvězda S.C.H. - pěna	^{137}Cs	605	89	6,8	Nekonečno ^(a)
Hvězda S.C.H. - roztok		555		6,2	20 ± 80 ^(a)
Neodekont bez abraziv		375		4,2	80 ± 1000 ^(a)
Neodekont		170		1,9	3 ± 4 ^(a)
Hvězda S.C.H. - pěna	^{60}Co	27	19	1,4	1,6 ± 1,1
Hvězda S.C.H. - roztok		35		1,8	1,7 ± 07
Neodekont bez abraziv		39		2,1	2,0 ± 1,0
Neodekont		40		2,1	1,9 ± 0,7
Hvězda S.C.H. - pěna	$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ v rovnováze	> 1600 ^(b)	> 920 ^(b)	1,7 ^(c)	1,7 ± 1,3 ^(c)
Hvězda S.C.H. - roztok		> 1900 ^(b)		2,1 ^(c)	1,7 ± 1,0 ^(c)
Neodekont bez abraziv		> 2100 ^(b)		2,3 ^(c)	2,2 ± 1,5 ^(c)
Neodekont		> 2900 ^(b)		3,2 ^(c)	2,8 ± 1,8 ^(c)
Hvězda S.C.H. - pěna	^{241}Am	1900	715	2,7	2,7 ± 1,4
Hvězda S.C.H. - roztok		1940		2,7	2,5 ± 1,1
Neodekont bez abraziv		2220		3,1	2,5 ± 1,0
Neodekont		1780		2,5	2,2 ± 1,0

Pozn. ^(a): Aktivita po dekontaminaci byla v mezích chyb nulová. Dekontaminační faktor činidla je zatížen velkou chybou, správné jsou proto jen hodnoty DF(95%)/DFv(95%).

Pozn. ^(b): Při měření I_v a I_d byla rovnováha mezi izotopy ^{90}Sr a ^{90}Y porušena. Uvedené hodnoty byly zkorigovány (sníženy) na nejnižší jisté z hlediska obnovení rovnováhy.

Pozn. ^(c): Hodnoty nezohledňují porušení rovnováhy mezi izotopy ^{90}Sr a ^{90}Y , jsou uvedeny jen jako orientační.

Tab. 8: Relativní porovnání dekontaminačních faktorů DF(95%) činidel				
Izotop	Hvězda - pěna	Hvězda - roztok	Neodekont bez abraziv	Neodekont ^(a)
^{137}Cs	356 %	326 %	221 %	100 %
^{60}Co	67 %	87 %	97 %	100 %
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	cca 55 % ^(b)	cca 65 % ^(b)	cca 70 % ^(b)	100 %
^{241}Am	107 %	109 %	125 %	100 %

Pozn. ^(a): Celkový dekontaminační faktor DF(95%) Neodekontu položen 100 % jako srovnávací standard.

Pozn. ^(b): Při měření I_v a I_d byla porušena rovnováha mezi izotopy ^{90}Sr a ^{90}Y . Uvedené hodnoty jsou proto jen přibližné.

7. Kritické zhodnocení

Lze konstatovat, že s použitím kvalitní analýzy dat byly získány relativně spolehlivé hodnoty žádaných veličin. Přesto je však třeba diskutovat některé neurčitosti, které se vyskytly.

Otázkou např. je, zda jsou spolehlivě určeny hodnoty dekontaminačních faktorů činidel DF_d. Odpověď zní ano, neboť tyto faktory byly určeny dvěma odlišnými způsoby. První způsob, tj. vyčíslení poměrů středních hodnot aktivit μ_o , μ_v a μ_d , je zcela obvyklý způsob, ale je v našem případě zatížen velkou neurčitostí způsobenou tím, že aktivita po dekontaminaci I_d je v mezích chyb blízká nule. Druhý způsob vychází z určení hodnot DF(95%) a DF_v(95%), což jsou hodnoty určené na statistické hadině spolehlivosti 95 %. Jinými slovy, tyto hodnoty jsou (téměř) zaručeny. Jejich poměr proto nutně ukazuje na kvalitu dekontaminačního činidla. Vzhledem k charakteru jednotlivých měřených veličin tyto dva způsoby určení DF_d mohou, ale nemusí vést na striktně stejný výsledek. Tím spíš je z tabulky 7 patrné, že určené hodnoty DF_d jsou oprávněné.

V této souvislosti je třeba diskutovat kvalitu dekontaminačních činidel, které mají DF_d „pouze“ cca 2 až 3. Veličina DF_d je dána jednak kvalitou dekontaminačního činidla samotného, a jednak dekontaminovaným povrchem. Právě kvalita povrchu určuje, jakou část kontaminantu lze pouze opláchnout, a jaká část bude k povrchu vázána fyzikálními a chemickými silami. Proto bylo testované činidlo Hvězda S.C.H. porovnáváno s činidlem Neodekont, které je běžně zavedeno a distribuováno.

Další otázkou je, zda jsme oprávněni počítat aritmetické průměry hodnot I_o , I_v a I_d , jak je to provedeno v tab. 6. Odpověď je ano, neboť mikropipetou bylo na každý vzorek aplikováno stejné množství roztoku s radioizotopem. V tomto ohledu je zajímavé, že hodnoty I_o pro ^{60}Co mají relativní rozptyl (standardní odchylku) přibližně 40%. Možná vysvětlení jsou tři:

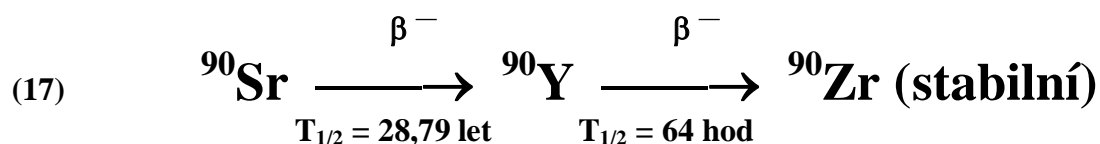
- i. izotop nebyl v roztoku homogenně rozptýlen,
- ii. aktivita I_o nebyla měřena vždy ve stejné geometrii,
- iii. došlo k šumu na sondě.

Pro ověření hypotézy i. byla provedena analýza, kdy byly dekontaminační faktory počítány odděleně pro každý vzorek. Výsledný relativní rozptyl hodnot DF, DF_v a DF_d však byl poněkud vyšší, než při postupu uvedeném výše. Hypotéza i. byla proto zamítnuta.

Pro ověření hypotéz ii. a iii. je třeba uvážit, že hodnoty I_o pro ^{60}Co byly měřeny ve stejný den a stejnými postupy, jako pro ^{137}Cs , u kterého je rozptyl (standardní odchylka) jen cca 5%. Vzorky kontaminované ^{60}Co byly ale měřeny o několik hodin později. Je proto pravděpodobné, že došlo k ohřevu měřícího zařízení a výskytu šumů, tj. nejpravděpodobnější je hypotéza iii.

Další otázkou je, zda můžeme vyvozovat závěry z dat pro dvojici izotopů $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, které se vyskytují v přirozené rozpadové rovnováze, když tato rovnováha byla dekontaminací jistě narušena. Lze totiž očekávat, že každý z těchto izotopů bude mít jiné dekontaminační faktory. Rovnováha mezi těmito izotopy se ustanovuje cca za několik dní. Lze proto definovat dekontaminační faktory této směsi jako poměry aktivit po uplynutí dostatečné doby k obnovení rovnováhy. V rovnováze mají oba izotopy stejnou aktivitu. Mohou nastat tyto mezní případy: odstraníme –li dekontaminací pouze ^{90}Y , bude aktivita směsi růst, dokud

nedosáhne dvojnásobné hodnoty oproti samotnému ^{90}Sr . Odstraníme –li dekontaminací pouze ^{90}Sr , aktivita bude klesat s přirozeným rozpadem ^{90}Y . Jisté tedy je, že rovnovážné hodnoty I_v a I_d mohou být oproti naměřeným maximálně 2x vyšší. S uvážením této skutečnosti můžeme dobře popsat dekontaminační prostředky pomocí veličiny $\text{DF}(95\%)$ a $\text{DFv}(95\%)$. Naproti tomu veličina DFd v našich podmínkách má pro dvojici izotopů $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ jen ilustrativní význam. Schéma (17) ukazuje rozpadový řetěz izotopu ^{90}Sr :



8. Závěr

Celkově má čínidlo Hvězda S.C.H. naprosto srovnatelné dezaktivační účinky, jako speciální dezaktivační mýdlo Neodekont, a to ať je aplikováno ve formě pěny, nebo roztoku. Přirozeně existují izotopy, které toto čínidlo dekontaminuje snáze než Neodekont, např. ^{137}Cs . Poněkud hůře toto čínidlo dekontaminuje izotopy ^{60}Co a pravděpodobně i dvojici izotopů $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$. Izotop ^{241}Am dekontaminují obě čínidla stejně úspěšně.

K experimentům byl použit nátěr khaki zavedený v Armádě ČR k ochraně bojové techniky. Nátěr byl nový, vyztáhlý, v praktických ani laboratorních podmínkách nepoužitý.

Uvedené rozdíly dekontaminačních faktorů představují maximálně jen cca 30-40 % v hodnotě dekontaminačního faktoru, což je srovnatelné s neurčitostmi výsledků. Tabulka 9 shrnuje celkové dekontaminační faktory $\text{DF}(95\%)$ určené na hladině spolehlivosti 95%, a příslušné dekontaminační účinnosti.

Tab. 9: Shrnutí dekontaminační účinnosti porovnávaných čínidel.			
Statistická hladina spolehlivosti 95%.			
Dekontaminační čínidlo	Izotop	Dekontaminační faktor DF	Dekontaminační účinnost DU
Hvězda S.C.H. – pěna	^{137}Cs	605	99,83 %
Hvězda S.C.H. - roztok		555	99,82 %
Neodekont bez abraziv		375	99,73 %
Neodekont		170	99,41 %
Hvězda S.C.H. - pěna	^{60}Co	27	96,30 %
Hvězda S.C.H. - roztok		35	97,14 %
Neodekont bez abraziv		39	97,43 %
Neodekont		40	97,50 %
Hvězda S.C.H. - pěna	$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ v rovnováze	> 1600 ^(a)	> 99,94 %
Hvězda S.C.H. - roztok		> 1900 ^(a)	> 99,95 %
Neodekont bez abraziv		> 2100 ^(a)	> 99,95 %
Neodekont		> 2900 ^(a)	> 99,97 %
Hvězda S.C.H. - pěna	^{241}Am	1900	99,95 %
Hvězda S.C.H. - roztok		1940	99,95 %

Neodekont bez abraziv		2220	99,95 %
Neodekont		1780	99,94 %
Pozn. ^(a) : Při měření I_v a I_d byla rovnováha mezi izotopy ^{90}Sr a ^{90}Y porušena. Uvedené hodnoty byly zkorigovány (sníženy) na nejnižší jisté z hlediska obnovení rovnováhy.			

9. Odkazy

[1] Jagdish K. Tuli (ed.): Nuclear Wallet Cards, National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. January 2000.

[2] Physical Review D50, 1173 (1994) – Particle Physics Booklet, form the Review of Particle Properties

10. Seznam příloh

Příloha č.P1: Naměřené aktivity vzorků

Příloha č.P2: METODA OVĚŘENÍ ÚČINNOSTI DEKONTAMINAČNÍHO PROSTŘEDKU. Decomkov Praha s.r.o. Interní dokument.

Příloha č.P3: Zařízení ke kontaminaci radioaktivním aerosolem. Decomkov Praha s.r.o. Návod k použití zařízení. 2005

Příloha P4: Protokol o přípravě činidla Hvězda S.C.H.

Příloha P5: Složení khaki laku – objednávka komponent

P1. Příloha č.1 – naměřené aktivity vzorků

Tab. č. P1/1: Aktivita I_0 a I_v vzorků kontaminovaných roztokem ^{137}Cs								
Hodnoty I_0					Hodnoty I_v			
Číslo vzorku	Naměřeno M [impulsů]	Doba měření	Přirozené pozadí B [impulsů]	Hodnota po odečtení pozadí N [impulsů za 100 s]	Naměřeno M [impulsů]	Doba měření	Přirozené pozadí B [impulsů]	Hodnota po odečtení pozadí N [impulsů za 100 s]
21	21593	100 s	508 ± 13,0 za 100 s	21090 ± 150	746	100 s	484,6 ± 5,2 za 100 s	261 ± 28
22	19264	100 s		18760 ± 140	564	100 s		79 ± 25
23	20175	100 s		19670 ± 150	535	100 s		50 ± 24
24	19365	100 s		18860 ± 140	582	100 s		97 ± 25
25	20261	100 s		19750 ± 150	494	100 s		9 ± 23
26	21458	100 s		20950 ± 150	622	100 s		137 ± 26
27	19928	100 s		19420 ± 150	614	100 s		129 ± 26
28	20101	100 s		19590 ± 150	721	100 s		236 ± 28
29	19953	100 s		19450 ± 150	621	100 s		136 ± 26
30	21444	100 s		20940 ± 150	532	100 s		47 ± 24
31	21613	100 s		21110 ± 150	592	100 s		107 ± 25
32	22067	100 s		21560 ± 150	698	100 s		213 ± 27
33	21451	100 s		20940 ± 150	608	100 s		123 ± 26
34	21181	100 s		20670 ± 150	603	100 s		118 ± 26
35	21300	100 s		20790 ± 150	652	100 s		167 ± 27
36	20937	100 s		20430 ± 150	554	100 s		69 ± 25
37	21745	100 s		21240 ± 150	522	100 s		37 ± 24
38	21280	100 s		20770 ± 150	595	100 s		110 ± 25
39	22180	100 s		21670 ± 150	597	100 s		112 ± 25
40	21692	100 s		21180 ± 150	636	100 s		151 ± 26
41	21312	100 s		20800 ± 150	601	100 s		116 ± 26
42	21927	100 s		21420 ± 150	533	100 s		48 ± 24
43	21962	100 s		21450 ± 150	626	100 s		141 ± 26
44	22758	100 s		22250 ± 160	701	100 s		216 ± 27
Pozadí	500	100 s		—	2849	600 s		—
	530	100 s		—	2900	600 s		—
	495	100 s		—	2974	600 s		—

Tab. č.P1/2:
Aktivita I₀ a I_v vzorků kontaminovaných roztokem ⁶⁰Co

	Hodnoty I ₀					Hodnoty I _v			
Číslo vzorku	Naměřeno M [impulsů]	Doba měření	Přirozené pozadí B [impulsů]	Hodnota po odečtení pozadí N [impulsů za 100 s]		Naměřeno M [impulsů]	Doba měření	Přirozené pozadí B [impulsů]	Hodnota po odečtení pozadí N [impulsů za 100 s]
45	67483	200 s	496,5 ± 15,8 za 100 s	66990 ± 270		870	100 s	484,6 ± 5,2 za 100 s	385 ± 30
46	64326	200 s		63830 ± 260		964	100 s		479 ± 32
47	68305	200 s		67810 ± 270		1178	100 s		693 ± 35
48	71361	200 s		70860 ± 270		1434	100 s		949 ± 39
49	68521	200 s		68020 ± 270		1233	100 s		748 ± 36
50	71613	200 s		71120 ± 270		1112	100 s		627 ± 34
51	78024	200 s		77530 ± 280		1504	100 s		1019 ± 40
52	70877	200 s		70380 ± 270		1451	100 s		966 ± 39
53	75046	200 s		74550 ± 280		1777	100 s		1292 ± 43
54	70151	200 s		69650 ± 270		2185	100 s		1700 ± 48
55	69587	200 s		69090 ± 270		1494	100 s		1009 ± 40
56	74823	200 s		74330 ± 280		1614	100 s		1129 ± 41
57	35283	100 s		34790 ± 190		1747	100 s		1262 ± 43
58	35957	100 s		35460 ± 200		1299	100 s		814 ± 37
59	35203	100 s		34710 ± 190		1553	100 s		1068 ± 40
60	30220	100 s		29720 ± 180		1393	100 s		908 ± 38
61	35573	100 s		35080 ± 190		1392	100 s		907 ± 38
62	31553	100 s		31060 ± 180		1541	100 s		1056 ± 40
63	34812	100 s		34320 ± 190		1758	100 s		1273 ± 43
64	33871	100 s		33370 ± 190		1681	100 s		1196 ± 42
65	31608	100 s		31110 ± 180		1074	100 s		589 ± 34
66	31698	100 s		31200 ± 180		1486	100 s		1001 ± 39
67	31423	100 s		30930 ± 180		1306	100 s		821 ± 37
68	30808	100 s		30310 ± 180		1193	100 s		708 ± 35
Pozadí	520	100 s	—		2849	600 s	—		
	473	100 s	—		2900	600 s	—		
	—	—	—		2974	600 s	—		

Tab. č.P1/3:
Aktivita I₀ a I_v vzorků kontaminovaných roztokem ⁹⁰Sr + ⁹⁰Y

Hodnoty I ₀ , cca o 5% nadhodnoceny díky nestabilitě sondy					Hodnoty I _v ^(a)			
Číslo vzorku	Naměřeno M [impulsů]	Doba měření	Přirozené pozadí B [impulsů]	Hodnota po odečtení pozadí N [impulsů za 100 s]	Naměřeno M [impulsů]	Doba měření	Přirozené pozadí B [impulsů]	Hodnota po odečtení pozadí N [impulsů za 100 s]
69	222400	100 s	Vzhledem k neurčitosti cca 5% pozadí zanedbatelné	222000 ± 12000	121	100 s	52,4 ± 3,24 za 100 s	69 ± 12
70	216929	100 s		217000 ± 11000	144	100 s		92 ± 13
71	229600	100 s		230000 ± 12000	228	100 s		176 ± 16
72	227156	100 s		227000 ± 12000	143	100 s		91 ± 13
73	230012	100 s		230000 ± 12000	148	100 s		96 ± 13
74	223005	100 s		223000 ± 12000	128	100 s		76 ± 12
75	225212	100 s		225000 ± 12000	125	100 s		73 ± 12
76	227332	100 s		227000 ± 12000	136	100 s		84 ± 13
77	232805	100 s		233000 ± 12000	143	100 s		91 ± 13
78	227830	100 s		228000 ± 12000	109	100 s		57 ± 11
79	229792	100 s		230000 ± 12000	89	100 s		37 ± 10
80	224552	100 s		225000 ± 12000	77	100 s		25 ± 10
81	227310	100 s		227000 ± 12000	104	100 s		52 ± 11
82	229516	100 s		230000 ± 12000	98	100 s		46 ± 11
83	227889	100 s		228000 ± 12000	103	100 s		51 ± 11
84	225728	100 s		226000 ± 12000	99	100 s		47 ± 11
85	230610	100 s		231000 ± 12000	138	100 s		86 ± 13
86	219580	100 s		220000 ± 11000	89	100 s		37 ± 10
87	210607	100 s		211000 ± 11000	105	100 s		53 ± 11
88	211804	100 s		212000 ± 11000	98	100 s		46 ± 11
89	211088	100 s		211000 ± 11000	112	100 s		60 ± 12
90	214251	100 s		214000 ± 11000	89	100 s		37 ± 10
91	212862	100 s		213000 ± 11000	63	100 s		11 ± 9
92	215897	100 s		216000 ± 11000	95	100 s		43 ± 11
Pozadí	1354	100 s		—	57	100 s		—
	—	—	—	—	59	100 s		—
	—	—	—	—	45	100 s		—
	—	—	—	—	61	100 s		—
	—	—	—	—	40	100 s		—

^(a) Oplachem byla narušena rovnováha mezi ⁹⁰Sr a ⁹⁰Y. Po obnovení rovnováhy se úhrnná aktivita I^v změní – jistě ale bude menší než dvojnásobek uvedených hodnot.

Tab. č.P1/4:
Aktivita I₀ a I_v vzorků kontaminovaných roztokem ²⁴¹Am

	Hodnoty Io					Hodnoty Iv			
Číslo vzorku	Naměřeno M [impulsů]	Doba měření	Přirozené pozadí B [impulsů]	Hodnota po odečtení pozadí N [impulsů za 100 s]		Naměřeno M [impulsů]	Doba měření	Přirozené pozadí B [impulsů]	Hodnota po odečtení pozadí N [impulsů za 100 s]
93	1153000	100 s	224,0 ± 5,3 za 100 s	1152800 ± 1100		2231	100 s	224,0 ± 5,3 za 100 s	2007 ± 48
94	1022000	100 s		1021800 ± 1100		1322	100 s		1098 ± 37
95	1120000	100 s		1119800 ± 1100		1833	100 s		1609 ± 44
96	1114000	100 s		1113800 ± 1100		1537	100 s		1313 ± 40
97	1126000	100 s		1125800 ± 1100		1688	100 s		1464 ± 42
98	1123000	100 s		1122800 ± 1100		1265	100 s		1041 ± 36
99	1127000	100 s		1126800 ± 1100		978	100 s		754 ± 32
100	1134000	100 s		1133800 ± 1100		806	100 s		582 ± 29
101	1130000	100 s		1129800 ± 1100		1114	100 s		890 ± 34
102	1115000	100 s		1114800 ± 1100		893	100 s		669 ± 31
103	1081000	100 s		1080800 ± 1100		887	100 s		663 ± 31
104	1181000	100 s		1180800 ± 1100		987	100 s		763 ± 32
105	1081000	100 s		1080800 ± 1100		1023	100 s		799 ± 33
106	1148000	100 s		1147800 ± 1100		1452	100 s		1228 ± 39
107	1142000	100 s		1141800 ± 1100		962	100 s		738 ± 32
108	1103000	100 s		1102800 ± 1100		1166	100 s		942 ± 35
109	1175000	100 s	1174800 ± 1100		969	100 s	745 ± 32		
110	1111000	100 s	1110800 ± 1100		928	100 s	704 ± 31		
111	1177000	100 s	1176800 ± 1100		1028	100 s	804 ± 33		
112	1124000	100 s	1123800 ± 1100		1027	100 s	803 ± 33		
113	1124000	100 s	1123800 ± 1100		1127	100 s	903 ± 34		
114	1104000	100 s	1103800 ± 1100		1467	100 s	1243 ± 39		
115	1148000	100 s	1147800 ± 1100		975	100 s	751 ± 32		
116	1108000	100 s	1107800 ± 1100		1280	100 s	1056 ± 37		
Pozadí	1332	600 s	Stejně jako Io	—		Stejně jako Io		—	
	222	100 s		—					
	238	100 s		—					

Tab. č.P1/5:
Aktivita I_d vzorků kontaminovaných roztokem ⁶⁰Co a ¹³⁷Cs

¹³⁷ Cs					⁶⁰ Co				
Číslo vzorku	Naměřeno M [impulsů]	Doba měření	Přirozené pozadí B [impulsů]	Hodnota po odečtení pozadí N [impulsů za 100 s]	Číslo vzorku	Naměřeno M [impulsů]	Doba měření	Přirozené pozadí B [impulsů]	Hodnota po odečtení pozadí N [impulsů za 100 s]
21	503	100 s	534,33 ± 9,5 za 100 s	-31 ± 25	45	718	100 s	534,33 ± 9,5 za 100 s	184 ± 29
22	547	100 s		13 ± 26	46	678	100 s		144 ± 28
23	570	100 s		36 ± 26	47	867	100 s		333 ± 31
24	520	100 s		-14 ± 25	48	1016	100 s		482 ± 34
25	505	100 s		-29 ± 25	49	839	100 s		305 ± 31
26	558	100 s		24 ± 26	50	871	100 s		337 ± 32
27	539	100 s		5 ± 26	51	1041	100 s		507 ± 34
28	597	100 s		63 ± 27	52	1068	100 s		534 ± 35
29	534	100 s		0 ± 25	53	1340	100 s		806 ± 38
30	520	100 s		-14 ± 25	54	1580	100 s		1046 ± 41
31	536	100 s		2 ± 26	55	1266	100 s		732 ± 37
32	521	100 s		-13 ± 25	56	1213	100 s		679 ± 37
33	519	100 s		-15 ± 25	57	1251	100 s		717 ± 37
34	499	100 s		-35 ± 25	58	1104	100 s		570 ± 35
35	566	100 s		32 ± 26	59	1050	100 s		516 ± 34
36	531	100 s		-3 ± 25	60	921	100 s		387 ± 32
37	547	100 s		13 ± 26	61	1257	100 s		723 ± 37
38	473	100 s		-61 ± 24	62	1235	100 s		701 ± 37
39	551	100 s		17 ± 26	63	1036	100 s		502 ± 34
40	541	100 s		7 ± 26	64	1101	100 s		567 ± 35
41	571	100 s		37 ± 26	65	841	100 s		307 ± 31
42	563	100 s		29 ± 26	66	1072	100 s		538 ± 35
43	548	100 s		14 ± 26	67	1039	100 s		505 ± 34
44	656	100 s		122 ± 28	68	1046	100 s		512 ± 34
Pozadí	590	100 s	534,33 ± 9,5 za 100 s	—	Pozadí	Stejně jako pro ¹³⁷ Cs	—	534,33 ± 9,5 za 100 s	—
	488	100 s		—			—		—
	515	100 s		—			—		—
	549	100 s		—			—		—
	546	100 s		—			—		—
	518	100 s		—			—		—

Tab. č.P1/6: Aktivita I _d vzorků kontaminovaných roztokem ⁹⁰ Sr + Y a ²⁴¹ Am									
⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y ^(a)					²⁴¹ Am				
Číslo vzorku	Naměřeno M [impulsů]	Doba měření	Přirozené pozadí B [impulsů]	Hodnota po odečtení pozadí N [impulsů za 100 s]	Číslo vzorku	Naměřeno M [impulsů]	Doba měření	Přirozené pozadí B [impulsů]	Hodnota po odečtení pozadí N [impulsů za 100 s]
69	65	100 s	32,8 ± 2,9 za 100 s	32 ± 9	93	712	100 s	236,9 ± 5,2 za 100 s	475 ± 28
70	74	100 s		41 ± 10	94	683	100 s		446 ± 27
71	67	100 s		34 ± 9	95	825	100 s		588 ± 30
72	54	100 s		21 ± 8	96	783	100 s		546 ± 29
73	90	100 s		57 ± 10	97	789	100 s		552 ± 29
74	75	100 s		42 ± 10	98	550	100 s		313 ± 25
75	79	100 s		46 ± 10	99	746	100 s		509 ± 28
76	99	100 s		66 ± 11	100	546	100 s		309 ± 24
77	75	100 s		42 ± 10	101	647	100 s		410 ± 26
78	50	100 s		17 ± 8	102	607	100 s		370 ± 26
79	61	100 s		28 ± 9	103	577	100 s		340 ± 25
80	41	100 s		8 ± 8	104	712	100 s		475 ± 28
81	64	100 s		31 ± 9	105	521	100 s		284 ± 24
82	71	100 s		38 ± 9	106	740	100 s		503 ± 28
83	74	100 s		41 ± 10	107	455	100 s		218 ± 22
84	52	100 s		19 ± 8	108	724	100 s		487 ± 28
85	65	100 s		32 ± 9	109	621	100 s		384 ± 26
86	42	100 s		9 ± 8	110	543	100 s		306 ± 24
87	54	100 s		21 ± 8	111	603	100 s		366 ± 26
88	57	100 s		24 ± 9	112	621	100 s		384 ± 26
89	64	100 s		31 ± 9	113	594	100 s		357 ± 25
90	61	100 s		28 ± 9	114	615	100 s		378 ± 26
91	54	100 s		21 ± 8	115	683	100 s		446 ± 27
92	58	100 s		25 ± 9	116	468	100 s		231 ± 23
Pozadí	22	100 s	—	Pozadí	254	100 s	—		
	36	100 s	—		248	100 s	—		
	33	100 s	—		225	100 s	—		
	40	100 s	—		1405	600 s	—		
^(a) Oplachem byla narušena rovnováha mezi ⁹⁰ Sr a ⁹⁰ Y. Po obnovení rovnováhy se úhrnná aktivita I _d změní – jistě ale bude menší než dvojnásobek uvedených hodnot pro tyto dva izotopy.									