



Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.

Oddělení dozimetrie

Bartoškova 28, 140 00 Praha 4

Metodika M7

Certifikovaná metodika

Retrospektivní dozimetrie

Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al_2O_3 z mobilního telefonu

Vypracoval

Funkce	Jméno	Datum	Podpis
Vedoucí oddělení dozimetrie	Ing. Daniela Ekendahl	12.6.2014	

Přezkoumal a schválil

Funkce	Jméno	Datum	Podpis
Ředitel SÚRO	RNDr. Zdeněk Rozlívka	18.6.2014	
Archivní označení	SÚRO 141-18.9-0	Číslo revize	0
Výtisk číslo	1	Datum účinnosti	1.1.2015

Rozdělovník

Výtisk	Převzal	Datum	Podpis
č. 1	Síťový disk S:\Certifikované metodiky\ M7.pdf Ing. Daniela Ekendahl	17.9.2014	
č. 2			
č. 3			

Oponenti

Jméno	Organizace	Datum	Podpis
Ing. Zuzana Pašková	SÚJB	8.9.2014	
Ing. Zdeněk Zelenka	CSOD, s.r.o.	21.8.2014	

Vypracováno v rámci projektu VF 20102015014
(Bezpečnostní výzkum MV ČR)

Rok uplatnění

2014

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 3 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al ₂ O ₃ z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

Obsah

1. CÍL METODIKY	4
2. DOZIMETRICKÉ VELIČINY	4
2.1. Absorbovaná dávka	4
2.2. Dávkový ekvivalent	4
2.3. Osobní dávkový ekvivalent	4
3. POPIS METODY	5
3.1. Měřicí systém	5
3.2. Materiál Al ₂ O ₃	8
3.2. Příprava vzorků	8
3.3. Měření OSL signálu	9
3.5. Rekonstrukce dávky	9
3.6. Kalibrace pomocí interního ozařovače ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	10
3.7. Verifikace a zabezpečení jakosti	11
3.8. Záznamy nebo výstupní dokumentace	11
4. UPLATNĚNÍ METODIKY A NOVOST POSTUPŮ	11
5. SEZNAM LITERATURY	12
PRAKTICKÉ PŘÍLOHY	13
Příloha 1: Laboratorní pomůcky a nástroje pro přípravu vzorků	14
Příloha 2: Rekonstrukce dávky – sled jednotlivých kroků a procedur	15
Příloha 3: Procedura měření	16
Příloha 4: Dávkový příkon ze zdroje ⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y pro Al ₂ O ₃	17
Příloha 5: Korekce na fading	18
Příloha 6: Vztahy mezi veličinami	19
Příloha 7: Korekce energetické závislosti	20
Příloha 8: Vzor protokolu	21

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 4 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al ₂ O ₃ z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

1. CÍL METODIKY

V případě závažných radiačních nehod nebo při událostech úmyslného zneužití radioaktivních látek může dojít k významnému externímu ozáření osob jak z řad zasahujících složek, tak i obyvatel. Pak je třeba odhadnout dávky těchto osob pro účely triáže, aby zasaženým mohla být co nejdříve poskytnuta adekvátní lékařská péče. K odhadu osobních dávek z ozáření ze zdrojů záření X a gama mohou být použity běžné mobilní telefony nebo jiná přenosná elektronická zařízení. Tyto předměty obsahují keramické materiály, které vykazují radiačně indukovanou luminiscenci, kterou lze stimulovat termálně (TL) i opticky (OSL). Takovým materiálem je Al₂O₃, jehož vrstvu lze běžně nalézt ve spodní části čipových rezistorů používaných v běžných mobilních telefonech.

Cílem této metodiky je specifikovat postup pro odhad osobní dávky ze záření X a gama na základě měření luminiscenčního signálu z elektronických součástek s vrstvou z Al₂O₃.

2. DOZIMETRICKÉ VELIČINY

2.1. ABSORBOVANÁ DÁVKA

Absorbovaná dávka **D** je definována jako podíl $d\bar{\epsilon}$ a dm , kde $d\bar{\epsilon}$ je střední energie ionizujícího záření sdělená látce o hmotnosti dm , tj.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

Jednotkou absorbované dávky v soustavě SI je J·kg⁻¹ a její zvláštní název je gray (Gy).

2.2. DÁVKOVÝ EKVIVALENT

Veličina dávkový ekvivalent **H** je definována vztahem

$$H = QD$$

kde **D** je absorbovaná dávka v bodě zájmu ve tkáni a **Q** je odpovídající jakostní faktor v tomto bodě, jehož hodnota je určena typem a energií nabitých částic procházejících malým objemovým elementem v tomto bodě. **Q** je funkcí lineárního přenosu energie nabitých částic ve vodě [1]. Pro fotonové záření je hodnota **Q** rovna 1. Jednotkou dávkového ekvivalentu v soustavě SI je J·kg⁻¹ a její zvláštní název je sievert (Sv).

2.3. OSOBNÍ DÁVKOVÝ EKVIVALENT

Osobní dávkový ekvivalent **H_p(d)** je dávkový ekvivalent v ICRU (měkké) tkáni v hloubce **d** pod konkrétním bodem povrchu lidského těla. Tento bod je obvykle volen v místě měření. Pro pronikavé fotonové záření se používá hloubka 10 mm. Veličina **H_p(10)** poskytuje odhad veličiny efektivní dávka [1]. Jednotkou osobního dávkového ekvivalentu je Sv.

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 5 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al_2O_3 z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

3. POPIS METODY

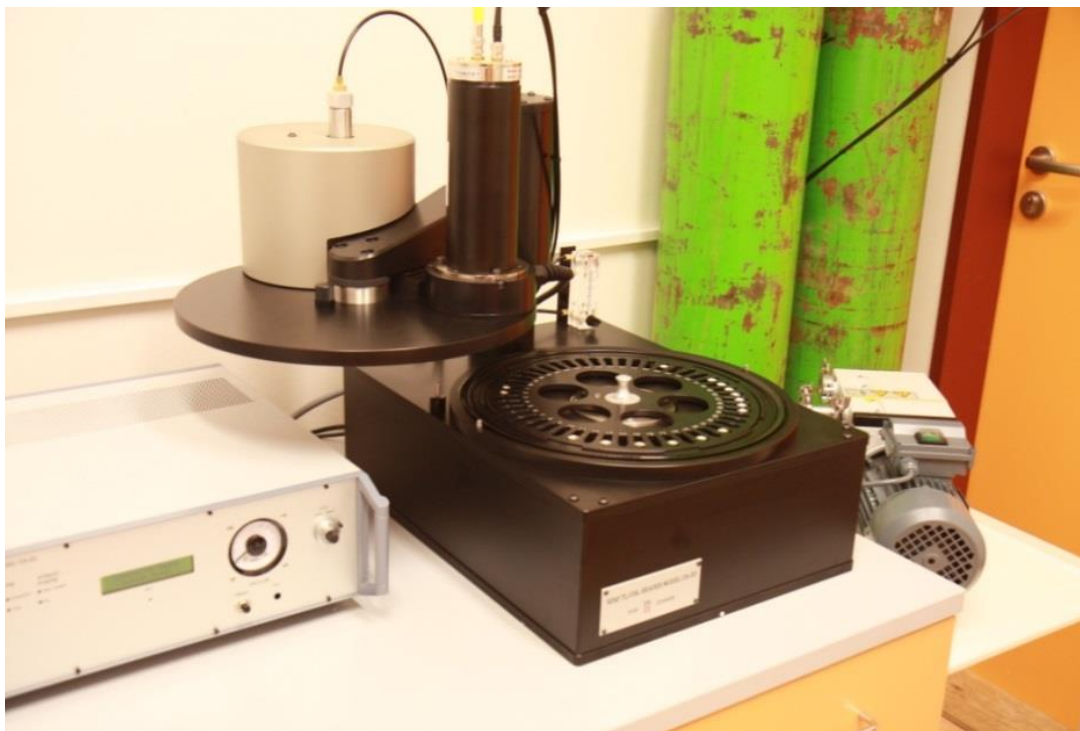
3.1. MĚŘÍCÍ SYSTÉM

Měření luminiscenčního signálu z elektronických součástek se provádí pomocí aparatury **Risø TL/OSL – model DA-20** (viz obr. 1), která se skládá z následujících částí:

- Systému pro detekci světla
- Systému pro tepelnou a optickou stimulaci luminiscence
- Ozařovače vzorků
- PC se SW aplikacemi pro řízení měření, záznam a zpracování výsledků
- Příslušenství

Systém pro detekci světla

Systém detekce světla je tvořen fotonásobičem a optickým filtrem. Fotonásobič je z řady bialkalických fotonásobičů EMI 9235QB, které mají maximální detekční účinnost mezi 200 a 400 nm a vyhovují pro detekci luminiscence z běžných dozimetrických materiálů. Použitý detekční filtr v základní konfiguraci je typ Hoya U-340 s transmisí pro vlnové délky od 200 do 400 nm. Tento filtr zabraňuje průniku rozptýleného modrého stimulačního světla (~ 470 nm) do fotonásobiče. V závislosti na aplikaci mohou být použity i jiné filtry (např. Schott BG-39, Corning 7-59). Charakteristiky těchto filtrů jsou uvedeny v uživatelské příručce [2].



Obr. 1: Měřicí část aparatury Risø TL/OSL – model DA-20

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 6 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al ₂ O ₃ z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

Systém pro tepelnou a optickou stimulaci luminiscence

a) Stimulace TL

K vyhřívání vzorků slouží topný článek, který je umístěn přímo pod fotonásobičem. Tento topný článek zároveň je součástí zvedacího mechanismu, který posunuje vzorek do polohy pro měření. Vyhřívání je prováděno přiváděním regulovaného elektrického proudu přes topný článek. Teplota je kontrolována termočlánkem. Topný systém je schopen vyhřívát vzorky až do teploty 700°C při konstantním nárůstu teploty od 0.1 do 10°C/s. Při použití rychlosti ohřevu vyšší než 5°C/s je třeba počítat s teplotním zpožděním mezi vzorkem a topným článkem. Topný systém je třeba chránit průtokem dusíku, který je prevencí před oxidací při vyšších teplotách.

b) Stimulace OSL

Zařízení je vybaveno dvěma světelnými zdroji: infračervenými (IR) světelnými diodami a modrými světelnými diodami. Světelné diody jsou uspořádány soustředně v držáku kruhového tvaru tak, aby světlo směřovalo na vzorek. Vzdálenost mezi vzorkem a diodami je přibližně 20 mm. V základní konfiguraci jsou používány modré diody.

Modré diody mají světelný pík emise na vlnové délce **470 nm**. Toto světlo umožňuje stimulaci křemene, safíru (α -Al₂O₃) i některých dalších krystalických materiálů, např. halogenidů. Celkový výkon těchto 28 světelných diod je **50 mW/cm²** v poloze vzorku. Intenzitu modrého stimulačního světla lze nastavovat.

Infračervené diody emitují světlo o vlnové délce kolem **870 nm**, které může stimulovat luminiscenci u většiny živců. Držák obsahuje 21 těchto diod, které poskytují maximální výkon přibližně **145 mW/cm²** v poloze vzorku.

Měřicí systém Risø TL/OSL Model DA-20 umožňuje světelnou stimulaci ve dvou režimech:

- Stimulace při konstantní intenzitě světla (**CW**)
- Stimulace při lineárně modulované intenzitě světla (**LM**)

V případě režimu CW stimulace se vytváří exponenciálně klesající signál, jak postupně dochází k vyprazdňování elektronových záchytných center. Při režimu LM stimulace jsou elektrony v záchytných centrech velmi citlivých na světlo uvolňovány při nízkých intenzitách světla, zatímco elektrony v méně citlivých záchytných centrech jsou uvolňovány při vyšších intenzitách osvětlení. Naměřený signál pak má podobu křivky s píkem, resp. s několika píky, které odpovídají vyprazdňování jednotlivých elektronových pastí. Detekce emitovaného luminiscenčního světla probíhá souběžně se stimulací, přičemž stimulační a detekované světlo je vzájemně odděleno pomocí vhodných optických filtrů [2].

Ozařovače vzorků

Měřicí systém Risø TL/OSL Model DA-20 obsahuje dva uzavřené radionuklidové zářiče (URZ) klasifikované jako jednoduché zdroje, které umožňují *in-situ* ozáření vzorků v rámci naprogramované procedury.

a) Zdroj ⁹⁰Sr/⁹⁰Y

URZ ⁹⁰Sr/⁹⁰Y emituje beta záření s maximální energií 2.27 MeV. Aktivita zdroje je 1,48 GBq (ke dni 22.12.2009), což poskytuje dávkový příkon 0.109 Gy/s pro vzorek z křemene v poloze měření (ke stejnému dni). Tato výrobcem daná hodnota dávkového příkonu byla ověřena skrze porovnání spočívající v měření vzorku po referenčním ozáření externím zdrojem ¹³⁷Cs.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 7 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al ₂ O ₃ z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

Poločas přeměny ⁹⁰Sr/⁹⁰Y je $T_{1/2} = 29.12$ roků [3]. Tento zdroj se užívá jako interní ozařovač pro aplikace retrospektivní dozimetrie.

b) Zdroj ²⁴¹Am

URZ ²⁴¹Am (10.7 MBq, alfa záření ≈ 5.49 MeV, gama záření ≈ 59.5 keV) je používán pouze pro experimentální výzkumné účely.

PC se SW aplikacemi pro řízení měření, záznam a zpracování výsledků

Součástí měřicího systému je PC se čtyřmi technologickými SW aplikacemi:

a) Aplikace Sequence Editor

Aplikace **Sequence Editor** se používá k vytvoření požadované měřicí sekvence (soubory typu SEQ), což jsou uživatelem definované posloupnosti procedur, které mají být provedeny se vzorky. Měřicí sekvence může obsahovat ozáření vybraným zdrojem záření, osvětlení vybraným zdrojem světla, předehřev při zadané teplotě, OSL měření při zadaném režimu, zdroji světla a dalších parametrech (intenzita světla, doba měření, teplota při měření, počet datových bodů) a TL měření (teplota, rychlost vyhřívání, počet datových bodů). Již definované sekvence mohou být uloženy nebo modifikovány pro další měření. Aplikace slouží rovněž pro záznam naměřených dat (soubory typu BIN). Podrobnosti jsou uvedeny v uživatelské příručce [4].

b) Aplikace Control

Aplikace **Control** slouží ke kontrole technických parametrů čtečky a používá se při údržbě zařízení.

c) Aplikace View

Aplikaci **View** lze využít k zobrazení a tisku OSL nebo TL křivek. Kromě toho umožňuje prohlížení, tisk a export těchto naměřených dat obsažených v BIN souborech. Dle zadaných mezí lze provádět integraci těchto dat.

d) Aplikace Analyst

Aplikace **Analyst** obsahuje nástroje pro zpracování a analýzu vstupních dat ve formě BIN souborů pořízených v aplikaci Sequence Editor. V rámci této aplikace je možné provádět normalizaci odezev vzorků vzhledem k vybraným parametrům. Součástí aplikace jsou i některé analytické protokoly (SAR, MAA) běžně používané při datování a retrospektivní dozimetrii. Podrobnosti jsou uvedeny v uživatelské příručce [5].

Příslušenství

K měřicímu systému náleží dva vyjímatelné **karusely** s kovovými **mističkami na vzorky**. Do karuselu lze umístit 48 kompatibilních mističek. Každý vzorek je jednoznačně identifikován pozicí mističky v karuselu (čísla 1 až 48). Karusel je nainstalován na motorem poháněnou otočnou desku, jejíž chod je ovládán prostřednictvím zadané měřicí sekvence.

K provozu měřicího systému jsou třeba dvě **tlakové nádoby s N₂**. N₂ musí být používán v případě měření s teplotou vyšší než 200°C. Druhá z tlakových nádob je využívána pro ovládání URZ ⁹⁰Sr/⁹⁰Y. V obou případech je třeba kvalitní **tlakový regulátor** umožňující udržovat stabilní tlak **2,5 barů**.

Pro ovládání zdroje záření ²⁴¹Am musí být připojena **vakuová pumpa**.

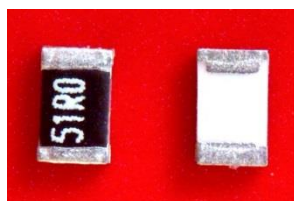
Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 8 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al_2O_3 z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

3.2. MATERIÁL Al_2O_3

Oxid hlinitý, v přírodní minerální formě známý jako korund nebo safír ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), je důležitý technologický materiál používaný v řadě optických, elektronických a radiálních aplikací. Interakce ionizujícího záření s Al_2O_3 vede k záchytu uvolněných nosičů náboje v záchytných centrech. Tyto pasti mají většinou charakter bodových defektů vzniklých v důsledku různých nepravidelností a nečistot v krystalové mřížce. Po stimulaci materiálu dochází k produkci světla prostřednictvím luminiscenčních center v důsledku rekombinace elektronů a děr. V případě materiálu Al_2O_3 jsou luminiscenčními centry kyslíkové vakance, jak neutrální, tak i kladně nabitě vůči krystalové mřížce. Tato centra jsou zdrojem luminiscence o vlnových délkách přibližně 330 nm respektive 420 nm. Stimulaci luminiscence lze provést jak termálně (TL), tak i opticky (OSL). Velikost světelného signálu je úměrná koncentraci kyslíkových center a absorbované dávce záření, kterému byl materiál vystaven. Pokud jde o optickou stimulaci, optimální vlnové délky stimulujícího světla se pohybují mezi 450 a 550 nm, což odpovídá modrému a zelenému světlu [6].

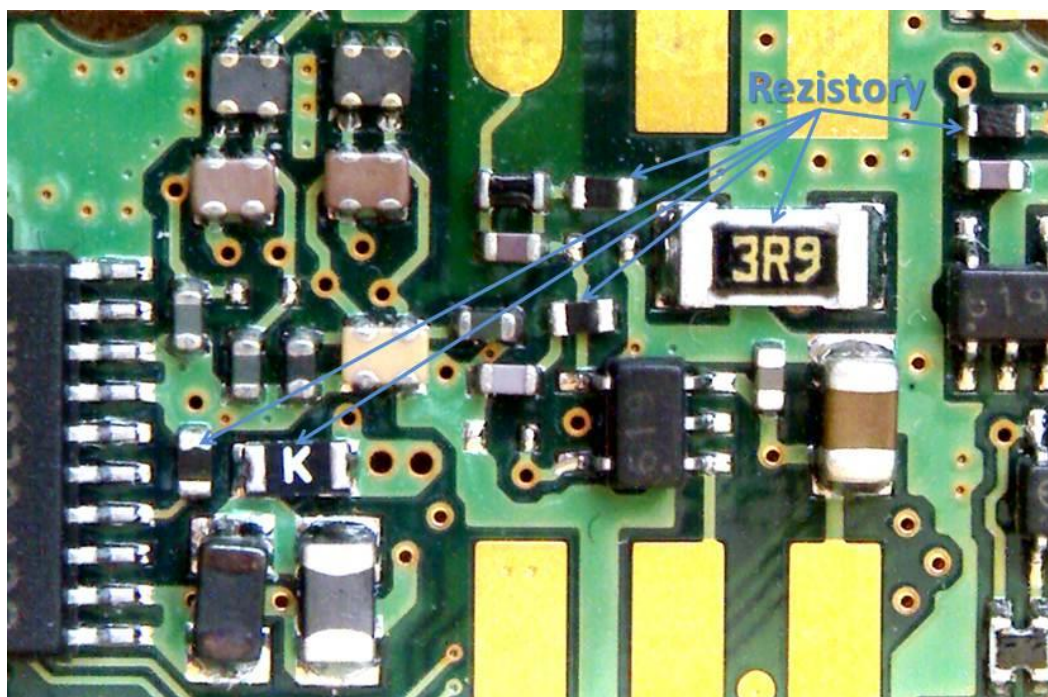
3.2. PŘÍPRAVA VZORKŮ

Rezistory s Al_2O_3 lze běžně nalézt na deskách plošných spojů nejen v mobilních telefonech, ale i v dalších přenosných elektronických zařízeních jako jsou např. USB flash disky a mp3 přehrávače. K **extrakci rezistorů** je nutné provést demontáž elektronického zařízení. Vzhledem k citlivosti materiálu na světlo musí demontáž probíhat **v podmínkách temné komory s červeným osvětlením**. K tomu je třeba sada pomůcek a nástrojů uvedených v **Příloze 1**. Čipové rezistory lze většinou vizuálně identifikovat podle jejich formy a barvy. Na obr. 2 jsou znázorněny typické rezistory jak z přední strany, tak i ze spodní strany přilehlé k desce plošných spojů. **Al_2O_3 je bílý krystalický materiál patrný na straně přilehlé k desce plošných spojů**. Z této strany je po stimulaci možné měřit OSL signál. Na obr. 3 je pro ilustraci znázorněn detail desky plošných spojů u běžného mobilního telefonu, kde jsou vyznačeny rezistory. Rozměry čipových rezistorů jsou od několika desetin mm až po několik mm. K identifikaci a extrakci nejmenších rezistorů je třeba mikroskop. Vyňaté rezistory se pomocí pinzety přemísťují na mističky na karuselu měřícího systému tak, aby bílá vrstva krystalu Al_2O_3 byla navrchu. V případě nejmenších rezistorů musí být vzorek pro měření tvořen alespoň 5-10 ks těchto součástek. V případě největších rezistorů (> 2 mm) může být vzorek tvořen pouze jednou touto součástkou.



Obr. 2: Čipové rezistory – vlevo vrchní strana, vpravo spodní strana s bílou vrstvou Al_2O_3

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 9 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al_2O_3 z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl



Obr. 3: Detail části desky plošných spojů s vyznačenými rezistory (zvětšeno 20 krát)

3.3. MĚŘENÍ OSL SIGNÁLU

Měření pro účely záznamu OSL signálu z ozářených rezistorů vychází z analýzy OSL a TL vlastností materiálu Al_2O_3 provedené v původní práci [6]. Měření vzorku sestává ze dvou následujících kroků:

- 1) **předehřev při teplotě 120°C po dobu 10 s**
- 2) **čtení CW-OSL při intenzitě modrého světla 45 mW/cm² a teplotě 90°C po dobu 40s.**

OSL signál je ze zaznamenané CW-OSL křivky stanoven jako integrál odezvy za první dvě sekundy měření zmenšený o hodnotu pozadí odpovídající integrálu za poslední dvě sekundy měření.

Příklad nastavení této měřicí procedury v aplikaci Sequence Editor je v **Příloze 3**.

3.5. REKONSTRUKCE DÁVKY

Metoda rekonstrukce dávky je založena na využití velmi dobré reprodukovatelnosti měření a lineární závislosti odezvy na dávce [6]. Dávka se stanovuje tak, že po úvodním měření OSL signálu odpovídajícímu havarijnímu ozáření jsou vzorky dodatečně ozářeny pomocí interního ozařovače $^{90}Sr/^{90}Y$ na známou regenerativní dávku $D(Al_2O_3)$. Hned poté jsou vzorky měřeny. Aplikace regenerativní dávky a okamžitého měření se provádí alespoň dvakrát, aby pro každý vzorek byla stanovena funkce $f = a \cdot D(Al_2O_3) + b$ vyjadřující závislost OSL signálu na dávce. Příklad vzorové procedury měření včetně aplikace regenerativních dávek je uveden v **Příloze 3**. S využitím tohoto vztahu mezi OSL signálem a dávkou se následně vypočte dávka odpovídající původní „havarijní“ expoziční situaci. Takto získanou hodnotu dávky je však

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 10 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al ₂ O ₃ z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

ještě nutné upravit aplikaci **korekce na fading**, tj. na úbytek odezvy, ke kterému došlo za dobu uplynulou od ozáření do měření. Odvození korekce na fading vychází z funkce vypočtené na základě experimentálních dat pro závislost OSL signálu na době uplynulé od ozáření – viz **Příloha 5**. Výše popsaný způsob stanovení dávky je implementován do vlastní vyvinuté SW aplikace **Alive** [7]. Takto stanovenou hodnotu dávky je možné použít pro účely prvního odhadu. Výsledek lze dodatečně dále upřesnit aplikací individuální korekce na fading pro každý vzorek. Tento postup spočívá v laboratorním ozáření vzorků a jejich měření hned po ozáření a po době odpovídající původnímu rozdílu mezi „havarijním“ ozářením a měřením. Individuální korekce na fading je pak vyjádřena jako poměr signálu naměřeného hned po ozáření a signálu naměřeného s daným časovým odstupem. V případě vyhodnocování většího množství vzorků se individuální korekce na fading nestanovuje.

Vzhledem k tomu, že běžný kryt mobilního telefonu, lze pro záření s energií > 100 keV považovat za vrstvu ekvivalentní polyetylenu o tloušťce 10 mm [6], může být výsledná hodnota dávky $D(Al_2O_3)$ přepočtena na dávku ve vodě $D(H_2O)$, kterou lze považovat za odhad dávky v tkáni, resp. osobního dávkového ekvivalentu $H_p(10)$. Vztah mezi $D(Al_2O_3)$ a $D(H_2O)$ vychází z poměru hmotnostních součinitelů absorpce energie pro dané $D(H_2O) = D(Al_2O_3) \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{H_2O} / \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{Al_2O_3}$. Pro zdroj záření ¹³⁷Cs je vztah mezi $D(Al_2O_3)$ a $D(H_2O)$ následující: $D(H_2O) = 1.13 \cdot D(Al_2O_3)$. Hodnota poměru hmotnostních součinitelů absorpce energie byla vypočtena s využitím dat databáze NIST [8]. Uvedený vztah je použitelný i pro jiná spektra vysokoenergetických fotonů. Vztahy mezi veličinami jsou přehledně uvedeny v **Příloze 6**.

Protože OSL signál materiálu Al₂O₃ vykazuje energetickou závislost [6], může být výsledná dávka nadhodnocena až faktorem 2 v oblasti energií 30 – 100 keV. Je-li známa energie záření je třeba získanou hodnotu dávky korigovat na základě dat v **Příloze 7**. V případě, že spektrum záření není známo, se korekce energetické závislosti neprovádí a stanovená hodnota dávky představuje konzervativní odhad.

Výstupem provedené analýzy je protokol, kde jsou uvedeny základní údaje týkající se analyzovaného materiálu a odhadnutá osobní dávka (viz **Příloha 8**).

3.6. KALIBRACE POMOCÍ INTERNÍHO OZAŘOVAČE ⁹⁰Sr/⁹⁰Y

Nutným předpokladem pro provedení rekonstrukce dávky je aplikace stanovených hodnot regenerativních dávek pomocí interního ozařovače ⁹⁰Sr/⁹⁰Y. Dávkový příkon pro vzorek z křemene v poloze měření platný ke dni instalace měřícího systému, tj. k 22.12.2009, byl 0.109 Gy/s. Dávkový příkon pro vzorek z Al₂O₃ pak na základě poměrů hmotnostních srážkových brzdných schopností uvedených materiálů vychází takto:

$$\dot{D}(Al_2O_3) = \frac{S_{col}(Al_2O_3)}{S_{col}(SiO_2)} \cdot \dot{D}(SiO_2) = 0.974 \cdot \dot{D}(SiO_2).$$

Hodnota poměru $\frac{S_{col}(Al_2O_3)}{S_{col}(SiO_2)}$ byla pro dané spektrum záření vypočtena s využitím dat z databáze NIST [9]. Dávkový příkon pro vzorek z Al₂O₃ ke dni instalace měřícího systému je tedy $\dot{D}(Al_2O_3)_0 = 0.106$ Gy/s. Dávkový příkon platný v čase měření t je pak:

$$\dot{D}(Al_2O_3)_t = \frac{A_t}{A_0} \dot{D}(Al_2O_3)_0$$

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 11 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al_2O_3 z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

kde A_t je aktivita zdroje v čase t a A_0 je aktivita ke dni instalace.

V **Příloze 4** je přehled vypočtených hodnot $\dot{D}(Al_2O_3)$ v závislosti na době uplynulé od instalace zařízení.

3.7. VERIFIKACE A ZABEZPEČENÍ JAKOSTI

Metodika byla ověřena pomocí experimentální studie, kde byly různé typy mobilních telefonů ozářeny na fantomu simulujícím lidské tělo [10]. Naměřené dávky byly porovnány s referenčními hodnotami, přičemž odchylky stanovené dávky od referenční hodnoty byly do 20%. Další ověření proběhlo formou mezinárodního srovnávacího měření organizovaného v rámci EURADOS [11], které rovněž potvrdilo tuto přesnost měření.

Pro účely havarijní připravenosti bude metodika experimentálně aplikována minimálně jednou ročně, a to buď formou místního experimentu simulujícího možné ozáření osoby, nebo formou mezinárodních porovnávacích měření.

3.8. ZÁZNAMY NEBO VÝSTUPNÍ DOKUMENTACE

Záznamy vztahované k měření a vyhodnocení dávky pomocí mobilního telefonu nebo jiného přenosného elektronického zařízení jsou uchovávány v těchto formách:

- Vstupní údaje od zadavatele měření
- Deník měření
- Elektronické záznamy o měření v rámci použitých laboratorních SW aplikací
- Protokoly měření (vzor viz **Příloha 8**)

4. UPLATNĚNÍ METODIKY A NOVOST POSTUPŮ

Tato metodika byla vytvořena pro účely doplnění systému metod havarijní připravenosti, které Státní ústav radiální ochrany poskytuje pro potřeby Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. Jedná se o první metodiku retrospektivní dozimetrie v ČR na bázi využití radiačně indukované luminiscence netradičních materiálů, které nejsou klasickými radiačními detektory. Metodika je určena pro odhad dávky osob ozářených při závažných radiačních nehodách a událostech, které v době ozáření nebyly vybaveny klasickými dozimetry, ale měly v blízkosti těla buď mobilní telefon, nebo jiné obdobné přenosné elektronické zařízení. Odhad dávky je základním předpokladem pro efektivní triáž zasažených osob. Časová náročnost vyhodnocení dávky z jednoho mobilního telefonu je přibližně 1 hod. Metodika je použitelná pro vyhodnocení dávek v řádu od desetin až do desítek Gy [6].

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 12 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al ₂ O ₃ z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

5. SEZNAM LITERATURY

- [1] Publikace ICRP 103 - Doporučení Mezinárodní komise radiologické ochrany 2007, 37(2-4), SÚJB, 2009.
- [2] Uživatelská příručka. Guide to „The Risø TL/OSL Reader“. Risø DTU, Denmark, 2008
- [3] Turner, J.E. Atoms, Radiation, and Radiation Protection. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2007
- [4] Uživatelská příručka. Software Manual. Risø DTU, Denmark, 2009
- [5] Uživatelská příručka. Analyst, version 3.24. Risø DTU, Denmark, 2007
- [6] Ekendahl, D., Judas, L. Retrospective dosimetry with alumina substrate from electronic components. Radiat. Prot. Dosim. 150, 134-141, 2012
- [7] Uživatelská příručka. Aplikace Alive. <https://github.com/bulanek/alive>, 2013
- [8] Databáze dat fyziky ionizujícího záření. National Institute of Standards and Technology (NIST). <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>
- [9] Databáze dat fyziky ionizujícího záření. National Institute of Standards and Technology (NIST). <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>
- [10] Bulánek, B., Ekendahl, D. Ověření metodiky retrospektivní dozimetrie - použití rezistorů z mobilních telefonů: zpráva SÚRO č. 10/2013. Praha: SÚRO, 2013
- [11] Bassinet, C., et al., Retrospective radiation dosimetry using OSL of electronic components: Results of an interlaboratory comparison, Radiat. Meas., 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2014.03.016>

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 13 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al_2O_3 z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PRAKTICKÉ PŘÍLOHY

Seznam příloh

- Příloha 1: Laboratorní pomůcky a nástroje pro přípravu vzorků
- Příloha 2: Rekonstrukce dávky – sled jednotlivých procedur
- Příloha 3: Procedura měření
- Příloha 4: Dávkový příkon ze zdroje $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ pro Al_2O_3
- Příloha 5: Korekce na fading
- Příloha 6: Vztahy mezi veličinami
- Příloha 7: Korekce energetické závislosti
- Příloha 8: Vzor protokolu

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 14 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al_2O_3 z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 1: LABORATORNÍ POMŮCKY A NÁSTROJE PRO PŘÍPRAVU VZORKŮ

Pro přípravu vzorků a manipulaci s nimi musí být laboratoř – temná komora vybavena těmito pomůckami:

- zdroje červeného světla (lampy s červeným filtrem)
- jemné laboratorní pinzety
- sada šroubováků a nožů vhodných pro demontáž elektronických zařízení
- silikon pro fixaci vzorku
- mikroskop

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 15 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al_2O_3 z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 2: REKONSTRUKCE DÁVKY – SLED JEDNOTLIVÝCH KROKŮ A PROCEDUR

- 1) Připravit karusel s čistými mističkami na vzorky.
- 2) Provést ozáření prázdných mističek zdrojem beta (čas ozáření alespoň 10 s) a změřit OSL signál při CW stimulaci modrým světlem (90%, 40 s) pro účely detekce případných nečistot, které by mohly generovat falešný OSL signál.
- 3) Zkontrolovat, zda je OSL signál na úrovni pozadí. Pokud byl zjištěn OSL signál převyšující úroveň pozadí, použít čistou misku a znovu zkontrolovat.
- 4) Do deníku měření zaznamenat identifikaci mobilního telefonu (osoba, typ telefonu).
- 5) V temné komoře s červeným osvětlením provést demontáž mobilního telefonu – vyjmout desku plošných spojů.
- 6) Desku plošných spojů vložit pod mikroskop a pomocí nože seškrábnout rezistory.
- 7) Rezistory umístit pomocí pinzety na mističku s vrstvou silikonu tak, aby bílá strana rezistoru byla navrchu. Počet rezistorů na mističce se řídí podle jejich velikosti.
- 8) Z jednoho mobilního telefonu by měly být připraveny alespoň 3 vzorky, tj. mističky s rezistory.
- 9) Karusel se vzorky umístit do měřící aparatury a uzavřít.
- 10) Lze rozsvítit laboratorní světlo.
- 11) Na PC nastavit proceduru měření – viz příklad **Příloha 3**.
- 12) Pro konkrétní proceduru měření zaznamenat aplikované dávky – viz **Příloha 4**.
- 13) Do deníku měření zaznamenat identifikaci vzorků a souboru měřených dat.
- 14) Aktivovat měření.
- 15) Po ukončení měření zkontrolovat naměřené výstupy pomocí aplikace Analyst.
- 16) Naměřená data převést do SW aplikace Alive, zadat vstupní údaje pro korekci fadingu a vypočítat dávku $D(Al_2O_3)$.
- 17) Pokud se jednalo o mobilní telefon nošený v blízkosti těla osoby, provést odhad dávky v těle v hloubce 10 mm dle **Přílohy 5**.
- 18) Jednalo-li se o ozáření osoby fotony nižších energií, provést korekci výsledné hodnoty dávky v souladu s **Přílohou 7**.
- 19) Vyplnit protokol měření – viz **Příloha 8**.
- 20) V případě potřeby/možnosti stanovit individuální korekci na fading dle **Přílohy 4**. Znovu vyhodnotit dávku a doplnit protokol měření. Výsledná hodnota představuje upřesněný odhad dávky.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 16 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al_2O_3 z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 3: PROCEDURA MĚŘENÍ

Měřicí procedura se zadává prostřednictvím aplikace **Sequence Editor**. Na obrázku níže je uveden příklad zadání měření vzorku v pozici 3. První cyklus měření (Run 1) odpovídá měření vzorku po „havarijním ozáření“, druhý cyklus (Run 2) odpovídá měření po aplikaci nulové regenerativní dávky a třetí cyklus (Run 3) odpovídá měření po aplikaci regenerativní dávky $D(Al_2O_3) = 50 \cdot \dot{D}(Al_2O_3)$.

The screenshot shows the 'Sequence Editor' application window. The title bar reads 'Sequence Editor - C:\PI_OSL_data\Retrospective dosimetry\Procedure_resistor.SEQ'. The menu bar includes 'File', 'Edit', 'Options', 'Seq Control', and 'Help'. Below the menu bar is a toolbar with icons for file operations and execution. The main area contains a table with the following data:

	Samples	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
Set 1	3		Beta 0s	Beta 50s	
Set 2	3	Pre Heat 120°C;5°C/s;10s	Pre Heat 120°C;5°C/s;10s	Pre Heat 120°C;5°C/s;10s	
Set 3	3	OSL 90°C Blue LEDs;40.00s;5°C/s;90.0%	OSL 90°C Blue LEDs;40.00s;5°C/s;90.0%	OSL 90°C Blue LEDs;40.00s;5°C/s;90.0%	
Set 4					
Set 5					
Set 6					
Set 7					
Set 8					
Set 9					
Set 10					
Set 11					
Set 12					
Set 13					
Set 14					
Set 15					
Set 16					
Set 17					
Set 18					
Set 19					
Set 20					
Set 21					
Set 22					
Set 23					

The status bar at the bottom shows the Windows taskbar with the 'start' button, the active application 'TL/OSL Sequence Editor', a 'USB DISK (E:)' icon, and the system clock showing '13:56'.

První regenerativní dávka je obvykle volena jako $D(Al_2O_3) = 0 Gy$. Druhá regenerativní dávka, resp. další regenerativní dávky, je volena v intervalu předpokládaných dávek pro danou expoziční situaci, minimálně však musí odpovídat desetinásobku aktuální hodnoty příkonu dávky $\dot{D}(Al_2O_3)$.

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 17 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al ₂ O ₃ z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 4: DÁVKOVÝ PŘÍKON ZE ZDROJE ⁹⁰Sr/⁹⁰Y PRO Al₂O₃

Vlastnosti zdroje ⁹⁰Sr/⁹⁰Y

$T_{1/2} = 29,1$ roků = 349,44 měsíců = 10 636 dní

Počáteční aktivita: $A_0 = 1,48$ GBq (ke dni 22.12.2009)

Aktivita po uplynutí času t: $A_t = 1,48 \cdot \exp\left(-t \cdot \ln 2 / T_{1/2}\right)$ GBq

Počáteční dávkový příkon v poloze vzorku: $\dot{D}(Al_2O_3)_0 = 0,106$ Gy/s (ke dni 22.12.2009)

Dávkový příkon po uplynutí času t: $\dot{D}(Al_2O_3)_t = \frac{A_t}{A_0} \cdot 0,106$ Gy/s

Vypočtené hodnoty $\dot{D}(Al_2O_3)$ pro období 2015 až 2020

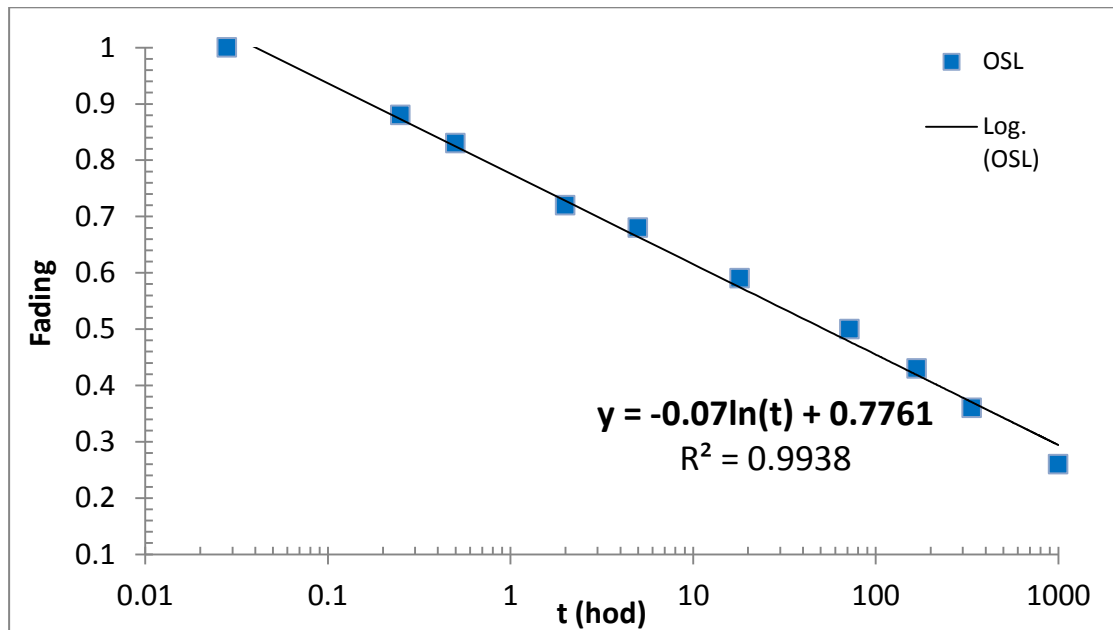
Datum	$\frac{A_t}{A_0}$	$\dot{D}(Al_2O_3) \left(\frac{Gy}{s}\right)$
1.1.2015	0,888	0,094
1.4.2015	0,883	0,094
1.7.2015	0,877	0,093
1.10.2015	0,872	0,093
1.1.2016	0,867	0,092
1.4.2016	0,862	0,091
1.7.2016	0,857	0,091
1.10.2016	0,852	0,090
1.1.2017	0,847	0,090
1.4.2017	0,841	0,089
1.7.2017	0,837	0,089
1.10.2017	0,832	0,088
1.1.2018	0,827	0,088
1.4.2018	0,822	0,087
1.7.2018	0,817	0,087
1.10.2018	0,812	0,086
1.1.2019	0,807	0,086
1.4.2019	0,802	0,085
1.7.2019	0,798	0,085
1.10.2019	0,793	0,084
1.1.2020	0,788	0,084
1.4.2020	0,784	0,083
1.7.2020	0,779	0,083
1.10.2020	0,774	0,082

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 18 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al_2O_3 z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 5: KOREKCE NA FADING

Korekce na základě empirické funkce

Korekce na fading vychází z experimentálně stanovené funkce závislosti OSL signálu na době uplynulé od měření (viz obrázek níže). Naměřené hodnoty OSL signálu byly normalizovány vzhledem k hodnotě OSL signálu naměřené 100 s po ozáření interním ozařovačem beta. Tato doba odpovídá době přesunu vzorku z polohy pro ozáření do doby iniciace čtení OSL signálu.



Korekční faktor

$$k_{fad} = \frac{1}{-0.07 \cdot \ln(t) + 0.7761}$$

Individuální korekce na fading

Postup:

- 1) Změřený vzorek ozářit zdrojem beta na zvolenou dávku $D(Al_2O_3)$ v rozsahu 1 až 5 Gy
- 2) Vzorek uložit tak, aby byl identifikovatelný a nemohlo dojít k jeho osvětlení
- 3) Vzorek změřit po čase t odpovídajícím době mezi jeho původním „havarijním“ ozářením a měřením
- 4) Aplikovat tutéž dávku jako v případě 1) a ihned po ozáření provést měření, tj. po čase $t_0 = 100$ s

Individuální korekce na fading je pak vyjádřena jako poměr signálu naměřeného hned po ozáření a signálu naměřeného s daným časovým odstupem:

$$k_{fad} = \frac{OSL(t_0)}{OSL(t)}$$

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 19 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al_2O_3 z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

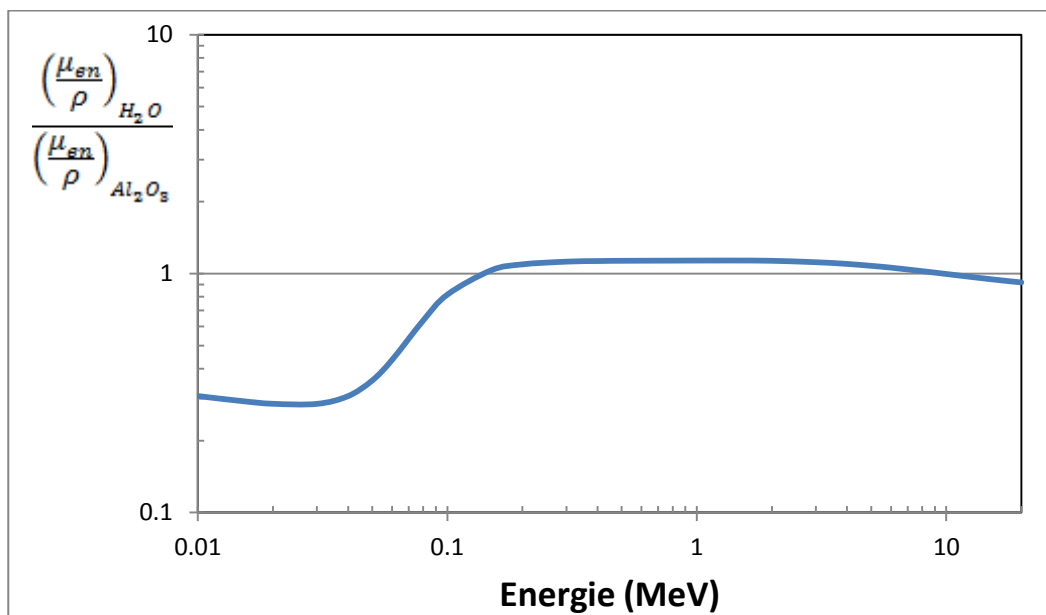
PŘÍLOHA 6: VZTAHY MEZI VELIČINAMI

Vztah mezi $D(Al_2O_3)$ a $H_p(10)$ pro vzorky z mobilních telefonů

Kryt běžného mobilního telefonu z hlediska transmise fotonového záření vyšších energií (>100 keV) odpovídá přibližně vrstvě 1 cm vody, resp. tkáně. Z dávky $D(Al_2O_3)$ naměřené z rezistoru pod touto vrstvou, pak lze odvodit odpovídající dávku ve vodě $D(H_2O)$, resp. hodnotu $H_p(10)$, takto:

$$H_p(10)[Sv] \approx D(H_2O)[Gy] = D(Al_2O_3) \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{H_2O} / \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{Al_2O_3}$$

Hodnoty poměru hmotnostních součinitelů absorpce energie $\frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{H_2O}}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{Al_2O_3}}$ jsou závislé na energii fotonů [8]:



Pro fotony o energii v rozmezí 200 keV až 2 MeV platí:

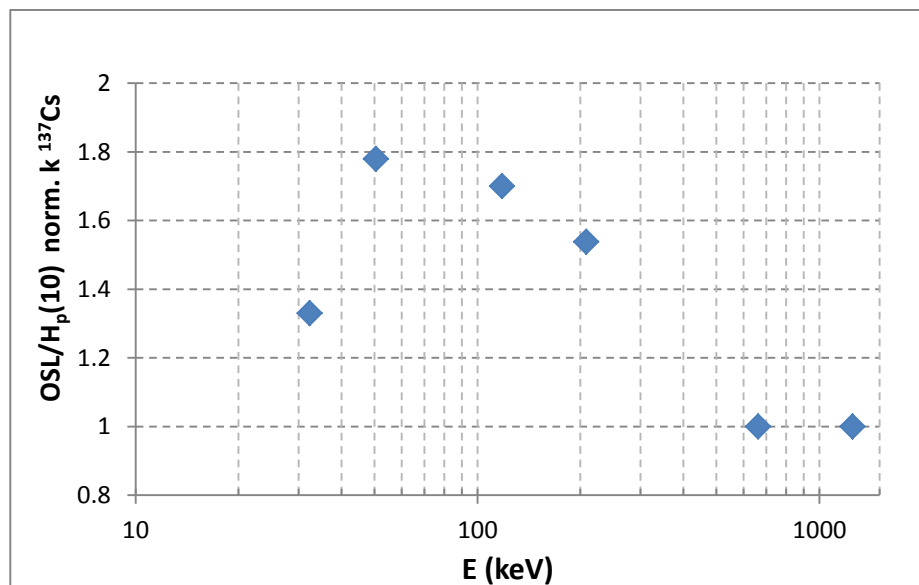
$$H_p(10)[Sv] \approx D(H_2O)[Gy] = 1.13 \cdot D(Al_2O_3)$$

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 20 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al ₂ O ₃ z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 7: KOREKCE ENERGETICKÉ ZÁVISLOSTI

V rámci práce [6] byla energetická závislost OSL signálu vzhledem k veličině $H_p(10)$ stanovena takto:


Spektrum	Střední energie (keV)	OSL/ $H_p(10)$
RQR3	32.3	1.33
RQR8	50.4	1.78
N150	118	1.70
N250	208	1.54
¹³⁷ Cs	662	1.00
⁶⁰ Co	1250	0.99
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	565	1.00



V případě ozáření fotony s energií od 30 do 200 keV je třeba korigovat naměřenou hodnotu $H_p(10)$ inverzní hodnotou poměru OSL/ $H_p(10)$.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M7	List: 21 ze 21
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al ₂ O ₃ z mobilního telefonu	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 8: VZOR PROTOKOLU

		Státní ústav radiace ochrany, v. v. i. Oddělení dozimetrie Bartoškova 28, 140 00 Praha 4	
Protokol SÚRO M7/pořadové č./datum			
Retrospektivní odhad dávky			
Datum měření	2.5.2014		
Použitá metodika	M7		
Vyhodnocení provedl/a	Mgr. Boris Bulánek		
Specifikace měření			
Osoba/datum nar.	Josef Ozářený/13.6.1954		
Mobilní telefon/elektronické zařízení	MT Nokia		
Datum předpokládaného ozáření	30.4.2014		
Podmínky ozáření	Pobyt v blízkosti zdroje ⁶⁰ Co po dobu cca 3 hod MT v kapse bundy		
Počet vyhodnocovaných vzorků	3		
Aplikované korekce	fading		
Výsledná dávka v Al ₂ O ₃ D(Al₂O₃)	1,30 Gy		
Odhad osobní dávky H_p(10)	1,47 Sv		

Ing. Daniela Ekendahl
vedoucí Oddělení dozimetrie

Datum:

Podpis: