



Státní ústav radiační ochrany, v.v.i.
ENVINET NUVIA Group



Certifikovaná metodika

ODHAD VNITŘNÍ KONTAMINACE TRANSURANY Z POHOTOVÉHO MĚŘENÍ AKTIVITY V PLICÍCH A KOSTŘE IN VIVO

Vypracoval Ing. Pavel Fojtík, Ing. Jan Surý

Výsledek projektu Bezpečnostního výzkumu České republiky BV II/2-VS,
kód projektu VG20122014093: Systém pro měření vnitřní kontaminace po havárii JEZ zaměřený
na štítné žlázy u dětí a kontaminaci transurany

Rok uplatnění metodiky: 2015

Oponenti Ing. Zuzana Pašková, MBA, Státní úřad pro jadernou bezpečnost
Ing. Helena Pospíšilová, ÚJV Řež, a.s.

Schválil

Vedoucí odboru

RNDr. Petr Rulík

Archivní označení

30-06-00

Výtisk číslo

1

Rozdělovník

Výtisk

Převzal

Datum

Podpis

Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika		List: 2 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo		Datum účinnosti: 1.1.2015

ZMĚNOVÝ LIST

Číslo změny	Vypracoval	Důvod změny		Schválil	Účinnost od
	Jméno, podpis	Nové listy:	Zrušené listy:	Jméno, podpis	
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					

Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. ENVINET NUZIA Group	Metodika	List: 3 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

SEZNAM REVIZÍ

Číslo revize	Důvod revize	Účinnost revize od
0	Původní dokument	1. 1. 2015

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 4 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

OBSAH

ZKRATKY A SYMBOLY	5
1. CÍL METODIKY	6
2. PŘÍSTROJE, POMŮCKY, MATERIÁLOVÉ ZAJIŠTĚNÍ	6
3. POPIS METODIKY	6
3.1 VŠEOBECNĚ	6
3.1.1 Činnosti společné pro obě části metodiky.....	7
4. STANOVENÍ AKTIVITY RADIONUKLIDŮ V PLICÍCH IN VIVO.....	9
4.1 ÚČEL	9
4.2 PRINCIP METODY	9
4.3 POSTUP.....	9
4.3.1 Nastavení detektorů do měřicí pozice	9
4.3.2 Výpočet aktivity v plicích	9
4.3.3 Nejistota stanovení aktivity v plicích.....	10
4.3.4 Vyjadřování výsledků	10
5. STANOVENÍ AKTIVITY ²⁴¹ Am V KOSTŘE MĚŘENÍM LEBKY <i>IN VIVO</i>	11
5.1 ÚČEL	11
5.2 PRINCIP METODY	11
5.3 POSTUP.....	11
5.3.1 Zjištění rozměrů lebky	11
5.3.2 Nastavení detektorů do měřicí pozice	12
5.3.3 Výpočet aktivity v lebce a kostře	12
5.3.4 Nejistota stanovení aktivity v kostře	13
5.3.5 Vyjadřování výsledků	13
PŘÍLOHA I: Zařízení pro měření aktivity v plicích a kostře v SÚRO, v.v.i.	14
PŘÍLOHA II: Měřicí geometrie v SÚRO v.v.i.	15
II.1 Měření plic	15
II.2 Měření lebky	15
PŘÍLOHA III: Detekční účinnosti	16
III.1 Měření plic	16
III.1.1 Účinnostní kalibrace.....	16
III.1.2 Odhad tloušťky a složení měkké tkáně hrudníku.....	20
III.2 Měření lebky	23
III.2.1 Účinnostní kalibrace.....	23
PŘÍLOHA IV: Rozbor nejistot.....	24
IV.1 Nejistota stanovení aktivity transuranů v plicích.....	24
IV.2 Nejistota stanovení aktivity ²⁴¹ Am v kostře.....	25
PŘÍLOHA V: Odhad minimální významné a minimální detekovatelné aktivity	26
NOVOST POSTUPŮ	27
POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY	27
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	27
SEZNAM SOUVISEJÍCÍCH PUBLIKACÍ A VÝSTUPŮ	28

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUZIA Group	Metodika	List: 5 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

ZKRATKY A SYMBOLY

CTP	celotělový počítač
MO	měřená osoba
SF	geometrická směrodatná odchylka (použita zkratka anglického <i>scattering factor</i> kvůli snadnějšímu srovnání s literaturou)
MVA	minimální významná aktivita
MDA	minimální detekovatelná aktivita
CWT	tloušťka tkáně hrudníku v cm (použita zavedená zkratka anglického <i>chest wall thickness</i> kvůli snadnějšímu srovnání s literaturou)
MEQ-CWT	ekvivalentní tloušťka svalové tkáně v cm (použita zavedená zkratka anglického <i>muscle equivalent chest wall thickness</i> kvůli snadnějšímu srovnání s literaturou)

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 6 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře <i>in vivo</i>	Datum účinnosti: 1.1.2015

1. CÍL METODIKY

Metodika slouží jako příručka popisující

- 1) organizaci a realizaci gamaspektrometrických měření *in vivo* prováděných pro účely odhadu vnitřní kontaminace osob transurany,
- 2) postup měření aktivity transuranů v plicích *in vivo* a jeho hodnocení,
- 3) postup odhadu aktivity ^{241}Am v kostře měřením lebky *in vivo* a jeho hodnocení.

2. PŘÍSTROJE, POMŮCKY, MATERIÁLOVÉ ZAJIŠTĚNÍ

- Spektrometrické trasy sestávající z polovodičového detektoru typu HPGe pro měření radionuklidů emitujících záření gama a X o nízké energii umístěného ve stínící komoře, zdroje vysokého napětí, předzesilovače, spektrometrického zesilovače a mnohokanálového analyzátoru.

Spektrometrické trasy ve Státním ústavu radiační ochrany, v.v.i. (SÚRO), specifikované v této metodice, mají interní označení SM-35, SM-36, SM-37 a SM-38 a jejich příslušné detektory jsou označeny jako D35, D36, D37 a D38. Jako mnohokanálový analyzátor je použit modul Canberra Multiport II. Popis detektorů je uveden v Příloze I.

- Vhodný distanční prvek (např. destička) pro nastavení vzdálenosti čela detektoru od povrchu těla.
- Počítač s programovým vybavením pro ovládání měření a analýzu spekter, např. Canberra Genie 2000.
- Polohovací vyšetřovací křeslo pro měřenou osobu.
- Osobní váha pro zjištění hmotnosti a výšky měřené osoby, hmatadlo, krejčovský metr nebo jiné vhodné měřidlo pro zjištění rozměrů lebky.
- Počítač s programovým vybavením pro zpracování dat (např. s tabulkovým kalkulátorem).
- Databáze pro záznam údajů o měřené osobě (MO) a výsledků měření.

3. POPIS METODIKY

3.1 VŠEOBECNĚ

Metodika odhadu vnitřní kontaminace transurany je založena na gamaspektrometrickém měření kontaminované osoby *in vivo* v měřicí komoře celotělového počítače Státního ústavu radiační ochrany, v.v.i. v Praze.

Pro účely odhadu jsou prováděna měření aktivity transuranů v plicích a kostře polovodičovými detektory se vstupním okénkem pro měření aktivity radionuklidů emitujících záření gama a X o nízké energii.

Detektory jsou v měřicí komoře zavěšeny v manipulátorech, které umožňují nastavit jednotlivé detektory do měřicí polohy pro měření aktivity v plicích nebo pro měření aktivity v lebce (pro odhad aktivity v kostře).

Měřená osoba je pohodlně a stabilně usazena v měřicím křesle, jehož konstrukce umožňuje měnit výšku a sklon křesla. Kombinací nastavení křesla a manipulátorů musí být možné nastavit detektory do pozic umožňujících měření plic a lebky u osob s rozpětím postavy, jak ho

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 7 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

předvídá příslušná technická norma (v rozpětí výšky postavy od cca 150 do 200 cm) [1].

Měření aktivity v lebce se provádí prakticky pouze pro účely odhadu vnitřní kontaminace radionuklidem ^{241}Am , a to v delším časovém odstupu od předpokládaného příjmu nebo při předpokládaném chronickém příjmu radionuklidu ^{241}Am .

Naměřená spektra z jednotlivých detektorů se po měření zpracují a stanoví se plocha píku úplné absorpce vhodné energetické linie fotonového záření emitovaného daným radionuklidem.

K výpočtu aktivity radionuklidu v plicích nebo lebce se dále použijí detekční účinnosti stanovené kalibrací jednotlivých detektorů pomocí fyzikálních fantomů nebo výpočetní metodou pomocí voxelových fantomů a metody Monte Carlo.

Detekční účinnosti musí zahrnovat korekci na tloušťku popř. složení měkké tkáně hrudníku v případě měření aktivity transuranů v plicích a korekci na velikost lebky v případě měření aktivity ^{241}Am v lebce pro odhad aktivity ^{241}Am v kostře.

Text metodiky je rozdělen na čtyři základní části:

- 1) činnosti společné pro obě metodiky,
- 2) metodika stanovení aktivity radionuklidů v plicích měření *in vivo*,
- 3) metodika odhadu aktivity ^{241}Am v kostře z měření aktivity v lebce *in vivo*,
- 4) přílohy obsahující podrobnosti k metodikám a údaje specifické pro uplatnění metodik v laboratoři celotělového počítače Státního ústavu radiační ochrany, v.v.i. (SÚRO)

3.1.1 Činnosti společné pro obě části metodiky

Příprava osoby k měření

Měřená osoba (MO) se zavede do šatny laboratoře CTP. Při průchodu hygienickou smyčkou se osprchuje, umyje si důkladně i vlasy a oblékne se do připraveného čistého pláště. V případě podezření na povrchovou kontaminaci je MO změřena přístrojem pro měření povrchové kontaminace s dostatečnou účinností detekce pro energie menší než 100 keV.

S MO je vyplněn záznam v databázovém laboratorním systému, který musí obsahovat základní osobní údaje, výšku a hmotnost osoby.

Zaznamená se důvod měření a informace důležité pro odhad aktivity a výpočet příjmu radionuklidu. V případě radiační havárie nebo radiační nehody je nutné do záznamu co nej přesněji uvést popis události a kde a kdy k ní došlo.

Před zavedením MO do měřicí komory je potřeba vhodně nastavit výšku a sklon vyšetřovacího křesla instalovaného v komoře. V případě měření osob vyšších než 170 cm se nastaví výška sedáku vyšetřovacího křesla do nejnižší polohy. Pro ostatní osoby se nastaví do nejvyšší polohy. Záklon opěradla vůči podlaze se ve všech případech nastaví na 145° (výrazné naklopení opěradla dozadu).

MO se uvede do měřicí komory, usadí se do vyšetřovacího křesla a opěrka hlavy se nastaví do pozice, která je pro měřenou osobu dostatečně pohodlná.

Z detektorů se sejmou víčka, která chrání jejich vstupní okénka. Detektory se překryjí např. potravinovou fólií pro ochranu před kontaminací.

Jednotlivé detektory se nastaví do příslušné geometrie měření. Geometrie měření jsou pro jednotlivé části metodiky uvedeny v Příloze II.

Pro případ opakování měření dané osoby v budoucnu se zaznamená individuální nastavení manipulátorů (posuny, výšky a úhly náklonů detektorů) odečtem ze stupnic, jimiž jsou

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 8 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

opatřeny manipulátory jednotlivých směrů pohybu detektoru. Údaje se zaznamenají do databázového záznamu měření dané osoby.

Po uzavření komory se spustí měření, zpravidla na dobu 1800 s. Kratší měřicí doby se volí v případech, kdy postačují pro dosažení požadované minimální detekovatelné aktivity (MDA). Během měření se provádí vizuální kontrola spektra na měřicím počítači.

Po ukončení měření se spektra z jednotlivých detektorů uloží do paměti počítače pod pořadovým číslem přiděleným laboratorním databázovým systémem a provede se u nich píková analýza.

Plocha fotopíků zájmových energií daného radionuklidu se zapíše do záznamu MO v laboratorním databázovém systému.

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 9 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

4. STANOVENÍ AKTIVITY RADIONUKLIDŮ V PLICÍCH IN VIVO

4.1 ÚČEL

Metoda je určena pro stanovení aktivity radionuklidů emitujících nízkenergetické fotonové záření deponovaných v plicích v důsledku inhalačního příjmu měřením plic *in vivo*.

4.2 PRINCIP METODY

Při neočekávaném uvolnění radioaktivních látek do ovzduší ve formě par nebo aerosolů může dojít k jejich vdechnutí. V důsledku vdechnutí tak dochází k příjmu radionuklidů a jejich následné depozici v plicích. Retence radionuklidu v plicích závisí na aktivitě a druhu radionuklidu, velikosti vdechnutých částic, jejich chemické formě, na rychlosti vstřebávání radionuklidu do krve a samočisticích schopnostech plic. Chování radionuklidů v plicích popisuje plicní model ICRP 66 [2].

Pro případ radionuklidů emitujících nízkenergetické záření gama nebo X, které lze na celotělovém počítači detekovat pouze obtížně, byla vyvinuta metoda měření plic pomocí polovodičových detektorů s tenkým vstupním okénkem pro měření fotonového záření o nízké energii. Měření se provádí ve stínící komoře celotělového počítače.

4.3 POSTUP

4.3.1 Nastavení detektorů do měřicí pozice

Detektory se nastaví do měřicích pozic, pro něž byla vypočtena detekční účinnost, postupem uvedeným v Příloze II.

V případě měřicího systému SÚRO se detektory v pořadí D35, D36 a D38 nastaví do měřicích pozic D, C a F podle obrázku 2 a pokynů v Příloze II.

Na měřicím počítači se spustí měření s předvolenou dobou měření. Při měření se systémem SÚRO se nastaví doba měření 1800 s.

Naměřená spektra se uloží pod pořadovým číslem shodně se záznamem v laboratorním databázovém systému.

4.3.2 Výpočet aktivity v plicích

Ze spekter naměřených jednotlivými detektory se odečtou plochy píků úplné absorpce zájmových radionuklidů a odečte se příspěvek z pozadí. Plochy týchž píků naměřených jednotlivými detektory se sečtou podle rovnice 1 a stanoví se sumární plocha píku P_S . Hodnota se použije k výpočtu aktivity v plicích pomocí rovnice 2.

Sumární plocha píku se vypočte pomocí rovnice

$$P_S = \sum P_D \quad (\text{impulsy}) \quad (1)$$

kde

P_S je součet ploch píků P_D ze spekter jednotlivých detektorů podle rovnice 1 opravených na příspěvek z pozadí,

Aktivita v plicích se vypočte pomocí rovnice:

$$A = \frac{P_S}{t \cdot Y \cdot \eta_S} \quad (\text{Bq}) \quad (2)$$

kde

A je aktivita radionuklidu v plicích v Bq,

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 10 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

η_S je detekční účinnost soustavy detektorů pro zvolenou energii vypočtená z rovnice 9 v Příloze III,

t je doba měření v sekundách,

Y je zastoupení energetické linie fotonového záření,

a ostatní symboly mají význam uvedený výše.

Detekční účinnost η_S soustavy detektorů je součtem detekčních účinností jednotlivých detektorů $\sum \eta_D$ a závisí na energii fotonového záření a na odhadnuté tloušťce překryvné tkáně hrudního koše. Pro danou energii fotonového záření se vypočte podle rovnice 9 v Příloze III.

V případě měřicího systému SÚRO se k měření použije soustava tří detektorů. Pokud okolnosti nedovolí použít třetí detektor (D38) v jeho měřicí pozici, např. při měření plic u žen, lze měření provést pouze se dvěma detektory (D35 a D36) a použít k výpočtu příslušný součet ploch pík a příslušnou detekční účinnost pro dva použité detektory.

4.3.3 Nejistota stanovení aktivity v plicích

Nejistota stanovení aktivity v plicích se vyjádří geometrickou směrodatnou odchylkou SF , která je kombinací 1) geometrické směrodatné odchylky stanovení sumární plochy píku SF_A a 2) geometrické směrodatné odchylky SF_B stanovené uzančně na základě rozboru nejistot a publikovaných odhadů:

$$SF = \exp \sqrt{[\ln(SF_A)]^2 + [\ln(SF_B)]^2} \quad (3)$$

přičemž $SF_A = \exp\left(\frac{\sigma_S}{P_S}\right)$ a $SF_B =$ uzanční konstanta (4)

kde

σ_S je nejistota stanovení sumární plochy píku (imp) podle zákona o šíření chyb,

P_S je sumární plocha píku (imp),

SF_A je geometrická směrodatná odchylka stanovení plochy píku (nejistota typu A),

SF_B je geometrická směrodatná odchylka ostatních faktorů ovlivňujících výsledek měření (nejistota typu B).

Hodnota uzanční konstanty a rozbor nejistot jsou uvedeny v Příloze IV.

4.3.4 Vyjadřování výsledků

Aktivita v plicích se vyjadřuje v jednotce Bq a ve tvaru:

$$A \times / SF \text{ Bq}$$

Není-li radionuklid detekován, vypočte se uznávaným postupem minimální významná aktivita a výsledek se uvede ve tvaru

$$A < MVA \text{ Bq}$$

V Příloze V je uveden způsob výpočtu minimální významné aktivity a minimální detekovatelné aktivity podle Currieho.

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 11 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

5. STANOVENÍ AKTIVITY ^{241}Am V KOSTŘE MĚŘENÍM LEBKY *IN VIVO*

5.1 ÚČEL

Metoda je určena k odhadu aktivity radionuklidu ^{241}Am v kostře měřením lebky *in vivo*.

5.2 PRINCIP METODY

Po vnitřní kontaminaci radionuklidem ^{241}Am dochází k redistribuci radionuklidu v těle, přičemž mezi hlavní orgány a tkáně, v nichž dochází k depozici, patří kostra. Pro stanovení aktivity ^{241}Am deponované v kostře je zvoleno měření lebky, protože lebka tvoří zhruba 1/8 z celkového objemu kostry, je relativně slabě pokryta měkkými tkáněmi a detektory lze umístit tak, aby příspěvky z ostatních částí kostry byly malé.

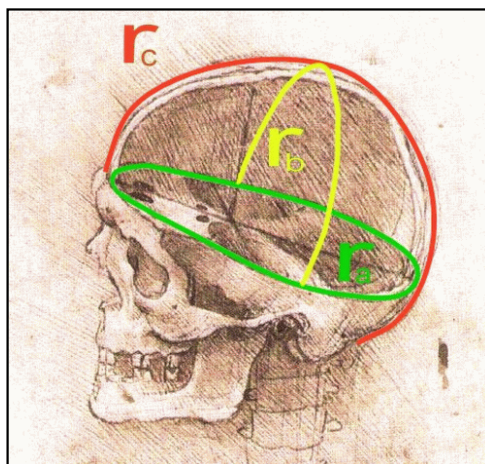
Měření se provádí pomocí polovodičových detektorů s tenkým vstupním okénkem pro měření fotonového záření o nízké energii. Měření se provádí ve stínící komoře celotělového počítače.

5.3 POSTUP

5.3.1 Zjištění rozměrů lebky

Při registraci MO se kromě výšky a hmotnosti zjistí pomocí vhodného měřidla, např. hmatadla nebo krejčovského metru, rozměry lebky [3] způsobem uvedeným na obrázku 1 a uvedou v databázovém záznamu o měření.

Obrázek 1: Rozměry lebky pro výpočet středního poloměru lebky



Z rozměrů r_a , r_b a r_c v centimetrech se vypočte střední poloměr lebky „ r “ pomocí rovnice 5:

$$r = \frac{\frac{r_a}{2\pi} + \frac{r_b}{\pi} + \frac{r_c}{\pi}}{3} \quad (\text{cm}) \quad (5)$$

kde

r je střední poloměr lebky v centimetrech,

r_a je obvod lebky v centimetrech,

r_b je vzdálenost od ucha k uchu přes temeno hlavy v centimetrech,

r_c je vzdálenost středu čela a týlního hrbolu (měřeno v mediální rovině) v centimetrech.

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 12 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

5.3.2 Nastavení detektorů do měřicí pozice

Detektory se nastaví do měřících pozic, pro něž byla vypočtena detekční účinnost postupem uvedeným v Příloze II. Vlastnosti různých měřících pozic detektorů jsou uvedeny v práci [4].

V případě měřicího systému SÚRO se pro měření aktivity ^{241}Am v lebce použijí detektory s interním označením D35, D36, D37 a D38 a nastaví se do měřících poloh podle obrázku 3 a pokynů v Příloze II.

Na měřicím počítači se spustí měření s předvolenou dobou měření. Při měření se systémem SÚRO se nastaví doba měření 1800 s.

Naměřená spektra se uloží pod pořadovým číslem shodně se záznamem v laboratorním databázovém systému.

5.3.3 Výpočet aktivity v lebce a kostře

Ze spekter naměřených jednotlivými detektory se odečtou plochy píku o energii 59,5 keV a odečte se příspěvek z pozadí. Plochy píku naměřené jednotlivými detektory se sečtou podle rovnice 6 a stanoví se sumární plocha píku P_S . Hodnota se použije k výpočtu aktivity v lebce pomocí rovnice 7.

Sumární plocha píku se vypočte pomocí rovnice

$$P_S = \sum P_D \quad (\text{impulsy}) \quad (6)$$

kde

P_S je součet ploch píků P_D ze spekter jednotlivých detektorů podle rovnice 6 opravených na příspěvek z pozadí,

Aktivita v lebce se vypočte pomocí rovnice:

$$A_{\text{lebka}} = \frac{P_S}{t \cdot Y \cdot \eta_S} \quad (\text{Bq}) \quad (7)$$

kde

A_{lebka} je aktivita radionuklidu v lebce v Bq,

η_S detekční účinnost soustavy čtyř detektorů pro energii 59,5 keV (^{241}Am) vypočtená z rovnice 11 v Příloze III pro změřený střední poloměr lebky,

t je doba měření v sekundách,

Y je zastoupení energetické linie záření gama 59,5 keV,

Detekční účinnost η_S soustavy čtyř detektorů je součtem detekčních účinností jednotlivých detektorů $\sum \eta_D$ a závisí na středním poloměru hlavy.

Pokud okolnosti nedovolí použít některý detektor, lze měření provést pouze se zbývajících detektory a použít k výpočtu příslušný součet ploch píků a příslušnou detekční účinnost.

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 13 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

Aktivita v kostře se vypočte pomocí rovnice

$$A_{\text{kostřa}} = \frac{A_{\text{lebka}}}{0,125} \quad (\text{Bq}) \quad (8)$$

kde

$A_{\text{kostřa}}$ je aktivita v kostře v Bq,

A_{lebka} je aktivita v lebce v Bq, vypočtená podle rovnice 7,

0,125 je hodnota stanovená na základě celotělových studií USTUR [5], podle nichž tvoří lebka 12,5 % z celkové hmotnosti kostry.

5.3.4 Nejistota stanovení aktivity v kostře

Nejistota stanovení aktivity v kostře se vyjádří geometrickou směrodatnou odchylkou SF , která je kombinací 1) geometrické směrodatné odchylky stanovení sumární plochy píku SF_A a 2) geometrické směrodatné odchylky SF_B stanovené uzančně na základě rozboru nejistot a publikovaných odhadů. Viz rovnice 3 a 4.

5.3.5 Vyjadřování výsledků

Aktivita v kostře se vyjadřuje v jednotce Bq a ve tvaru:

$A_{\text{kostřa}} \times / SF \text{ Bq}$

Není-li radionuklid ^{241}Am detekován, vypočte se uznávaným postupem minimální významná aktivita a výsledek se uvede ve tvaru

$A_{\text{kostřa}} < MVA \text{ Bq}$

V Příloze V je uveden způsob výpočtu minimální významné aktivity a minimální detekovatelné aktivity podle Currieho [6].

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 14 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

PŘÍLOHA I: ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ AKTIVITY V PLICÍCH A KOSTŘE V SÚRO

Stínící komora

Měření v SÚRO probíhá ve stínící komoře. Je vyrobena z oceli o síle stěn 20 cm. Rozměry komory jsou 177×224×200 cm, vnitřní stěny komory jsou obloženy 2 cm silnou vrstvou olova, 1 cm silnou vrstvou mědi a 1 mm silnou vrstvou čisté mědi.

V komoře se nachází vyšetřovací křeslo umožňující zdvih sedáku mezi výškami 46 až 56 cm nad podlahou a záklon opěradla 100 až 160° v úči podlaze.

Popis detektorů

Tabulka 2: Charakteristiky detektorů

Označení detektoru	Typ	Výrobce	Model	Materiál okna	Plocha krystalu (mm ²)	Výška krystalu (mm)
D35	HPGe	ORTEC	LO-AX 70450/30-P	karbonepoxid	3825	30,5
D36	HPGe	ORTEC	LO-AX 70450/30-P	Be	3902	32,5
D37	HPGe	Canberra	BEGe 3825	karbonepoxid	3800	25,5
D38	HPGe	ORTEC	GEM-FX 7025P4	karbonepoxid	3848	27,6

Detektory D35, D36 a D38 jsou trvale chlazeny zařízeními ORTEC X-Cooler II. Detektor D37 je trvale chlazen zařízením Canberra Cryo-JT. Každý detektor je zavěšen v manipulátoru a schopen pohybu ve směrech x, y, z a s výjimkou detektoru D37 také rotace ve vodorovné a svislé rovině.

Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 15 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

PŘÍLOHA II: MĚŘICÍ GEOMETRIE V SÚRO v.v.i.

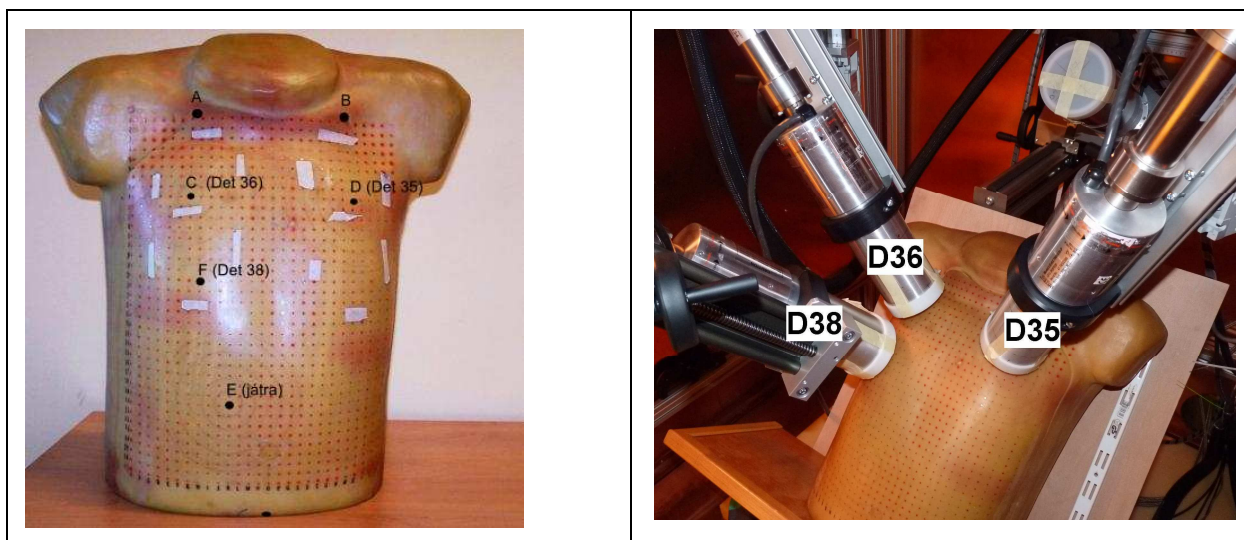
Okénko detektoru se nastaví rovnoběžně s plochou, respektive tečně k ploše (hrudi, lebky) v měřicím bodě. Pomocí distanční destičky se nastaví vzdálenost detektoru od těla na 1 cm.

II.1 MĚŘENÍ PLIC

Pozice detektorů při měření plic jsou uvedeny na obrázku 2 s vyobrazením fantomu LLNL Torso Phantom (dále jen fantom LLNL), který odpovídá postavě muže o výšce 177 cm a hmotnosti 76 kg a byl použit pro kalibraci měřicí sestavy [7].

Detektory se v pořadí D35, D36 a D38 nastaví do měřicích pozic D, C a F.

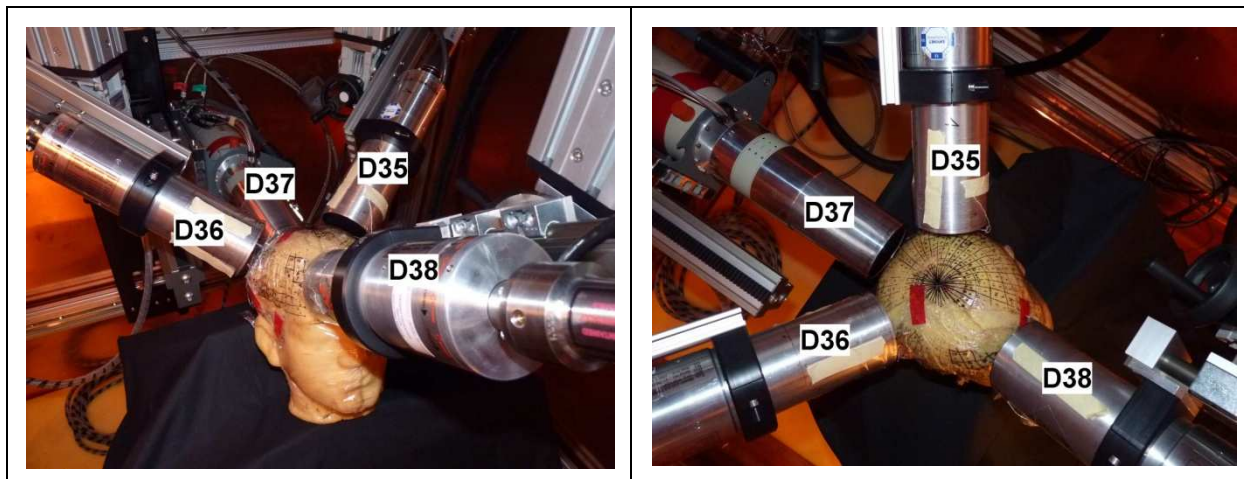
Obrázek 2: Měřicí pozice detektorů při měření aktivity radionuklidů v plicích na příkladu fantomu LLNL



II.2 MĚŘENÍ LEBKY

Pozice detektorů jsou uvedeny na obrázku 3 s vyobrazením fantomu lebky BPAM-001 (USTUR Case 102) [8].

Obrázek 3: Měřicí pozice detektorů při měření aktivity ^{241}Am v lebce



Státní ústav radiční ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 16 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

PŘÍLOHA III: DETEKČNÍ ÚČINNOSTI

III.1 MĚŘENÍ PLIC

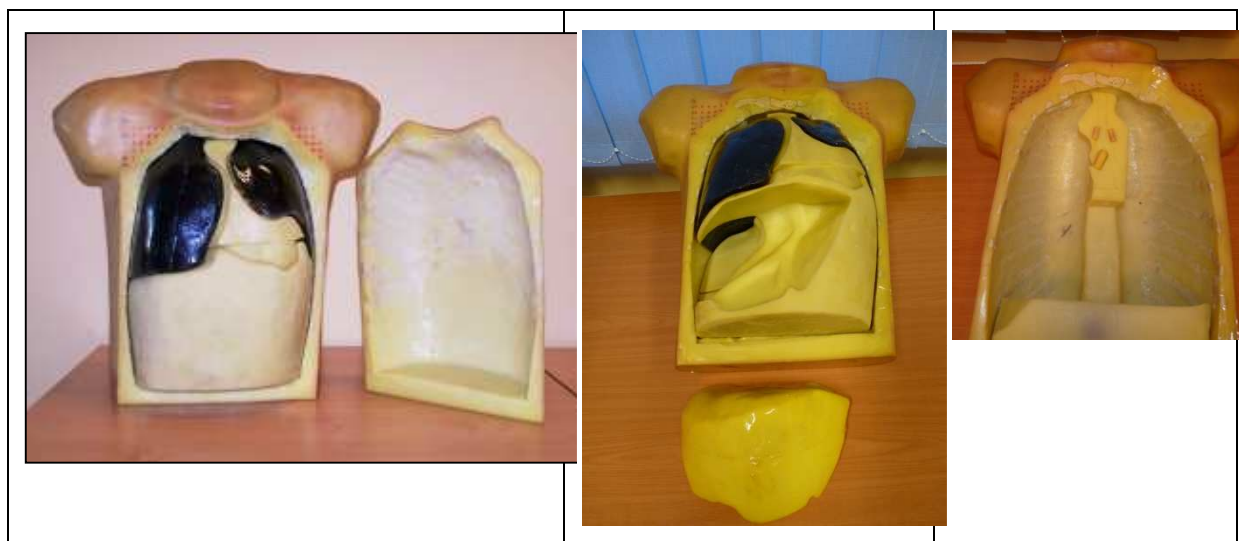
III.1.1 Účinnostní kalibrace

Pro kalibraci geometrie měření plic byl použit exemplář výše uvedeného fantomu LLNL vyrobený pro Mezinárodní agenturu pro atomovou energii ve Vídni.

Popis fantomu

Antropomorfní fantom trupu lidského těla bez hlavy a rukou je vyroben z tkáni ekvivalentních materiálů, má odnímatelnou přední část trupu a vyjímatelné vnitřní části – orgány. K zapůjčenému fantomu byly k dispozici celkem čtyři sady plic o hustotě 0,25-0,30 g/cm³, z toho tři sady s homogenně deponovanou aktivitou ²⁴¹Am nebo ²³⁹Pu v celém objemu plic (viz tabulka 1). Dále byl pro fantom k dispozici odlitek jater a odlitky lymfatických uzlin obsahující ²⁴¹Am. Fantom je vybaven základní vrstvou hrudní tkáně (se žebry) o tloušťce 1,5 cm a čtyřmi přídavnými vrstvami pro překrytí hrudi, které simulují různou tloušťku měkké tkáně hrudníku (0,6; 1,3; 1,7 a 2,5 cm). Překryvné tkáně použité pro kalibraci detekční účinnosti byly vyrobeny tak, aby simulovaly zastoupení svalové a tukové tkáně v poměru 50:50 %. Fotografie fantomu jsou uvedeny na obrázku 4.

Obrázek 4 LLNL Torso Phantom



Tabulka 1 Popis plicních radionuklidových zdrojů k fantomu LLNL

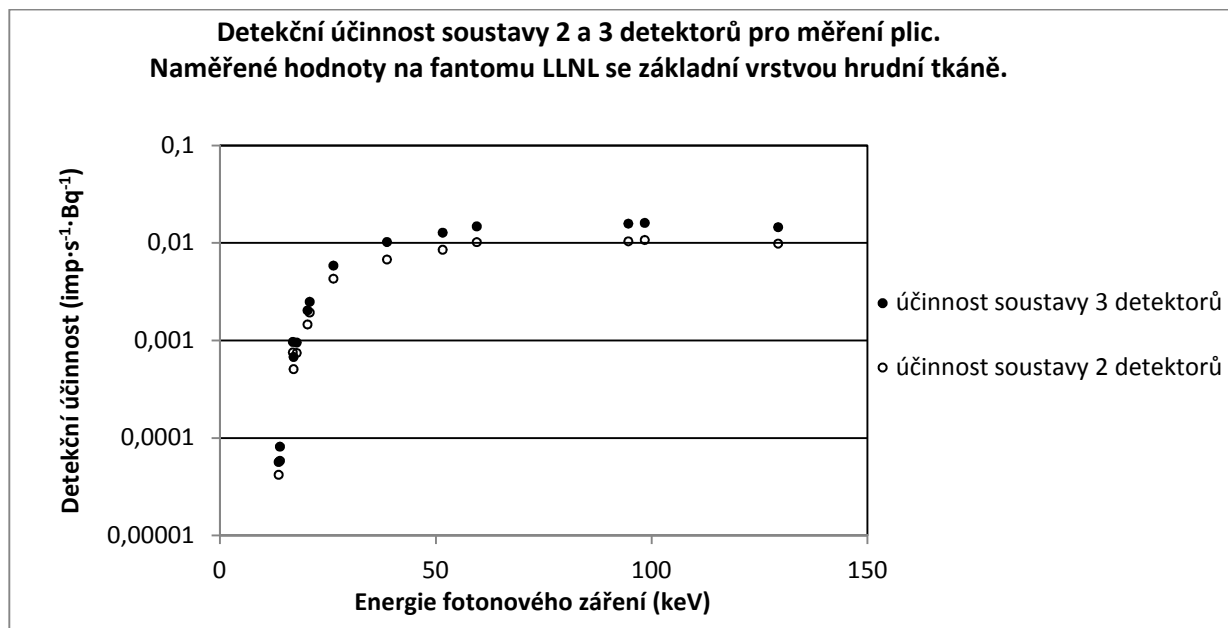
Nuklid	Označení	Aktivita	Referenční datum
²⁴¹ Am	619 R, 619 L	2,29 kBq	19. 11. 1986
²³⁹ Pu	504 R, 504 L	181,3 kBq	5. 11. 1986
²³⁹ Pu	608 R, 608 L	11,05 kBq	5. 11. 1986

Křivky závislosti detekční účinnosti

Příklad naměřené detekční účinnosti v závislosti na energii fotonového záření je uveden na obrázku 5. Jedná se o detekční účinnost pro fantom se základní vrstvou hrudní tkáně 1,5 cm.

Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 17 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

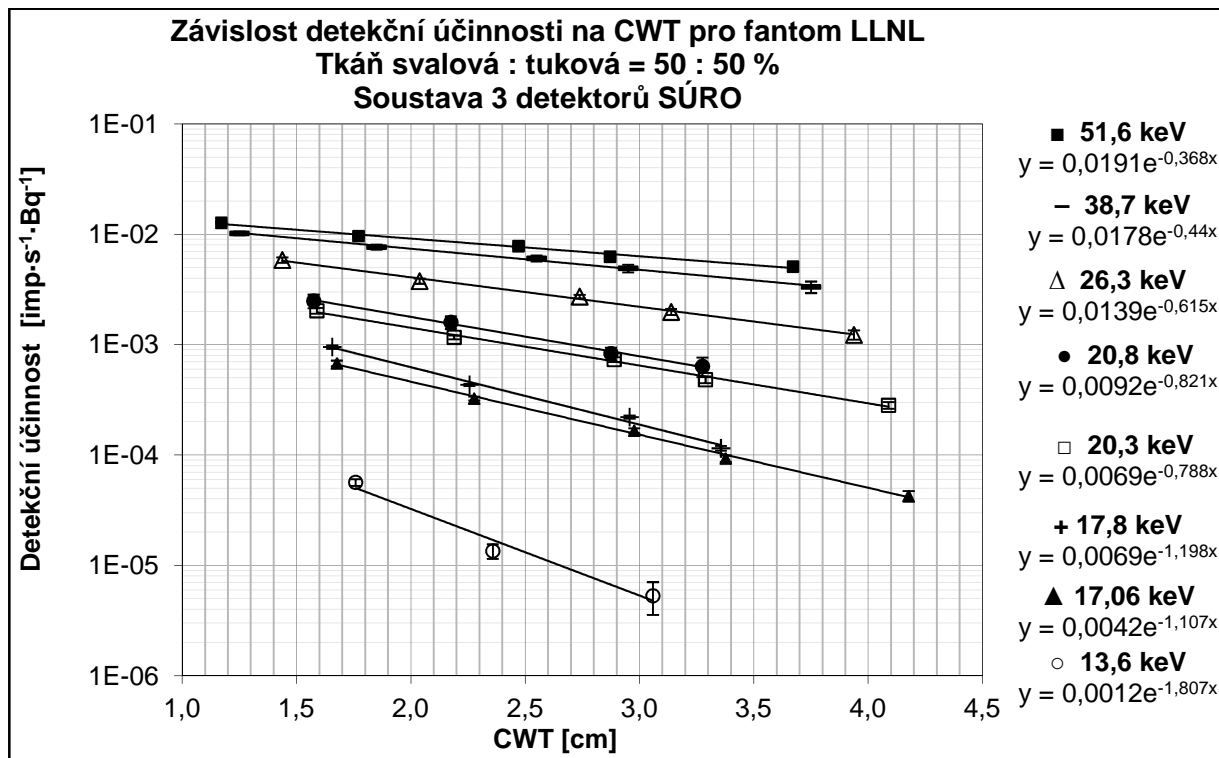
Obrázek 5



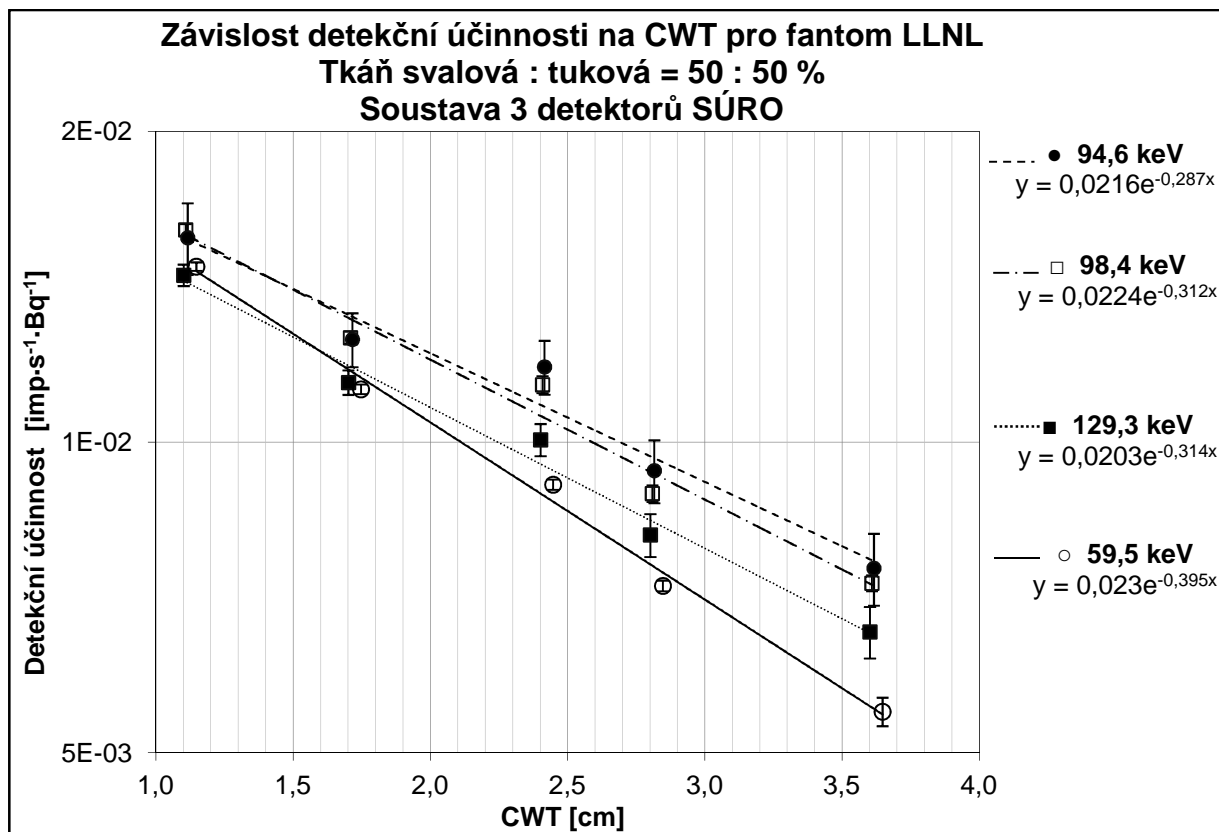
Detekční účinnost sestavy **tří** nebo **dvou detektorů** pro danou energii fotonového záření závisí na geometrii měření a na tloušťce a složení měkké tkáně hrudníku, která fotonové záření zeslabuje. Pro soustavu tří detektorů je tato závislost uvedena na obrázcích 6a,b a 7a,b s grafy pozorované závislosti detekční účinnosti na tloušťce hrudní tkáně (*CWT*) s poměrem svalové a tukové tkáně 50:50 %, (obrázek 6a a 6b) a na veličině ekvivalentní tloušťka svalové tkáně (*MEQ-CWT*) (obrázek 7a a 7b), která je definována jako tloušťka svalové tkáně vykazující stejnou míru zeslabení pro fotonové záření jako tkáň o daném poměru svalové a tukové tkáně [9]. Veličina *MEQ-CWT* slouží k eliminaci vlivu různého složení tkáně na průběh křivky detekční účinnosti.

Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 18 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

Obrázek 6a

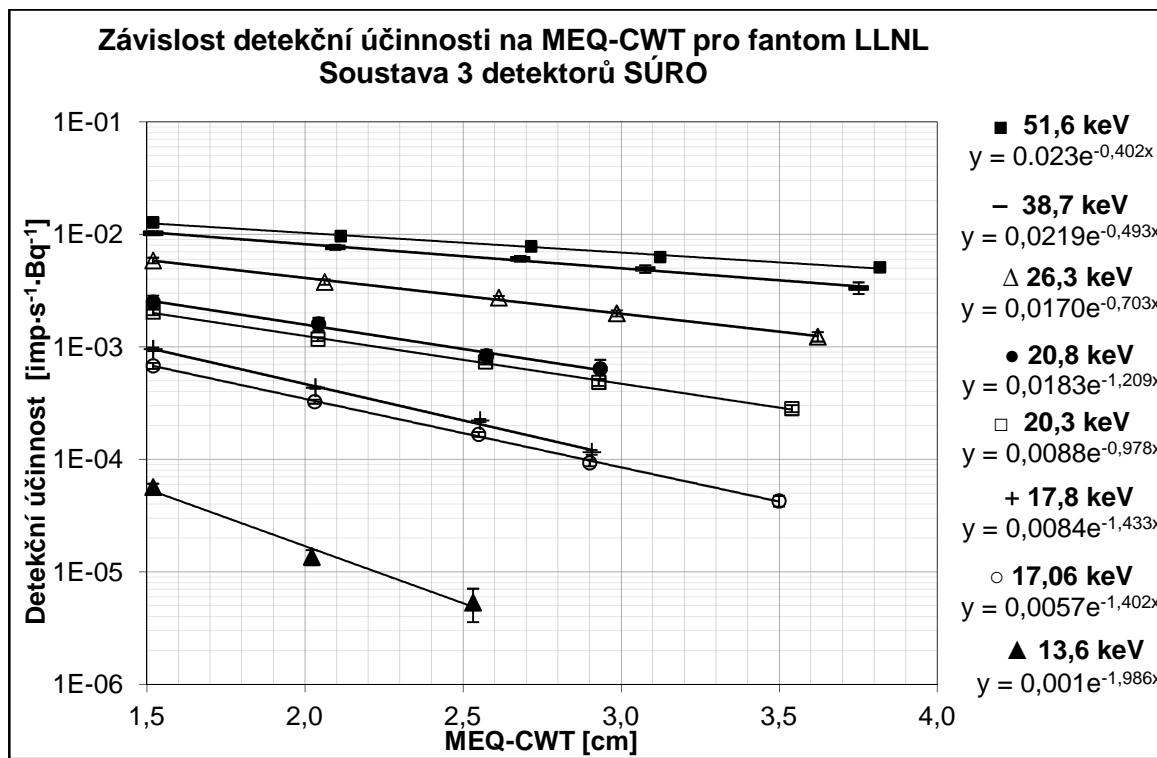


Obrázek 6b

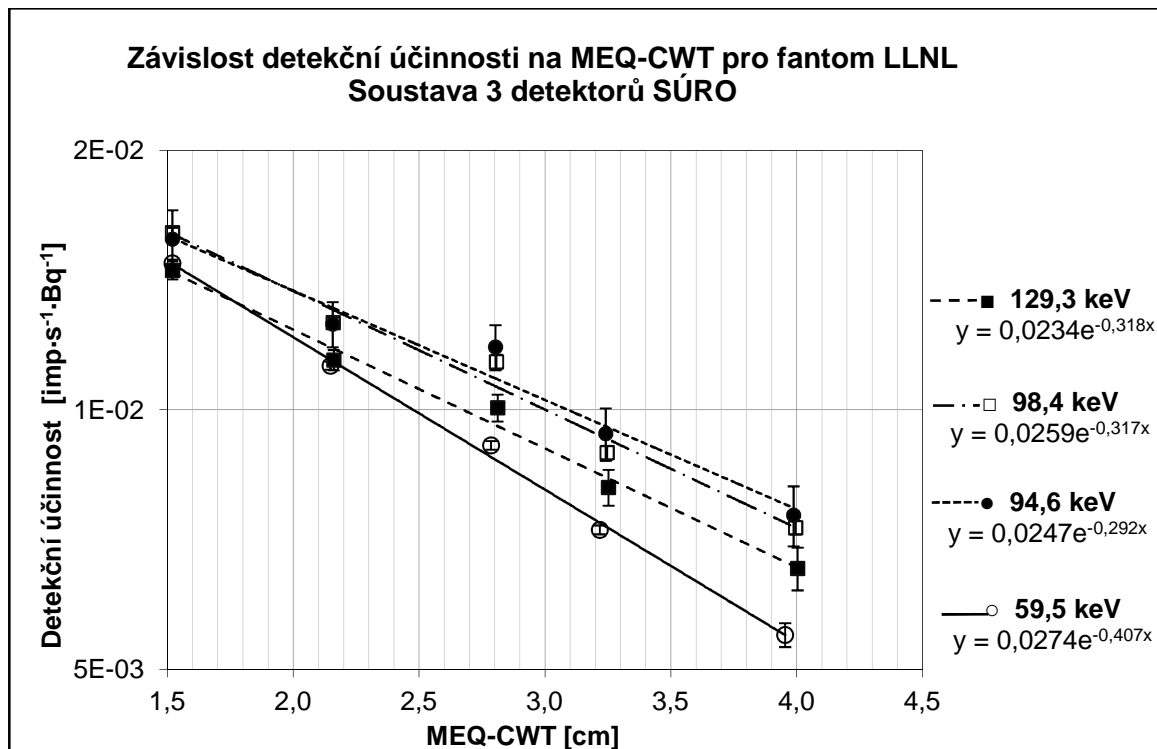


Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 19 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

Obrázek 7a



Obrázek 7b



Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 20 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

Poznámka k obrázkům 6a,b a 7a,b: Chybové úsečky odpovídají nejistotě stanovení plochy sumárního píku na úrovni 1σ .

Z experimentálních měření byla pro každou sestavu detektorů sestrojena křivka závislosti detekční účinnosti

- 1) na tloušťce hrudní tkáně (CWT) složené ze svalové a tukové tkáně v poměru 50:50 % (viz fantom LLNL) a
- 2) na veličině ekvivalentní tloušťka svalové tkáně (MEQ-CWT).

Pro matematické vyjádření křivek detekční účinnosti byla použita rovnice navržená Kramerem [10] obsahující jako proměnné energii fotonového záření a tloušťku CWT nebo MEQ-CWT:

$$\ln(\eta_S) = a + b \cdot Y + \frac{(c + d \cdot Y)}{\ln(E)} + \frac{(e + f \cdot Y)}{\ln(E)^2} + \frac{(g + h \cdot Y)}{\ln(E)^3} + \frac{(i + j \cdot Y)}{\ln(E)^4} \quad (9)$$

kde

E je energie fotonového záření v keV,

Y je tloušťka CWT nebo MEQ-CWT v cm,

„a“ až „j“ jsou parametry určené regresí z dat naměřených na fantomu LLNL.

Hodnoty tlouštěk CWT a MEQ-CWT se při absenci individuálního měření tloušťky tkáně lékařskými zobrazovacími metodami odhadnou pomocí empirických biometrických rovnic uvedených níže.

Matematická poznámka:

Rovnice tohoto tvaru velmi dobře popisuje pozorovaná experimentální data a předpovídá detekční účinnost s velmi malou chybou. Kvůli velké provázanosti nezávislých proměnných se odhady parametrů mohou lišit experiment od experimentu. Na odhad detekční účinnosti však tato skutečnost nemá vliv.

Odhady parametrů rovnice 9 pro soustavu dvou detektorů (D35 a D36) a tří detektorů (D35, D36 a D38) a pro použití s CWT nebo MEQ-CWT jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Odhady parametrů rovnice 9

Parametr	Soustava 2 detektorů		Soustava 3 detektorů	
	CWT	MEQ-CWT	CWT	MEQ-CWT
a	-76,81321634	-31,89965442	-38,94394751	10,0478552
b	19,10938855	5,552569815	12,14792429	-4,259462037
c	1067,732342	423,2828361	503,4590758	-199,05339
d	-277,4836435	-84,32847016	-174,7409639	59,28650464
e	-5828,082639	-2419,293445	-2696,317545	1017,167198
f	1451,028445	431,7995292	895,1563921	-339,7165432
g	14082,62773	6204,263111	6496,097388	-2080,935645
h	-3257,831529	-887,8666908	-1952,81068	913,2341732
i	-12800,03429	-6082,587634	-6033,203679	1275,342134
j	2588,885084	519,3081708	1465,537491	-1024,324231

III.1.2 Odhad tloušťky a složení měkké tkáně hrudníku

Odhad tloušťky měkké tkáně hrudníku je jednou z proměnných v rovnici 9 pro výpočet

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 21 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

detekční účinnosti. Musí se provést pro každou MO. Při jiném složení (poměru svalové a tukové tkáně) vykazuje navíc stejná tloušťka jiné zeslabení pro danou energii fotonového záření.

Tloušťku a popřípadě složení lze odhadnout dvěma způsoby:

- 1) pomocí lékařských zobrazovacích metod, zejména ultrasonografie,
- 2) odhadem z empirických biometrických rovnic.

Využití první metody je vázáno na spolupráci měřené osoby a specializovaného zdravotnického pracoviště, na němž se zobrazovací metoda rutinně používá. Taková praxe musí být předem dohodnuta a odzkoušena. Vhodná zobrazovací metoda pak umožní odhadnout tloušťku svalové a tukové tkáně. Není-li tato možnost k dispozici, odhadne se tloušťka tkáně z empirické biometrické rovnice navržené předem na základě průzkumu a měření zobrazovacími metodami. Biometrické rovnice využívají pro odhad tloušťky měkké tkáně hrudníku (CWT) znalost hmotnosti a výšky osoby, popř. věk osoby. Existuje několik empirických rovnic vycházejících z ultrazvukového měření tloušťky tkáně a měření hmotnosti a výšky u různě velkých skupin osob, zpravidla pracovníků, u nichž má rutinně probíhat monitorování aktivity radionuklidů v plicích. Rovnice jsou velmi specifické s ohledem na způsob jejich získání a na měřicí praxi laboratoře, která je má využívat.

Při absenci vlastního průzkumu za účelem vývoje biometrické rovnice jsou pro měřicí systém a praxi v této metodice navrženy k použití biometrické rovnice publikované Vickersem [11], a to konkrétně rovnice, které získal pro podobnou soustavu polovodičových detektorů (co do počtu detektorů a průměru jejich krystalů) a pro podobnou polohu měřené osoby (v sedě, v záklonu v podobném úhlu). Kromě toho byl ve Vickersově práci použit pro kalibraci soustavy detektorů fantom LLNL, a lze tedy předpokládat, že tloušťka tkáně byla zjišťována a průměrována v místě uvažované pozice detektoru. Tloušťka tkáně vypočtená z Vickersových rovnic na základě znalosti hmotnosti a výšky osoby vykazuje stejné zeslabení fotonového záření jako překryvná tkáň fantomu LLNL s poměrem svalové a tukové tkáně 50:50 %. Parametry biometrické rovnice tedy platí pouze pro určitou energii fotonového záření. V uvedené práci jsou navrženy rovnice pro energii 17 keV (pro měření ^{239}Pu) a pro energii 59,5 keV (pro měření ^{241}Am). Pro mezilehlé energie se v metodice SÚRO navrhuje lineární interpolace hodnot. Pro energie vyšší než 60 keV se použije hodnota vypočtená pro energii 59,5 keV. Posledně uvedený přístup vede ke konzervativnímu odhadu aktivity. Vickers navrhl rovnice pro měření mužů i žen. Rovnice mají následující tvar:

$$CWT = a \cdot \frac{\text{hmotnost}}{\text{výška}} + b \quad (10)$$

kde

CWT je tloušťka tkáně hrudníku v cm při předpokládaném poměru svalové a tukové tkáně 50:50 %

hmotnost je v kilogramech

výška je v centimetrech

a, b jsou parametry, jejichž hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Hodnoty parametrů empirické biometrické rovnice podle Vickerse [11]

Pohlaví	Soustava detektorů	Energie (keV)	Parametry		Nejistota 2σ
			a	b	\pm cm
Muži	2 detektory	17	3,99	1,16	0,34
	3 detektory	17	4,34	1,25	0,35
Muži	2 detektory	59,5	4,19	0,82	0,36

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika			List: 22 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo			Datum účinnosti: 1.1.2015

	3 detektory	59,5	4,81	0,85	0,42
Ženy	2 detektory	17	5,45	0,14	0,50
	3 detektory	17	5,60	0,35	0,50
Ženy	2 detektory	59,5	5,35	0,17	0,50
	3 detektory	59,5	5,95	0,50	0,71

Tloušťka a složení měkké tkáně jsou spolu s reprodukovatelností nastavení měřicí geometrie a nejistotou distribuce radionuklidu v plicích nejvýznamnějšími složkami nejistoty stanovení, zejména při měření radionuklidů emitujících fotonové záření o energii několika desítek keV.

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 23 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

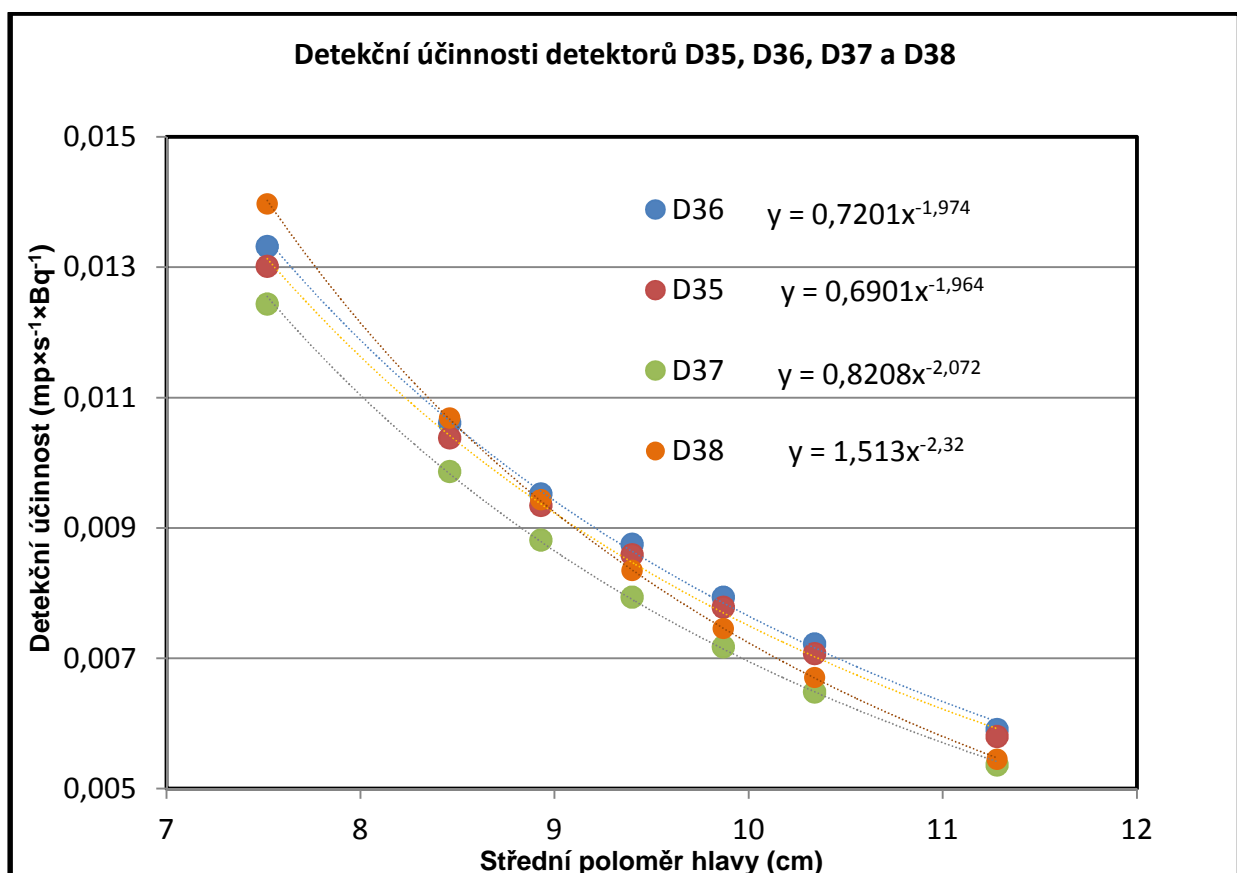
III.2 Měření lebky

III.2.1 Účinnostní kalibrace

Vzhledem k tomu, že je účinnost měření závislá na rozměrech měřené lebky, jsou detekční účinnosti pro jednotlivé detektory a energii záření gama 59,5 keV (^{241}Am) vyjádřeny jako funkce středního poloměru lebky, který se považuje za měřítko velikosti lebky a vypočte se pomocí rovnice 5.

Křivka závislosti detekční účinnosti je založena na sérii simulací s voxelovým fantomem reálné hlavy, ve kterých byla modifikována velikost lebky [12]. Výsledky simulací byly prověřeny fyzikálním fantomem lebky. Křivky pro jednotlivé detektory jsou zobrazeny na obrázku 8. V hodnotách účinnosti je zahrnut příspěvek od krčních obratlů.

Obrázek 8: Detekční účinnosti jednotlivých detektorů pro měření aktivity ^{241}Am v lebce.



Detekční účinnost soustavy čtyř detektorů se vypočte z rovnice 11:

$$\eta_s = 3,5448 \cdot r^{-2,082} \quad (11)$$

Detekční účinnosti jednotlivých detektorů se vypočtou z následujících rovnic:

$$\eta_{D35} = 0,6901 \cdot r^{-1,964} \quad (12)$$

$$\eta_{D36} = 0,7201 \cdot r^{-1,974} \quad (13)$$

$$\eta_{D37} = 0,8208 \cdot r^{-2,072} \quad (14)$$

$$\eta_{D38} = 1,513 \cdot r^{-2,321} \quad (15)$$

Symbols mají význam uvedený výše.

Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 24 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

PŘÍLOHA IV: ROZBOR NEJISTOT

IV.1 NEJISTOTA STANOVENÍ AKTIVITY TRANSURANŮ V PLICÍCH

Nejistota stanovení aktivity v plicích se vyjádří geometrickou směrodatnou odchylkou SF, která je kombinací geometrické směrodatné odchylky nejistoty typu A (nejistoty stanovení sumární plochy píku SF_A) a geometrické směrodatné odchylky nejistoty typu B (SF_B) dané nekontrolovanými faktory. V této metodice jsou nejistotě typu B přiřazeny konstantní hodnoty pro tři různé intervaly energií fotonového záření.

$$SF = \exp \sqrt{[\ln(SF_A)]^2 + [\ln(SF_B)]^2} \quad (16)$$

přičemž

$$SF_A = \exp\left(\frac{\sigma_S}{P_S}\right) \quad SF_B = \text{uzanční konstanta} \quad (17)$$

kde

σ_S je nejistota stanovení sumární plochy píku (imp) podle zákona o šíření chyb,

P_S je sumární plocha píku (imp)

SF_A je geometrická směrodatná odchylka stanovení plochy píku (nejistota typu A)

SF_B je geometrická směrodatná odchylka ostatních faktorů ovlivňujících výsledek měření, zejména pak detekční účinnosti (nejistota typu B).

V této metodice jsou nejistotě typu B přiřazeny konstantní hodnoty pro tři různé intervaly energií fotonového záření. Jsou navrženy v literatuře [13] na základě typických hodnot pro měření *in vivo* a jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4: Typické hodnoty nejistoty typu B (SF_B) pro měření *in-vivo* [13].

Fotony o nízké energii $E < 20 \text{ keV}$	Fotony o střední energii $20 \text{ keV} < E < 100 \text{ keV}$	Fotony o vysoké energii $E > 100 \text{ keV}$
2,06	1,25	1,15

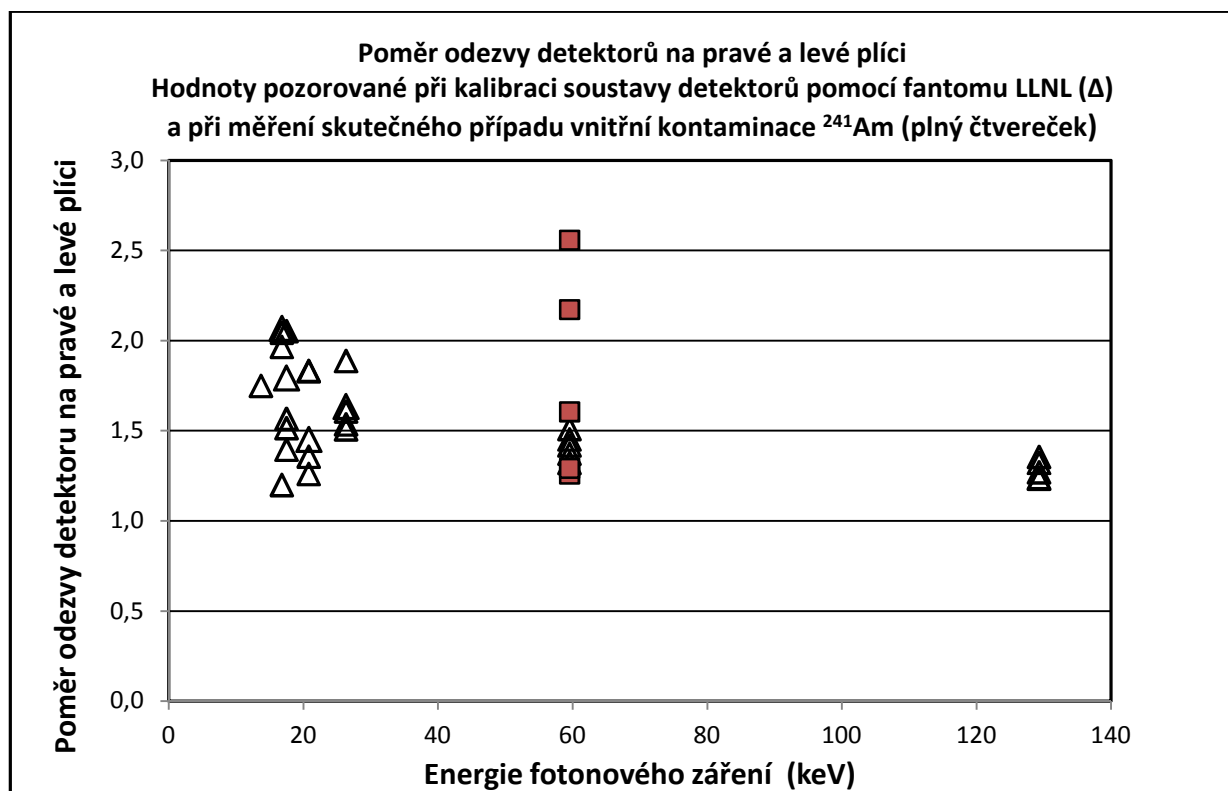
Tyto typické hodnoty nejistoty se zakládají na expertních odhadech a na pozorováních. Nejistotou typu B je zatížena zejména detekční účinnost. Nejistota detekční účinnosti závisí zejména na odlišnosti anatomických parametrů měřené osoby a kalibračního fantomu. Významný rozptyl detekční účinnosti byl však pozorován i při opakovaných měřeních téhož fantomu v ročních intervalech při tomtéž nastavení měřicí geometrie [14].

Nepostižitelná je nejistota v důsledku odlišné distribuce radionuklidu v plicích. Na nerovnoměrnou distribuci mezi pravou a levou plící lze usuzovat z poměru odezev příslušných detektorů. Na obrázku 6 jsou uvedeny poměry odezev detektoru na pravé plíci a detektoru na levé plíci při měření fantomu LLNL s různými vrstvami překryvné tkáně. I při neměnné (homogenní) distribuci radionuklidu (^{241}Am) v plicích vykazuje poměr určitý rozptyl způsobený změnou geometrického uspořádání detektorů mezi měřeními s jednotlivými vrstvami překryvné tkáně. Rozptyl poměru je ještě výraznější na hodnotách z měření skutečného případu vnitřní kontaminace ^{241}Am , kdy bylo dodrženo stejné geometrie mezi jednotlivými měřeními obtížnější než u opakovaného měření fantomu. Viz obrázek 9.

Liší-li se výrazně poměr odezev detektorů na pravé a levé plíci a nelze-li rozdíl vysvětlit statistikou měření, je třeba zvážit možnou nerovnoměrnou distribuci radionuklidu v plicích nebo přetrvávající povrchovou kontaminaci a řešit případ individuálně.

Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 25 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

Obrázek 9: Pozorovaný rozptyl poměrů odezvy detektorů na pravé a levé plíci při kalibraci s fantomem LLNL a při měření skutečného případu vnitřní kontaminace



IV.2 NEJISTOTA STANOVENÍ AKTIVITY ^{241}Am V KOSTŘE

Při odhadu nejistoty stanovení aktivity ^{241}Am v kostře se použije stejný přístup jako u nejistoty měření v plicích a tytéž rovnice pro geometrickou směrodatnou odchylku.

V této metodice je geometrické směrodatné odchylce pro nejistotu typu B pro měření aktivity ^{241}Am v kostře přiřazena konstantní hodnota $SF_B = 1,4$. Je navržena v souladu s rozбором nejistoty v práci [15].

Státní ústav radiční ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 26 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

PŘÍLOHA V: ODHAD MINIMÁLNÍ VÝZNAMNÉ A MINIMÁLNÍ DETEKOVATELNÉ AKTIVITY

Minimální významná aktivita (MVA) a minimální detekovatelná aktivita (MDA) se stanoví ze vzorce podle Currieho [6], zjednodušeného pro výpočet při neexistenci píku stanovovaného radionuklidu v pozadí:

$$MVA = \frac{k \cdot \sqrt{\sum B_D}}{\eta_S \cdot Y \cdot t} \quad (\text{Bq}) \quad (18)$$

$$MDA = \frac{k^2 + 2k \cdot \sqrt{\sum B_D}}{\eta_S \cdot Y \cdot t} \quad (\text{Bq}) \quad (19)$$

kde

MVA je minimální významná aktivita v Bq,

MDA je minimální detekovatelná aktivita v Bq,

B_D je součet odhadnutého počtu impulsů pozadí pod hodnoceným píkem pro daný detektor *D*,

k je kvantil normálního rozdělení,

ostatní symboly mají význam uvedený výše.

Počet impulsů pozadí pod hodnoceným píkem se pro daný detektor vypočte podle rovnice

$$B_D = \left(1 + \frac{n}{2m}\right) \cdot \frac{n}{2m} \cdot (B_1 + B_2) \quad (20)$$

kde

n je počet kanálů pod píkem

m je počet kanálů nalevo a napravo od píku, určených pro odhad pozadí pod píkem

B_1 a B_2 jsou počty impulsů v „*m*“ kanálech nalevo a napravo od píku.

Pro hladinu spolehlivosti 95 % ($k = 1,645$) přechází rovnice 6 a 7 na tvar

$$MVA = \frac{1,645 \cdot \sqrt{\sum B_D}}{\eta_S \cdot Y \cdot t} \quad (\text{Bq}) \quad (21)$$

$$MDA = \frac{2,71 + 3,29 \cdot \sqrt{\sum B_D}}{\eta_S \cdot Y \cdot t} \quad (\text{Bq}) \quad (22)$$

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 27 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

NOVOST POSTUPŮ

Zařízení pro gamaspektrometrické měření aktivity radionuklidů v plicích a lebce (jako takových) *in vivo* instalované v SÚRO Praha je jediným v České republice. Příslušná metodika měření je tedy prvním dokumentem svého druhu popisující postup měření a zpracování jeho výsledků.

POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY

Metodiku uplatní laboratoř celotělového počítače SÚRO Praha pro připravenost na radiační havárii nebo radiační nehodu, při výzkumu v oblasti radiační ochrany a v rámci služeb dozimetrie vnitřního ozáření jednotlivcům a podnikům. Metodika je použitelná v laboratořích s příslušným vybavením.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN EN 61582:2006 Přístroje radiační ochrany – Detektory in vivo – Klasifikace, všeobecné požadavky a zkušební postupy pro přenosná, přepravitelná a instalovaná zařízení
- [2] ICRP. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1 – 3). Oxford: Pergamon Press. 1994
- [3] Vrba, T.: Head calibration phantoms for actinides: measurements and simulations. Radiat. Prot. Dosim. 144(1–4), 357–360 (2011).
- [4] Vrba, T.: Comparison of geometries for in vivo measurements of actinides in the skull. Applied Radiat. and Isotopes 68 (2010), s. 918–921.
- [5] Lynch, T.P., Kathren, R.L., McInroys, J.F.: Macrodistribution of plutonium and americium in four human skeletons. J. Radiol. Prot. 8(2), 1988, s. 67-76.
- [6] Currie, L.A.: Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry. Anal. Chem., 40 (3), 1968, s. 586–593.
- [7] Taylor, Frieda Y.: History of the Lawrence Livermore National Laboratory Torso Phantom. (1997) Master's Theses. Paper 1476. http://scholarworks.sjsu.edu/etd_theses/1476
- [8] Hickman, D. P. and Cohen, N. Reconstruction of a human skull calibration phantom using bone sections from an ²⁴¹Am exposure case. Health Phys. 55(1),59–65 (1988).
- [9] Newton, D.: The Livermore phantom as a calibration standard in the assessment of plutonium in lungs. UKAEA, AERE; R11210. London. H.M. Stationery Office, 1984.
- [10] Kramer, G.H., Burns, L.C., Guerriere, S.: Monte Carlo Simulation of a Scanning Detector Whole Body Counter and the Effect of BOMAB Phantom Size on the Calibration. Health Phys 83(4), 2002, 526-533
- [11] Vickers, L. R.: The Gender-Specific Chest Wall Thickness Prediction Equations for Routine Measurements of ²³⁹Pu and ²⁴¹Am within the Lungs Using HPGe Detectors. Health Phys 40(3),1996, 346-357
- [12] Vrba, T.: Development and Application of Anthropomorphic Voxel Phantom of the Head for In Vivo Measurement. Radiat. Prot. Dosim. 127(1-4), 201-204 (2007)

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. ENVINET NUVIA Group	Metodika	List: 28 z 28
	Odhad vnitřní kontaminace transurany z pohotového měření aktivity v plicích a kostře in vivo	Datum účinnosti: 1.1.2015

- [13] General guidelines for estimation of committed effective dose from incorporation monitoring data (Project IDEAS). Výzkumná zpráva FZKA 7243, Forschungszentrum Karlsruhe, 2006
- [14] Jeffers, K.L., Hickman, D.P.: Historical Review of Lung Counting Efficiencies for Low Energy Photon Emitters. Health Phys 106(3), 2014, 415-417
- [15] Vrba, T. Uncertainty of in vivo assessment of actinides activity in human skeleton. In: Proceedings of the Third European IRPA Congress, 14–18 June, Helsinki, Finland (2010). Dostupné na <http://www.irpa2010europe.com/proceedings.htm>.

SEZNAM SOUVISEJÍCÍCH PUBLIKACÍ A VÝSTUPŮ

Celotělový počítač se zvýšenou kapacitou pohotového měření kontaminace transurany v plicích a kostře. Funkční vzorek. Hlavní výsledek projektu výzkumu, vývoje a inovací VG20122014093. SÚRO Praha, 2014.