

SROVNÁNÍ HPGE DETEKTORŮ GAMMA SPEKTROMETRŮ FALCON 5000N VE VYBAVENÍ JEDNOTEK HZS ČR

COMPARISON OF HPGE DETECTORS OF FALCON 5000N SPEKTROMETERS IN EQUIPMENT OF UNITS OF HZS CR

Tomáš KROUPA, René MAREK
tomas.kroupa@ioolb.izscr.cz, rene.marek@ioolb.izscr.cz

Abstract

Fire Brigade of the Czech Republic has in its equipment range of devices for detection of ionizing radiation, locate and determine their sources. One of these devices is the FALCON 5000N gamma spectrometer with HPGe (High-Purity Germanium) detector. This device, as explained below, will use an effective calibration to determine the activity. This can be done by direct measurement of a known activity standard. The second option is to calculate it based on the mathematical model. This paper deals precisely with the accuracy of the calculated efficiency calibration by comparing the measured activity values using the calculated efficiency calibration and using the calibration obtained by measuring the standard sample. Subsequently, we compared the HPGe detectors of the FALCON 5000N spectrometers, which are equipped with in chemical laboratories of the Czech Republic's Fire Brigade. The aim of this comparison was to find out to what extent can be used the calculated calibration efficiency of a one spectrometer transferred to other spectrometers. This comparison confirmed the good match of the results for all FALCON 5000N spectrometers using the to-end geometry, the geometry where the sample is placed above the detector in its axis.

Key words

HPGe detector, gamma spectrometer, efficiency calibration, Fire Rescue Service, chemical laboratories.

1 ÚVOD

Radioaktivita je součástí světa kolem nás. Mezi její projevy patří i emise ionizujícího záření, které dokáže při průchodu prostředím způsobit jeho ionizaci. Ionizace může probíhat interakcí nabytých částic, to označujeme jako přímou ionizaci (částice alfa, elektrony, pozitrony). Druhým principem je interakce nenabytých částic (fotony, neutrony) s prostředím, která vede ke tvorbě nabytých částic, tzv. sekundárních a ty následně způsobují ionizaci prostředí. Ionizace biomolekul uvnitř živých buněk může pak vést ke změně struktury a vlastností těchto molekul. Živé organismy jsou neustále vystaveny ionizujícímu záření, a proto mají mechanismy, jak se vypořádat s těmito změnami. Pokud je ale míra ionizace nad schopností opravných mechanismů, nebo jsou tyto opravné mechanismy oslabeny, dochází k poškození buněk. Tato vlastnost ionizujícího záření je důvodem, proč musí být jeho účinky brány v potaz s ohledem na zdraví lidí a ochranu obyvatel. HZS ČR některé z otázek ochrany proti ionizujícímu záření řeší jednak prostřednictvím účasti na monitorování radiační situace v systému MonRaS [1][2], spravovaném SÚJB (Státní úřad pro jadernou bezpečnost), a plnění úkolů při mimořádných událostech, které jsou spojeny s výskytem zdrojů ionizujícího záření [3]. Při řešení těchto úkolů se využívá celá řada přístrojů, které umožní detekovat ionizující záření, lokalizovat jeho zdroj, identifikovat jej, hodnotit úroveň kontaminace povrchů a osob či hodnotit dávku tělového ozáření zasahujících. V této práci se budeme věnovat

přístroji, který dokáže identifikovat zdroj ionizujícího záření a dokáže navíc i kvantifikovat tyto zdroje stanovením aktivity jednotlivých radionuklidů, které zdroj obsahují.

Gama spektrometrie je metodou používanou pro identifikaci radionuklidů na základě energie fotonů. Toto záření vzniká při jaderných reakcích nebo při radioaktivním rozpadu přechodem jádra z vyššího do nižšího energetického stavu. I když existuje několik čistých gama zářičů, doprovází toto záření zpravidla alfa nebo beta záření. Záření gama má čárové spektrum. Každý radionuklid proto emituje pouze fotony s určitými energiemi, které jsou pro jeho přeměnu charakteristické. Měřením těchto fotonů je možné spolehlivě identifikovat daný radionuklid.

Pro identifikaci radionuklidů a stanovení jejich aktivity ve měřeném vzorku je nutné spektrometr kalibrovat. Pro identifikaci radionuklidu je nejdůležitější energetická kalibrace, která umožňuje ve změřeném spektru zjistit energie detekovaných fotonů a následně těmto fotonům přiřadit radionuklidy. Pro výpočet aktivity radionuklidů ve vzorku je potřebná účinnostní kalibrace, která charakterizuje, s jakou pravděpodobností se fotony z identifikovaných radionuklidů v detektoru zaregistrovaly [4].

Energetická kalibrace spočívá ve změření spektra standardního etalonu složeného z radionuklidů, které emitují fotony o známých energiích v širokém rozmezí a s dostatečnou intenzitou.

Účinnostní kalibrace může být provedena dvěma způsoby. První je změření standardního etalonu se známými aktivitami radionuklidů, hustotou vzorku a vzájemným geometrickým uspořádáním detektoru, kolimátoru a vzorku. Program, zpracovávající naměřená spektra, potom na základě známých aktivit vypočítá účinnost pro energie fotonů, které je možné použít pro měření neznámého vzorku. Takto vzniklá účinnostní kalibrace však platí pouze pro vzorky o podobném fyzikálně-chemickém složení matrice a pro dané geometrické uspořádání [5]. Takto vytvořená účinnostní kalibrace je většinou využívána pro měření rutinních vzorků s velice podobnými vlastnostmi. Problém nastává při měření vzorků, které se od sebe vzájemně liší matricí anebo geometrickým uspořádáním. Je prakticky nemožné mít adekvátní standard pro každou možnou geometrii měření a rozdílné vlastnosti vzorku. Právě pro tyto případy je možné použít druhý způsob kalibrace. Druhý způsob se opírá o charakterizaci detektoru. Cílem charakterizace je získat vstupní parametry detektoru pro matematický model, který vypočítá účinnostní kalibraci pro jakoukoliv vlastnost vzorku a geometrické uspořádání [6].

Multifunkční spektrometr FALCON 5000N je přenosný elektricky chlazený gama spektrometr s HPGe (high purity germanium) detektorem, který je využíván v chemických laboratořích HZS ČR jak pro měření vzorků v laboratorních podmínkách, tak při činnostech v terénu. To představuje takovou širokou paletu možných kombinací vlastností vzorku a geometrických uspořádání, které není možné postihnout žádnou formou standardních etalonů. Tedy jedinou možností je účinnostní kalibraci vypočítat pomocí matematického modelu.

V rámci rozšíření možností měření chemickými laboratořemi HZS ČR byla u jednoho multifunkčního spektrometru FALCON 5000N provedena u výrobce charakterizace HPGe detektoru. Charakterizace detektoru se provádí pomocí matematického modelu založeného na metodě Monte Carlo, kde se simuluje odezva detektoru na zdroje gama záření pomocí napodobování náhodného chování fotonů v reálných fyzikálních situacích.

Model vychází ze samotné konstrukce detektoru, to je rozměrů HPGe krystalu, šířky mrtvé vrstvy a dalších součástí detektoru. Přesnost modelu je ověřena sérií srovnávacích měření. V případě, že model neodpovídá skutečnosti, provedou se v modelu úpravy a znovu se provedou srovnávací měření. Celý proces se opakuje tak dlouho, dokud model souhlasí se skutečnou v rámci nejistoty na úrovni 2σ . Po validaci modelu jsou generovány množiny dat pro velký počet bodových měření ve vakuu. Tyto body jsou modelově rozmístěny okolo detektoru od vzdálenosti 0–500 m, při 15 energiích od 45 keV do 7 MeV. Tato data pak slouží jako referenční hodnoty, které jsou používány pro výpočet účinnostních kalibrací [7].

Cílem naší práce bylo ověřit, zda výrobcem provedená charakterizace se shoduje s námi naměřenými daty. Dále pak, zda vypočítané účinnostní kalibrace pomocí matematického modelu pro jeden multifunkční spektrometr FALCON 5000N s charakterizovaným detektorem budou v dobré shodě s kalibracemi provedenými s několika standardy ~~etalony~~ a zda je možné tyto kalibrace použít pro ostatní multifunkční spektrometry FALCON 5000N, které jsou využívány chemickými laboratoři HZS ČR.

Konečným cílem je pak vytvoření knihovny kalibračních souborů použitelných pro měření v podmínkách In-Situ. Tedy při měření přímo na místě incidentu a získat tak rychlejší a přesnější informace o úrovni kontaminace. Které mohou být v přímé korelaci s ohrožením obyvatel přítomných v blízkosti incidentu.

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Použité vybavení

Multifunkční HPGe gama spektrometr FALCON 5000N, vyhodnocovací software GENIE 2000 (Gamma Analysis Software, LabSOCS Calibration Software)

Standardní zdroje: CAMBERRA ISOXSRC – 75F23 – 1/13000063, CBSS 2 210112 – 1374044, MBSS 2 140611 – 1265030, CBSS 2 230412 – 1329047, CBSS 2 220916-1597034, CBSS 2 220916-1597034, CBSS 2 220916-1597035, CBSS 2 220916-1597036, CBSS 2 220916-1597037.

2.2 Postup ověření charakterizace detektoru

Protože se některé vlastnosti detektoru (např. mrtvá vrstva) mohou s časem měnit, je možné tyto změny sledovat pomocí speciálních měření, která byla provedena při charakterizaci detektoru. Speciálními měřeními je možno pravidelně ověřovat validitu charakterizace. Měření se provádí kontrolním zdrojem, který byl s charakterizací detektoru dodán. Kontrolní zdroj obsahuje ^{155}Eu (86,5 keV a 105,3 keV) a ^{22}Na (511 keV a 1275 keV). Kontrolní zdroj je umístěn v držáku s upínacím popruhem, který umožňuje připevnění držáku k tělu detektoru a umožňuje měřit odezvu detektoru v přesných polohách zdroje okolo detektoru.

Pro ověření charakterizace je nutné porovnat hodnoty četnosti ploch píků pro jednotlivé energetické linie dodané z charakterizace detektoru a při provedeném měření, kdy je kontrolní zdroj umístěn nad čelo detektoru (to-end) a pak ve třech polohách kolmo na osu detektoru v úhlech 0° , 120° a 240° . V každé poloze se spektrum nabíralo po dobu 600 vteřin a zjištěné hodnoty četnosti ploch píků v cps pro jednotlivé energie linie se přepočítaly k referenčnímu datu. Pro ověření validity charakterizace je nutné, aby rozdíl četnosti ploch píků u nízkých energií nepřesáhl 10 % a u vysokých energií 5 %.

Pro zjištění lepší úhlové závislosti detektoru bylo provedeno podrobnější měření, které ukazuje, jak se mění odezva detektoru v závislosti na poloze kontrolního zdroje. Postupovalo se tedy tak, že se úhel 360° okolo osy detektoru rozdělil na stejné dílky vždy po 9° . V každé poloze se spektrum nabíralo po dobu 600 vteřin a zjistily se hodnoty četnosti ploch píků pro každou energetickou linii. Ze všech naměřených hodnot se vypočítaly průměrné hodnoty četnosti v cps a ty se porovnávaly hodnotami četnosti pro jednotlivé úhly.

2.3 Získání účinnostních kalibrací

Ke skutečnému porovnání rozdílů mezi účinnostní kalibrací získanou měřením standardů a kalibrací vypočtenou pomocí matematických modelů se použily tři standardy, které

byly měřeny multifunkčním spektrometrem FALCON 5000N s charakterizovaným detektorem. Každý z těchto standardů byl připraven rozptýlením radionuklidů v silikonovém polymeru nalitým do plastové nádoby a výrobcem byl vydán příslušný certifikát. Každý standard byl vyroben v jiné plastové nádobě a obsahoval jiné složení radionuklidů.

Postup byl následující. Spektrum každého standardu se nabíralo 5000 vteřin. Pro každý z těchto standardů se spočítaly dvě účinnostní kalibrace. Jedna na základě aktivit získaných z certifikátu standardu a druhá výpočtem z matematického modelu. Na závěr se stanovené aktivity jednotlivých radionuklidů z obou kalibrací vzájemně porovnály s hodnotami z certifikátů standardů.

2.4 Vzájemné srovnání spektrometrů ve výbavě laboratoří

Pro porovnání využitelnosti účinnostních kalibrací provedených výpočtem z matematického modelu pro multifunkční spektrometr FALCON 5000N s charakterizovaným detektorem se všemi ostatními multifunkčními spektrometry FALCON 5000N používanými u CHL HZS bez charakterizovaného detektoru se provedla jednotlivá měření s kontrolním zdrojem, který byl s charakterizací detektoru dodán.

Všechna měření byla provedena ve stejný den a za stejných podmínek. Kontrolní etalon byl měřen v pozici nad detektorem a ve třech pozicích okolo detektoru. Tedy podobně jako je doporučeno pro ověření charakterizace detektoru. Jediným rozdílem byla volba základního úhlu, kdy pro úhel 0° byla pro jednoduchost zvolena středová osa. V každé pozici jsme nabírali spektrum 3000 vteřin a zjistily se hodnoty četnosti ploch píků v cps pro jednotlivé energie linie.

2.5 Ověřitelnost spektrometrů ve výbavě laboratoří

Přenosný HPGe spektrometr typ FALCON 5000 získal v roce 2016 certifikát o schválení typu měřidla pod značkou TCM 441/16-5440, který vydal Český metrologický institut. Z těchto důvodů bylo přistoupeno k získání ověření pro pět geometrií měření pro spektrometr FALCON 5000N s charakterizovaným detektorem. Po získání osvědčení byly získané standardy pro jednotlivé geometrie využity ke kontrole ověřitelnosti ostatních spektrometrů FALCON 5000N. Každý z pěti standardů představuje odlišnou geometrii měření. Jedná se o geometrii: P1 nerezová petriho miska, K-500 plastová nádoba o objemu 500 ml, M-250 plastová nádoba o objemu 600 ml naplněná do poloviny, M-600 plastová nádoba o objemu 600 ml naplněná do plna a PT-700 plastová nádoba s plynotěsným uzávěrem o objemu 700 ml. Na základě rozměrů nádob a složení matrice byly vypočítány pomocí matematického modelu účinnostní kalibrace pro každou geometrii. Na každém spektrometru se spektrum měřilo po dobu 5000 vteřin pro každou geometrii. Vyhodnocení se povedlo v programu Genie 2000. Identifikovalo se radionuklidové složení a stanovily se aktivity jednotlivých radionuklidů, které byly přepočteny k referenční datum.

3 VÝSLEDKY

3.1 Kontrola charakterizace

Vyhodnocením spekter ve čtyřech bodech určených pro kontrolu charakterizace se potvrdilo, že charakterizace detektoru, a tedy i matematický model, je stále validní (viz tabulka 1), protože z hodnot četnosti ploch píků v cps pro jednotlivé energetické linie překročila předem stanovenou odchylku (pro nízké energie hodnotu 10% a pro vysoké energie hodnotu 5%) pouze energetická linie 511 keV, kde odchylka je o maximálně o 3,1 % větší. Tato odchylka, jak

ukazují následné grafy 1, 2, 3 a 4, je zřejmě způsobena tím, že detektor není ve spektrometru umístěn symetricky a tedy záleží na přesné poloze umístění kontrolního zdroje. Výrobce neuvedl, kde je na detektoru úhel 0°.

Poloha nad čelem detektoru (geometrie to-end) je pro geometrie měření nevhodnější k využití, protože odchylka hodnot četnosti našeho měření od nominální hodnoty četnosti je maximálně 2,5 %. Při využití spektrometrů budou využívány především tyto geometrie.

Na rozdíl od geometrie to-end odezvy detektoru okolo jeho osy ukázaly na velmi výraznou závislost pozice zdroje záření (viz grafy 1, 2, 3 a 4). Pro energetickou linii 86,5 keV vyhovuje stanovenému kritériu celkem 56 % hodnot, pro linii 105 keV vyhovuje 34 % hodnot, pro linie 511 keV a 1274,5 keV vyhovuje 98 % hodnot. Z naměřených hodnot je patrné, že u nízkých energií může být odchylka až 50%, kdežto pro vysoké energie je odchylka do 5 %.

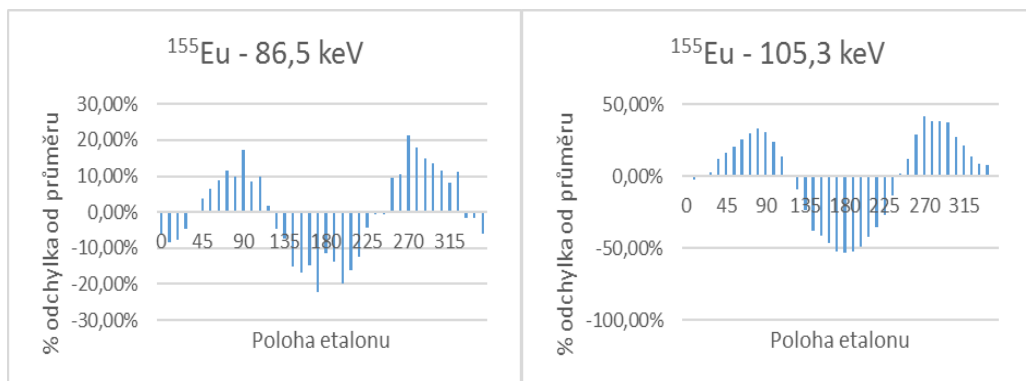
3.2 Srovnání účinnostních kalibrací

U etalonu CBSS 2 210112-1374044 se vyhodnocovalo 6 radionuklidů (241Am, 57Co, 113Sn, 137Cs, 60Co a 88Y) a u etalonů MBSS 2 140611-1265030 a CBSS 2 230412-1329047 se vyhodnocovaly 3 radionuklidy (241Am, 137Cs a 60Co). Po vyhodnocení tří spekter od jednotlivých standardů v programu Genie 2000 a stanovení aktivit pomocí dvou účinnostních kalibrací (viz tabulky 2, 3 a 4) je z výsledků patrné, že nejpřesnějším způsobem stanovení aktivity je podle účinnostní kalibrace získané ze standardu. Odchytky od nominální hodnoty se pohybují v rozmezí od -2,71 % do 1,0 %. Stanovení aktivity podle účinnostní kalibrace získané z matematického modelu není tak přesné, ale je vyhovující. Odchytky od nominální hodnoty se pohybují v rozmezí od -10,9 % do 5,39 %. Provedená měření potvrdila, že pokud pro daný typ geometrie, nebo vlastnost vzorku není k dispozici odpovídající standard, je vhodné použít účinnostní kalibraci výpočtem z matematického modelu (viz grafy 5, 6, 7 a 8).

Tabulka 1

Ověření charakterizace detektoru spektrometru FALCON 5000N CHL IOO

Radionuklid / energetická linie (keV)	Úhel	Nominální četnost (cps)	Naměřená četnost (cps)	Odchylka (%)
Eu 155 / 86,5 keV	120°	24,4	22,81	-6,53%
	240°	34,82	31,54	-9,43%
	0°	30,1	27,73	-7,86%
	to-end	140,07	138,43	-1,17%
Eu 155 / 105,3 keV	120°	8,92	9,54	6,96%
	240°	24,87	24,85	-0,10%
	0°	20,71	20,88	0,81%
	to-end	93,25	92,98	-0,29%
Na 22 / 511 keV	120°	99,93	91,85	-8,08%
	240°	100,93	94,62	-6,25%
	0°	96,33	90,26	-6,30%
	to-end	185,72	181,35	-2,35%
Na 22 / 1274,5 keV	120°	25,69	25,58	-0,43%
	240°	25,33	25,38	0,20%
	0°	24,67	24,95	1,12%
	to-end	40,34	39,44	-2,24%

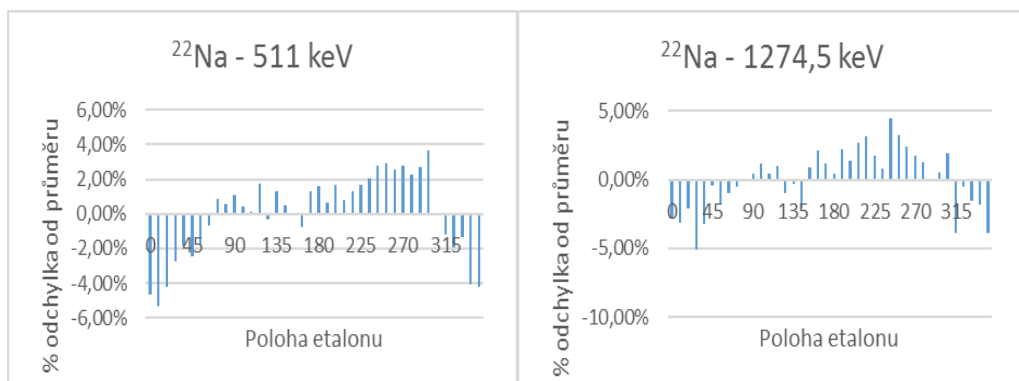


Graf 1

Odchylka rozdílu hodnot četnosti v závislosti na úhlu pozice kontrolního zdroje pro 86,5 keV

Graf 2

Odchylka rozdílu hodnot četnosti v závislosti na úhlu pozice kontrolního zdroje pro 105,3 keV



Graf 3

Odchylka rozdílu hodnot četnosti v závislosti na úhlu pozice kontrolního zdroje pro 511 keV

Graf 4

Odchylka rozdílu hodnot četnosti v závislosti na úhlu pozice kontrolního zdroje pro 1274,5 keV

Tabulka 2

Standardní etalon CBSS 2 210112-1374044

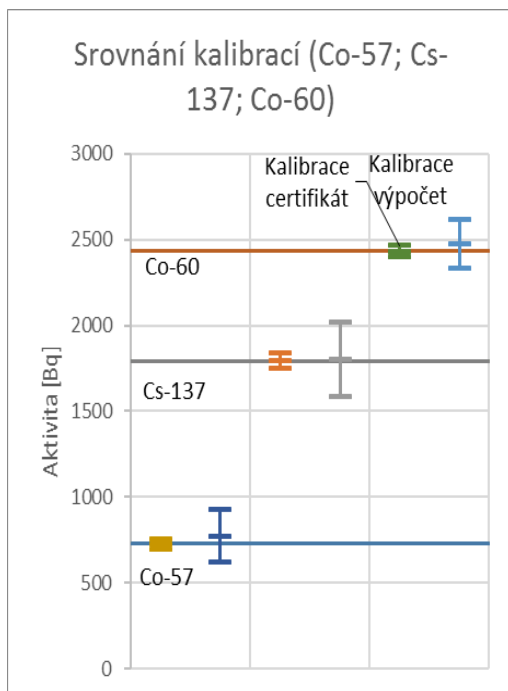
Radionuklid	Nominální hodnota [Bq]	Kalibrace pomoci standardu			Kalibrace pomoci modelu		
		aktivita [Bq]	2σ [Bq]	odchylka	aktivita [Bq]	2σ [Bq]	odchylka
Am 241	3245	3273,94	104,55	0,88%	3130,27	635,93	-3,67%
Co 57	728	719,64	31,29	-1,16%	769,50	156,13	5,39%
Sn 113	4918	4788,09	466,04	-2,71%	4845,08	799,89	-1,51%
Cs 137	1790	1792,26	45,90	0,13%	1801,99	216,76	0,67%
Co 60	2431	2429,80	33,55	-0,05%	2473,47	140,82	1,72%
Y 88	6661	6715,75	357,08	0,82%	6724,79	498,28	0,95%

Tabulka 3
Standardní etalon MBSS 2 140611-1265030

Izotop	Nominální hodnota [Bq]	Kalibrace pomoci standardu			Kalibrace pomoci modelu		
		aktivita [Bq]	2 σ [Bq]	odchylka	aktivita [Bq]	2 σ [Bq]	odchylka
Am 241	2795	2822,38	90,93	0,97%	2793,25	569,60	-0,06%
Cs 137	1481	1476,92	40,88	-0,28%	1482,10	178,45	0,07%
Co 60	1563	1567,78	27,50	0,30%	1601,26	91,84	2,39%

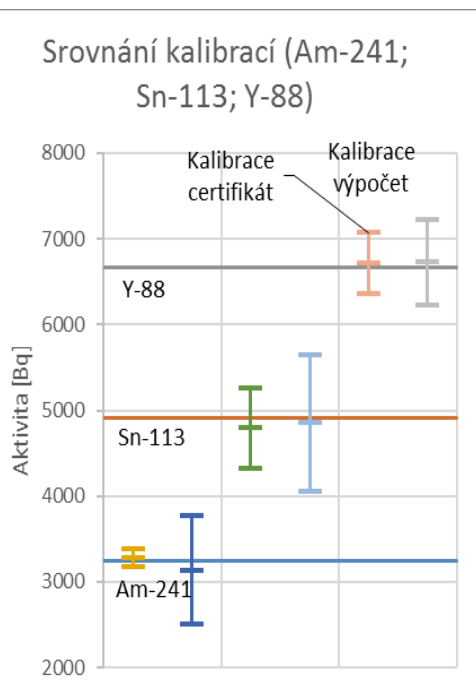
Tabulka 4
Standardní etalon CBBS 2 230412-1329047

Izotop	Nominální hodnota [Bq]	Kalibrace pomoci standardu			Kalibrace pomoci modelu		
		aktivita [Bq]	2 σ [Bq]	odchylka	aktivita [Bq]	2 σ [Bq]	odchylka
Am 241	2659	2685,85	109,67	1,00%	2396,74	491,76	-10,94%
Cs 137	1458	1454,44	40,98	-0,24%	1407,66	169,61	-3,58%
Co 60	1532	1535,73	31,81	0,24%	1500,34	85,86	-2,11%



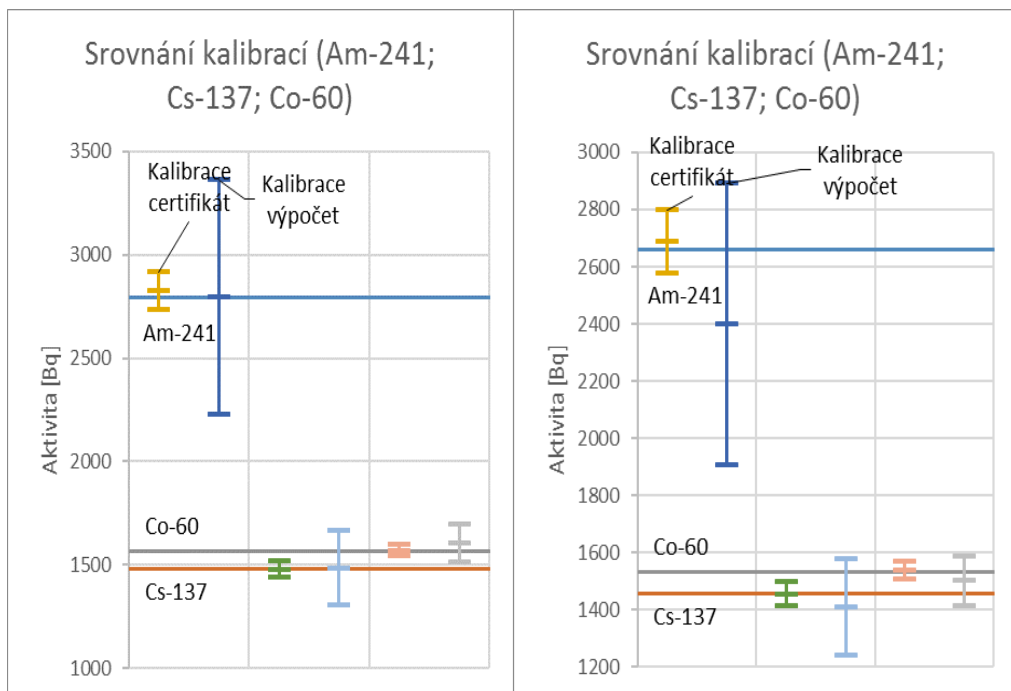
Graf 5

Standardní etalon CBSS 2 210112-1374044,
radionuklidy ^{57}Co , ^{137}Cs a ^{60}Co



Graf 6

Standardní etalon CBSS 2 210112-1374044,
radionuklidy ^{241}Am , ^{113}Sn a ^{88}Y



Graf 7

Standardní etalon MBSS 2 140611-1265030,
radionuklidy ^{241}Am , ^{137}Cs a ^{60}Co

Graf 8

Standardní etalon CBBS 2 230412-1329047,
radionuklidy ^{241}Am , ^{137}Cs a ^{60}Co

3.3 Srovnání jednotlivých spektrometrů

Vyhodnocením spekter ve čtyřech bodech určených pro kontrolu charakterizace vzájemně na pěti spektrometrech se zjistilo, že jednotlivé spektrometry se vzájemně shodují. Výsledky ukázaly relativně dobrou shodu v geometrii to-end, tedy geometrii, kdy je zdroj umístěn nad čelem detektoru (viz tabulka 5). Odchyšky se pohybovaly v rozmezí od -3,28 % do 5,44 %. Pro zbylé tři body je odchylka podstatně větší (pro 0° je v rozmezí od -7,02 do 6,8 %, pro 120° v rozmezí od -9,63 do 14,9 a pro 240° v rozmezí od -12,32 do 17,3 %). Tyto odchylky jsou zřejmě způsobeny tím, že detektor není v jednotlivých spektrometrech umístěn symetricky a tedy záleží na přesné poloze umístění kontrolního zdroje. Výrobce neuvádí, kde je na detektoru úhel 0° . Větší variabilita odchylek ukazuje na daleko větší strukturální rozdíly u jednotlivých detektorů.

Tabulka 5
Srovnání odezvy detektorů spektrometrů FALCON 5000N ve výbavě CHL HZS

Laboratoř			IOO		Tišnov		Třemošná		Kamenice		Frenštát	
Radionuklid/ energie	Geometrie	průměr	cps	Δcps	cps	Δcps	cps	Δcps	cps	Δcps	cps	Δcps
Eu-155 / 86,5	To-end	86,92	86	-1,06%	86	-1,06%	89,6	3,08%	85,4	-1,75%	87,6	0,78%
Eu-155 / 105,5	To-end	58,08	57,2	-1,52%	58,2	0,21%	58,7	1,07%	57,8	-0,48%	58,5	0,72%
Na-22 / 511	To-end	77,96	75,4	-3,28%	76,7	-1,62%	82,2	5,44%	76,5	-1,87%	79	1,33%
Na-22 / 1274,5	To-end	16,8	17,1	1,79%	17	1,19%	17,6	4,76%	16,9	0,60%	15,4	-8,33%
Eu-155 / 86,5	0°	14,7	15,6	6,12%	14,2	-3,40%	14,2	-3,40%	13,8	-6,12%	15,7	6,80%
Eu-155 / 105,5	0°	10,5	11,2	6,67%	10,6	0,95%	10	-4,76%	10	-4,76%	10,7	1,90%
Na-22 / 511	0°	38,92	39,4	1,23%	39,8	2,26%	37,9	-2,62%	37,2	-4,42%	40,3	3,55%
Na-22 / 1274,5	0°	10,54	12,5	18,60%	10,3	-2,28%	10,2	-3,23%	9,9	-6,07%	9,8	-7,02%
Eu-155 / 86,5	120°	15,38	16,6	7,93%	14,5	-5,72%	14,3	-7,02%	14,3	-7,02%	17,2	11,83%
Eu-155 / 105,5	120°	10,18	10,4	2,16%	9,7	-4,72%	9,9	-2,75%	9,2	-9,63%	11,7	14,93%
Na-22 / 511	120°	38,92	39,4	1,23%	39,8	2,26%	37,9	-2,62%	37,2	-4,42%	40,3	3,55%
Na-22 / 1274,5	120°	10,58	10,9	3,02%	10,8	2,08%	10,7	1,13%	10,2	-3,59%	10,3	-2,65%
Eu-155 / 86,5	240°	14,68	17	15,80%	14,2	-3,27%	13,9	-5,31%	13,1	-10,76%	15,2	3,54%
Eu-155 / 105,5	240°	8,44	9,9	17,30%	8,5	0,71%	7,7	-8,77%	7,4	-12,32%	8,7	3,08%
Na-22 / 511	240°	39,58	40,5	2,32%	39,5	-0,20%	40,9	3,34%	37,2	-6,01%	39,8	0,56%
Na-22 / 1274,5	240°	10,62	11	3,58%	10,6	-0,19%	11	3,58%	10,3	-3,01%	10,2	-3,95%

Poznámka: cps reprezentuje četnost plochy pro danou energetickou linii,
Δcps je odchylka cps od průměrné cps od všech pěti spektrometrů.

Tabulka 6
Hodnoty aktivit geometrie P1

Radionuklid	P1		IOO		Třemošná		Kamenice		Frenštát p/R		Tišnov	
	Nominální hodnota	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	
Am-241	1292	1249	-3,33%	1258	-2,63%	1210	-6,35%	1300	0,62%	1283	-0,70%	
Cd-109	3952	3881	-1,80%	3827	-3,16%	3830	-3,09%	3900	-1,32%	4130	4,50%	
Ce-139	258,5	258,8	0,12%	273	5,61%	258	-0,19%	264	2,13%	276	6,77%	
Co-57	250,6	245,9	-1,88%	262	4,55%	248	-1,04%	249	-0,64%	266	6,15%	
Co-60	724,3	679,5	-6,19%	683	-5,70%	667	-7,91%	643	-11,22%	698	-3,63%	
Cs-137	631	613	-2,85%	620	-1,74%	609	-3,49%	607	-3,80%	636	0,79%	
Sn-113	1749	1776	1,54%	1765	0,91%	1520	13,09%	1660	-5,09%	1732	-0,97%	
Sr-85	4158	4044	-2,74%	4280	2,93%	4130	-0,67%	4040	-2,84%	---	---	
Y-88	3791	3562	-6,04%	3592	-5,25%	3520	-7,15%	2050	-45,92%	3643	-3,90%	
Cr-51	2661	2526	-5,07%	2594	-2,52%	2660	-0,04%	2700	1,47%	----	----	

Tabulka 7
Hodnoty aktivit geometrie K-500

K-500		IOO		Třemošná		Kamenice		Frenštát p/R		Tišnov	
Radionuklid	Nominální hodnota	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka
Am-241	808,6	760,3	-5,97%	768	-5,02%	496	-38,66%	770	-4,77%	752	-7,00%
Cd-109	2474	2446	-1,13%	2467	-0,28%	1550	-37,35%	2500	1,05%	2580	4,28%
Ce-139	161,8	171,3	5,87%	177	9,39%	122	-24,60%	174	7,54%	180	11,25%
Co-57	156,9	171,9	9,56%	163	3,89%	104	-33,72%	162	3,25%	172	9,62%
Co-60	453,5	436,8	-3,68%	430	-5,18%	280	-38,26%	410	-9,59%	451	-0,55%
Cs-137	395	385	-2,53%	379	-4,05%	265	-32,91%	384	-2,78%	390	-1,27%
Sn-113	529,8	512,4	-3,28%	502	-5,25%	254	-52,06%	496	-6,38%	522	-1,47%
Sr-85	1259	1205	-4,29%	1230	-2,30%	630	-49,96%	1210	-3,89%	---	---
Y-88	1148	1106	-3,66%	1089	-5,14%	590	-48,61%	657	-42,77%	1127	-1,83%
Cr-51	5984	5908	-1,27%	6250	4,45%	3850	-35,66%	6130	2,44%	----	----

Tabulka 8
Hodnoty aktivit geometrie M-250

M-250		IOO		Třemošná		Kamenice		Frenštát p/R		Tišnov	
Radionuklid	Nominální hodnota	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka
Am-241	822,2	749	-8,90%	767	-6,71%	715	-13,04%	760	-7,57%	763	-7,20%
Cd-109	2516	2358	-6,28%	2404	-4,45%	2320	-7,79%	2500	-0,64%	2573	2,27%
Ce-139	164,6	166,1	0,91%	172	4,50%	175	6,32%	167	1,46%	178	8,14%
Co-57	159,6	159,3	-0,19%	160	0,25%	159	-0,38%	158	-1,00%	160	0,25%
Co-60	461,1	432,7	-6,16%	415	-10,00%	429	-6,96%	398	-13,68%	435	-5,66%
Cs-137	401,7	374,1	-6,87%	374	-6,90%	381	-5,15%	375	-6,65%	379	-5,65%
Sn-113	456,4	422,6	-7,41%	432	-5,35%	422	-7,54%	411	-9,95%	441	-3,37%
Sr-85	1085	1014	-6,54%	1041	-4,06%	1030	-5,07%	1010	-6,91%	---	---
Y-88	988,9	924,2	-6,54%	902	-8,79%	919	-7,07%	526	-46,81%	938	-5,15%
Cr-51	5794	5531	-4,54%	5858	1,10%	5800	0,10%	5800	0,10%	---	---

Tabulka 9
Hodnoty aktivit geometrie M-600

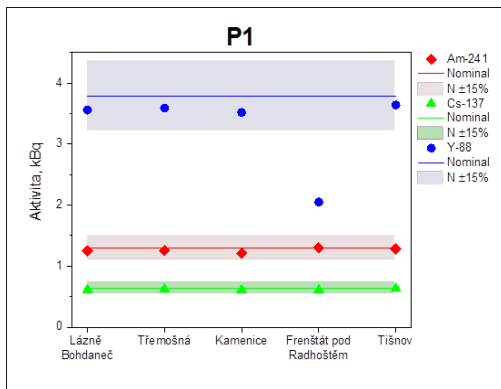
M-600		IOO		Třemošná		Kamenice		Frenštát p/R		Tišnov	
Radionuklid	Nominální hodnota	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka
Am-241	802,4	717,3	-10,61%	720	-10,27%	709	-11,64%	720	-10,27%	721	-10,14%
Cd-109	2455	2331	-5,05%	2314	-5,74%	2300	-6,31%	2500	1,83%	2415	-1,63%
Ce-139	160,6	168	4,61%	172	7,10%	173	7,72%	165	2,74%	176	9,59%
Co-57	155,7	151,8	-2,50%	152	-2,38%	163	4,69%	165	5,97%	158	1,48%
Co-60	450	423	-6,00%	412	-8,44%	421	-6,44%	374	-16,89%	429	-4,67%
Cs-137	392	375	-4,34%	368	-6,12%	368	-6,12%	373	-4,85%	372	-5,10%
Sn-113	395,1	373,6	-5,44%	368	-6,86%	389	-1,54%	371	-6,10%	382	-3,32%
Sr-85	939,1	866	-7,78%	855	-8,96%	909	-3,21%	899	-4,27%	---	---
Y-88	856,1	797,1	-6,89%	800	-6,55%	795	-7,14%	377	-55,96%	812	-5,15%
Cr-51	5781	5497	-4,91%	5626	-2,68%	5430	-6,07%	5000	-13,51%	---	---

Tabulka 10
Hodnoty aktivit geometrie PT-700

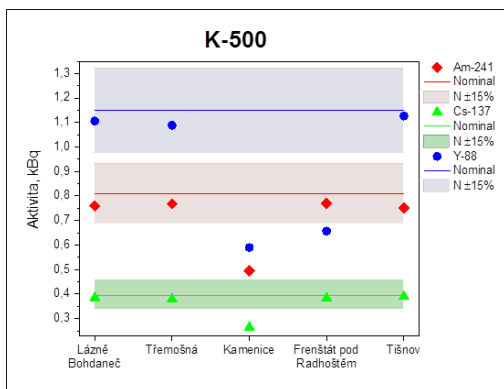
PT-700		IOO		Třemošná		Kamenice		Frenštát p/R		Tišnov	
Radionuklid	Nominální hodnota	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka	Aktivita [Bq]	Odchylka
Am-241	827,5	790,6	-4,46%	746	-9,85%	791	-4,41%	810	-2,11%	790	-4,53%
Cd-109	2532	2610	3,08%	2343	-7,46%	2440	-3,63%	2700	6,64%	2679	5,81%
Ce-139	165,6	185,8	12,20%	174	5,07%	192	15,94%	189	14,13%	185	11,71%
Co-57	160,6	180,2	12,20%	165	2,74%	164	2,12%	171	6,48%	182	13,33%
Co-60	464,1	460,8	-0,71%	425	-8,42%	413	-11,01%	435	-6,27%	464	-0,02%
Cs-137	404,3	408	0,92%	367	-9,23%	403	-0,32%	403	-0,32%	420	3,88%
Sn-113	407,5	408,7	0,29%	376	-7,73%	388	-4,79%	399	-2,09%	422	3,56%
Sr-85	968,4	968,5	0,01%	912	-5,82%	956	-1,28%	990	2,23%		
Y-88	882,9	878,7	-0,48%	807	-8,60%	864	-2,14%	518	-41,33%	892	1,03%
Cr-51	5962	6061	1,66%	5208	-12,65%	5930	-0,54%	5840	-2,05%		

3.4 Ověřitelnost jednotlivých spektrometrů

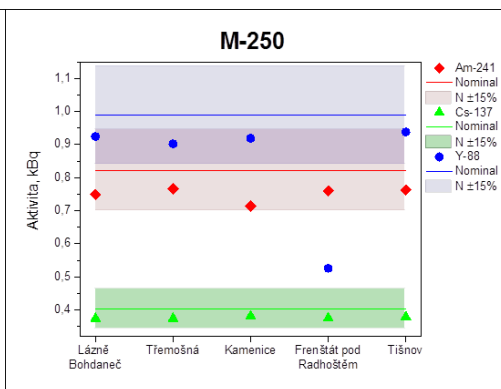
Výsledky porovnání ověřitelnosti všech pěti spektrometrů na pěti geometrických trasách jsou uvedené v tabulkách 6, 7, 8, 9 a 10. Pro ověření přístroje v rámci kontrolního měření ČMI je nutné, aby stanovené aktivity byly v rozsahu $\pm 15\%$ od nominální hodnoty. Z tabulek výsledků je patrné, že převážná většina výsledků našeho srovnání je v této toleranci. Výjimkou je aktivita radionuklidu ^{88}Y zjištěná u všech geometrií měřených CHL Frenštát pod Radhoštěm, radionuklidu ^{60}Co geometrie M-600 CHL Frenštát pod Radhoštěm a aktivita radionuklidu ^{139}Ce u geometrie PT-700 měřené CHL Kamenice. U CHL Kamenice byla velká odchylka od nominální hodnoty při měření geometrie K-500 a to u všech radionuklidů ve vzorku. Pro větší názornost se vybraly tři radionuklidy tak, aby byly zastoupeny fotony gama záření nízkých energií (^{241}Am), středních (^{137}Cs) a vysokých energií (^{88}Y), a graficky znázornily výsledné hodnoty aktivit v rámci nastavené tolerance $\pm 15\%$ (viz grafy 9, 10, 11, 12 a 13).



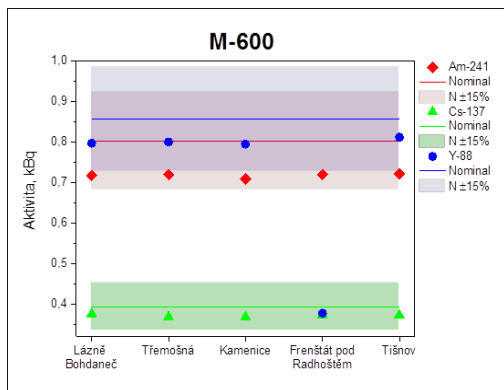
Graf 9
Aktivita ^{241}Am , ^{137}Cs a ^{88}Y - všechny CHL, geometrie P1



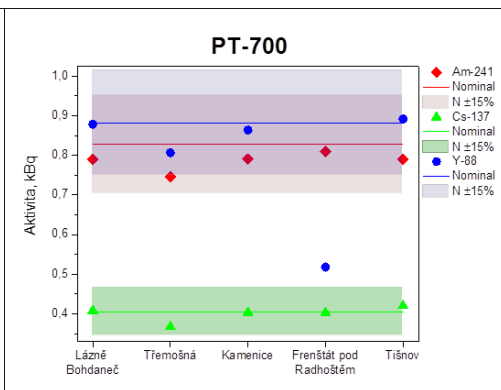
Graf 10
Aktivita ^{241}Am , ^{137}Cs a ^{88}Y - všechny CHL, geometrie K-500



Graf 11
Aktivita ^{241}Am , ^{137}Cs a ^{88}Y - všechny CHL, geometrie M-250



Graf 12
Aktivita ^{241}Am , ^{137}Cs a ^{88}Y - všechny CHL, geometrie M-600



Graf 13
Aktivita ^{241}Am , ^{137}Cs a ^{88}Y - všechny CHL, geometrie PT-700

Pomocí analýzy rozptylu byly výsledky jednotlivých geometrií porovnávány za účelem zjištění, jestli jsou spektrometry ověřitelné pro kalibrace vypočítané matematickým modelem na pracovišti IOO. Pro statistické vyhodnocení všech naměřených hodnot se pro každou geometrii získala p _hodnota pro porovnání nulové hypotézy H_0 – účinnostní kalibrace vytvořená pro jeden přístroj je použitelná pro ostatní přístroje stejného typu, proti alternativní hypotéze H_A – účinnostní kalibraci je nutné vypočítat specificky pro každý přístroj zvlášť.

Pro jednotlivé geometrie vyšla p _hodnota:

$$p_{P1}=0,9902; p_{K-500}=0,8676; p_{M-250}=0,9576; p_{M-600}=0,955; p_{PT-700}=0,9582$$

a tedy hypotézu H_0 je možno přijmout.

4 DISKUZE

Cílem této práce bylo zjistit, do jaké míry je použitelná charakterizace HPGe detektoru multifunkčního spektrometru FALCON 5000N na pracovišti IOO, pro výpočet účinnostní kalibrace pomocí matematického jak pro měření neznámých vzorků na spektrometru s charakterizovaným detektorem, tak pro spektrometry FALCON 5000N používanými ostatními CHL HZS.

Kontrola charakterizace detektoru spektrometru CHL IOO potvrdila platnost matematického modelu, který je využíván pro výpočet účinnostní kalibrace programem Geometry Composer.

Tyto kalibrace se testovaly na standardních etalonových vzorcích a výsledné aktivity jsme porovnávali s aktivitami získanými pomocí kalibrací získaných z certifikátů skutečných aktivit v těchto standardech. Ze získaných výsledků je jasně vidět, že není možné soutěžit s kalibrací získanou pomocí standardních etalonů s certifikátem, ale v případě, že není možné takovou kalibraci získat, je vypočtení kalibrace zcela přijatelné. Použití vypočtených kalibrací je pak nevyhnutelné, pokud potřebujeme změřit velké množství vzorků, které mají velice rozdílné vlastnosti matrice. V těchto případech je velice nepraktické a také finančně neúnosné mít obrovské množství standardních etalonů pro každou možnou hustotu vzorku. V těchto situacích je možnost vypočítat účinnostní kalibraci na základě známých vlastností detektorů obrovskou výhodou.

Když se podařilo ověřit použitelnost vypočtených účinnostních kalibrací na spektrometru s charakterizovaným detektorem, přešlo se k druhému kroku, zda je možné tyto kalibrace použít i na spektrometry stejného typu.

Srovnáním měření etalonu obsahujícího ^{155}Eu a ^{22}Na na všech spektrometrech a podrobnějším měřením u detektoru CHL IOO se zjistilo, že odezva detektoru vůči gama záření přicházejícímu k detektoru kolmo na jeho osu je závislá na úhlu a je rozdílná v rámci jednotlivých přístrojů CHL HZS. Z tohoto důvodu se rozhodlo soustředit se primárně na geometrie měření, které spočívají v umístění vzorku nad čelo detektoru a ne okolo detektoru, jako tomu může být např. v případě použití Marinelliho měřicí nádoby. Proto jsme pro výběr geometrie při kontrolním měření vybrali právě těch pět geometrií, které splňují tuto podmínku.

Kontrolní měření ČMI na pracovišti CHL IOO vedlo k získání certifikátu o ověření přístroje. Při tomto měření se identifikovaly všechny přítomné radionuklidy a jejich stanovené aktivity se nikdy neodchýlily o více jak 15 %. Když byly tyto stejné standardy použity pro srovnávací měření napříč CHL HZS, byla většina výsledků stejně jako u spektrometru s charakterizovaným detektorem také v mezích 15 %. Tedy se zmíněnou výjimkou ^{88}Y u všech vzorků a ^{60}Co u vzorku geometrie M-600, měřené CHL HZS Frenštát pod Radhoštěm. Tato odchylka může být vysvětlena špatnou odezvou detektoru na vysoké energie, tj. energie nad

1000 keV. Měření geometrie K-500 CHL HZS Kamenice bylo špatně vyhodnocené. Všechna data jsme navíc podrobili analýze rozptylu a nejnižší p_{hodnota} byla 0,8676.

5 ZÁVĚR

Z výsledků plyne, že je možné použít vypočtené účinnostní kalibrace jako dobrou alternativu v případě, že není možné pro danou geometrii a vlastnost vzorku získat tuto kalibraci pomocí vhodného standardu. Navíc můžeme říct, že je možné použít kalibraci vypočítanou pro charakterizovaný detektor multifunkčního spektrometru FALCON 5000N CHL IOO i při měření u ostatních spektrometrů FALCON 5000N, které používají CHL HZS. S jedinou výjimkou, a tou je CHL HZS Frenštát pod Radhoštěm, kde je možné použít tyto vypočtené kalibrace jen do energií 1000 keV, a bude předmětem dalších testů pro lepší pochopení důvodů, proč je tomu tak.

I když multifunkční spektrometr FALCON 5000N je výborným přístrojem pro měření laboratorních vzorků, jde také o přístroj, který může být využit při měření v terénu. A tato oblast je naším budoucím polem výzkumu. Naším konečným cílem je vytvoření kalibrací a postupů, které budou schopny poskytnout výsledky ve většině problémů, kterým by mohly CHL HZS čelit, ať už jako podpora řešení mimořádných událostí v rámci IZS, tak i jako součást celostátní Radiační monitorovací sítě.

Résumé

Our results shows it is possible to use the calculated efficiency calibration as a good alternative for calibration by standard in case there is not suitable standard for particular geometry. In addition, we can say that it is possible to use the calibration calculated for the multifunction spectrometer detector with characterization even when measured on other FALCON 5000N spectrometers that are in use by other CHL HZS. The only exception is CHL HZS Frenstat pod Radhostem, where these calculated calibrations can only be used up to 1000 keV. This problem will be subjected to further testing to better understand why this case is happening.

Although the FALCON 5000N multifunctional spectrometer is an excellent instrument for measuring laboratory samples, it is also a device that is designed for field measurements. And this area is subject of our future research. Our ultimate goal is to create calibrations and procedures that will be able to deliver results in most of the issues that CHL HZS might face, either as a support for emergency response in the IRS, or as part of the National Radiation Monitoring Network.

Příspěvek vznikl v rámci projektu VI20152020009.

Použité zkratky:

cps	counts per second (počet impulzů za vteřinu)
ČMI	Český metrologický institut
HPGe	High-Purity Germanium (vysoce čisté germánium)
HZS ČR	Hasičský záchranný sbor České republiky
CHL HZS	Chemická laboratoř Hasičského záchranného sboru
IOO	Institut ochrany obyvatelstva

IZS	Integrovaný záchranný systém
MonRaS	Monitorování radiační situace
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost

Literatura

- [1] SÚRO. *Informace o funkci a organizaci RMS*. 2016.
- [2] SÚJB. *Monitorování radiační situace* [online]. 1997 [vid. 2017-09-15]. Dostupné z: <http://www.sujb.cz/monitorovani-radiacni-situace/>
- [3] GŘ HZS ČR. Pokyn generálního ředitele Hasičského záchranného sboru ČR č. 49/2016, kterým se stanoví působnost a úkoly chemických laboratoří Hasičského záchranného sboru ČR. In: *Sbírka interních aktů řízení*. Praha.
- [4] VUKANAC, I., M. DJURAŠEVIĆ, A. KANDIĆ, D. NOVKOVIĆ, L. NADJERDJ a Z. MILOŠEVIĆ. Experimental determination of the HPGe spectrometer efficiency curve. *Applied Radiation and Isotopes* [online]. 2008, **66**(6–7), 792–795. ISSN 09698043. Dostupné z: doi:10.1016/j.apradiso.2008.02.039
- [5] SAAT, Ahmad, Zaini HAMZAH, Mohammad Fariz YUSOP a Muhd Amiruddin ZAINAL. Experimental determination of the HPGe spectrometer efficiency calibration curves for various sample geometry for gamma energy from 50 keV to 2000 keV. In: *AIP Conference Proceedings* [online]. 2010, s. 39–42. ISBN 9780735407978. Dostupné z: doi:10.1063/1.3469690
- [6] VARGAS, M. Jurado, A. Fernández TIMÓN, N. Cornejo DÍAZ a D. Pérez SÁNCHEZ. Monte Carlo simulation of the self-absorption corrections for natural samples in gamma-ray spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes* [online]. 2002, **57**(6), 893–898. ISSN 09698043. Dostupné z: doi:10.1016/S0969-8043(02)00220-8
- [7] VENKATARAMAN, R., F. BRONSON, V. ATRASHKEVICH, M. FIELD a B. M. YOUNG. Improved Detector Response Characterization Method in ISOCS and LabSOCS 1. General Philosophy of ISOCS Detector Characterization 2. Response Characterization Methodologies. 2003, **264**(Marc Vi), 1–21.