



Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.

Certifikovaná metodika

Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření

Vypracoval Ing. Karin Fantínová

Výsledek projektu Bezpečnostního výzkumu České republiky, Projekt MV ČR – BV „Výzkum pokročilých metod detekce, stanovení a následného zvládnutí radioaktivní kontaminace“, identifikační kód VF20102015014

Rok uplatnění metodiky: 2015

Oponenti Ing. Jan Matzner, Státní úřad pro jadernou bezpečnost
Mgr. Marek Kurfířt, LRKO JE Temelín

Schválil	RNDr. Petr Rulík
Vedoucí odboru	RNDr. Petr Rulík
Archivní označení	00-00-00
Výtisk číslo	1

Rozdělovník

Výtisk	Převzal	Datum	Podpis

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika		List: 2 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření		Datum účinnosti: 1. 7. 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.	Metodika	List: 4 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

OBSAH

1	CÍL METODIKY	5
2	PRINCIP METODY	5
3	CHARAKTERISTIKA RADIONUKLIDU	6
4	PŘÍSTROJE, POMŮCKY, MATERIÁLOVÉ ZAJIŠTĚNÍ	6
5	POSTUP ANALÝZY	7
	5.1 Schéma analýzy	7
	5.2 Příprava a měření vzorku.....	10
	5.3 Detekce přítomnosti ^{90}Sr ve vzorku a řádový odhad aktivity.....	11
	5.3.1 Prohlídka spektra	11
	5.3.2 Porovnání naměřeného spektra s referenčními srovnávacími spektry a řádový odhad aktivity.....	12
	5.3.3 Potvrzení přítomnosti ^{90}Sr ve vzorku	13
	5.4 Odečet spekter radionuklidů.....	13
	5.5 Stanovení aktivity ^{90}Sr pomocí spektrometrie gama	15
	5.5.1 Stanovení aktivity ^{90}Sr ze spektra brzdného záření.....	15
	5.5.2 Odhad nejistoty stanovení aktivity ^{90}Sr	16
	5.5.3 Proklad spektra BZ a stanovení aktivity ^{90}Sr z prokladu	17
6	STANOVENÍ MINIMÁLNÍ VÝZNAMNÉ A MINIMÁLNÍ DETEKOVATELNÉ AKTIVITY	18
	6.1 Odhad MVA a MDA ze spektra BZ.....	18
	6.2 MDA stanovená ze spektra BZ pro typické hodnoty	19
7	VYJADŘOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	20
	NOVOST POSTUPŮ	20
	POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY	20
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	20
	SEZNAM SOUVISEJÍCÍCH PUBLIKACÍ A VÝSTUPŮ	21
	PŘÍLOHA I: Základní pojmy..... Chyba! Záložka není definována.	
	PŘÍLOHA II: Charakteristika radionuklidů ^{90}Sr , ^{90}Y a dalších s emisí beta	23
	PŘÍLOHA III: Kalibrace HPGe detektoru pro měření ^{90}Sr prostřednictvím BZ.....	26
	Příklad experimentální kalibrace HPGe detektoru pro měření ^{90}Sr	31
	PŘÍLOHA IV: Odhad nejistoty stanovení aktivity ^{90}Sr ze spektra BZ.....	32
	PŘÍLOHA V: Minimální významná a minimální detekovatelná aktivita	35
	PŘÍLOHA VI: Spektra ^{90}Sr na pozadí přírodních radionuklidů	38
	PŘÍLOHA VII: Referenční spektra.....	43
	VII.1 Postup získání referenčních spekter měřením.....	43
	VII.2 Postup získání referenčních spekter pomocí MC simulace	54
	Příklad zadání parametrů zdroje pro MC simulaci spektra	77

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 5 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

ZKRATKY A SYMBOLY

CBSS	<u>C</u> oaxial <u>B</u> eaker <u>S</u> tandard <u>S</u> ource (kalibrační etalon – válcová nádoba)
cps	Poč <u>e</u> t impu <u>s</u> ů za sekundu (<u>c</u> ounts <u>p</u> er <u>s</u> econd)
ČMI	Český metrologický institut
ČR	Česká republika
BEGe	Typ oknového HPGe detektoru (<u>B</u> road <u>E</u> nergy <u>G</u> ermanium)
BZ	Brzdné záření
FWHM	Šířka píku v polovině jeho maxima (<u>F</u> ull <u>W</u> idth at <u>H</u> alf <u>M</u> aximum)
Fluka	Obecný MC transportní kód
Gnuplot	Volně dostupný program určený pro tvorbu grafů a proklady dat
HPGe	Polovodičový detektor z vysoce čistého germania (<u>H</u> igh <u>P</u> urity <u>G</u> ermanium)
MBSS	<u>M</u> arinelli <u>B</u> eaker <u>S</u> tandard <u>S</u> ource (kalibrační etalon – Marinelliho nádoba)
MC	Monte Carlo
MCNP	Obecný MC transportní kód (<u>M</u> onte <u>C</u> arlo <u>N</u> - <u>P</u> article)
MDA	Minimální detekovatelná aktivita
MVA	Minimální významná aktivita
ppm	Poč <u>e</u> t částic na jeden milion (<u>p</u> arts <u>p</u> er <u>m</u> illion): 1 ppm = 10 ⁻⁶
ROI	Oblast zájmu (<u>R</u> egion <u>O</u> f <u>I</u> nterest)
RMS	Radiační monitorovací síť
RN	Radionuklid
SÚRO	Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
ŽP	Životní prostředí

1 CÍL METODIKY

Cílem metodiky je rychlá detekce a odhad aktivity ⁹⁰Sr ve vzorcích životního prostředí (ŽP) a potravních komodit.

Metodika je využitelná pro detekci i jiných nuklidů emitujících záření beta, které významně neemitují záření gama. Informace jsou uvedeny v příloze.

Metodika je určena pro pracovníky, kteří mají již delší zkušenost s analýzou vzorků pomocí spektrometrie gama s využitím HPGe detektorů, zejména s analýzou přírodních radionuklidů (RN).

2 PRINCIP METODY

Metodika je založena na detekci brzdného záření (BZ) ⁹⁰Sr a jeho dceřiného produktu ⁹⁰Y za předpokladu jejich radioaktivní rovnováhy pomocí spektrometrie gama s využitím polovodičového HPGe detektoru bez složité přípravy vzorku.

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 6 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

3 CHARAKTERISTIKA RADIONUKLIDU

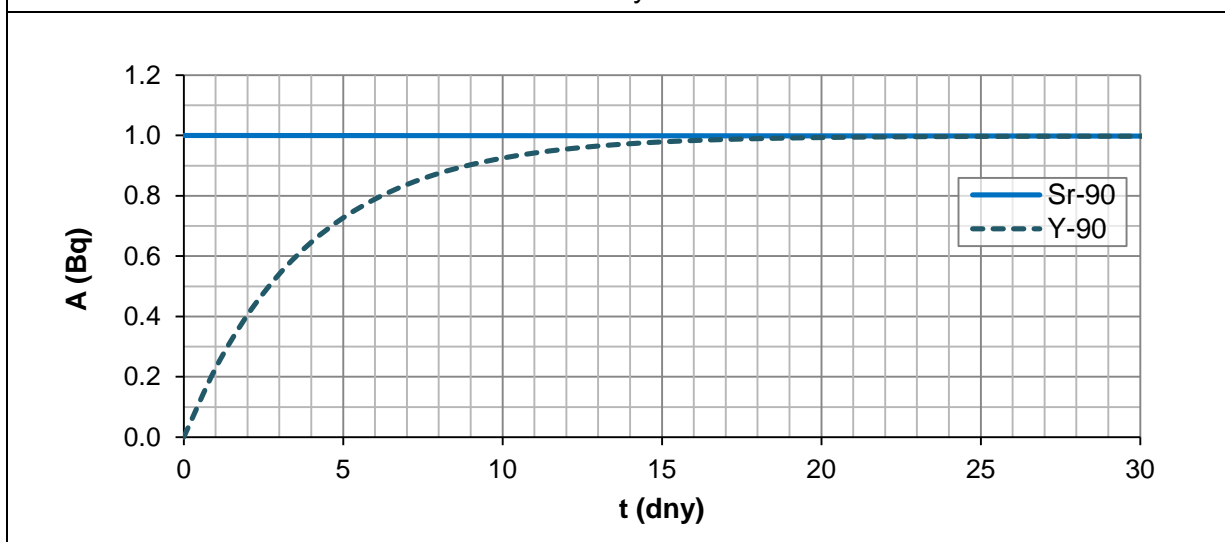
^{90}Sr je štěpný produkt a čistý zářič beta s poločasem přeměny 28,79 let. Maximální energie beta ^{90}Sr je 546 keV ($I_\beta = 1$). Jeho dceřiný produkt ^{90}Y má vlastní poločas přeměny 2,7 dne (64 hodin) a maximální energii beta ^{90}Y je 2279,8 keV ($I_\beta = 0,9999$). S pravděpodobností 99,98 % se přeměňuje do základního stavu ^{90}Zr .

^{90}Sr není obsaženo v přírodní směsi stroncia. Průměrný obsah ^{90}Sr v půdách v ČR je 2 Bq/kg [8], což odpovídá koncentraci 0,392 fg/g ($3,92 \times 10^{-16}$ g ^{90}Sr v 1 g půdy).

^{90}Sr se většinou nachází v trvalé radioaktivní rovnováze se svým dceřiným radionuklidem (RN) ^{90}Y , který lze považovat také za čistý beta zářič. 99% radioaktivní rovnováha mezi ^{90}Sr a ^{90}Y se ustavuje přibližně po 18 dnech (viz obr. 1).

Čistých zářičů beta s poločasem přeměny v řádu let a maximální energií záření beta větší než 400 keV existuje kromě ^{90}Sr jen pět (^{10}Be , ^{39}Ar , ^{42}Ar , ^{85}Kr , ^{115}In). Podrobnosti jsou uvedeny v Příloze II (viz tab. 7).

Obrázek 1 Nárůst ^{90}Y do radioaktivní rovnováhy se ^{90}Sr



4 PŘÍSTROJE, POMŮCKY, MATERIÁLOVÉ ZAJIŠTĚNÍ

Pro účely stanovení přítomnosti a aktivity ^{90}Sr ve vzorku je nutné následující přístrojové, programové a materiálové vybavení:

- Kalibrovaná spektrometrická trasa sestávající z polovodičového HPGe detektoru umístěného ve stínění, zdroje vysokého napětí, spektrometrického zesilovače a mnohokanálového analyzátoru.
- Měřicí nádoba (masťovka, Marinelliho nádoba), pro kterou je spektrometrická trasa kalibrována.
- Váhy pro zjištění hmotnosti měřeného vzorku.
- Místo a pomůcky pro přípravu vzorků s potencionálně vyššími aktivitami (např. digestoř, fotomisky s filtračním papírem), rukavice.
- Počítač s programovým vybavením pro ovládání spektrometru, měření a analýzu spekter (např. Canberra Genie 2k) a programovým vybavením pro zpracovávání dat a grafů (např. tabulkový procesor Microsoft Excel nebo LibreOffice Calc).
- Referenční spektra matric vzorků pro posuzování obsahu ^{90}Sr ve vzorku normovaná na cps/(Bq/kg) (cps = počet impulsů za vteřinu).

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 7 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

- g) Radionuklidové etalony nebo program pro MC simulace, např. obecný program pro výpočet transportu částic MCNP nebo Fluka

5 POSTUP ANALÝZY

Pokud se hovoří o spektru BZ ^{90}Sr , je tím myšleno spektrum BZ ^{90}Sr a ^{90}Y v rovnováze.

Spektrum BZ je spojitě s maximální energií rovnou maximální energii záření beta. Intenzita BZ je obecně nejvyšší přibližně v oblasti 20 až 200 keV.

Lze předpokládat, že nejčastějším druhem vzorku bude půda, proto je metodika orientována především na ni.

Příprava na analýzu, zejména příprava „srovnávacích“ a „odečítacích“ spekter pro citlivější měření, je poměrně pracná.

Podklady pro analýzy (jako jsou např. referenční spektra srovnávací a odečítací - viz dále v textu) lze připravit buď experimentálně, nebo pomocí MC simulací, popřípadě kombinací obojího. Oba přístupy jsou detailněji uvedeny v přílohách.

Při analýze se pracuje s oblastí spektra maximální produkce BZ označené jako ROI (region of interest). Většinou lze v průběhu analýzy pracovat s celkovým počtem impulsů v oblasti ROI, v některých částech analýzy (volbou postupu se jim lze vyhnout) je nutné pracovat s počty impulsů v jednotlivých energetických intervalech ROI (tj. v jednotlivých kanálech mnohakanálového analyzátoru), jejichž šířka je zde volena 0,75 keV/kanál (odpovídá energetické kalibraci spektrometru 4096 kanálů pro oblast energií 0-3 MeV).

Konkrétní hodnoty veličin (proměnných) uvedené v metodice se vztahují k HPGe detektoru typu-p GC1018 o relativní účinnosti 10 % a vzorku o objemu 50 ml (v některých případech 200 ml nebo 275 ml - plná měřicí nádoba) umístěného v tzv. masťovce měřené v poloze na čele detektoru. Oblast ROI byla zvolena v rozsahu 50 – 200 keV. Část hodnot byla získána experimentálně a část MC simulací.¹

Pokud se v dalším textu hovoří o korekci spektra, lze tím nejjednodušeji chápat korekci celkového počtu impulsů v ROI.

Protože produkce BZ mimo oblast ROI je významně nižší než v ROI, lze korekční koeficienty často užít i na oblast vyšších energií mimo ROI a pracovat tak i s celými spektry. Práce s celými spektry je pracnější, může však usnadnit odhalení chyb zvláště při malých zkušenostech.

5.1 Schéma analýzy

Analýzu lze rozdělit na část přípravnou popsanou v bodech a) až d) a na část vlastní analýzy uvedenou v bodě e) tohoto oddílu.

- a) Účinnostní kalibrace detektoru.** Účinnostní kalibrace pro detekci BZ v oblasti ROI - pro vybrané geometrie a detektory; kalibrovat nejlépe s etalonem ^{90}Sr v gelové matici (dodavatel ČMI). Podrobnosti jsou v [Příloze III](#).

b) Stanovení korekčních koeficientů

- b1) Korekční koeficienty pro účinnost detekce BZ.** Stanovení korekčních koeficientů pro přepočítání účinnosti detekce BZ v gelu na jinou matici o dané hustotě a prvkovém složení (půda, mléko, ...). Podrobnosti jsou v [Příloze III](#).

¹ Účinnostní kalibrace pro detekci BZ byla získána jednak MC simulací a jednak experimentálně (potvrzení správnosti MC simulací). Korekční faktory pro účinnost detekce BZ byly získány pouze MC simulací. Srovnávací spektra byla získána MC simulací, resp. kombinací experimentálně získaných spekter BZ ^{90}Sr a MC simulací spekter záření gama. Odečítací spektra byla získána MC simulací.

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 8 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

b2) Korekční koeficienty na samoabsorpci fotonů pro oblast ROI od RN emitujících záření gama. Stanovení korekčních koeficientů na rozdíl mezi samoabsorpci fotonů v gelu a v matrici při vytváření referenčních srovnávacích spekter (viz dále dle bodu c13)) a referenčních odečítacích spekter (viz dále dle bodu d12)).

Stanovení korekčních koeficientů na rozdíl mezi samoabsorpci fotonů v „referenční“ matrici (pro kterou jsou vytvořena referenční odečítací spektra) a v matrici skutečného vzorku.

c) Vytvoření referenčních srovnávacích spekter

Vytvoření referenčních srovnávacích spekter RN emitujících záření gama vyskytujících se v analyzovaných matricích bez ^{90}Sr a s různou aktivitou ^{90}Sr pro různé matrice (gel, mléko, půda, ...). Spektra RN (kromě ^{90}Sr) lze vytvářet buď přímým měřením jednotlivých matric obsahujících uvažované RN nebo měřením gelových etalonů radionuklidů nebo pomocí MC simulací nebo s využitím kombinace obou metod. Spektrum ^{90}Sr se získá měřením gelového etalonu.

c1) Měřená srovnávací spektra pro daný detektor a geometrii

c11) Měření gelového etalonu ^{90}Sr a převedení spektra na cps/(Bq/kg). Převedení získaného spektra BZ pomocí korekčního koeficientu (získaného v bodě b1)) pro různé matrice. Pro každou matrici vytvoření sady spekter (v cps) s různou aktivitou ^{90}Sr násobením spektra v cps/(Bq/kg) různými aktivitami ^{90}Sr (v Bq/kg).

c12) Měření reálné matrice (týká se především půdy) o skutečné hustotě, složení a obsahu RN U a Th řady, ^{40}K a případně ^{137}Cs a převedení na cps/(Bq/kg); protože RN jsou obvykle ve směsi, bude spektrum vztažené na Bq/kg jen vzhledem k vybranému RN, ostatní nuklidy budou do ROI přispívat počtem impulsů za sekundu (cps) vztažených k aktivitě A_i/A Bq/kg (kde A je aktivita vybraného RN a A_i aktivita postupně každého z „ostatních“ RN). Spektra lze využít jako srovnávací k neznámým vzorkům s obsahem RN v podobném poměru jako ve spektrech srovnávacích. Vybraným RN může být např. ^{226}Ra , popřípadě ^{40}K .

c13) Alternativa k c12). Měření gelového etalonu odděleně s ^{226}Ra , U_{Nat} , ^{232}Th , ^{137}Cs (a případně ^{210}Pb z důvodu možné vyšší aktivity oproti ^{226}Ra v některých matricích) v gelu a ^{40}K v gelu nebo v KCl a přepočítání na cps/(Bq/kg). Převedení získaných spekter pomocí korekčního koeficientu na samoabsorpci (získaného v bodě b2)) pro různé matrice.

c14) Pro každou matrici vytvoření sady spekter (v cps) s různou aktivitou RN emitujících záření gama z bodu c12) nebo c13) násobením spektra v cps/(Bq/kg) různými aktivitami těchto RN v Bq/kg. Toto je možno provést buď předem pro různé kombinace aktivit RN emitujících záření gama nebo až po zjištění aktivit RN emitujících záření gama v neznámém vzorku pro konkrétní situaci.

c15) Pro danou matrici sečtení spekter RN emitujících záření gama pro různé kombinace aktivit (v Bq/kg), pokud už nejsou požadované RN obsaženy v 1 spektru a postupné jejich kombinování (sčítání) se spektry s různou aktivitou ^{90}Sr . Spektra budou v cps.

c2) MC simulovaná srovnávací spektra pro daný detektor a geometrii

Simulovaná spektra jsou automaticky normována na cps/Bq a jsou bez pozadí.

c21) Simulace jednotlivých spekter ^{90}Sr a RN emitujících záření gama (RN U, Th a Ac řady, ^{40}K , ^{137}Cs a případně další RN), které významně přispívají do ROI BZ (v cps/Bq) pro různé matrice.

c22) Přepočítání spekter na cps/(Bq/kg) vynásobením hmotností matrice.

c23) Vynásobení spekter U, Th a Ac řady, ^{40}K , ^{137}Cs a případně dalších aktivitou RN (v Bq/kg) v hodnoceném vzorku (nebo aktivitou obvyklou pro daný typ vzorku). Sečtení spekter. Výsledné spektrum je v cps.

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 9 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

c24) Vytvoření sady spekter vynásobením spektra ^{90}Sr (v cps/(Bq/kg)) aktivitami ^{90}Sr v rozmezí 1 – 1000 kBq/kg (např. postupně 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 500 a 1000 kBq/kg). Výsledná spektra jsou v cps.

c25) Sečtení spektra získaného v bodě c23) odděleně s jednotlivými spektry získanými v bodě c24). Výsledná spektra jsou v cps.

Bod c23) a c25) je vhodné provádět až dle naměřených aktivit RN emitujících záření gama v neznámém vzorku (s podezřením na obsah ^{90}Sr).

d) Vytvoření referenčních odečítacích spekter

Vytvoření referenčních odečítacích spekter RN emitujících záření gama vyskytujících se v analyzovaných maticích (gel, mléko, půda, ...). Spektra RN lze vytvářet buď přímým měřením jednotlivých matic obsahujících uvažované RN nebo měřením gelových etalonů RN nebo pomocí MC simulací nebo s využitím kombinace metod.

d1) Měření odečítací spektra pro daný detektor a geometrii

Postup je podobný jako v bodu c1).

d11) Měření reálné matrice (týká se především půdy) o skutečné hustotě, složení a obsahu RN U a Th řady, ^{40}K a případně ^{137}Cs a převedení na cps/(Bq/kg); protože RN jsou obvykle ve směsi, bude spektrum vztažené na Bq/kg jen vzhledem k vybranému RN, ostatní nuklidy budou do ROI přispívat počtem impulsů za sekundu (cps) vztažených k aktivitě velikosti A_i/A v Bq/kg (kde A je aktivita vybraného RN a A_i aktivita postupně každého z „ostatních“ RN). Spektra lze využít jako srovnávací pro neznámé vzorky s obsahem RN v podobném poměru jako ve spektrech srovnávacích. Vybraným RN může být např. ^{226}Ra , popřípadě ^{40}K .

d12) Alternativa k d11). Měření gelového etalonu odděleně s ^{226}Ra , U_{Nat} , ^{232}Th , ^{137}Cs (a případně ^{210}Pb z důvodu možné vyšší aktivity oproti ^{226}Ra v některých maticích) v gelu a ^{40}K v gelu nebo v KCl a přepočítání na cps/(Bq/kg). Převedení získaných spekter pomocí korekčního koeficientu na samoabsorpci (získaného v bodě b2)) pro různé matrice.

d13) Pro každou matici vytvoření sady spekter (v cps) s různou aktivitou RN emitujících záření gama z bodu d11) nebo d12) násobením spektra v cps/(Bq/kg) různými aktivitami těchto RN v Bq/kg. Toto je možno provést buď předem pro různé kombinace aktivit RN emitujících záření gama nebo až po zjištění aktivit RN emitujících záření gama v neznámém vzorku pro konkrétní situaci.

d14) Pro danou matici sečtení spekter RN emitujících záření gama pro různé kombinace aktivit (v Bq/kg), pokud už nejsou požadované RN obsaženy v 1 spektru. Spektra budou v cps.

d2) MC simulovaná odečítací spektra pro daný detektor a geometrii

Postup je podobný jako v bodu c2).

Simulovaná spektra jsou automaticky normována na cps/Bq a jsou bez pozadí.

d21) Simulace jednotlivých spekter RN emitujících záření gama (RN U, Th a Ac řady, ^{40}K , ^{137}Cs a případně další RN), které významně přispívají do ROI BZ v cps/Bq pro různé matrice.

d22) Přepočítání spekter na cps/(Bq/kg) vynásobením hmotností matrice v dané geometrii.

d23) Vynásobení spekter U, Th a Ac řady, ^{40}K , ^{137}Cs a případně dalších aktivitou RN v hodnoceném vzorku (nebo aktivitou obvyklou pro daný typ vzorku). Sečtení spekter. Výsledné spektrum je v cps.

Bod d23) je vhodné provádět až dle naměřených aktivit RN emitujících záření gama v neznámém vzorku (s podezřením na obsah ^{90}Sr).

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 10 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

e) Analýza neznámého vzorku

V závislosti na požadavcích na analýzu se provádějí kroky vybrané z následujících

- Nabrání spektra neznámého vzorku
- Vizuální prohlídka spektra na přítomnost ^{90}Sr
- Srovnávací vizuální prohlídka spektra na přítomnost ^{90}Sr (porovnáním s referenčními srovnávacími spektry)
- Řádový odhad aktivity s využitím porovnání s referenčními srovnávacími spektry
- Stanovení aktivity RN emitujících záření gama v neznámém vzorku
- Podrobnější prohlídka spektra na přítomnost ^{90}Sr (s odečtem referenčních odečítacích spekter)
- Odhad aktivity s využitím odečtu referenčních odečítacích spekter ostatních RN nebo s využitím prokladu funkcí bez odečtu odečítacích spekter
- Odhad nejistoty aktivity
- Odhad MVA / MDA

5.2 Příprava a měření vzorku

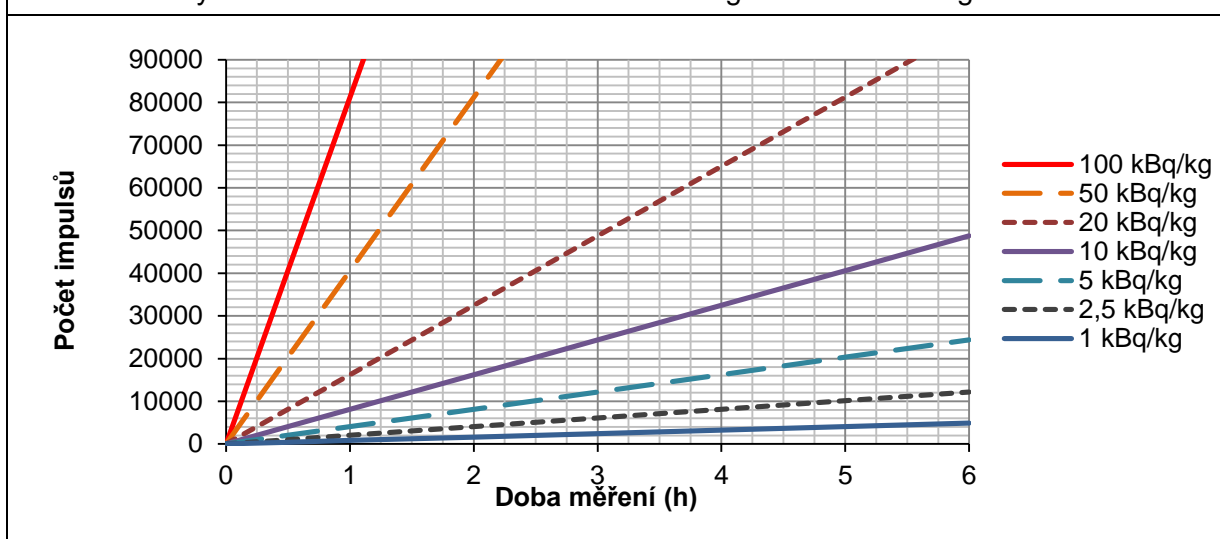
Vzorky se připravují do měřicích nádob standardním způsobem jako v případě přípravy vzorků pro měření pomocí spektrometrie gama, u kterých je podezření na vyšší obsah RN (např. v digestoři na fotomiskách s filtračním papírem).

Měření vzorku umístěného v měřicí nádobě probíhá pomocí HPGe detektoru.

Vhodné měřicí nádoby jsou masťovky, kde je vzorek naplněn do objemu 50 - 200 ml, nebo Marinelliho nádoby.

Délka měření se volí s ohledem na účinnost detektoru a požadovanou citlivost měření. Pro vzorek o objemu 200 ml s hustotou 1 g/cm^3 měřený pomocí 10% HPGe detektoru je počet impulsů v ROI píku BZ 50 – 200 keV v závislosti na době měření uveden na obr. 2.

Obrázek 2 Závislost počtu impulsů BZ ^{90}Sr v oblasti ROI 50-200 keV na délce měření vzorku s různými aktivitami ^{90}Sr v matrici silikonového gelu s hustotou 1 g/cm^3



Poznámka: HPGe detektor typu-p s 10 % rel. účinností, masťovka 200 ml na detektoru.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 11 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

5.3 Detekce přítomnosti ^{90}Sr ve vzorku a řádový odhad aktivity

Spektrum (četnost impulsů) BZ ^{90}Sr resp. ^{90}Y roste od maximální energie fotonů dané maximální energií záření beta 546 keV, resp. 2280 keV směrem k nižším energiím s maximem v oblasti mezi 30 až 150 keV. Poloha maxima závisí na protonovém čísle prvků, z nichž je složen vzorek, a protonovém čísle dalších absorpčních materiálů, kterými BZ prochází.

Pro posouzení přítomnosti ^{90}Sr je nutné předem odečíst spektrum pozadí. V případě vzorku obsahujícího 5 kBq/kg ^{90}Sr měřeného v Pb stínění tloušťky 10 cm bude příspěvek pozadí přibližně 10 %.

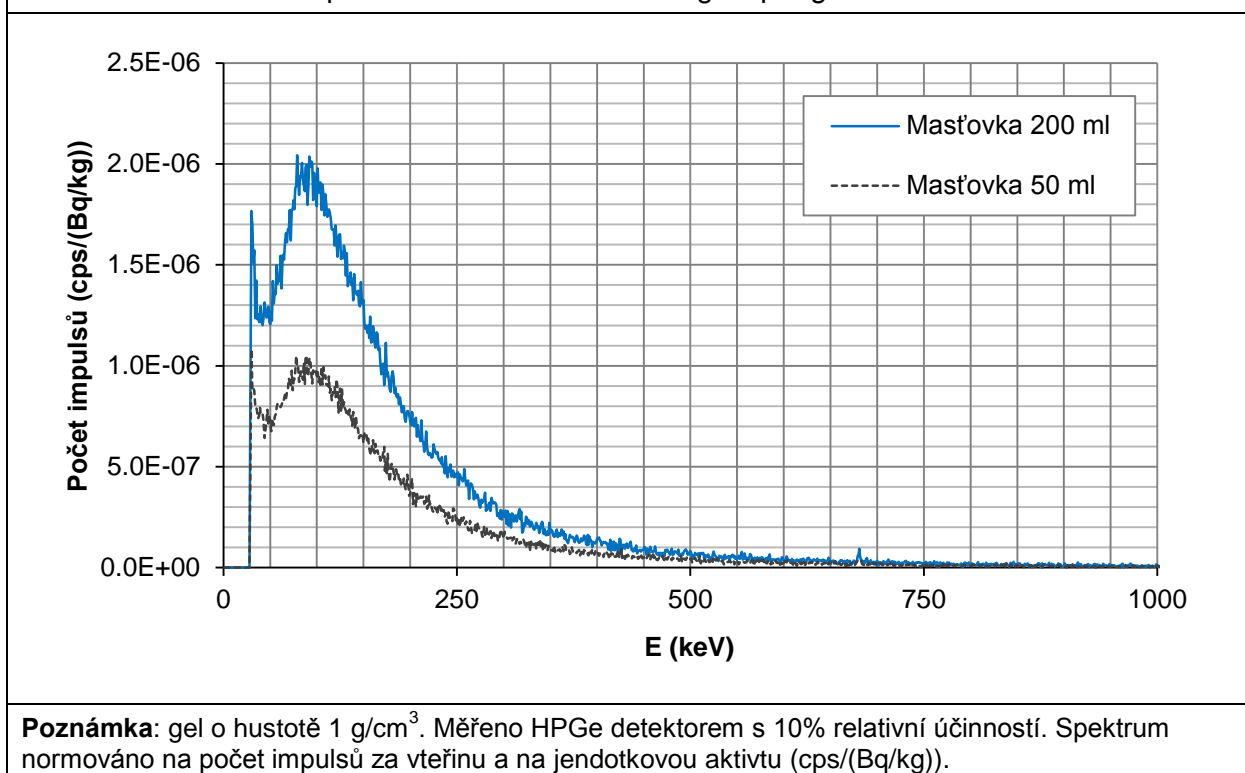
Postup hodnocení spektra z hlediska BZ za účelem stanovení přítomnosti ^{90}Sr ve vzorku zahrnuje následující kroky:

5.3.1 Prohlídka spektra

Vizuální prohlídka spektra slouží pro primární odhad přítomnosti ^{90}Sr ve vzorku.

Při posuzování přítomnosti ^{90}Sr ve vzorku postupujeme od maximální energie, kterou BZ může mít, tj. od 2280 keV. Vyšší energie BZ jsou však velmi slabě zastoupené, proto v případě ^{90}Sr může být růst spektra BZ ve směru klesajících energií patrný až od energie mnohem menší než $E_{\beta\text{max}}$. Nárůst spektra BZ ^{90}Sr bývá zřetelněji pozorovatelný od 500 keV, přičemž prudký nárůst spektra BZ je zřetelný od 250 keV ve směru klesajících energií (viz obr. 3). Důležitá oblast energií z hlediska hodnocení BZ je 50 až 250 keV, kde je intenzita produkovaného BZ nejvyšší. Je-li nárůst impulsů viditelný, lze řádově odhadnout, že ve vzorku bude aktivita ^{90}Sr vyšší než 5 kBq/kg. Příklady spekter RN obsažených v půdě s různým obsahem ^{90}Sr jsou uvedeny v Příloze VI (obr. 8 a 9).

Obrázek 3 Porovnání spekter etalonu ^{90}Sr v matrici gelu pro geometrii masťovka 50 a 200 ml



Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 12 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

5.3.2 Porovnání naměřeného spektra s referenčními srovnávacími spektry a řádový odhad aktivity

Měřený vzorek obecně obsahuje RN přírodních přeměnových řad, ^{40}K , ^{137}Cs a případně další RN emitující záření gama. Pro spolehlivější posouzení přítomnosti BZ ve spektru a pro hrubý odhad aktivity je nutné porovnat spektrum měřeného vzorku s referenčními spektry podobného (referenčního) vzorku, který jednak ^{90}Sr neobsahuje, a který obsahuje různé aktivity ^{90}Sr . Pro porovnávání je nutné mít připravena referenční srovnávací spektra bez obsahu ^{90}Sr a s různým obsahem ^{90}Sr (např. 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 500 a 1000 kBq/kg) pro stejný detektor a geometrii jak byl měřen neznámý vzorek.

Referenční srovnávací spektra je možné získat naměřením reálných matic s různým obsahem RN emitujících záření gama nebo měřením gelových etalonů s RN korigovaných na složení a hustotu pro požadované matrice nebo pomocí MC simulace např. pomocí obecného programu pro výpočet transportu částic MCNP nebo Fluka.

Příprava referenčních srovnávacích spekter (závislost počtu impulsů v cps na energii) je popsána v Příloze VII. Příklad srovnávacích spekter (MC simulovaných) je uveden v Příloze VI (obr. 9).

Porovnat spektrum neznámého vzorku s referenčními srovnávacími spektry lze například pomocí programu pro analýzu spekter Genie 2k (Canberra) nebo lépe lze využít tabulkový procesor Excel nebo jemu podobný.

Aby mohla být spektra snadno porovnána, je nutné, aby složení a hustoty referenčního a hodnoceného vzorku byly srovnatelné.

V programu Genie 2k je k dispozici příkaz COMPARE pro vizuální porovnání spekter, který ale neumožňuje spektra přepočítat na cps. Spektra lze vzájemně porovnávat pomocí zobrazení v módu VFS (vertical full scale).

Pokud chceme porovnat spektra normovaná na cps, je nutné jejich zpracování například v programu Excel. Pro porovnání je potřeba ke kanálu přiřadit energetickou kalibraci a spektra zobrazit v grafu závislosti cps na energii. Dále budeme předpokládat, že se pracuje v prostředí Excel.

Při porovnání spektra neznámého vzorku s referenčními srovnávacími spektry a při řádovém odhadu aktivity se postupuje následovně

- Stanoví se aktivita RN emitujících záření gama v analyzovaném vzorku (v Bq/kg).
- Od spektra analyzovaného vzorku se odečte pozadí.
- Spektrum se převede na cps vydělením počtu impulsů v kanálech délkou měření.
- Stanoví se celkový počet impulsů v ROI BZ (v cps).
- Vybere se sada referenčních srovnávacích spekter s různými aktivitami ^{90}Sr té matrice, která odpovídá nejvíce matici analyzovaného vzorku a jejíž aktivity RN emitujících záření gama jsou nejbližší aktivitě RN v analyzovaném vzorku. Poznámka: sadu lze operativně vytvořit také až následně po stanovení aktivit RN emitujících záření gama.
- Porovná se charakter spektra analyzovaného vzorku se srovnávacím spektrem bez obsahu ^{90}Sr a poté postupně se srovnávacími spektry se vzrůstajícím obsahem ^{90}Sr ; totéž se provádí s celkovým počtem impulsů v ROI. Referenční srovnávací spektra s nejbližší nižší hodnotou cps a nejbližší vyšší hodnotou cps vyznačují interval, ve kterém by se řádově aktivita ^{90}Sr v neznámém vzorku měla nacházet, přičemž je nutno vzít v úvahu rozdílnost složení a hustoty referenčního vzorku a vzorku neznámého a rozdílnost v aktivitách RN emitujících záření gama ve spektru neznámého vzorku a referenčních srovnávacích spekter.

Zde popsané porovnání spekter je prováděno se spektry převedenými na cps. Postup je však možno aplikovat i na spektra bez převodu na cps, tj. spektra v impulsech. Výhodou převedení

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 13 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

na cps je to, že se převádí jen spektrum neznámého vzorku, protože srovnávací spektra jsou již v cps. Při práci s odečítacími spektry (viz dále) je však výhodnější z hlediska přehlednosti pracovat se spektry v impulsích.

Porovnáním spektra měřeného vzorku s referenčním lze v hodnoceném vzorku identifikovat aktivity přibližně od 1 kBq/kg.

Do ROI BZ přispívají svým BZ i RN emitující beta záření doprovázené zářením gama, jejichž aktivity se stanovují pomocí spektrometrie gama (týká se i ^{210}Pb a jeho krátkodobého dceřiného produktu ^{210}Bi , který sice neemituje gama záření, ale maximální energie beta záření je 1161 keV). Při jejich vyšších aktivitách může být charakter oblasti ROI podobný charakteru BZ ^{90}Sr . Nicméně srovnávací spektra s podobným obsahem RN emitujících záření gama jako v analyzovaném vzorku by tento charakter měla mít také. Například BZ ^{214}Pb a ^{214}Bi dceřiných produktů ^{226}Ra v rovnováze přispívá do oblasti ROI spektra těchto RN přibližně 10 %.

Řádový odhad aktivity je vhodný zejména v případech, kdy je potřeba vzorky rychle roztrždit z hlediska obsahu ^{90}Sr . Vhodné třídící intervaly jsou například < 1 kBq/kg, 1-10 kBq/kg, 10-100 kBq/kg, 100-1000 kBq/kg a > 1000 kBq/kg.

5.3.3 Potvrzení přítomnosti ^{90}Sr ve vzorku

Pokud je ve spektru vzorku ŽP identifikován pík BZ a není způsoben některým RN emitujícím i záření gama, je velmi pravděpodobné, že tento pík pochází od ^{90}Sr . Ostatní zářiče beta (s poločasem přeměny v řádu let a maximální energií záření beta větší než 400 keV), kterým by mohl být pík BZ přisuzován, jsou štěpné produkty ^{85}Kr , $^{113\text{m}}\text{Cd}$ a ^{115}In . ^{85}Kr lze však ve spektru identifikovat pomocí píku úplné absorpce záření gama s energií 514 keV ($I_\gamma = 0,0043$) a $^{113\text{m}}\text{Cd}$ pomocí píku s energií 263,7 keV ($I_\gamma = 0,0002$). Vzhledem k tomu, že Kr je plyn, mohl by být přítomen pouze ve speciálním sorbentu či ve vzorku (stlačeného) plynu a ne v běžných vzorcích. ^{115}In ($E_{\beta\text{max}} = 496$ keV) lze vyloučit posouzením maximální energie záření beta.

Jediný další čistý zářič beta, který má vysokou maximální energii záření beta, je ^{32}P ($E_{\beta\text{max}} = 1711$ keV), ale o jeho přítomnosti lze obvykle rozhodnout díky jeho krátkému poločasu přeměny 14 dnů a díky úvaze, zda se v dané matici může vyskytovat.

Pokud je vzorek měřen pomocí oknového HPGe detektoru, lze přítomnost ^{90}Sr v měřeném vzorku potvrdit pomocí linek charakteristického záření yttria a zirkonu (^{90}Zr je dceřiným produktem ^{90}Y). Nejintenzivnější linky charakteristického záření se ve spektru vyskytují v oblasti od 14 keV do 18 keV. Linky charakteristického záření jsou však detekovatelné až od jednotek, v krajním případě desetin MBq/kg ^{90}Sr ve vzorku. Seznam linek charakteristického záření je uveden v Příloze II.

5.4 Odečet spekter radionuklidů

Pokud je potřeba ve vzorku posoudit přítomnost ^{90}Sr s aktivitou menší než 1 kBq/kg, je nutné odečíst od celkového spektra příspěvky nejen od pozadí, ale i od ostatních RN emitujících záření gama. K tomu slouží referenční odečítací spektra, jejichž postup získání je uveden v Příloze VII.

Pro posouzení přítomnosti ^{90}Sr a i dále při odhadu jeho aktivity se lze sice zabývat jen počty impulsů v oblasti ROI, ale výhodnější je z důvodu neustálého přehledu pracovat i s celými spektry nebo počty impulsů v jednotlivých kanálech širší energetické oblasti než je ROI. Při odečtu celého spektra může díky nepřesnostem (pokud se provádějí korekce, jež jsou definovány pro oblast ROI rozšířeny na celé spektrum) a statistickým fluktuacím v počtech impulsů dojít k tomu, že počet impulsů po odečtení v některé části spektra bude záporný.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 14 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Referenční odečítací spektra musí být připravena pro RN obvykle se vyskytující v hodnoceném vzorku. Impulzy musí být v jednotkách cps/(Bq/kg). Jedná se o spektra přírodních přeměnových řad (U, Th, Ac), ^{40}K , ^{137}Cs a případně další.

Referenční odečítací spektra je možné získat naměřením reálných matic s různým obsahem RN emitujících záření gama nebo měřením gelových etalonů s RN korigovaných na složení a hustotu pro požadované matrice nebo pomocí MC simulace např. pomocí obecného programu pro výpočet transportu částic MCNP nebo Fluka.

Pokud je v měřeném vzorku rovnováha RN v přírodní řadě zachována, je odečet jednodušší a rychlejší. Rovnováha U-řady může být porušena např. v případě kontaminace půdy ^{226}Ra nebo v případě velké emanace radonu nebo v případě vysoké aktivity ^{210}Pb , a tím i jeho krátkodobého dceřiného produktu ^{210}Bi , který sice neemituje gama záření, ale maximální energie beta záření je 1161 keV. Rovnováha Th-řady v půdě bývá většinou zachována. Vliv Ac-řady na oblast ROI je vzhledem k vlivu U-řady většinou zanedbatelný (poměr aktivity Ac-řady a U-řady je v přírodní směsi uranu za stavu rovnováhy řady 0,045).

Pokud se referenční spektra získají měřením, je nutné vždy od nich odečítat spektrum pozadí. Problémem u měření získaných referenčních spekter vzorků půd je, že referenční vzorky obsahují aktivity RN v určitém poměru, který může být jiný než poměr RN v měřeném vzorku. Proto je nutné mít větší množství takových spekter s různými poměry RN, aby bylo možno lépe vybírat nejvhodnější kombinaci aktivit.

V případě simulovaných referenčních odečítacích spekter je vhodné mít spektra RN přírodních přeměnových řad připravena jak pro jednotlivé RN, tak ve třech spektrech odpovídajících U, Th a Ac řadě v rovnováze. Simulovaná spektra neobsahují pozadí.

Při přípravě odečítacích spekter se postupuje následovně

- Stanoví se aktivita RN emitujících záření gama v analyzovaném vzorku (v Bq/kg).
- Od spektra analyzovaného vzorku se odečte pozadí.
- Stanoví se celkový počet impulsů v ROI BZ.
- Vybere se sada referenčních odečítacích spekter RN emitujících záření gama (v cps/(Bq/kg)) matrice, která nejvíce odpovídá matici analyzovaného vzorku.
- Počty impulsů RN emitujících záření gama (v cps/(Bq/kg)) v odečítacích spektrech se vynásobí aktivitami RN v analyzovaném vzorku (v Bq/kg), pokud již taková spektra nebyla připravena dopředu. Pokud byla připravena předem, bude aktivita v odečítacích spektrech odpovídat aktivitě analyzovaného vzorku jen přibližně. Stanoví se celkový počet impulsů v ROI BZ odečítacích spekter (v cps). Získané hodnoty se vynásobí poměrem hmotnosti analyzovaného vzorku a hmotnosti matrice referenčních odečítacích spekter. Počet impulsů je v cps.
- Počty impulsů v cps v ROI odečítacích spekter (a i celá odečítací spektra) se přepočítají na délku měření vzorku. Výsledek bude přímo v počtech impulsů.

Přepočet na délku měření vzorku a aktivitu vzorku se provede dle vztahu

$$N_i = N_i^{\text{St}} \cdot A_i \cdot \frac{m_{\text{Vz}}}{m_i^{\text{St}}} \cdot t \quad (1)$$

kde

N_i je počet impulsů v ROI referenčního spektra i-tého nuklidu (nebo sečtených spekter více nuklidů) přepočítaný na délku měření, jeho hmotnostní aktivitu a hmotnost vzorku měřeného v dané geometrii,

N_i^{St} je počet impulsů v cps v ROI referenčního spektra i-tého nuklidu (nebo sečtených spekter více nuklidů) vztažený na jednotkovou hmotnostní aktivitu

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 15 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

(cps/(Bq/kg)), přičemž referenční spektrum je již korigováno na rozdílnost složení a hustoty neznámého vzorku od vzorku, z kterého spektrum pochází nebo je tato rozdílnost zahrnuta do nejistoty stanovení

- A_i je hmotnostní aktivita i -tého nuklidu ve vzorku (nebo více nuklidů, pokud mají stejnou aktivitu), který je nutno odečíst (Bq/kg),
- m_{Vz} je hmotnost vzorku (kg) měřeného ve stejné geometrii jako standard; hmotnost se může lišit od m_i^{St} , neboť navážka měřeného vzorku nemusí být stejná, jako byla u standardu, i kdyby se vzorek a standard plně shodovaly v maticích
- m_i^{St} je hmotnost standardu (kg) i -tého nuklidu, které odpovídá počet impulsů N_i^{St} ,
- t je délka měření vzorku (s).

Od počtu impulsů v ROI spektra analyzovaného vzorku se odečte počet impulsů v ROI spektra pozadí přepočteného na délku měření vzorku a připravené počty impulsů v ROI referenčních odečítacích spekter. V ideálním případě se získá čistý počet impulsů v ROI odpovídající aktivitě ^{90}Sr (viz vztah (3a) v kapitole 5.5.1). Vztah (1) lze aplikovat i na celé spektrum (jednotlivě na všechny kanály). Vzhledem k nepřesnostem a statistickým fluktuacím mohou některé kanály obsahovat záporný počet impulsů.

Tímto postupem lze ve vzorku stanovit přítomnost ^{90}Sr s aktivitou menší než 1 kBq/kg.

5.5 Stanovení aktivity ^{90}Sr pomocí spektrometrie gama

5.5.1 Stanovení aktivity ^{90}Sr ze spektra brzdného záření

Aktivita A (Bq/kg) ^{90}Sr , stanovená ze spektra BZ, se vypočte podle vztahu

$$A = \frac{N}{I_\beta \cdot \varepsilon_\beta \cdot t \cdot m_{Vz} \cdot C} \quad (2)$$

$$N = N_{Tot} - N_B - \sum_{i=1}^K N_i \quad (3a)$$

$$N_B = \frac{t}{t_0} \cdot N_0 \quad (3b)$$

kde

- N je počet impulsů v ROI BZ po odečtení pozadí v ROI N_B (naměřeného pro daný detektor a přepočteného na délku měření vzorku) a po odečtení počtu impulsů v ROI pocházejících od ostatních RN emitujících záření gama přítomných v měřeném vzorku N_i ,
- N_{Tot} je celkový počet impulsů v ROI BZ neznámého vzorku,
- N_B je počet impulsů v ROI BZ z měření pozadí přepočtený na délku měření vzorku,
- N_0 je počet impulsů v ROI BZ z měření pozadí za dobu měření pozadí,
- N_i je počet impulsů v ROI BZ i -tého RN emitujícího záření gama, viz vztah (1),
- I_β je součet intenzit záření beta ^{90}Sr a ^{90}Y , tj. zastoupení přeměny ^{90}Sr a ^{90}Y emisí záření beta (v případě rovnováhy ^{90}Sr a ^{90}Y $I_\beta = 2$),

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 16 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

ε_{β} je účinnost detekce BZ ^{90}Sr v ROI v gelovém etalonu,

t je délka měření vzorku (s),

t_0 je délka měření pozadí (s),

m_{vz} je hmotnost vzorku (kg),

C je korekční koeficient účinnosti na složení a hustotu vzorku rozdílné od etalonu (viz [tab. 1](#) a podrobněji v [tab. 9](#) v Příloze III).

Šířka ROI píku BZ, pro kterou je stanovován počet impulsů N , musí odpovídat zvolené šířce ROI, pro kterou byla stanovena detekční účinnost BZ ε_{β} při kalibraci spektrometru.

Pokud je měřený vzorek odlišný složením a hustotou od kalibračního vzorku, je nutné provést korekci účinnosti detekce BZ (v které je obsažena i pravděpodobnost produkce BZ) na složení a hustotu vzorku. Korekční koeficienty „ C “ na složení a hustotu vzorku odlišné od etalonu pro oblast ROI 50 - 200 keV a geometrii masťovka 50 ml na detektoru jsou uvedeny v [tab. 1](#) (podrobněji [tab. 9](#) Přílohy III). Rozsah koeficientů je od 0,81 pro sušené mléko až po 1,27 pro suchý písek. Pokud se korekce nepoužije, tak u sušeného mléka může dojít k podhodnocení aktivity přibližně o 20 %, pokud se nepoužije u hlíny či písku, může dojít k nadhodnocení aktivity až o 1/3.

Tabulka 1 Korekční koeficienty pro přepočítání pravděpodobnosti vzniku a účinnosti detekce BZ na složení a hustotu vzorku odlišné od etalonu pro oblast ROI 50 - 200 keV a geometrii masťovka 50 ml na detektoru

Materiál	Hustota (g/cm ³)	Korekční faktor
Gel (etalon)	0,985	1,00
Voda	1,000	0,83
Mléko tekuté	1,033	0,83
Mléko sušené	0,470	0,81
Maso	1,052	0,77
Půda	1,100	1,19
	1,800	1,22
Písek	2,300	1,27

Poznámky: Korekční koeficienty byly vypočítány vzhledem k etalonu (silikonový gel). Hodnoty platí pro půdu a písek v sušeném stavu, maso bez obsahu tuku v nativním stavu. Byly získány na základě MC simulace pro HPGe detektor typu-p o rel. účinnosti 10 % jako poměr impulsů v oblasti ROI 50 - 200 keV daného materiálu a gelu a jsou platné pro všechny detektory tohoto typu.

5.5.2 Odhad nejistoty stanovení aktivity ^{90}Sr

Nejistota σ_A (Bq/kg) stanovení aktivity A (Bq/kg) se získá metodou šíření chyb ze vztahu (2). Platí pro ni vztah (nejistoty délky měření a hmotnosti jsou zanedbatelné)

$$\sigma_A = A \sqrt{\left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\varepsilon}}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_C}{C}\right)^2 + \sum_i \left(\frac{\sigma_{Ri}}{100}\right)^2} \quad (4)$$

kde

σ_N je nejistota stanovení počtu impulsů v ROI; odhad je uveden níže

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 17 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

σ_ϵ je nejistota stanovení účinnosti detekce BZ etalonu ⁹⁰Sr v ROI; lze ji odhadnout na 10%

σ_C je nejistota stanovení korekčního faktoru C;

σ_{Ri} je odhad dalších nejistot (v %), a to

- nejistoty dané neodečtením RN emitujících záření gama přispívajících do spektra BZ ⁹⁰Sr, pokud takové zůstaly; velikost příspěvku těchto RN lze odhadnout z [obr. 10 Přílohy VI](#),
- nejistoty dané přípravou vzorku (nehomogenita),

Při nejistotě stanovení aktivity RN emitujících záření gama do 20 % v hodnoceném spektru (RN, jejichž spektra se odečítají), lze pro nejistotu σ_N psát (podrobněji viz [Příloha IV](#))

$$\sigma_N = \sqrt{N_{Tot} + \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 N_0 + 0,08 \sum_{i=1}^K N_i^2} \quad (5)$$

kde

N_i a další proměnné jsou popsány pod vztahem (3).

Pokud se nepodaří postihnout všechny příspěvky pro odečet z oblasti ROI, bude aktivita nadhodnocena.

5.5.3 Proklad spektra BZ a stanovení aktivity ⁹⁰Sr z prokladu

V případě potřeby rychlého stanovení aktivity u vzorků s průměrným obsahem přírodních RN a obsahem ⁹⁰Sr ≥ 20 kBq/kg (odhadnutým řádově dle [části 5.3.2](#)) se nabízí možnost prokladu spektra BZ vhodnou funkcí bez nutnosti odečtu spekter ostatních RN z celkového spektra. Prokladem se sice neodečtou příspěvky BZ ostatních RN, ale odříznou se příspěvky píků úplné absorpce.

Příspěvek ostatních RN obsažených v běžné půdě představuje např. ve vzorku s aktivitou 20 kBq/kg ⁹⁰Sr 10 % impulsů v oblasti ROI spektra BZ ⁹⁰Sr. Příklady jsou uvedeny v [Příloze VI](#) (viz [obr. 11](#) a [obr. 12](#)).

Postup je následující

- Spektrum BZ se proloží polynomiální funkcí podle vztahu (6)

$$s(E) = \exp\left(\sum_{i=0}^n a_i \cdot E^i\right) \quad (6)$$

kde

$s(E)$ je funkce prokladu spektra BZ pro danou ROI,

E je energie fotonového záření (keV),

a_i jsou koeficienty prokladu; i je od 0 do n (vhodné $n = 8$).

Stupeň polynomu je doporučeno volit 8 a spektrum BZ pro proklad brát od 40 do 500 keV, resp. od 20 do 500 keV pro oknový HPGe detektor.

K prokladu spektra BZ lze použít například volně dostupný program Gnuplot. Jako data se zadají dvojice - energie a jí odpovídající logaritmus počtu impulsů za vteřinu (cps).

- Aktivita se vypočte podle vztahu

$$A = \frac{S}{I_\beta \cdot \epsilon_\beta \cdot t \cdot m_{Vz} \cdot C} \quad (7)$$

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 18 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

kde

s je integrál funkce s(E) prokladu spektra BZ přes danou ROI (tzn. součet počtu impulsů získaných z prokladu).

Ostatní proměnné jsou popsány pod vztahem (3).

6 STANOVENÍ MINIMÁLNÍ VÝZNAMNÉ A MINIMÁLNÍ DETEKOVATELNÉ AKTIVITY

Postup stanovení minimální významné aktivity (MVA) a minimální detekovatelné aktivity (MDA) je podrobně popsán v Příloze V. Hodnota MDA závisí na délce měření vzorku, detekční účinnosti a počtu impulsů v ROI ve spektru pozadí a ve spektru vzorku.

6.1 Odhad MVA a MDA ze spektra BZ

Pokud jsou ve spektru přítomny jiné RN emitující záření gama, ale nejistota stanovení jejich aktivity je menší než 20 %, stanoví se minimální významná aktivita (MVA) ze vztahu

$$MVA = \frac{k \cdot \sqrt{\frac{t}{t_0} N_0 + \sum_{i=1}^K N_i + \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 N_0 + 0,08 \sum_{i=1}^K N_i^2}}{\varepsilon_\beta \cdot I_\beta \cdot t \cdot m_{Vz} \cdot C} \quad (8)$$

kde

MVA je minimální významná aktivita ⁹⁰Sr (Bq/kg),

k je kvantil jednostranného normálního rozdělení (pro hladinu významnosti 5 % k = 1,645),

N₀ je počet impulsů v ROI BZ z měření pozadí za dobu měření pozadí,

N_i je počet impulsů v ROI referenčního spektra i-tého nuklidu (nebo sečtených spekter více nuklidů) přepočítaný na délku měření a hmotnost vzorku,

I_β je součet intenzit záření beta ⁹⁰Sr a ⁹⁰Y, tj. zastoupení přeměny ⁹⁰Sr a ⁹⁰Y emisí záření beta (v případě rovnováhy ⁹⁰Sr a ⁹⁰Y I_β = 2),

ε_β je účinnost detekce BZ pro gelový etalon,

t je délka měření vzorku (s)

t₀ je délka měření pozadí (s),

m_{Vz} je hmotnost vzorku (kg),

C je korekční faktor na složení a hustotu vzorku rozdílné od etalonu. Korekční faktory pro půdu, vodu a mléko jsou uvedeny v tab. 1 (podrobněji v tab. 9 Přílohy III).

Pokud ve spektru nejsou přítomny jiné RN emitující záření gama nebo jen v zanedbatelné míře vzhledem k velikosti pozadí, MVA se odhadne ze vztahu

$$MVA_0 = \frac{k \cdot \sqrt{\frac{t}{t_0} N_0 + \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 N_0}}{\varepsilon_\beta \cdot I_\beta \cdot t \cdot m_{Vz} \cdot C} \quad (9)$$

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 19 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Vztah se redukuje pouze na počty impulsů v ROI pozadí, tj. jedná se o „ideální“ (nejnižší) hodnotu MVA.

Pokud je navíc délka měření vzorku stejná jako délka měření pozadí, tj. $t = t_0$, vztah (9) se zjednodušuje na

$$MVA_0 = \frac{k \cdot \sqrt{2N_0}}{\varepsilon_\beta \cdot I_\beta \cdot t \cdot m_{VZ} \cdot C} = \frac{k \cdot \sqrt{2N_B}}{\varepsilon_\beta \cdot I_\beta \cdot t \cdot m_{VZ} \cdot C} \quad (10)$$

Pokud je délka měření vzorku mnohem kratší než délka měření pozadí, tj. $t \ll t_0$, vztah (9) se zjednodušuje na

$$MVA_0 = \frac{k \cdot \sqrt{\frac{t}{t_0}} N_0}{\varepsilon_\beta \cdot I_\beta \cdot t \cdot m_{VZ} \cdot C} = \frac{k \cdot \sqrt{N_B}}{\varepsilon_\beta \cdot I_\beta \cdot t \cdot m_{VZ} \cdot C} \quad (11)$$

MDA se z MVA stanoví z přibližného vztahu

$$MDA = 2 \cdot MVA \quad (12)$$

Pro přepočítání MDA (MVA) na jinou délku měření se použije přibližný vztah

$$MDA_2 \approx \sqrt{\frac{t_1}{t_2}} MDA_1 \quad (13)$$

kde t_i je délka měření vzorku.

6.2 MDA stanovená ze spektra BZ pro typické hodnoty

Příklad odhadu MDA ^{90}Sr z oblasti píku BZ (ROI 50 – 200 keV) ve vzorku půdy pro HPGe detektor s 10% relativní účinností a pro různé geometrie jsou shrnuty v [tab. 2](#).

Odhady MDA byly provedeny na základě měření spektra pozadí (MDA_0) a na základě měření spektra vzorku (MDA_{BZ}), kde není BZ ^{90}Sr pozorovatelné. Aktivita přírodních RN ve vzorku byla 17 Bq/kg (U řada), 6,3 Bq/kg (Th řada) a 97 Bq/kg ^{40}K . Aktivita ^{137}Cs byla 0,6 Bq/kg.

Tabulka 2 Odhad MDA ^{90}Sr v půdě v ROI píku BZ pro HPGe detektor s 10% rel. účinností

Geometrie	Mastřovka 50 ml		Mastřovka 200 ml	
	MDA ₀ (Bq/kg)	MDA _{VZ} (Bq/kg)	MDA ₀ (Bq/kg)	MDA _{VZ} (Bq/kg)
10 minut	1400	4000	690	2800
30 minut	760	2300	390	1600
1 hodina	530	1600	280	1200
5 hodin	240	710	130	500
1 den	110	330	60	230
2 dny	80	230	40	160
5 dnů	50	150	30	110

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 20 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Poznámka: MDA_0 (dle vztahu (10) a (12)) je MDA stanovená na základě spektra pozadí a MDA_{VZ} (dle vztahu (8)) je MDA stanovená na základě spektra vzorku s obsahem přírodních RN a ^{137}Cs (17 Bq/kg U-řada, 6,3 Bq/kg Th-řada, 97 Bq/kg ^{40}K). ROI piků BZ 50 – 200 keV.

7 VYJADŘOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Aktivita se vyjadřuje v jednotce Bq/kg, resp. Bq/l v případě stanovování aktivity ve vodě a tekutém mléku, a udává se spolu s kombinovanou standardní nejistotou.

Výsledkem může být i interval aktivit ^{90}Sr , ve kterém by se skutečná aktivita vzorku měla nacházet; v takovém případě se nejistota neudává.

Výsledkem může být i konstatování, že pík BZ ve spektru není patrný.

Je-li stanovena hodnota aktivity menší než minimální významná aktivita (MVA), uvede se jako výsledek stanovení hodnota MVA. Lze také použít vyjádření výsledku stanovení v hodnotě minimální detekovatelné aktivity (MDA).

MVA resp. MDA se vyjadřuje jako hmotnostní, resp. objemová aktivita v jednotkách Bq/kg, Bq/l při hladině významnosti 5 %.

Z důvodu jednoznačnosti je vždy nutno poznamenat, zda uváděná hodnota má význam MVA nebo MDA.

NOVOST POSTUPŮ

Metoda detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr spektrometrií gama měřením BZ pomocí HPGe detektoru nebyla dosud v laboratorích spektrometrie gama začleněných v síti laboratoří Radiální monitorovací sítě ČR zavedena.

POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY

Metodiku uplatní laboratoře spektrometrie gama začleněné v síti laboratoří Radiální monitorovací sítě ČR v situacích, kdy je potřeba rychle rozhodnout o (ne)přítomnosti vyšší aktivity ^{90}Sr ve vzorku a případně provést odhad její hodnoty. Může se jednat například o starou zátěž (v minulosti byly nalezeny půdy kontaminované ^{90}Sr) nebo o záměrný rozptýl radioaktivní látky či podezření na něj apod. Také v případě vážné havárie JE mohou být vyšší aktivity ^{90}Sr nacházeny ve vzorcích z jejího blízkého okolí. Odhad aktivity v takových situacích je důležitý pro volbu způsobu přípravy vzorků pro přesná měření, aby nebyla kontaminací ohrožena laboratoř či kroskontaminací ostatní vzorky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Mietelski, J.W., Meczynski, W.: Application of a low-background gamma-ray spectrometer to the determination of ^{90}Sr . App Radiation Isotopes 2000, 53: 121-6.
- [2] Gilmore, G.: Practical Gamma-Ray Spectrometry – 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2008, Ltd. ISBN: 978-0-470-86196-7
- [3] X-3 Monte Carlo Team, MCNP5, Monte Carlo N-Particle transport code, 2005
- [4] Laboratoire National Henri Becquerel, <http://www.nucleide.org/>
- [5] Chu, S.Y.F., Ekström, L.P., Firestone, R.B.: The Lund/LBNL Nuclear Data Search, <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 21 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

- [6] Currie, L.A.: Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry. Anal. Chem., 40 (3), 1968, s. 586–593.
- [7] Strontium-90, Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Strontium-90>
- [8] Rulík, P.: Studium umělých radionuklidů v životním a pracovním prostředí, Závěrečná zpráva úkolu institucionálního výzkumu SÚRO 2000-2004, část III, 2005
- [9] Skřivanová, E.: Biologie potravin a surovin živočišného původu, http://biomikro.vscht.cz/vyuka/b2/Biologie_potravin_a_surovin_zivocisneho_puvodu.pdf
- [10] XCOM, Photon Cross Sections Database. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html> (cit. duben 2015)
- [11] R.G. Jaeger: Engineering Compendium on Rad.Shield., Nuclear Instruments and Methods (1983)
- [12] Soil Moisture Classification, terraGIS, http://www.terragis.bees.unsw.edu.au/terraGIS_soil/sp_water-soil_moisture_classification.html

SEZNAM SOUVISEJÍCÍCH PUBLIKACÍ A VÝSTUPŮ

- [1] Stanovení radionuklidů spektrometrií záření gama s vysokým rozlišením. Standardní zkušební postup SZP 11. SÚRO Praha, 2014.

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 22 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

PŘÍLOHA I: Základní pojmy

Brzdné záření

Brzdné záření (BZ) je fotonové záření, které vzniká při pohybu rychlých nabitých částic látkou, kdy vlivem Coulombické interakce především s jádry atomů (v menší míře i s elektronovými obaly) dochází ke změnám rychlostí a směru pohybu částic vedoucí k emisi elektromagnetického záření se spojitým spektrem. Ze zákonů elektrodynamiky plyne, že intenzita BZ je tím větší, čím je částice lehčí a čím je vyšší protonové číslo látky, kterou prochází. Proto je nejvýznamnější u elektronů pohybujících se v poli „těžkých“ jader. Na brzdné záření se v látce mění jen poměrně malá část (pouze cca 1%) původní kinetické energie dopadající částice. Většina energie se mnohonásobným Coulombickým rozptylem nakonec přenáší na kinetickou energii atomů prostředí, tj. projevuje se jako teplo. Účinnost vzniku BZ (počet fotonů/elektron) roste s energií dopadajících elektronů. Celková energetická účinnost (poměr celkové energie emitovaných fotonů k energii dopadajících elektronů) je však pro vyšší energie nižší (vzhledem k vyššímu procentuálnímu zastoupení nízkoenergetických fotonů).

Čistý zářič beta

Čistý zářič beta je takový zářič beta, který nemá ve spektru zastoupené záření gama nebo X nebo jen tak slabě zastoupené, že je nelze za běžných podmínek detekovat.

Masťovka

Masťovka je válcová nádoba o průměru 6,5 cm a výšce 9 cm pro měření vzorků na HPGe detektoru používaná standardně v laboratoři SÚRO. V SÚRO Praha se masťovky standardně plní vzorky do objemu 50, 100, 200 a 275 ml (plná po okraj) o výšce vzorku 1,6 cm, 3,2 cm, 6,3 a 8,7 cm.

Šířka kanálu

Závislost energie na čísle kanálu mnohakanálového spektrometru je obvykle dobře aproximovatelná kvadratickou funkcí $y = ax^2 + bx + c$, kde y je energie (keV) příslušná kanálu číslo x . Protože závislost je přibližně lineární, udává charakter průběhu především lineární člen. Šířkou kanálu je myšlena hodnota tohoto členu; v této metodice je jeho velikost nastavena na $b = 0,75$ keV/kanál.

Státní ústav radiacní ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 23 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

PŘÍLOHA II: Charakteristika radionuklidů ^{90}Sr , ^{90}Y a dalších s emisí beta

Hmotnostní aktivita ^{90}Sr je $5,103 \times 10^{12}$ Bq/g a ^{90}Y $2,012 \times 10^{16}$ Bq/g.

Maximální energie záření beta ^{90}Sr a ^{90}Y je uvedena v [tab. 3](#).

^{90}Sr není obsaženo v přírodní směsi stroncia. Přírodní směs obsahuje pouze stabilní izotopy ^{84}Sr (0,56 %), ^{86}Sr (9,86 %), ^{87}Sr (7,00 %) a ^{88}Sr (82,58 %). Koncentrace přírodního stroncia v zemské kůře se pohybuje v rozmezí 50 – 2000 ppm. Průměrná koncentrace stroncia v půdě je 200 ppm, yttria 50 ppm a zirkonu 300 ppm. Vápencové půdy nebo zemědělsky obdělávané půdy, hnojené fosfátovými hnojivy, mohou mít obsah stroncia vyšší (průměr kolem 600 ppm).

Průměrný obsah ^{90}Sr v půdách v ČR je 2 Bq/kg [8], což odpovídá koncentraci 0,392 fg/g ($3,92 \times 10^{-16}$ g ^{90}Sr v 1 g půdy).

V [tab. 4](#) až [6](#) jsou uvedeny linky charakteristického záření stroncia, yttria a zirkonu. Pravděpodobnost jejich vzniku je velice nízká, neboť β^- přeměna obvykle probíhá do základního stavu dceřiného jádra. Vakance v elektronovém obalu nevznikají vnitřní konverzí ani elektronovým záchytem, ale jen prostřednictvím vnitřního brzdného záření nebo interakcí β^- záření samotného s elektronovým obalem; případně prostřednictvím fotonů emitovaných jinými atomy.

Přehled čistých zářičů beta je shrnut v [tab. 7](#).

Tabulka 3 Energie záření beta ^{90}Sr a ^{90}Y

Beta zářič	Poločas přeměny	$E_{\beta\text{max}}$ (keV)	I_{β} (%)	Přeměna	Gama
Sr 90	28,79 let	546,0	100	β^-	ne
Y 90	64 hodin (2,67 dne)	93,8	1,4E-06	β^-	2186,2 keV (velmi slabé zastoupení)
		519,4	0,0115	β^-	
		2280,1	99,9885	β^-	

Tabulka 4 Linky charakteristického záření stroncia

Stroncium (Z=38)		Intenzita na 100 vakancí ve slupce			
Linka	E (keV)	K-slupka	L ₁ -slupka	L ₂ -slupka	L ₃ -slupka
Sr L _γ	1,582	0,069	0,06	0,013	0,11
Sr L _h	1,649	0,04	0,03	0,11	
Sr L _{α2}	1,805	0,16	0,14	0,029	0,25
Sr L _{α1}	1,806	1,4	1,2	0,26	2,2
Sr L _{β1}	1,872	0,81	0,62	2,3	
Sr L _{β6}	1,902	0,0079	0,0069	0,0015	0,0125
Sr L _{β4}	1,937	0,022	0,18		
Sr L _{β3}	1,947	0,032	0,26		
Sr L _{γ2}	2,196	0,0027	0,022		
Sr L _{γ3}	2,196	0,0061	0,049		
Sr K _{α3}	13,888	0,000225			
Sr K_{α2}	14,098	20,5			
Sr K_{α1}	14,165	39,4			
Sr K_{β3}	15,825	2,93			
Sr K_{β1}	15,836	5,68			
Sr K _{β5}	15,971	0,0217			
Sr K _{β2}	16,085	1,01			
Sr K _{β4}	16,105	0,172			

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 24 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 5 Linky charakteristického záření yttria

Ytrium (Z=39)		Intenzita na 100 vakancí ve slupce			
Linka	E (keV)	K-slupka	L ₁ -slupka	L ₂ -slupka	L ₃ -slupka
Y L _I	1,686	0,072	0,064	0,014	0,115
Y L _h	1,762	0,041	0,03	0,12	
Y L _{α2}	1,92	0,17	0,15	0,034	0,27
Y L _{α1}	1,923	1,5	1,3	0,3	2,4
Y L _{β1}	1,996	0,86	0,64	2,5	
Y L _{β6}	2,035	0,0088	0,0077	0,0018	0,014
Y L _{β4}	2,06	0,025	0,21		
Y L _{β3}	2,072	0,035	0,3		
Y L _{β2}	2,078	0,0044	0,0038	0,0009	0,0069
Y L _{γ1}	2,153	0,012	0,0089	0,034	
Y L _{γ3}	2,347	0,0066	0,056		
Y L _{γ2}	2,347	0,0031	0,026		
Y K _{α3}	14,666	0,00027			
Y K_{α2}	14,883	21,0			
Y K_{α1}	14,958	40,4			
Y K_{β3}	16,726	3,06			
Y K_{β1}	16,738	5,93			
Y K _{β5}	16,88	0,0246			
Y K _{β2}	17,013	1,14			
Y K _{β4}	17,036	0,193			

Tabulka 6 Linky charakteristického záření zirkonu

Zirkon (Z=40)		Intenzita na 100 vakancí ve slupce				Intenzita (%) „záření X ⁹⁰ Y“
Linka	E (keV)	K-slupka	L ₁ -slupka	L ₂ -slupka	L ₃ -slupka	
Zr L _I	1,792	0,078	0,068	0,016	0,124	3,10E-06
Zr L _h	1,876	0,041	0,031	0,119		1,60E-06
Zr L _{α2}	2,04	0,19	0,16	0,039	0,29	7,40E-06
Zr L _{α1}	2,042	1,66	1,5	0,35	2,6	6,70E-05
Zr L _{β1}	2,124	0,9	0,68	2,6		3,50E-05
Zr L _{β6}	2,171	0,01	0,0088	0,0021	0,0159	4,00E-07
Zr L _{β4}	2,187	0,027	0,24			2,10E-06
Zr L _{β3}	2,201	0,038	0,34			3,00E-06
Zr L _{β2}	2,219	0,0116	0,0103	0,0025	0,019	4,70E-07
Zr L _{γ1}	2,304	0,03	0,022	0,086		1,20E-06
Zr L _{γ3}	2,503	0,0072	0,065			2,90E-07
Zr L _{γ2}	2,503	0,0036	0,033			5,70E-07
Zr K _{α3}	15,466	0,000325				1,16E-08
Zr K_{α2}	15,691	21,5				7,70E-04
Zr K_{α1}	15,775	41,2				1,47E-03
Zr K_{β3}	17,653	3,19				1,14E-04
Zr K_{β1}	17,667	6,18				2,20E-04
Zr K _{β5}	17,816	0,0276				9,90E-07
Zr K _{β2}	17,969	1,26				4,50E-05
Zr K _{β4}	17,995	0,264				9,40E-06

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 25 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 7 Přehled čistých zářičů beta a zářičů beta s intenzitou záření gama menší než 1 % ($I_\gamma \leq 0,01$). Řazeno vzestupně podle $E_{\beta\max}$.

Beta zářič	$E_{\beta\max}$ (keV)	I_β	Poločas přeměny (roky)	Poločas přeměny (dny)	I_γ	E_γ (keV)
Re 187	2,7	1	4,35E+10	1,59E+13	-	-
H 3	18,6	1	1,23E+01	4,50E+03	-	-
Pu 241	20,8	1	1,44E+01	5,24E+03	-	-
Pd 107	33,0	1	6,50E+06	2,37E+09	-	-
Ru 106	39,4	1	1,02E+00	3,74E+02	-	-
Ni 63	66,9	1	1,00E+02	3,66E+04	-	-
Sm 151	76,7	0,991	9,00E+01	3,29E+04	0,0003	21,5
Tm 171	96,4	0,980	1,92E+00	7,01E+02	0,0014	66,7
Bk 249	124,0	1	8,76E-01	3,20E+02	-	-
Se 79	151,0	1	1,13E+06	4,13E+08	-	-
C 14	156,5	1	5,73E+03	2,09E+06	-	-
S 35	167,1	1	2,39E-01	8,73E+01	-	-
Pm 147	224,1	1	2,62E+00	9,58E+02	-	-
Si 32	224,5	1	1,50E+02	5,48E+04	-	-
Ni 66	226,0	1	6,23E-03	2,28E+00	-	-
P 33	248,5	1	6,94E-02	2,53E+01	-	-
Ca 45	256,8	1	4,45E-01	1,63E+02	-	-
Cs 135	269,3	1	2,30E+06	8,40E+08	-	-
Tc 99	293,7	1	2,11E+05	7,71E+07	-	-
Cd 113	316,0	1	7,70E+15	2,81E+18	-	-
Cd 113m	316,0	1	1,41E+01	5,15E+03	0,0002	263,7
W 188	349,0	0,990	1,90E-01	6,94E+01	0,0040	290,7
Er 169	351,1	0,550	2,57E-02	9,40E+00	0,0016	8,4
Sn 121	390,1	1	3,09E-03	1,13E+00	-	-
In 115	496,0	1	4,41E+14	1,61E+17	-	-
Sr 90	546,0	1	2,88E+01	1,05E+04	-	-
Be 10	555,8	1	1,51E+06	5,52E+08	-	-
Ar 39	565,0	1	2,69E+02	9,83E+04	-	-
Ar 42	599,0	1	3,29E+01	1,20E+04	-	-
Pb 209	644,2	1	3,71E-04	1,36E-01	-	-
Kr 85	687,1	0,996	1,08E+01	3,93E+03	0,0043	514,0
Te 127	698,0	0,988	1,07E-03	3,90E-01	0,0100	418,0
Pr 143	933,9	1	3,72E-02	1,36E+01	-	-
Bi 210	1162,1	1	1,37E-02	5,01E+00	-	-
Sn 123	1403,0	0,994	3,54E-01	1,29E+02	0,0060	1088,6
Sr 89	1495,1	1	1,38E-01	5,05E+01	0,0001	908,9
Y 91	1544,8	0,997	1,60E-01	5,85E+01	0,0030	1204,8
P 32	1710,7	1	3,90E-02	1,43E+01	-	-
Pr 145	1805,0	0,950	6,83E-04	2,49E-01	0,0053	748,3
Y 90	2280,1	1	7,30E-03	2,67E+00	-	-
Cu 66	2642,0	0,908	9,73E-06	3,56E-03	0,09	1039,2

Poznámky: $E_{\beta\max}$ – maximální energie záření beta, I_β – intenzita záření beta, I_γ – intenzita záření gama, E_γ – energie záření gama. V tabulce je uvedena pouze jedna nejvíce intenzivní energie záření gama.

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 26 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

PŘÍLOHA III: Kalibrace HPGe detektoru pro měření ⁹⁰Sr prostřednictvím BZ

Vhodné kalibrační etalony jsou objemové etalony vyráběné ČMI, a to typu CBSS X (masťovka) nebo MBSS X (Marinelliho nádoba), kde RN je homogenně rozptýlen v gelu.

Kalibrační etalony obecně obsahují ⁹⁰Sr a ⁹⁰Y v radioaktivní rovnováze.

Aktivitu kalibračního etalonu ⁹⁰Sr je vhodné volit 100 - 1000 kBq/kg; při příliš vysoké aktivitě ⁹⁰Sr by i při malé účinnosti produkce BZ mohlo docházet ke vzniku nepravých koincidenčí, které by počet fotonů v ROI píku BZ mohly významně snížit (mrtvá doba by měla být větší než cca 5 %).

Naměřené spektrum etalonu je složeno ze spektra BZ ⁹⁰Sr, spektra BZ ⁹⁰Y a spektra pozadí. MC simulované spektrum ⁹⁰Sr a ⁹⁰Y je bez pozadí (obr. 4). Příklad spektra pozadí pro HPGe detektor s 10% relativní účinností je uveden na obr. 5.

Spektrum BZ ⁹⁰Sr se nachází v oblasti od E₀ do 546 keV a je superponované na spektrum ⁹⁰Y, které se nachází v oblasti od E₀ do 2280 keV. Hodnota E₀ závisí na tloušťce a protonovém čísle absorpčních materiálů, kterými BZ prochází. E₀ se běžně pohybuje v rozmezí 10 až 30 keV.

Účinnost detekce BZ ϵ_{β} se vypočte podle vztahu

$$\epsilon_{\beta} = \frac{N}{I_{\beta} \cdot A \cdot t} \quad (\text{III-1})$$

kde

N je počet impulsů v ROI píku BZ po odečtení pozadí (tj. po odečtu počtu impulsů v ROI z měření pozadí),

I_β je intenzita záření beta (pro ⁹⁰Sr a ⁹⁰Y v rovnováze = 2),

A je aktivita kalibračního etalonu vztažená k datu měření (Bq),

t je délka měření (s).

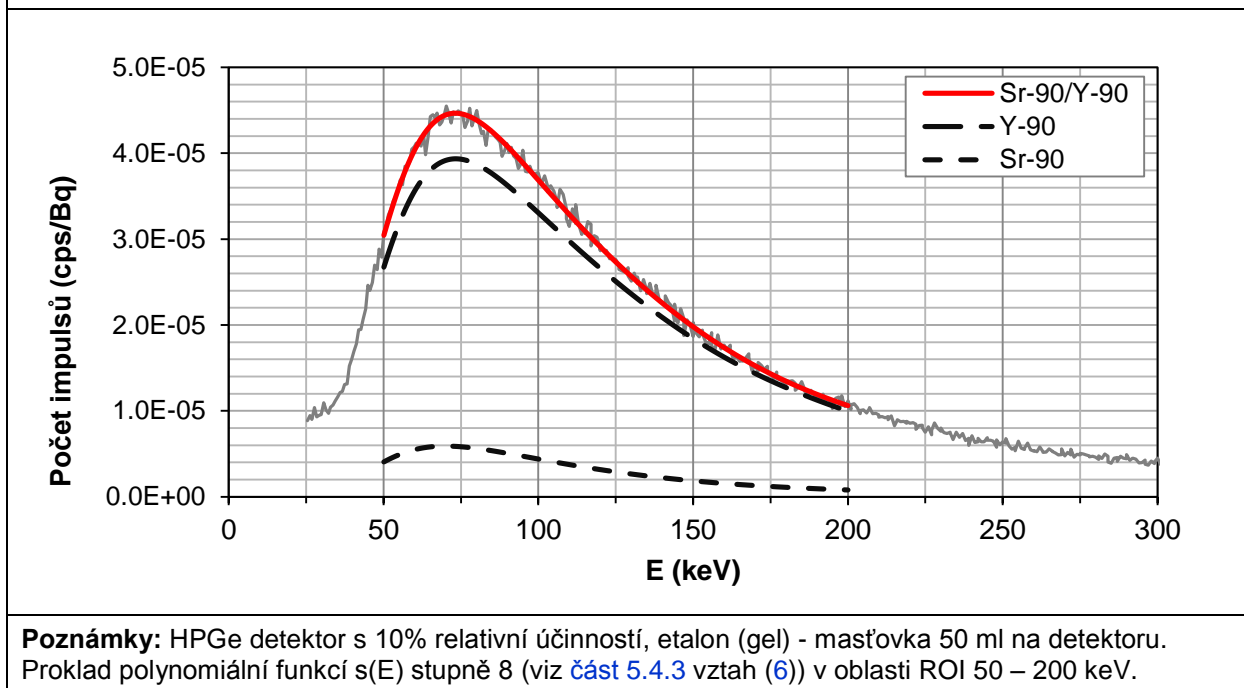
ROI píku BZ lze volit libovolně v intervalu od E₀ do E_{βmax}. V případě HPGe detektoru typu-p lze doporučit volit ROI od 50 keV do 200 keV a v případě oknového HPGe detektoru (HPGe n-ty, BEGe apod.) od 20 keV do 200 keV. V této oblasti energií má spektrum BZ největší intenzitu, avšak v rozmezí cca 60 – 100 keV jsou velmi významné příspěvky od záření X v případě měření BZ na pozadí přírodních RN, proto je vhodné kalibraci provést také pro ROI 100 – 200 keV a v případě oknového typu HPGe detektoru také pro oblast 20 – 60 keV (tab. 8) a případně je pro vyhodnocení také využít.

Tabulka 8 Doporučená energetická oblast ROI pro hodnocení BZ

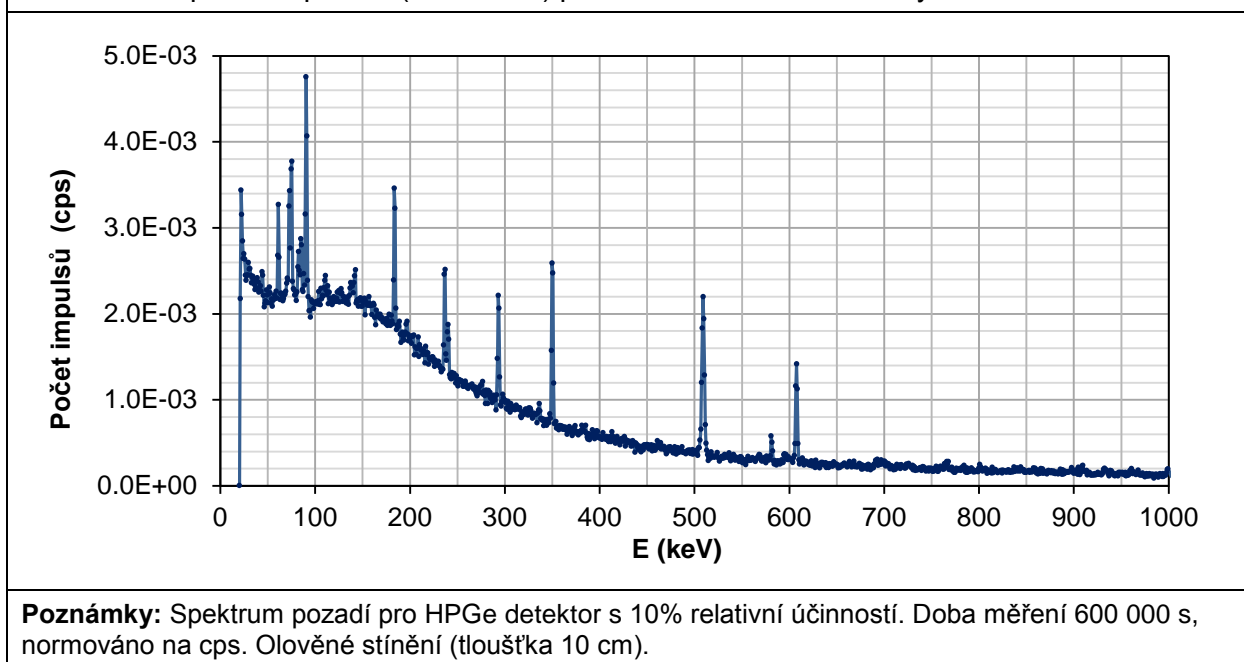
Typ detektoru	ROI (keV)
HPGe p-ty	50 - 200
	100 - 200
Oknový Ge detektor (HPGe n-ty, BEGe)	20 - 200
	20 - 60
	100 - 200

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 27 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Obrázek 4 Příspěvek BZ ^{90}Sr a ^{90}Y v rovnováze do celkového spektra BZ, MC simulace



Obrázek 5 Spektrum pozadí (naměřené) pro HPGe detektor umístěný v Pb stínění



Korekční faktory pro přepočítání spektra BZ ^{90}Sr v gelu na jiné matrice

Složení a hustoty skutečných měřených vzorků jsou většinou odlišné od složení a hustoty kalibračního etalonu. Intenzita produkovaného BZ ^{90}Sr bude pro různé matrice odlišná. Definujme korekční faktor „C“ jako poměr počtu impulsů v ROI spektra BZ ^{90}Sr vzorku (v cps/Bq) a v ROI spektra BZ ^{90}Sr etalonu (silikonový gel) (v cps/Bq).

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 28 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Hodnoty korekčních faktorů pro vodu, mléko, maso, půdu a písek a složení těchto matric pro výpočet korekčních faktorů jsou uvedeny v [tab. 9](#). Korekční faktory byly získány na základě MC simulace pro HPGe detektor typu-p o rel. účinnosti 10 % jako poměr impulsů v oblasti ROI daného materiálu a gelu. Korekční faktory uvedené v [tab. 9](#) jsou pro konkrétní geometrii obecně platné pro HPGe detektory typu-p. Korekčním faktorem se účinnost pro gel násobí.

$$\varepsilon_{\beta-C} = \varepsilon_{\beta} \cdot C \quad (\text{III-2})$$

kde

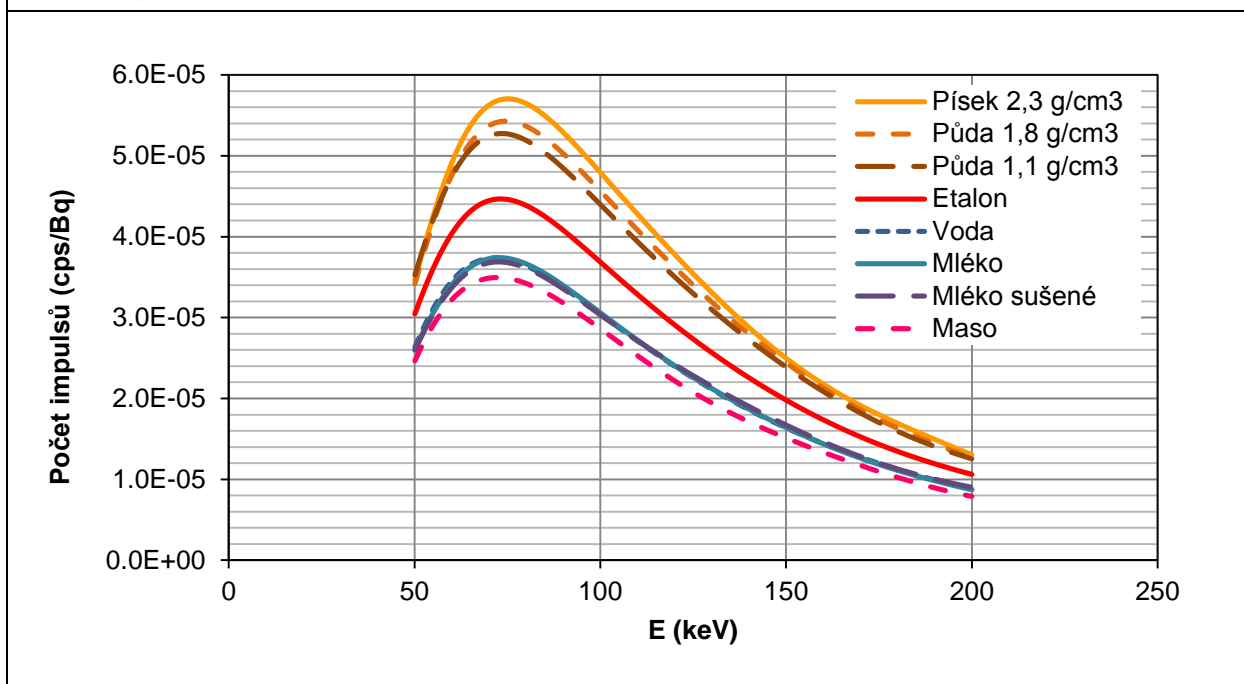
ε_{β} je účinnost detekce BZ v ROI generovaného v gelovém etalonu dle [\(III-1\)](#)

$\varepsilon_{\beta-C}$ je účinnost detekce BZ v ROI generovaného v dané matrici

C je korekční faktor pro přepočítání počtu impulsů BZ v ROI generovaného gelovým etalonem na jinou matrici z [tab. 9](#). Je to poměr počtu impulsů v ROI spektra BZ ^{90}Sr vzorku (v cps/Bq) a v ROI spektra BZ ^{90}Sr etalonu (silikonový gel) (v cps/Bq).

Porovnání spekter BZ produkovaného vzorkem vody, mléka, masa, půdy a písku se spektrem gelového etalonu je uvedeno na [obr. 6](#).

Obrázek 6 Porovnání spekter BZ $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ pro různé druhy matric 50 ml v masťovce, MC simulace, 10% HPGe detektor



Poznámky: Půda a písek v sušeném stavu. Maso v nativním stavu. Voda a mléko (konzumní, sušené) v grafu splývají. Zobrazen je pouze proklad polynomiální funkcí $s(E)$ stupně 8 (viz [část 5.4.3](#) vztah [\(6\)](#)) pro ROI 50 – 200 keV.

Obsah vody v půdách se pohybuje přibližně až do 50 % celkové hmotnosti půdy (tj. hmotnosti půdy s obsahem vody). Nejméně vody obsahují písčité půdy (8 – 10 % z celkové hmotnosti) a nejvíce jílovité půdy, u kterých se průměrný obsah vody pohybuje v rozmezí 30 – 40 % z celkové hmotnosti [12]. Korekční faktory uvedené v [tab. 9](#) se pro suchou půdu a půdu s obsahem vody 10 – 50 % pohybují v rozmezí 1,22 - 1,01. Půda obsahující 50 % vlhkosti má korekční faktor blízký 1.

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 29 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 9 Korekční faktory pro BZ ⁹⁰Sr na složení a hustotu vzorku odlišné od etalonu pro geometrii masťovka 50 a 200 ml na detektoru

Materiál	Hustota (g/cm ³)	Korekční faktor (pro ROI 50-200 keV)		Korekční faktor (pro ROI 100-200 keV)	
		50 ml	200 ml	50 ml	200 ml
Gel (etalon)	0,985	1,00	1,00	1,00	1,00
Voda	1,000	0,83	0,82	0,83	0,82
Mléko tekuté	1,033	0,83	0,82	0,83	0,82
Mléko sušené	0,470	0,81	0,79	0,81	0,80
Maso	1,052	0,77	0,77	0,76	0,75
Půda suchá	1,100	1,19	1,20	1,20	1,25
	1,800	1,22	1,17	1,23	1,24
Půda (10% vlhkost)	1,100	1,15	1,16	1,16	1,21
	1,800	1,18	1,14	1,19	1,20
Půda (20% vlhkost)	1,100	1,12	1,12	1,12	1,16
	1,800	1,14	1,10	1,15	1,16
Půda (30% vlhkost)	1,100	1,08	1,09	1,09	1,12
	1,800	1,10	1,07	1,11	1,11
Půda (40% vlhkost)	1,100	1,05	1,05	1,05	1,08
	1,800	1,07	1,03	1,07	1,07
Půda (50% vlhkost)	1,100	1,01	1,01	1,01	1,04
	1,800	1,03	1,00	1,03	1,03
Písek suchý	2,300	1,27	1,23	1,27	1,25
Písek (5% vlhkost)	2,300	1,25	1,21	1,25	1,23
Písek (10% vlhkost)	2,300	1,23	1,19	1,23	1,21

Složení materiálů použité pro MC výpočet korekčních faktorů

Materiál	Složení
Gel (etalon)	Si (37,5 %), C (32,1 %), O (21,4 %), H (8,1 %), S (1 %)
Voda	H ₂ O
Mléko tekuté	voda (87,0 %), bílkoviny (3,4 %), tuky (4,0 %), cukry (4,9 %), minerály (0,7 %)
Mléko sušené	bílkoviny (26,5 %) – kasein (85 %), syrovátkové bílkoviny (15 %); tuky (30,3 %) – TAG (98 %); cukry (37,9 %) – laktóza (90 %), glukóza a galaktóza (10 %); minerály (5,3 %) – Ca, P, Na, K, Mg (0,01 až 0,1 %)
Maso	H (9,0 %), C (59,4 %), N (3,3%), O (26,6 %), Ca (1,7 %)
Půda suchá	O (49 %), Si (33 %), Al (6,7 %), Fe (3,2 %), Ca (2 %), K (1,8 %), C (1,4 %), Na (1,1 %), Mg (0,8 %), Ti (0,5 %), N (0,2 %), P (0,1 %), Mn (0,1 %)
Písek	SiO ₂

Poznámky:

- Korekčním faktorem se účinnost pro etalon-gel násobí.
- Korekční faktory byly získány na základě MC simulace pro HPGe detektor typu-p o rel. účinnosti 10% jako poměr počtu impulsů v oblasti ROI daného materiálu a gelu (obojí v cps/Bq).
- Korekční faktory jsou obecně platné pro HPGe detektory typu-p pro konkrétní geometrii.
- Hodnoty platí pro maso bez obsahu tuku v nativním stavu. TAG = triacylglycerol. Podrobnosti o složení mléka byly získány na základě publikace [9].

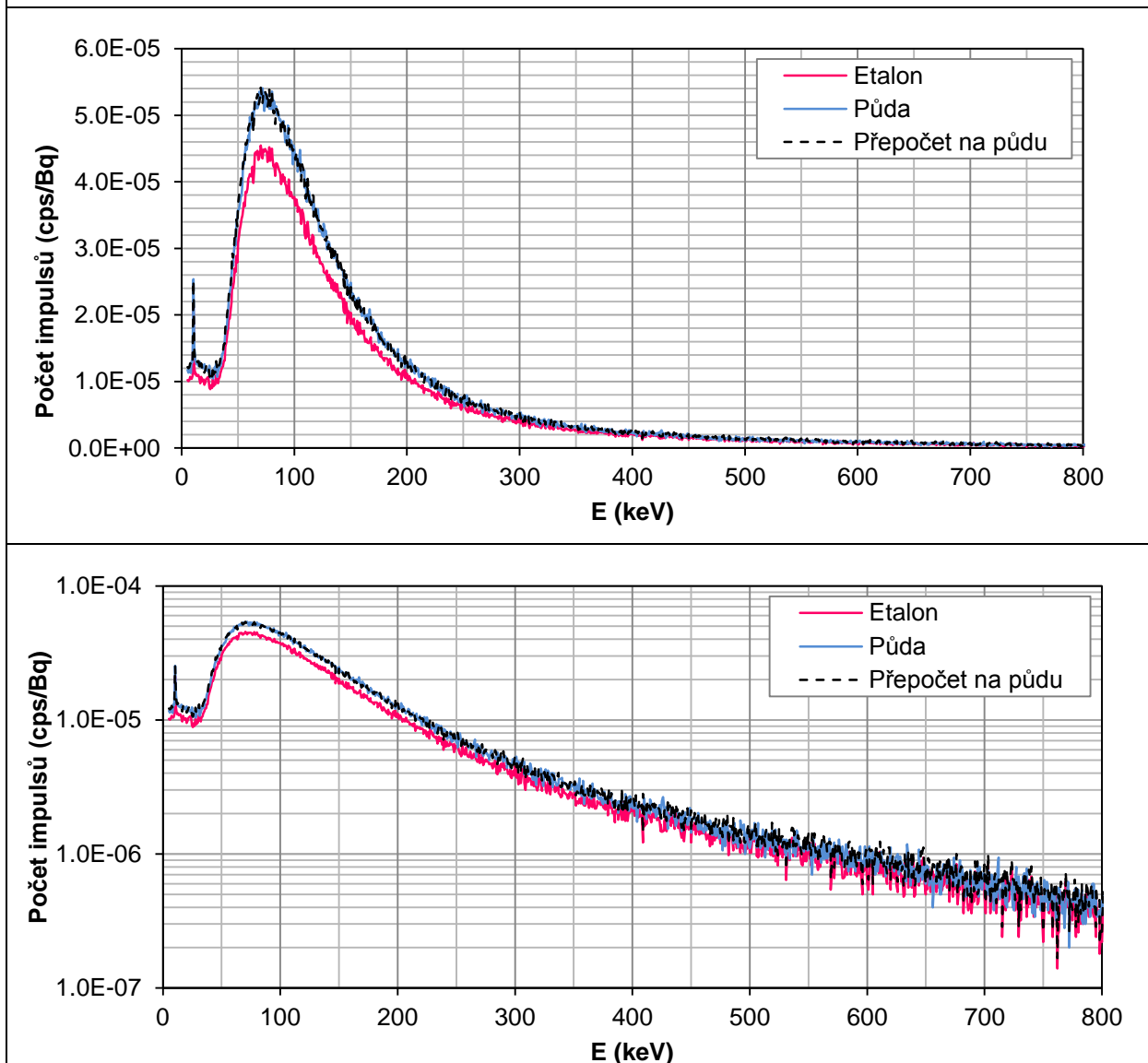
Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 30 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Jak je patrné z [tab. 9](#), obsah vody v půdě má významnější vliv na hodnotu korekčního faktoru, než hustota, která jej ovlivní jen minimálně. Rozsah koeficientů je od 0,81 pro sušené mléko až po 1,27 pro suchý písek. Pokud se korekce nepoužije, tak u sušeného mléka může dojít k nadhodnocení účinnosti přibližně o 20 %, pokud se nepoužije u hlíny či písku, může dojít k podhodnocení účinnosti až o 1/3.

Korekční faktory lze v dobrém přiblížení použít i na přepočítání celého spektra, jak je vidět na příkladu na [obr. 7](#).

Pokud je [tab. 9](#) využita pro korekci účinnosti pro měření neznámého vzorku dle vztahu (III-2), pak již ve vztahu (3) pro výpočet aktivity korekce označená proměnnou „C“ nevystupuje. Pokud je potřeba stanovit korekci pro jiný materiál, použije se „expertní odhad“ učiněný na základě dat z [tab. 9](#) nebo nový výpočet pomocí MC simulace.

Obrázek 7 Přepočítání spektra BZ ^{90}Sr etalonu na spektrum BZ ^{90}Sr půdy (normální a semi-logaritmické zobrazení)



Poznámky: HPGe detektor typu-p, 10% relativní účinnost, masťovka 50 ml na detektoru, MC simulace. Hustota půdy 1,1 g/cm³. Korekční faktor 1,19.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 31 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Příklad experimentální kalibrace HPGe detektoru pro měření ⁹⁰Sr

HPGe detektor typu-p

Typ detektoru:	GC1018
Relativní účinnost:	10 %
Průměr krystalu:	47 mm
Výška krystalu:	33 mm
Vzdálenost krystalu od víčka:	5 mm
Přední mrtvá vrstva:	0,56 mm
Boční mrtvá vrstva:	0,86 mm

Kalibrováno pomocí etalonu ⁹⁰Sr v gelu o objemu 50 a 200 ml v masťovce.

Tabulka 10a Účinnost detekce BZ ⁹⁰Sr pro 10% HPGe detektor typu-p GC1018 dle (III-1)

10% HPGe	Účinnost detekce BZ ⁹⁰ Sr pro různé ROI	
	50-200 keV	100-200 keV
Geometrie		
Masťovka 50 ml na detektoru	1,17E-03	5,66E-04
Masťovka 200 ml na detektoru	5,64E-04	2,70E-04
Masťovka 200 ml vedle detektoru	2,09E-04	9,91E-05

Poznámka: Účinnost pro 200 ml masťovku umístěnou vedle detektoru je sice nižší než účinnost pro 200 ml masťovku umístěnou na detektoru, při odhadu aktivity ale vystupuje ve vztahu součin účinnosti a hmotnosti vzorku, a ta může být při použití až 7 masťovek vedle (kolem) detektoru až 7x vyšší, než hmotnost vzorku v masťovce na detektoru.

BEGe detektor (oknový)

Typ detektoru:	BE5030
Relativní účinnost:	50 %
Průměr krystalu:	81 mm
Výška krystalu:	31 mm
Vzdálenost krystalu od okénka:	5 mm
Tloušťka a materiál okénka:	0,6 mm C-epoxid
Přední mrtvá vrstva:	0,0004 mm
Boční mrtvá vrstva:	0,47 mm

Tabulka 11b Účinnost detekce BZ ⁹⁰Sr pro BEGe detektor BE5030 dle (III-1)

50% BEGe	Účinnost detekce BZ ⁹⁰ Sr pro různé ROI		
	20-60 keV	20-200 keV	100-200 keV
Geometrie			
Masťovka 50 ml na detektoru	2,82E-03	6,36E-03	1,94E-03
Masťovka 200 ml na detektoru	1,11E-03	2,68E-03	8,16E-04

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 32 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

PŘÍLOHA IV: Odhad nejistoty stanovení aktivity ^{90}Sr ze spektra BZ

Aktivita A (Bq/kg) ^{90}Sr , stanovovaná ze spektra BZ hodnoceného vzorku, se vypočte podle vztahu (IV-1) s využitím vztahů (IV-1a) a (IV-1b)

$$A = \frac{N}{I_{\beta} \cdot \varepsilon_{\beta} \cdot t \cdot m_{Vz} \cdot C} \quad (IV-1)$$

$$N = N_{\text{Tot}} - N_B - \sum_{i=1}^K N_i \quad (IV-1a)$$

$$N_B = \frac{t}{t_0} \cdot N_0 \quad (IV-1b)$$

kde

A je hmotnostní aktivita ^{90}Sr ve vzorku (v Bq/kg)

N je počet impulsů v oblasti ROI BZ po odečtení počtu impulsů pozadí v ROI (naměřeného pro daný detektor a přepočteného na čas měření vzorku) a po odečtení počtu impulsů v ROI pocházejících od ostatních RN emitujících záření gama přítomných v měřeném vzorku (v případě MC simulace se odečtou přímo simulované počty impulsů v ROI RN; v případě měření RN se odečtou naměřené počty impulsů v ROI jednotlivých RN po odečtu pozadí),

N_{Tot} je celkový počet impulsů v ROI BZ,

N_B je počet impulsů v ROI BZ z měření pozadí přepočtený na délku měření vzorku,

N_0 je počet impulsů v ROI BZ z měření pozadí za dobu měření pozadí,

N_i je počet impulsů v ROI referenčního odečítacího spektra i-tého RN (nebo sečtených spekter více RN) přepočítaný na délku měření vzorku, hmotnostní aktivitu ve vzorku a hmotnost vzorku měřeného v dané geometrii, viz vztah,

I_{β} je součet intenzit záření beta ^{90}Sr a ^{90}Y (tj. zastoupení přeměny ^{90}Sr a ^{90}Y emisí záření beta), (v případě rovnováhy ^{90}Sr a ^{90}Y $I_{\beta} = 2$),

ε_{β} je účinnost detekce BZ ^{90}Sr produkovaného v matici gelového etalonu

t je délka měření vzorku (s),

t_0 je délka měření pozadí (s),

m_{Vz} je hmotnost vzorku (kg),

C je korekční faktor na složení a hustotu vzorku rozdílné od gelového etalonu pro generování BZ (tab. 9 Přílohy III).

Počet impulsů v ROI referenčního odečítacího spektra (viz Příloha VI) je dán vztahem

$$N_i = N_i^{\text{St}} \cdot A_i \cdot \frac{m_{Vz}}{m_i^{\text{St}}} \cdot t \quad (IV-2)$$

kde

N_i je počet impulsů v ROI referenčního odečítacího spektra i-tého nuklidu (nebo sečtených spekter více nuklidů) přepočítaný na délku měření neznámého vzorku, hmotnostní aktivitu ve vzorku a hmotnost vzorku měřeného v dané geometrii,

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 33 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

N_i^{St} je počet impulsů za jednotku času (v cps) v ROI referenčního odečítacího spektra (St je ve významu „standardní“) i-tého RN vztažený na jednotkovou hmotnostní aktivitu (cps/(Bq/kg)), přičemž referenční spektrum je již korigováno na rozdílnost složení a hustoty neznámého vzorku a vzorku, z kterého spektrum pochází nebo je tato rozdílnost zahrnuta do nejistoty stanovení² (viz Příloha VII),

A_i je hmotnostní aktivita (v Bq/kg) i-tého nuklidu emitujícího záření gama (nebo více nuklidů, pokud mají stejnou aktivitu) v neznámém vzorku, jehož příspěvek do ROI je nutno odečíst (v Bq/kg),

m_{Vz} je hmotnost neznámého vzorku (v kg) měřeného ve stejné geometrii jako standard,

m_i^{St} je hmotnost standardu (v kg) i-tého nuklidu, jehož referenční spektrum bylo použito. Hmotnost standardů v určité geometrii se pro jednotlivé RN může lišit (tj. liší se hustoty), i když většinou bude standard mít stejnou hustotu pro všechny odečítané RN

t je délka měření vzorku (s).

Poznámka: poměr $m_{\text{Vz}}/m_i^{\text{St}}$ vyjadřuje přepočtení na celkovou aktivitu v neznámém vzorku oproti aktivitě ve standardu (předpokládá se, že geometrie měření vzorku a standardu jsou stejné, ale může být rozdíl v hustotách; tj. místo poměru hmotností je možno dosadit poměr hustot).

Nejistota σ_A (Bq/kg) stanovení aktivity A (Bq/kg) ^{90}Sr se získá metodou šíření chyb ze vztahu (IV-1). Je dána vztahem (nejistoty doby měření a hmotnosti jsou zanedbatelné)

$$\sigma_A = A \sqrt{\left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_C}{C}\right)^2 + \sum_i \left(\frac{\sigma_{Ri}}{100}\right)^2} \quad (\text{IV-3})$$

kde

σ_N je nejistota stanovení počtu impulsů v ROI; odhad je uveden níže

σ_ε je nejistota stanovení účinnosti detekce BZ etalonu ^{90}Sr v ROI; lze ji odhadnout na 10%

σ_C je nejistota stanovení korekčního faktoru C ;

σ_{Ri} je odhad dalších nejistot (v %), a to

- nejistoty dané neodečtením RN emitujících záření gama přispívajících do spektra BZ ^{90}Sr (velikost příspěvku lze odhadnout z obr. 10 Přílohy VI,
- nejistoty dané přípravou vzorku (nehomogenita),

Pro nejistotu σ_N dle metody šíření chyb ze vztahu (IV-1a) a (IV-1b) vyplývá

$$\sigma_N = \sqrt{\sigma_{\text{NTot}}^2 + \sigma_B^2 + \sum_{i=1}^K \sigma_{Ni}^2} \quad (\text{IV-4})$$

σ_{NTot} a σ_0 jsou přímo měřitelné hodnoty, takže počet impulsů je dán Poissonovým rozdělením, a tedy směrodatná odchylka je rovna odmocnině z tohoto počtu

$$\sigma_{\text{NTot}} = \sqrt{N_{\text{Tot}}} \quad (\text{IV-4a})$$

² Korekci na rozdílnost složení a hustoty neznámého vzorku a referenčního vzorku, z kterého spektrum pochází, lze odhadnout poměrem zeslabení v matici a v gelu (viz vztah (VII-2))

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 34 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

$$\sigma_B = \frac{t}{t_0} \sqrt{N_0} \quad (IV-4b)$$

Nejistoty σ_{Ni} ($i=1$ až K) příslušející ostatním RN přítomným v měřeném vzorku (viz vztah (IV-2)), jejichž příspěvky jsou odečítány, se skládají ze dvou částí (nejistota délky měření a stanovení hmotnosti se považují za zanedbatelné): první část - nepřesnost stanovení aktivity RN (emitujících záření gama) přítomných v měřeném vzorku, jejichž příspěvky jsou odečítány (nejistoty těch RN, které nejsou odečítány, jsou zahrnuty v nejistotě σ_{Ri}); druhá část - pokud jsou odečítaná referenční spektra simulována, je nutno do odhadu nejistoty zahrnout nepřesnost jejich simulace, pokud jsou odečítaná referenční spektra měřena, je nutno zahrnout nepřesnost stanovení počtu impulsů z měření. Nejistota σ_{Ni} je dána vztahem

$$\sigma_{Ni}^2 = N_i^2 \cdot \left[\left(\frac{\sigma_{Ai}}{A_i} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Ni}^{St}}{N_i^{St}} \right)^2 \right] \quad (IV-4c)$$

kde proměnné jsou popsány pod vztahem (IV-2); v čitatelích zlomků jsou nejistoty proměnných uvedených ve jmenovatelích zlomků.

Použitím výše uvedeného lze pro (IV-4) psát

$$\sigma_N = \sqrt{N_{Tot} + \left(\frac{t}{t_0} \right)^2 N_0 + \sum_{i=1}^K N_i^2 \cdot \left[\left(\frac{\sigma_{Ai}}{A_i} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Ni}^{St}}{N_i^{St}} \right)^2 \right]} \quad (IV-5)$$

Příspěvek $\sigma_{Ni}^{St}/N_i^{St}$ lze odhadnout na 0,2 a relativní nejistota aktivity σ_{Ai}/A_i by také neměla být větší než 0,2. Nejistotu σ_N lze tedy odhadnout jako

$$\sigma_N = \sqrt{N_{Tot} + \left(\frac{t}{t_0} \right)^2 N_0 + 0,08 \sum_{i=1}^K N_i^2} \quad (IV-6)$$

Pokud ve spektru nejsou přítomny významně další RN, vztah se zjednoduší na

$$\sigma_N = \sqrt{N_{Tot} + \left(\frac{t}{t_0} \right)^2 N_0} \quad (IV-7)$$

a pokud je délka měření pozadí mnohem delší než délka měření vzorku, vztah se dále zjednoduší na

$$\sigma_N = \sqrt{N_{Tot}} \quad (IV-8)$$

Za N_{Tot} můžeme do (IV-8) dosadit z (IV-1a) a (IV-1b)

$$\sigma_N = \sqrt{N + \frac{t}{t_0} N_0} \quad (IV-9)$$

Šířka ROI píku BZ, pro kterou je stanovován počet impulsů N , musí odpovídat zvolené šířce ROI, pro kterou byla počítána detekční účinnost BZ ϵ_β při kalibraci spektrometru.

Pokud se nepodaří postihnout všechny příspěvky pro odečet z oblasti ROI, bude aktivita nadhodnocena a nejistota může být podhodnocena.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 35 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

PŘÍLOHA V: Minimální významná a minimální detekovatelná aktivita

Při odvození vztahu pro minimální významnou aktivitu MVA [6] při hladině významnosti 5 % se vychází z následujících vztahů, již uvedených v předchozích kapitolách

$$A = \frac{N}{I_{\beta} \cdot \varepsilon_{\beta} \cdot t \cdot m_{VZ} \cdot C} \quad (V-1)$$

$$N_{Tot} = N + N_B + \sum_{i=1}^K N_i \quad (V-2)$$

$$\text{tj. } N = N_{Tot} - N_B - \sum_{i=1}^K N_i \quad (V-2a)$$

$$N_B = \frac{t}{t_0} \cdot N_0 \quad (V-3)$$

$$N_i = N_i^{St} \cdot A_i \cdot \frac{m_{VZ}}{m_i^{St}} \cdot t \quad (V-4)$$

$$\sigma_N = \sqrt{N_{Tot} + \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 N_0 + \sum_{i=1}^K N_i^2 \cdot \left[\left(\frac{\sigma_{A_i}}{A_i}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{N_i^{St}}}{N_i^{St}}\right)^2 \right]} \quad (V-5)$$

kde

- A je aktivita ^{90}Sr (Bq/kg),
- N je počet impulsů v oblasti ROI BZ po odečtení pozadí v ROI (naměřený pro daný detektor a přepočtený na čas měření vzorku) a po odečtení počtu impulsů v ROI pocházejících od ostatních RN emitujících záření gama přítomných v měřeném vzorku,
- σ_N je nejistota N plynoucí ze vztahu (V-2a) metodou šíření chyb
- N_{Tot} je celkový počet impulsů v ROI BZ,
- N_B je počet impulsů v ROI BZ z měření pozadí přepočtený na délku měření vzorku,
- N_0 je počet impulsů v ROI BZ z měření pozadí za dobu měření pozadí,
- N_i je počet impulsů v ROI referenčního odečítacího spektra i-tého RN (nebo sečtených spekter více nuklidů) přepočítaný na délku měření, hmotnostní aktivitu ve vzorku a hmotnost vzorku,
- I_{β} je součet intenzit záření beta ^{90}Sr a ^{90}Y , tj. zastoupení přeměny ^{90}Sr a ^{90}Y emisí záření beta; v případě rovnováhy ^{90}Sr a ^{90}Y $I_{\beta} = 2$,
- ε_{β} je účinnost detekce BZ ^{90}Sr produkovaného v matici gelového etalonu,
- t je délka měření vzorku (s),
- t_0 je délka měření pozadí (s),
- C je korekční faktor na složení a hustotu vzorku rozdílné od etalonu (korekční faktory pro půdu, vodu a mléko vzhledem ke gelovému etalonu jsou uvedeny v tab. 9 Přílohy III),

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 36 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

- N_i^{St} je počet impulsů za jednotku času v ROI referenčního odečítacího spektra vztážený na jednotkovou hmotnostní aktivitu (cps/(Bq/kg)),
- A_i je hmotnostní aktivita ve vzorku i-tého nuklidu (nebo více nuklidů), který je nutno odečíst (Bq/kg),
- m_{vz} je hmotnost vzorku (kg),
- m_i^{St} je hmotnost standardu (kg).

Pro MVA lze psát [6]

$$\text{MVA} = \frac{k \cdot \sqrt{\frac{t}{t_0} N_0 + \sum_{i=1}^K N_i + \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 N_0 + \sum_{i=1}^K N_i^2} \cdot \left[\left(\frac{\sigma_{A_i}}{A_i}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{N_i^{\text{St}}}}{N_i^{\text{St}}}\right)^2 \right]}{\varepsilon_{\beta} \cdot I_{\beta} \cdot t \cdot m_{\text{vz}} \cdot C} \quad (\text{V-6})$$

kde

MVA je minimální významná aktivita (Bq/kg),

k je kvantil jednostranného normálního rozdělení (pro hladinu významnosti 5 % $k = 1,645$).

Pokud ve spektru nejsou přítomny jiné RN emitující záření gama nebo jen v zanedbatelné míře vzhledem k velikosti pozadí, vztah (V-6) se zjednoduší n

$$\text{MVA} = \frac{k \cdot \sqrt{\frac{t}{t_0} N_0 + \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 N_0}}{\varepsilon_{\beta} \cdot I_{\beta} \cdot t \cdot m_{\text{vz}} \cdot C} \quad (\text{V-7})$$

Vztah se redukuje pouze na počty impulsů v ROI pozadí, tj. jedná se o „ideální“ (nejnižší hodnotu MVA. Poznámka: tento vztah se užije i v případě, když se nepodaří odečíst příspěvky od všech RN emitujících záření gama, které významně přispívají do ROI; za N_0 se pak dosadí celkový počet impulsů v ROI.

Pokud je délka měření vzorku stejná jako délka měření pozadí, tj. $t = t_0$ dostáváme z (V-7)

$$\text{MVA} = \frac{k \cdot \sqrt{2N_0}}{\varepsilon_{\beta} \cdot I_{\beta} \cdot t \cdot m_{\text{vz}} \cdot C} = \frac{k \cdot \sqrt{2N_B}}{\varepsilon_{\beta} \cdot I_{\beta} \cdot t \cdot m_{\text{vz}} \cdot C}$$

(V-7a) Pokud je délka měření vzorku mnohem kratší než délka měření pozadí, tj. $t \ll t_0$ dostáváme z (V-7)

$$\text{MVA} = \frac{k \cdot \sqrt{\frac{t}{t_0} N_0}}{\varepsilon_{\beta} \cdot I_{\beta} \cdot t \cdot m_{\text{vz}} \cdot C} = \frac{k \cdot \sqrt{N_B}}{\varepsilon_{\beta} \cdot I_{\beta} \cdot t \cdot m_{\text{vz}} \cdot C} \quad (\text{V-7b})$$

Pokud jsou ve spektru přítomny jiné RN emitující záření gama, ale nejistota stanovení jejich aktivity je menší než 20 %, MVA ze vztahu (V-6) lze vyjádřit jako

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 37 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

$$MVA = \frac{k \cdot \sqrt{\frac{t}{t_0} N_0 + \sum_{i=1}^K N_i + \left(\frac{t}{t_0}\right)^2 N_0 + 0,08 \sum_{i=1}^K N_i^2}}{\varepsilon_\beta \cdot I_\beta \cdot t \cdot m_{Vz} \cdot C} \quad (V-8)$$

kde za relativní nejistoty (σ_{A_i}/A_i) a ($\sigma_{N_i^{St}}/N_i^{St}$) je dosazen horní odhad 0,2. Vliv kvadratického členu s N_i^2 bude tedy spíše nadhodnocen.

Pokud je délka měření vzorku stejná jako délka měření pozadí, tj. $t = t_0$ (v tomto případě platí $N_0 = N_B$), dostáváme z (V-8)

$$MVA = \frac{k \cdot \sqrt{2N_0 + \sum_{i=1}^K N_i + 0,08 \sum_{i=1}^K N_i^2}}{\varepsilon_\beta \cdot I_\beta \cdot t \cdot m_{Vz} \cdot C} = \frac{k \cdot \sqrt{2N_B + \sum_{i=1}^K N_i + 0,08 \sum_{i=1}^K N_i^2}}{\varepsilon_\beta \cdot I_\beta \cdot t \cdot m_{Vz} \cdot C} \quad (V-8a)$$

Pokud je délka měření vzorku mnohem kratší než délka měření pozadí, tj. $t \ll t_0$ dostáváme z (V-8)

$$MVA = \frac{k \cdot \sqrt{\frac{t}{t_0} N_0 + \sum_{i=1}^K N_i + 0,08 \sum_{i=1}^K N_i^2}}{\varepsilon_\beta \cdot I_\beta \cdot t \cdot m_{Vz} \cdot C} = \frac{k \cdot \sqrt{N_B + \sum_{i=1}^K N_i + 0,08 \sum_{i=1}^K N_i^2}}{\varepsilon_\beta \cdot I_\beta \cdot t \cdot m_{Vz} \cdot C} \quad (V-8b)$$

Pokud je ve spektru vyšší aktivita RN emitujících záření gama a spektra se neodečítají, lze pro odhad MVA použít vztah (V-7) resp. (V-7a) a (V-7b), kde za N_0 se dosadí N_{Tot} . Tento přístup je celkem oprávněný, pokud se jedná o matici, kde obsah dalších radionuklidů emitujících gama záření je poměrně stálý, jako např. obsah ^{40}K v mléku nebo pokud se jedná o hrubý odhad MVA. V některých případech může být tento odhad podhodnocující.

Minimální detekovatelnou aktivitu MDA lze stanovit na základě vztahu

$$MDA = \frac{k^2}{\varepsilon_\beta \cdot I_\beta \cdot t \cdot m_{Vz} \cdot C} + 2 \cdot MVA \quad (V-9)$$

Mezi minimální významnou a minimální detekovatelnou aktivitou platí přibližný vztah

$$MDA \approx 2 \cdot MVA \quad (V-10)$$

Pro přepočítání MDA (a analogicky pro MVA) na jinou délku měření lze použít přibližný vztah

$$MDA_2 \approx \sqrt{\frac{t_1}{t_2}} MDA_1 \quad (V-11)$$

kde t_i jsou délky měření vzorku příslušné k MDA_i .

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 38 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

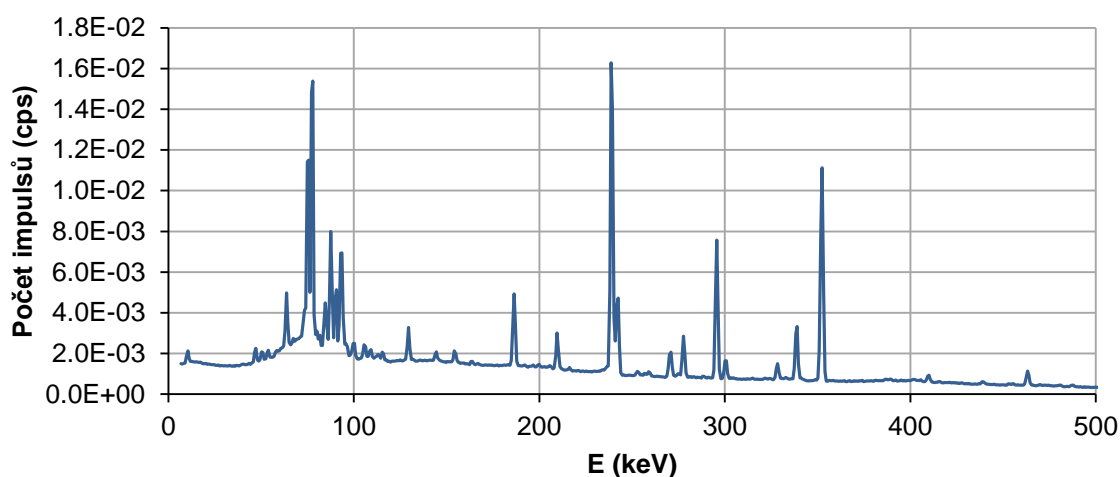
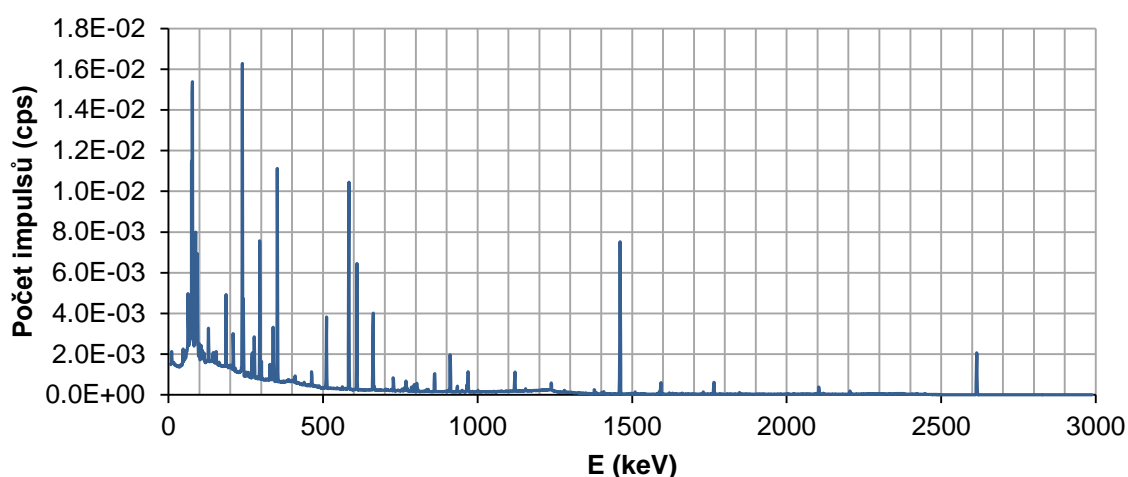
PŘÍLOHA VI: Spektra ^{90}Sr na pozadí přírodních radionuklidů

Typické hodnoty aktivit přírodních RN v půdách v ČR jsou desítky Bq/kg U-řady, desítky Bq/kg Th-řady a stovky Bq/kg ^{40}K ; Ac-řada bývá zastoupena 4,5% aktivity uranové řady (přírodní směs uranu). RN přírodních přeměnových řad jsou často v rovnováze.

Příklad spektra vzorku půdy bez ^{90}Sr s obsahem přírodních RN (U, Th a Ac řada, ^{40}K) a ^{137}Cs měřeném v masťovce 50 ml je uveden na [obr. 8a](#); příklad nasimulovaných spekter U, Th a Ac řady v rovnováze pro vzorek půdy v masťovce 50 ml je uveden na [obr. 8b](#).

V oblasti od 60 do 100 keV jsou patrné velmi významné příspěvky od záření X a také příspěvky od nízkoenergetického záření gama, které komplikují stanovení přítomnosti ^{90}Sr ve vzorku v případě jeho nižších aktivit (pod 1 kBq/kg).

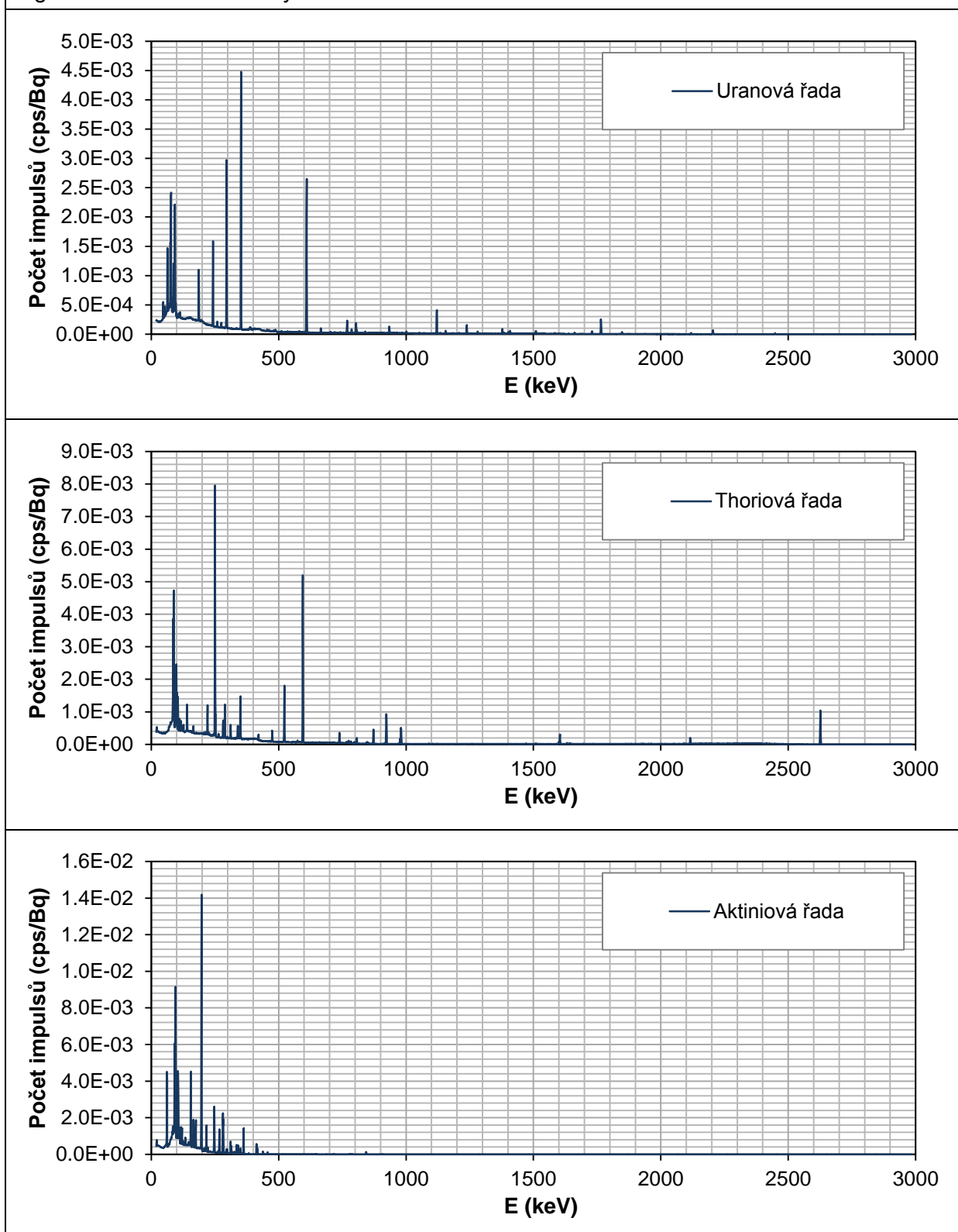
Obrázek 8a Spektrum půdy s obsahem přírodních RN a ^{137}Cs neobsahující ^{90}Sr . HPGe detektor s 10% relativní účinností, masťovka 50 ml na detektoru. MC simulace.



Poznámka: Jedná se pouze o příklad. Aktivity odpovídají průměru z měření půd v rámci RMS v roce 2014. U, Th a Ac řada v rovnováze (43 Bq/kg U-řada, 36 Bq/kg Th-řada a 1,9 Bq/kg Ac-řada), ^{40}K (610 Bq/kg) a ^{137}Cs (16 Bq/kg). Půda (suchá) s hustotou 1,1 g/cm³. Šířka kanálu: 0,75 keV.

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 39 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Obrázek 8b Porovnání spekter U, Th a Ac řady v rovnováze pro půdu o hustotě $1,1 \text{ g/cm}^3$ v geometrii 50 ml masťovky na 10% HPGe detektoru. MC simulace.

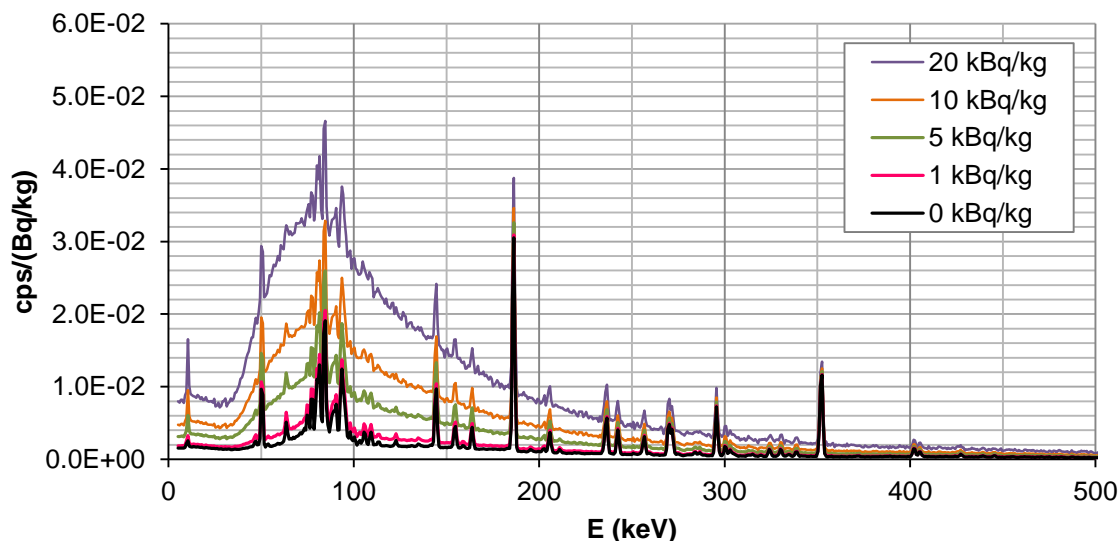
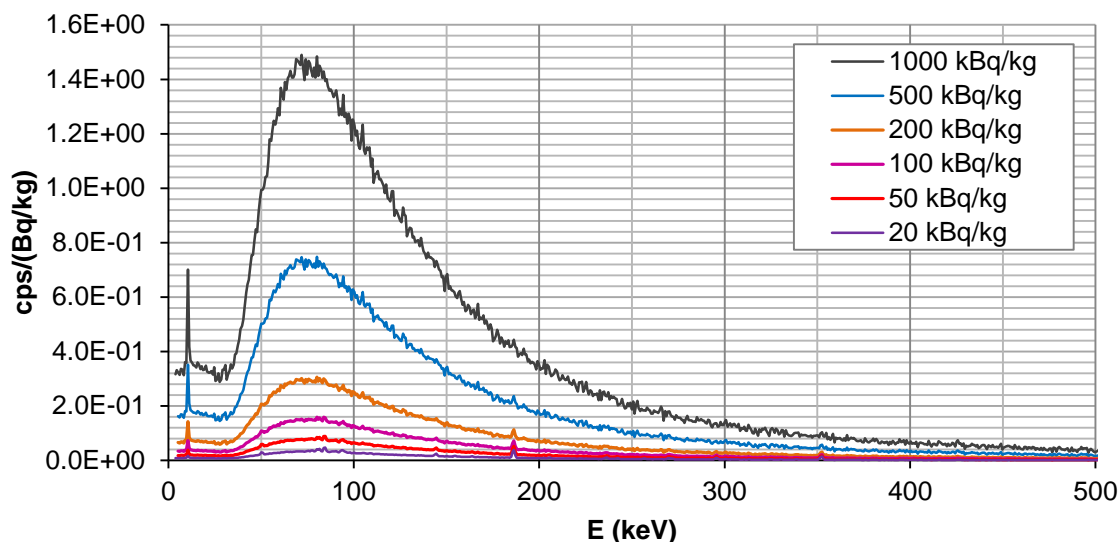


Poznámka: Půda (suchá) s hustotou $1,1 \text{ g/cm}^3$. Šířka kanálu: 0,75 keV.

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 40 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Porovnání spekter vzorků půdy s obsahem RN přírodních přeměnových řad, ^{40}K a ^{137}Cs bez obsahu ^{90}Sr a s obsahem 1, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 a 1000 kBq/kg ^{90}Sr je uvedeno na obr. 9. Podíl příspěvku impulsů ostatních RN do ROI v závislosti na aktivitě ^{90}Sr ve vzorku půdy je uveden na obr. 10.

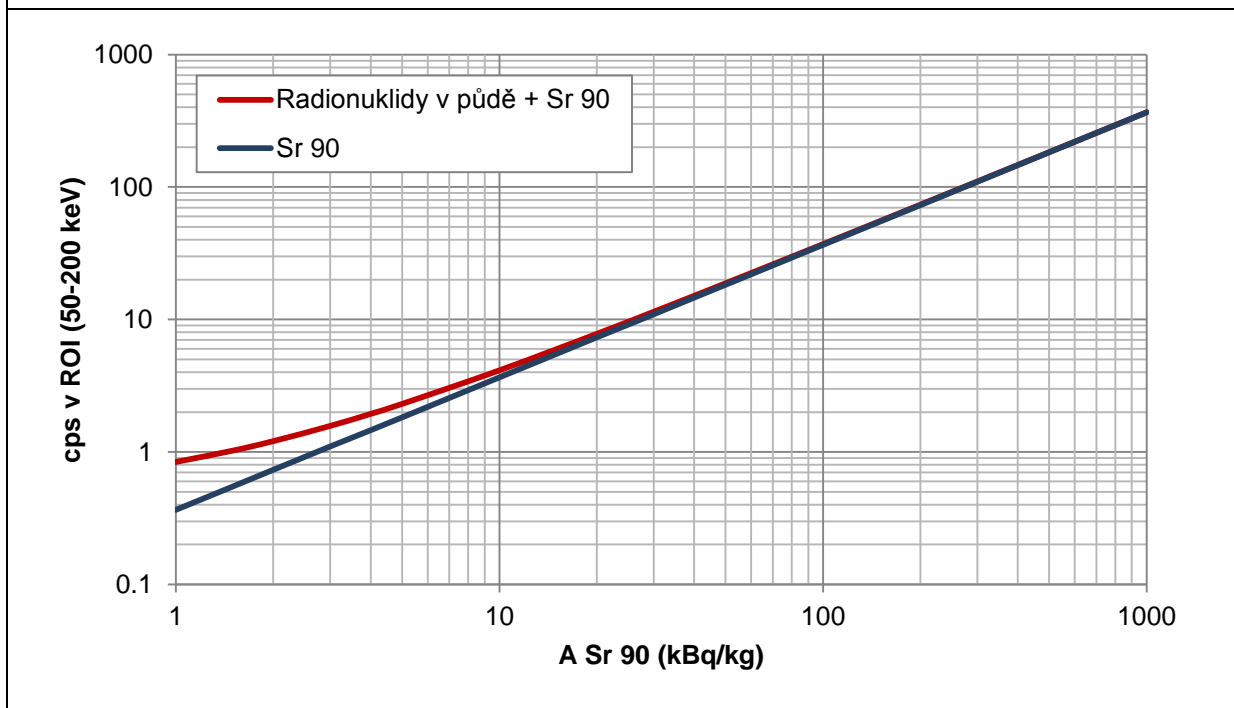
Obrázek 9 Porovnání spekter vzorku půdy s různým obsahem ^{90}Sr na pozadí přírodních RN. HPGe detektor s 10% relativní účinností, masťovka 50 ml na detektoru. MC simulace



Poznámka: Jedná se o příklad. U, Th a Ac řada v rovnováze (43 Bq/kg U-řada, 36 Bq/kg Th-řada a 1,9 Bq/kg Ac-řada), ^{40}K (610 Bq/kg) a ^{137}Cs (16 Bq/kg). Půda (suchá) s hustotou 1,1 g/cm³. Šířka kanálu: 0,75 keV.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 41 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Obrázek 10 Podíl příspěvku impulsů ostatních RN do ROI v závislosti na aktivitě ^{90}Sr ve vzorku půdy, geometrie masťovky 50 ml, HPGe detektor s relativní účinností 10%, MC simulace



Poznámka: Jedná se o příklad. U, Th a Ac řada v rovnováze (43 Bq/kg U-řada, 36 Bq/kg Th-řada a 1,9 Bq/kg Ac-řada), ^{40}K (610 Bq/kg) a ^{137}Cs (16 Bq/kg). Půda (suchá) s hustotou 1,1 g/cm³. Šířka kanálu: 0,75 keV.

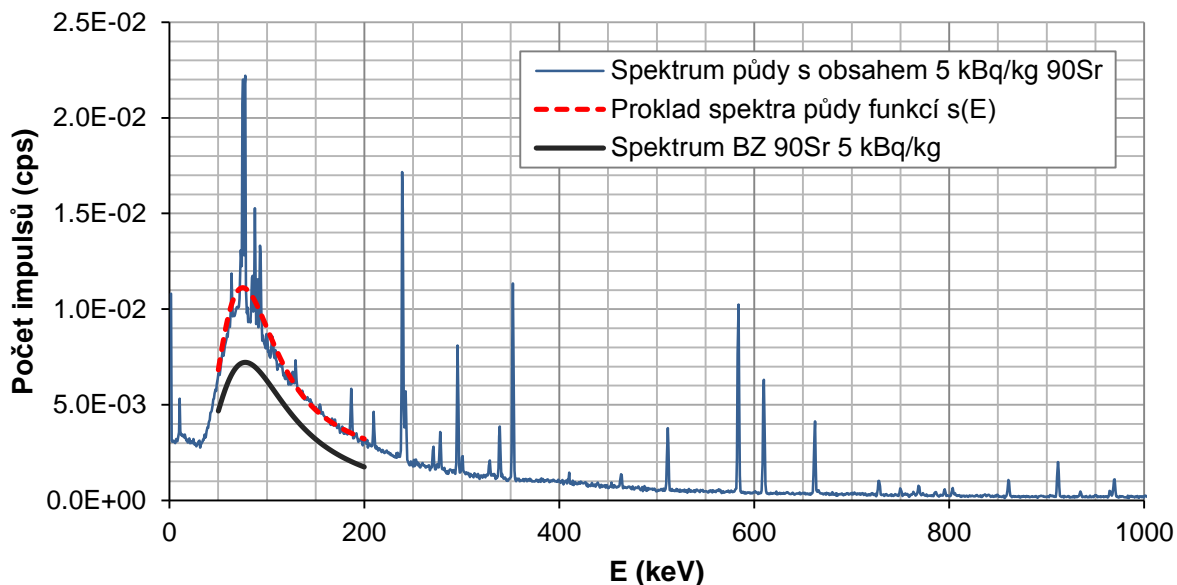
Pokud se stanovuje aktivita ^{90}Sr ze spektra BZ, je vhodné odečíst příspěvky RN přírodních přeměnových řad, ^{40}K a ^{137}Cs (a případně dalších RN přítomných ve vzorku), jinak dojde k nadhodnocení aktivity ^{90}Sr .

Na [obr. 11](#) a [obr. 12](#) jsou uvedena spektra vzorků půdy s obsahem 5 a 20 kBq/kg ^{90}Sr . Červenou přerušovanou čarou je naznačen proklad spektra vzorku a černou plnou čarou proklad čistého spektra ^{90}Sr (tzn. po odečtení příspěvků ostatních RN ve vzorku půdy; v tomto případě – 43 Bq/kg ^{238}U , 36 Bq/kg ^{234}Th , 1,9 Bq/kg ^{235}U , 610 Bq/kg ^{40}K a 16 Bq/kg ^{137}Cs). Spektra byla proložena polynomiální funkcí $s(E)$ stupně $n = 8$ (viz [část 5.4.3](#), vztah (6)). Rozdíl mezi červenou přerušovanou čarou a černou čarou náleží příspěvku od přírodních RN a ^{137}Cs o uvedených aktivitách.

Pokud neodečteme příspěvky ostatních RN o uvedených aktivitách z celkového spektra, dopustíme se nadhodnocení aktivity faktorem 1,5 v případě vzorku půdy s obsahem 5 kBq/kg ^{90}Sr a faktorem 1,1 v případě vzorku půdy s obsahem 20 kBq/kg ^{90}Sr .

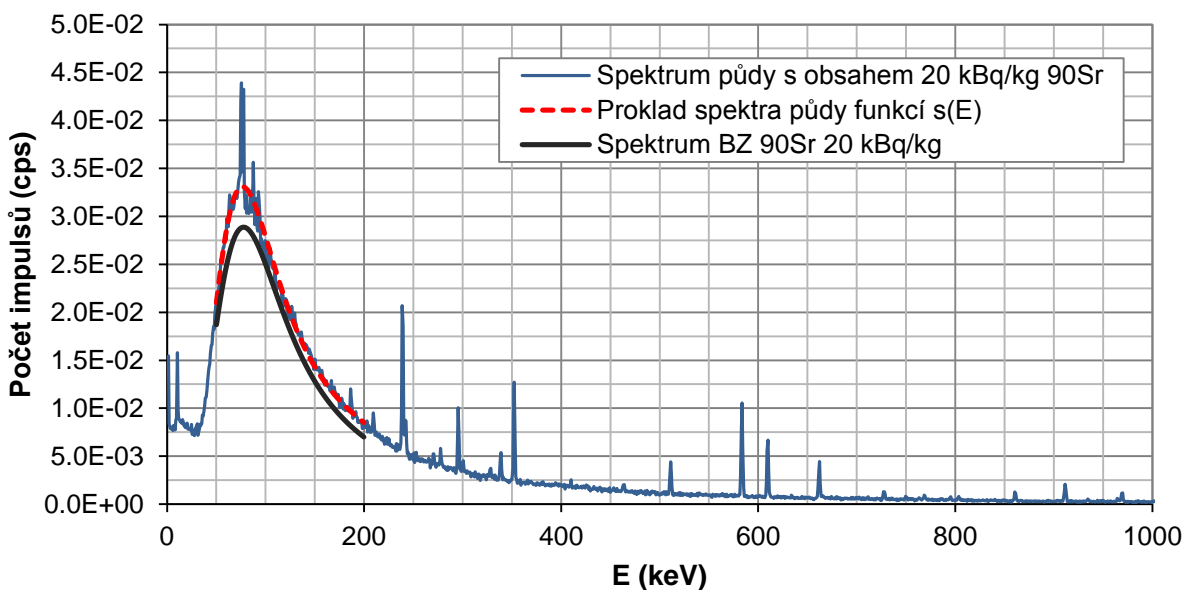
Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 42 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Obrázek 11 Spektrum RN v půdě s obsahem 5 kBq/kg ^{90}Sr , geometrie masťovky 50 ml, HPGe detektor s relativní účinností 10%, MC simulace



Poznámky: Jedná se o příklad. U, Th, Ac řada v rovnováze (43 Bq/kg U-řada, 36 Bq/kg Th-řada a 1,9 Bq/kg Ac-řada), ^{40}K (610 Bq/kg) a ^{137}Cs (16 Bq/kg). Půda (suchá) s hustotou 1,1 g/cm³. Šířka kanálu: 0,75 keV. Proklad polynomiální funkcí $s(E)$ stupně 8 (viz část 5.4.3 vztah (6)).

Obrázek 12 Spektrum RN v půdě s obsahem 20 kBq/kg ^{90}Sr , geometrie masťovky 50 ml, HPGe detektor s relativní účinností 10%, MC simulace



Poznámky: Jedná se o příklad. U, Th, Ac řada v rovnováze (43 Bq/kg U-řada, 36 Bq/kg Th-řada a 1,9 Bq/kg Ac-řada), ^{40}K (610 Bq/kg), ^{137}Cs (16 Bq/kg). Půda (suchá) s hustotou 1,1 g/cm³. Šířka kanálu: 0,75 keV. Proklad polynomiální funkcí $s(E)$ stupně 8 (viz část 5.4.3 vztah (6)).

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 43 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

PŘÍLOHA VII: Referenční spektra

Referenční spektra slouží pro hodnocení obsahu ^{90}Sr ve vzorku.

Referenční spektra se dělí na

- referenční srovnávací spektra
- referenční odečítací spektra.

Referenční srovnávací spektra jsou spektra sloužící k posouzení přítomnosti ^{90}Sr a k odhadu jeho aktivity porovnáním se spektrem neznámého vzorku. Obecně se skládají ze spekter RN emitujících záření gama a spekter BZ ^{90}Sr . Připraví se tak, že se ke spektru vzorku (např. půdy) s obvyklým obsahem RN emitujících záření gama přičtou spektra BZ ^{90}Sr s referenčními aktivitami v rozmezí 1 – 1000 kBq/kg.

Referenční odečítací spektra jsou spektra jednotlivých RN emitujících záření gama, které mohou být přítomné v měřeném vzorku, a které je vhodné odečíst z celkového spektra vzorku, aby mohla být stanovena aktivita ^{90}Sr ze spektra BZ spolehlivěji.

Referenční spektra srovnávací i odečítací lze získat měřením nebo pomocí MC simulace, případně kombinací obou metod.

Pro získání referenčních spekter měřením, je nutné mít připravené vhodné etalony. Objemové kalibrační etalony jsou standardně vyráběné jako gel s hustotou blízkou 1 g/cm^3 . Většina stanovovaných vzorků je ale zpravidla odlišná od kalibračních etalonů, jak materiálovým složením, tak i hustotou, takže příprava spekter často ještě vyžaduje zavedení korekcí.

Využití MC simulací řeší problém s kalibračními etalony a korekcemi na složení a hustotu vzorku, ale přináší s sebou problém nutné znalosti vnitřní struktury HPGe detektoru a dalších parametrů pro zadání geometrie úlohy. K určení vnitřní struktury lze využít obecně známých informací o konstrukci detektoru, parametrů dodaných k detektoru výrobcem a rentgenového nebo gama (např. zdroj ^{137}Cs) snímkování detektoru, z kterého se rozměry struktur dají odhadnout.

VII.1 Postup získání referenčních spekter měřením

VII.1.1 Příprava referenčních srovnávacích spekter měřením

K přípravě je nutné:

- a) naměřit spektrum BZ etalonu ^{90}Sr ,
- b) naměřit spektrum srovnávacího (referenčního) vzorku (půda, voda, mléko, ...), který neobsahuje ^{90}Sr (tzn. spektrum vzorku, kde není BZ ^{90}Sr pozorovatelné), a který je podobný složením a hustotou vzorkům analyzovaným.

Srovnávacích vzorků uvedených v bodě b) může být více; mohou se lišit složením, hustotou a různým poměrem RN emitujících gama záření.

U všech naměřených spekter v a) i b) se odečte pozadí, tj. odečte se spektrum získané měřením odezvy detektoru bez vzorku.

Spektrum srovnávacího vzorku (s odečteným pozadím) a spektrum etalonu ^{90}Sr (s odečteným pozadím) resp. jejich počet impulsů v ROI se přepočítají na cps/(Bq/kg). Protože spektrum srovnávacího vzorku obsahuje různé aktivity přírodních RN, je nutné přepočítání provést pro 1 vybraný RN; ostatní nebudou normovány, počet impulsů v ROI bude odpovídat jejich aktivitám děleným číselně aktivitou vybraného RN. Pro půdu a podobné vzorky je vhodným RN ^{226}Ra , pro mléko a maso ^{40}K .

Naměřené spektrum gelového etalonu ^{90}Sr , resp. počet impulsů v ROI gelového etalonu ^{90}Sr (v cps/(Bq/kg)) pro daný detektor a geometrii se násobením korekčním faktorem přepočte na požadovaný materiál pomocí faktorů z [tab. 9 Přílohy III](#). Graficky je přepočten počátek spektra

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 44 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

pro jednotlivé kanály až do 600 keV uveden na [obr. 13](#). Poté se spektrum (resp. oblast ROI) vynásobí postupně referenčními aktivitami ⁹⁰Sr v rozsahu 1 až 1000 kBq/kg (např. 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 500 a 1000 kBq/kg). Jako příklad je výsledek uveden na [obr. 14](#) pro půdu. Příklad přepočtu spektra etalonu na spektrum BZ pomocí korekčního faktoru byl ukázán také již na [obr. 7 Přílohy III](#).

Korekční faktory uvedené v [tab. 9 Přílohy III](#) jsou platné pro HPGe detektory typu-p a pro geometrii masťovka 50 a 200 ml na detektoru.

Zvolí se sada aktivit RN emitujících záření gama, které se běžně vyskytují v měřených vzorcích. Spektrum srovnávacího vzorku v cps/(Bq/kg) se vynásobí zvolenou aktivitou pro ten RN, pro který bylo normováno.

Spektra ⁹⁰Sr s referenčními aktivitami se jednotlivě přičtou k jednotlivým spektrům srovnávacích vzorků (půda, voda, mléko, ...) přepočtených na zvolené aktivity RN emitujících záření gama. Tím se získají spektra s požadovaným obsahem ⁹⁰Sr a dalších RN, která budou sloužit jako srovnávací.

Takto se získá poměrně rozsáhlá sada srovnávacích spekter a údajů o počtu impulsů v ROI. Příklad rozsahu a počtu srovnávacích spekter je uveden v [tab. 11a](#); počet spekter je dán součinem počtu možností v jednotlivých sloupcích. Násobení spekter zvolenou aktivitou lze také učinit až po zjištění aktivit RN emitujících gama záření v reálném neznámém vzorku, takže počet srovnávacích spekter může být výrazně omezen a srovnávací spektra mohou lépe odpovídat spektru neznámého vzorku.

Příklad referenčních srovnávacích spekter pro půdu s konkrétním obsahem RN je uveden na [obr. 15](#) a příklad zpracování počtu impulsů v ROI srovnávacích spekter pro běžně se vyskytující aktivity RN emitujících záření gama v půdě v [tab. 11b](#) (odpovídá řádce „Půda suchá“ z [tab. 11a](#)). [Tab. 11b](#) ve skutečnosti nebyla získána měřením, ale vznikla na základě dat z [tab. 14](#) (MC simulace) a [tab. 16](#), zejména v [tab. 16](#) jsou již hodnoty z [tab. 11b](#) obsaženy, ale v méně přehledné formě.

Tabulka 11a Příklad rozsahu a počtu srovnávacích spekter

Matrice	Přírodní RN Aktivita (Bq/kg)	¹³⁷ Cs Aktivita (Bq/kg)	⁹⁰ Sr Aktivita (kBq/kg)	Počet spekter
Mléko tekuté	⁴⁰ K - 50	0	1, 10	2
Mléko sušené	⁴⁰ K - 500	0	1, 5, 10	3
Voda	⁴⁰ K - 0	0	1, 10	2
Půda suchá	U, Th, ⁴⁰ K - 10, 10, 100 U, Th, ⁴⁰ K - 50, 50, 500 U, Th, ⁴⁰ K - 100, 100, 1000	0 100	1, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000	54
Půda 30% vlhkost	U, Th, ⁴⁰ K - 10, 10, 100 U, Th, ⁴⁰ K - 50, 50, 500 U, Th, ⁴⁰ K - 100, 100, 1000	0 100	1, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000	54
Půda 50% vlhkost	U, Th, ⁴⁰ K - 10, 10, 100 U, Th, ⁴⁰ K - 50, 50, 500 U, Th, ⁴⁰ K - 100, 100, 1000	0 100	1, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000	54
Písek suchý	U, Th, ⁴⁰ K - 10, 10, 100 U, Th, ⁴⁰ K - 50, 50, 500 U, Th, ⁴⁰ K - 100, 100, 1000	0 100	1, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000	54
Celkem				223

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika		List: 45 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření		Datum účinnosti: 1. 7. 2015

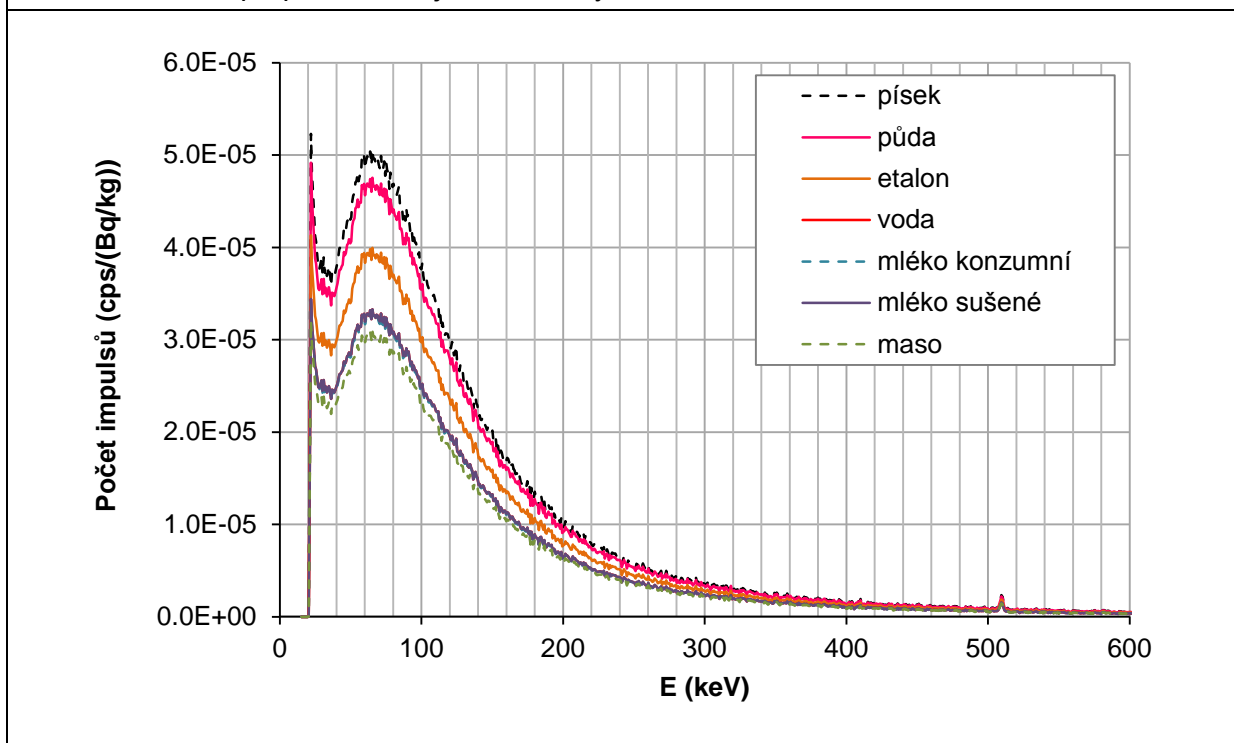
Tabulka 11b Součet počtu impulsů v ROI 50-200 keV ⁹⁰Sr a RN emitujících gama záření o různých aktivitách pro HPGe 10%, **mast'ovka 50 ml, půda suchá 1,1 g/cm³**

	A (Bq/kg)	cps	A (Bq/kg)	cps	A (Bq/kg)	cps
U řada	10	4,97E-02	50	2,49E-01	100	4,97E-01
Th řada	10	6,30E-02	50	3,15E-01	100	6,30E-01
K 40	100	3,70E-03	500	1,85E-02	1000	3,70E-02
Součet		0,12		0,58		1,16
Sr 90						
Sr 90		Součet Sr s U, Th a K				
A (kBq/kg)	cps	cps		cps		cps
1	0,18	0,30		0,76		1,35
5	0,91	1,03		1,49		2,07
10	1,82	1,94		2,40		2,98
20	3,64	3,76		4,22		4,80
30	5,46	5,58		6,04		6,62
40	7,28	7,40		7,86		8,44
50	9,10	9,22		9,68		10,26
100	18,20	18,32		18,78		19,36
200	36,40	36,52		36,98		37,56
500	91,00	91,12		91,58		92,16
1000	182,00	182,12		182,58		183,16
Cs 137						
	10	7,75E-03				
	100	7,75E-02				

Poznámka: Tab. 11b vznikla na základě dat z tab. 14 a 16, zejména v tab. 16 jsou již hodnoty z tab. 11b obsaženy, ale v méně přehledné formě.

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 46 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Obrázek 13 Naměřené spektrum etalonu ^{90}Sr v gelu v geometrii 50 ml masťovky na 10% HPGe detektoru přepočtené na jiné materiály



Poznámky: Přepočtení na jiné materiály pomocí korekčních faktorů uvedených v [tab. 9 Přílohy III](#). Voda a mléko (konzumní, sušené) v grafu splývají.

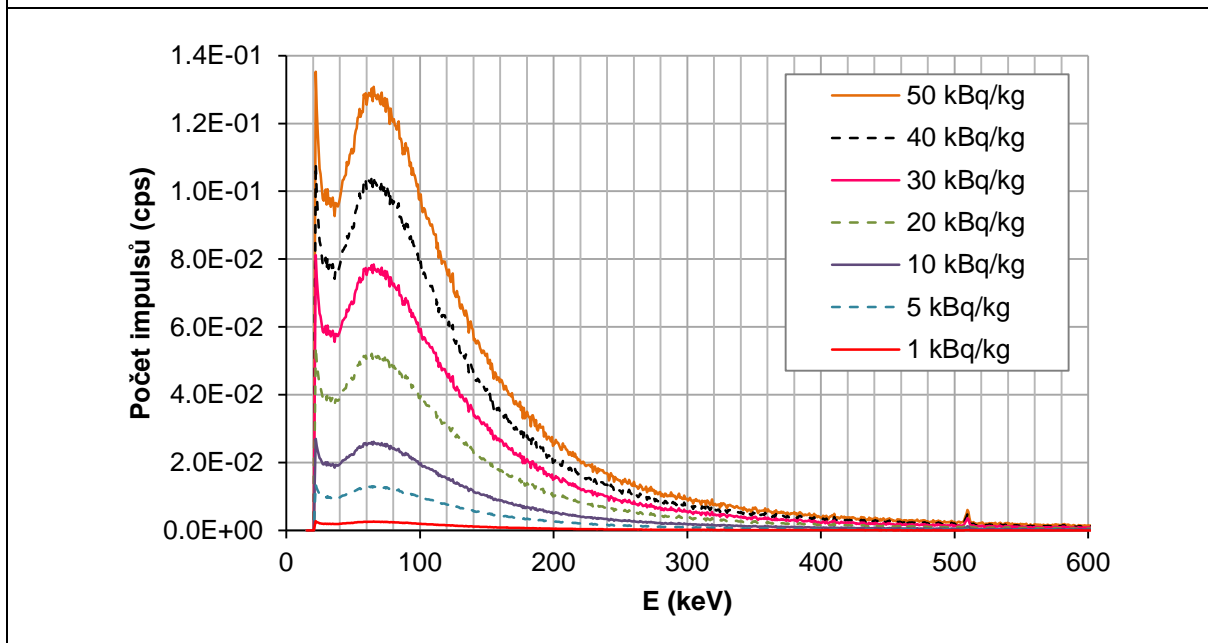
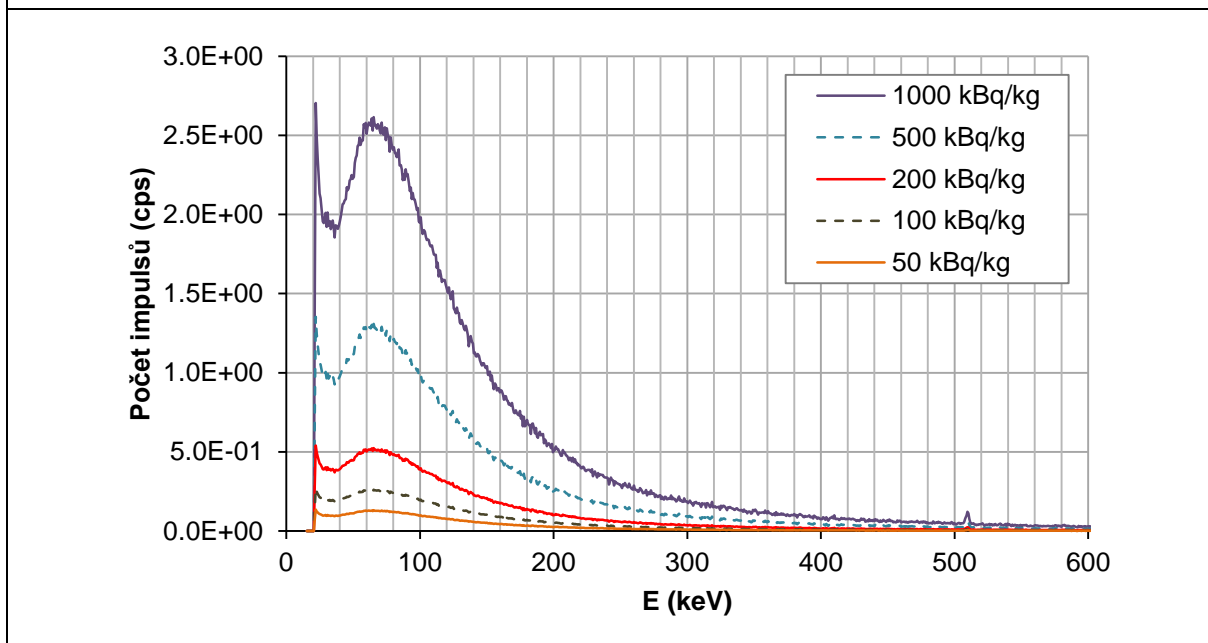
Počet impulsů v ROI 50 - 200 keV (cps/(Bq/kg)):

písek suchý ($2,3 \text{ g/cm}^3$)	- $8,14\text{E-}04$,	půda suchá ($1,1 \text{ g/cm}^3$)	- $3,66\text{E-}04$,
etalon (gel)	- $2,73\text{E-}04$,	voda	- $2,32\text{E-}04$,
mléko konzumní	- $2,39\text{E-}04$,	mléko sušené	- $1,09\text{E-}04$,
maso	- $2,23\text{E-}04$		

Např. hodnota pro písek se získá násobením hodnoty počtu impulsů pro gel korekčním faktorem z [tab. 9](#) a poměrem hmotností (resp. hustot) písku a gelu v uvedené geometrii měření.

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 47 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Obrázek 14 Naměřené spektrum ^{90}Sr etalonu přepočtené na spektra suché půdy (hustota $1,1 \text{ g/cm}^3$) s aktivitami ^{90}Sr v rozmezí 1 - 1000 kBq/kg v geometrii 50 ml masťovky, HPGe detektor s 10% relativní účinností



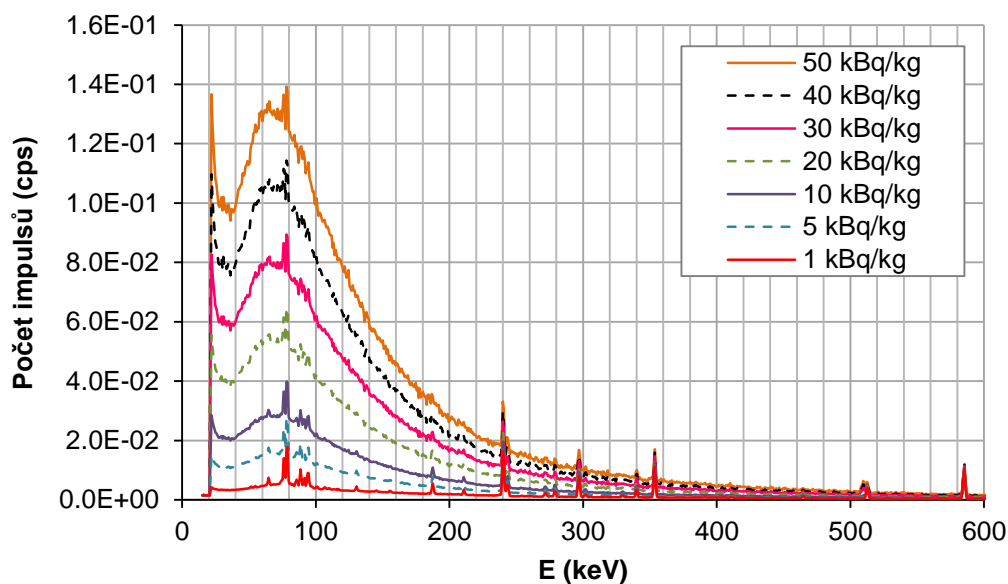
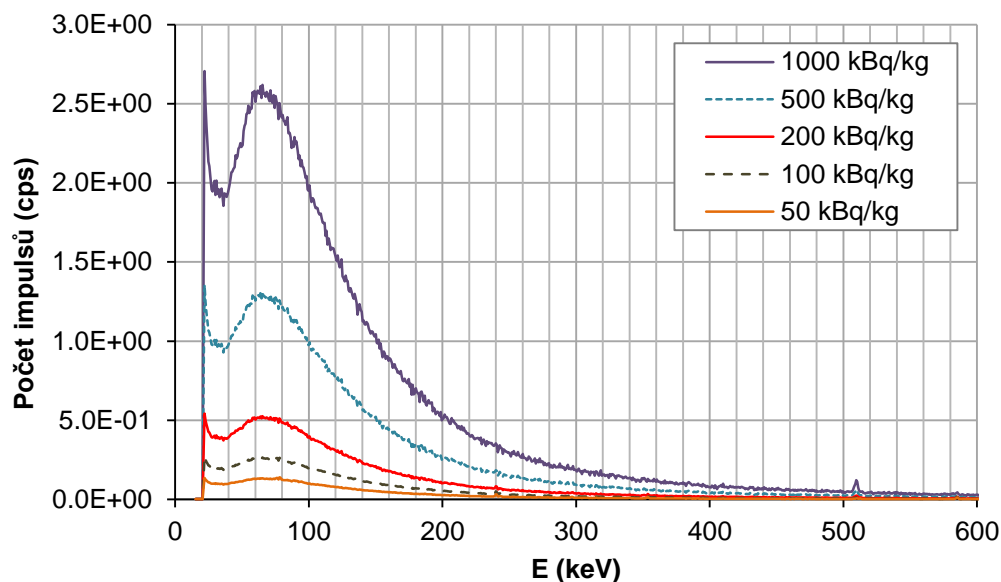
Poznámky: Gel v masťovce 50 ml na detektoru přepočtený na půdu pomocí korekčního faktoru 1,19 (viz [tab. 9 Přílohy III](#)).

Počet impulsů v ROI 50 - 200 keV (cps):

1 kBq/kg - 0,366	5 kBq/kg - 1,83	10 kBq/kg - 3,66
20 kBq/kg - 7,32	30 kBq/kg - 11,0	40 kBq/kg - 14,6
50 kBq/kg - 18,3	100 kBq/kg - 36,6	200 kBq/kg - 73,2
500 kBq/kg - 183	1000 kBq/kg - 366	

Státní ústav radiacní ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 48 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Obrazek 15 Spektra ^{90}Sr s aktivitami v rozmezí 1 - 1000 kBq/kg v půdě s přírodními RN a ^{137}Cs , HPGe detektor s 10% relativní účinností, masťovka 50 ml na detektoru.



Poznámky: Příklad. Půda (suchá) s hustotou $1,1 \text{ g/cm}^3$. U, Th, Ac řada v rovnováze (43 Bq/kg U-řada, 36 Bq/kg Th-řada a 1,9 Bq/kg Ac-řada), ^{40}K (610 Bq/kg) a ^{137}Cs (16 Bq/kg).

Počet impulsů v ROI 50 - 200 keV (cps/(Bq/kg)):

1 kBq/kg	- 0,841	5 kBq/kg	- 2,30	10 kBq/kg	- 4,13
20 kBq/kg	- 7,80	30 kBq/kg	- 11,5	40 kBq/kg	- 15,1
50 kBq/kg	- 18,8	100 kBq/kg	- 37,1	200 kBq/kg	- 73,7
500 kBq/kg	- 183	1000 kBq/kg	- 366		

Poznámka: Porovnáním dat v Poznámce u obr. 14 a 15 přírodní RN a ^{137}Cs o uvedených aktivitách přispívají do ROI 0,475 cps (rozdíl 0,841 a 0,366 cps)

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 49 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

VII.1.2 Příprava referenčních odečítacích spekter měřením

V případě referenčních odečítacích spekter jsou kladeny větší nároky na přesnost stanovení počtu impulsů v ROI než v případě srovnávacích spekter, proto níže uvedená metoda se liší od metody popsané výše. Nicméně lze v případě nutnosti i pro přípravu referenčních odečítacích spekter použít metodu popsanou výše a naopak.

K přípravě referenčních odečítacích spekter je nutné naměřit spektra U a Th řady v rovnováze, spektrum ^{40}K a spektra dalších RN, které se typicky vyskytují v měřeném vzorku (zejména ^{137}Cs). Zastoupení aktivit Ac řady v přírodě je zhruba 4,5% uranové řady, takže její příspěvek do ROI lze zanedbat.

Vzhledem k tomu, že může být problematické získat kalibrační etalon v matici podobné analyzovaným vzorkům, je možné naměřit spektra U-řady, Th řady, ^{40}K a ^{137}Cs v gelu, které standardně vyrábí ČMI. Spektrum U-řady v gelu nelze získat najednou, protože dodávány jsou etalony ^{226}Ra a přírodní směsi uranu a případně i ^{210}Pb (v rovnováze s jeho krátkodobým dceřiným produktem ^{210}Bi , který sice neemituje gama záření, ale maximální energie beta záření je 1161 keV a může přispívat do ROI BZ) odděleně. Kalibraci pro ^{40}K lze provést také pomocí levnějšího volně prodejného chloridu draselného (v 1 g přírodního draslíku je 31,3 Bq ^{40}K , takže v 1 g KCl je 16,4 Bq ^{40}K).

Od všech naměřených spekter se odečte pozadí a spektra se přepočítají na cps/(Bq/kg).

V případě měření spektra ^{226}Ra , pokud z etalonu emanuje ^{222}Rn (u Th-řady prakticky nerovnováha nenastává díky krátkému poločasu přeměny ^{220}Rn), je nutné provést korekci spektra v ROI, aby počet impulsů odpovídal rovnovážnému stavu mezi ^{226}Ra a jeho dceřinými produkty. Korekce se provede následovně: definujeme koeficient nerovnováhy K_{Ner} jako podíl průměrné aktivity dceřiných produktů ^{214}Pb a ^{214}Bi a aktivity ^{226}Ra stanovené z celého píku 186 keV. Protože dceřiné produkty ^{226}Ra přispívají do ROI více než 90%, lze přepočet provést podle přibližného vztahu

$$N_{\text{Ra}}^{\text{St0}}(E) = N_{\text{Ra-Ner}}^{\text{St0}}(E) \cdot K_{\text{Ner}} \quad (\text{VII-1})$$

kde

$N_{\text{Ra}}^{\text{St0}}(E)$ je na nerovnováhu korigovaný počet impulsů za jednotku času v části ROI příslušné energetickému intervalu se středem o energii E referenčního spektra gelu (tj. příslušný jednomu kanálu mnohakanálového analyzátoru) vztažený na jednotkovou hmotnostní aktivitu (cps/(Bq/kg)) ^{226}Ra

$N_{\text{Ra-Ner}}^{\text{St0}}(E)$ je naměřený na nerovnováhu nekorigovaný počet impulsů za jednotku času v části ROI příslušné energetickému intervalu se středem o energii E referenčního spektra gelu vztažený na jednotkovou hmotnostní aktivitu (cps/(Bq/kg)) ^{226}Ra

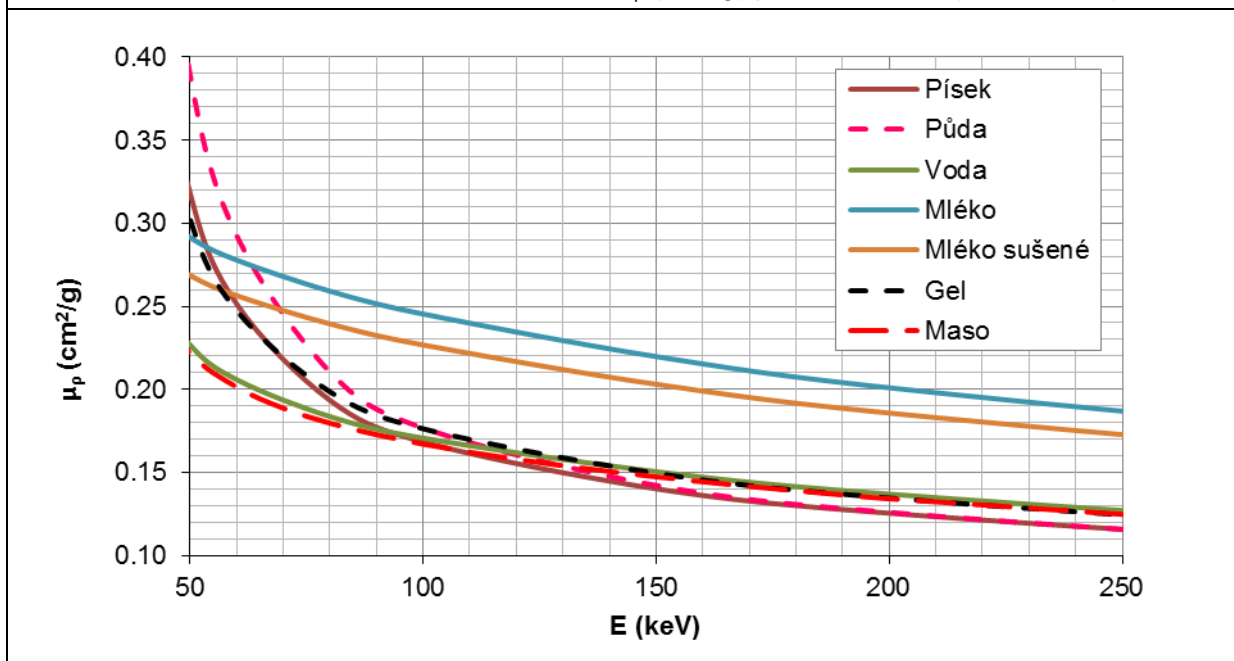
K_{Ner} je koeficient nerovnováhy definovaný jako podíl průměrné aktivity dceřiných produktů ^{214}Pb a ^{214}Bi a aktivity ^{226}Ra stanovené z celého píku 186 keV při měření gelového etalonu

Získaná spektra pocházející z měření RN v gelu přepočítáme na rozdílnost v samoabsorpci záření gama v gelu a v matici, pro kterou odečítací spektra chceme získat.

Přepočet na rozdílnost v samoabsorpci záření gama v gelu a v matici je dán poměrem zeslabení fotonů v matici dané hustoty a složení a v gelu závislého na lineárním součiniteli zeslabení μ (cm^{-1}), který se získá vynásobením hmotnostního součinitele zeslabení μ_p (cm^2/g) hustotou. Hmotnostní součinitele zeslabení lze získat pomocí volně dostupné databáze účinných průřezů XCOM [10] zadáním prvkového složení vzorku. Závislost hmotnostních součinitelů zeslabení na energii pro gel, písek, půdu, vodu a mléko je uveden na obr. 16 a v tab. 12, kde je interval energií ROI dělen po 10 keV.

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 50 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Obrázek 16 Hmotnostní součinitel zeslabení μ_p (cm^2/g) pro oblast ROI (50-200 keV)



Poznámka: Hmotnostní součinitele zeslabení byly vypočteny pomocí databáze XCOM [10]

Tabulka 12 Hmotnostní součinitel zeslabení μ_p (cm^2/g) pro oblast ROI 50-200 keV

E (keV)	Gel	Písek (suchý)	Půda (suchá)	Voda	Mléko	Mléko sušené	Maso
50	3,03E-01	3,19E-01	3,90E-01	2,27E-01	2,92E-01	2,69E-01	2,22E-01
60	2,48E-01	2,52E-01	2,93E-01	2,06E-01	2,78E-01	2,57E-01	2,01E-01
70	2,17E-01	2,15E-01	2,41E-01	1,93E-01	2,68E-01	2,47E-01	1,89E-01
80	1,99E-01	1,94E-01	2,11E-01	1,84E-01	2,59E-01	2,40E-01	1,80E-01
90	1,86E-01	1,79E-01	1,91E-01	1,77E-01	2,52E-01	2,33E-01	1,73E-01
100	1,76E-01	1,68E-01	1,77E-01	1,71E-01	2,45E-01	2,27E-01	1,67E-01
110	1,69E-01	1,60E-01	1,67E-01	1,66E-01	2,39E-01	2,21E-01	1,62E-01
120	1,63E-01	1,54E-01	1,59E-01	1,61E-01	2,34E-01	2,16E-01	1,58E-01
130	1,58E-01	1,49E-01	1,52E-01	1,57E-01	2,29E-01	2,12E-01	1,54E-01
140	1,53E-01	1,44E-01	1,47E-01	1,54E-01	2,24E-01	2,07E-01	1,51E-01
150	1,50E-01	1,40E-01	1,42E-01	1,51E-01	2,20E-01	2,03E-01	1,47E-01
160	1,46E-01	1,37E-01	1,38E-01	1,48E-01	2,16E-01	1,99E-01	1,44E-01
170	1,43E-01	1,34E-01	1,35E-01	1,45E-01	2,12E-01	1,96E-01	1,42E-01
180	1,40E-01	1,31E-01	1,32E-01	1,42E-01	2,08E-01	1,92E-01	1,39E-01
190	1,37E-01	1,28E-01	1,29E-01	1,39E-01	2,04E-01	1,89E-01	1,37E-01
200	1,35E-01	1,26E-01	1,26E-01	1,37E-01	2,01E-01	1,86E-01	1,34E-01

Pro materiály s atomovým číslem < 20 (kromě vodíku, kde hmotnostní součinitel zeslabení je přibližně dvojnásobný), lze použít přibližný vztah pro závislost hmotnostního součinitele zeslabení na energii ve tvaru

$$\mu_p = e^{-1,03 - 0,0296 \times \ln(E) - 0,0323 \times \ln^2(E)} \quad (\text{VII-2})$$

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 51 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Koeficienty funkce byly získány prokladem dat z publikace [11].

K odhadu korekce využijeme následujícího zjednodušení.

Zeslabení svazku fotonů o dané energii, které jsou generovány homogenně rozloženým zdrojem těchto fotonů podél úsečky délky d (odpovídající výšce vzorku v měřené geometrii) ve směru této úsečky (tj. dochází k interakci generovaných fotonů s materiálem nacházejícím se podél dráhy fotonu) je dáno vztahem

$$Z = \frac{1}{\mu_{\rho} \rho d} (1 - e^{-\mu_{\rho} \rho d})$$

kde

- Z je relativní zeslabení svazku fotonů o energii E (tj. ze svazku ubývají fotony fotoefektem a Comptonovým rozptylem),
- μ_{ρ} je hmotnostní součinitel zeslabení závislý na energii fotonů E ,
- ρ je hustota materiálu,
- d je délka úsečky (výška vzorku).

Korekci lze pak odhadnout poměrem zeslabení v matrici a v gelu. Pro počet impulsů v daném energetickém intervalu (reprezentovaném energií E) spektra dané matrice vzhledem k počtu impulsů spektra gelového etalonu lze psát

$$N_i^{St}(E) = N_i^{St0}(E) \cdot \frac{\mu_{\rho G}(E) \cdot \rho_G (1 - e^{-\mu_{\rho M}(E) \cdot \rho_M \cdot d})}{\mu_{\rho M}(E) \cdot \rho_M (1 - e^{-\mu_{\rho G}(E) \cdot \rho_G \cdot d})} \quad (\text{VII-3})$$

kde

$N_i^{St0}(E)$ je počet impulsů za jednotku času v části ROI příslušné energetickému intervalu (kanálu) se středem o energii E referenčního spektra gelu vztažený na jednotkovou hmotnostní aktivitu (cps/(Bq/kg)) i -tého RN

$N_i^{St}(E)$ je počet impulsů za jednotku času v části ROI příslušné energetickému intervalu (kanálu) se středem o energii E referenčního spektra matrice (daného složení a hustoty) vztažený na jednotkovou hmotnostní aktivitu (cps/(Bq/kg)) i -tého RN

G, M zkratky se vztahují ke gelu resp. matrici

Korekce je dána podílem

$$\frac{\mu_{\rho G}(E) \cdot \rho_G (1 - e^{-\mu_{\rho M}(E) \cdot \rho_M \cdot d})}{\mu_{\rho M}(E) \cdot \rho_M (1 - e^{-\mu_{\rho G}(E) \cdot \rho_G \cdot d})} \quad (\text{VII-4})$$

Hodnoty korekce dané výrazem (VII-4) jsou pro geometrii 50 ml a 200 ml vzorku v masťovce (2 výšky vzorku d) a různé hustoty ρ uvedeny v tab. 13a – 13d. Protože se korekce provádí jen v oblasti ROI 50-200 keV, může být na hranicích intervalu ve spektru viditelný skok (nejvýraznější je z uvedených materiálů pro písek).

V případě, že se analyzovaný neznámý vzorek liší materiálovým složením a hustotou od vzorku, pro který bylo připraveno referenční odečítací spektrum, je nutné opět provést přepočty pomocí korekcí podobným způsobem, jaký byl zmíněn výše. A to včetně případu, kdy v analyzovaném vzorku nebude v rovnováze aktivita ^{226}Ra s aktivitami dceřiných produktů ^{214}Pb a ^{214}Bi , tj. pokud koeficient K_{Ner} ze vztahu (VII-1) stanovený pro analyzovaný vzorek je podstatně menší než 1. V tom případě je nutné tímto koeficientem počty impulsů v ROI referenčního odečítacího spektra ^{226}Ra vynásobit.

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika					List: 52 z 79				
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření					Datum účinnosti: 1. 7. 2015				

Tabulka 13a Hodnoty poměru zeslabení v půdě a gelu dané vztahem (VII-4) pro výšku vzorku 1,6 cm (masťovka 50 ml) a 6,3 cm (masťovka 200 ml) v oblasti ROI 50-200 keV

Výška (cm)	Půda (suchá)									
	1,6					6,3				
Hustota (g/cm ³)	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
E (keV)	Poměr zeslabení půda / gel					Poměr zeslabení půda / gel				
50	0,94	0,89	0,84	0,80	0,76	0,83	0,71	0,62	0,55	0,50
60	0,96	0,92	0,89	0,85	0,82	0,89	0,79	0,70	0,63	0,57
70	0,98	0,95	0,91	0,88	0,85	0,94	0,84	0,75	0,68	0,62
80	0,99	0,96	0,93	0,90	0,87	0,96	0,87	0,79	0,72	0,66
90	0,99	0,97	0,94	0,91	0,89	0,98	0,89	0,82	0,75	0,69
100	1,00	0,97	0,95	0,92	0,90	0,99	0,91	0,83	0,77	0,71
110	1,00	0,97	0,95	0,93	0,90	1,00	0,92	0,85	0,78	0,73
120	1,00	0,98	0,95	0,93	0,91	1,00	0,93	0,86	0,79	0,74
130	1,00	0,98	0,96	0,94	0,91	1,01	0,93	0,86	0,80	0,75
140	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	1,01	0,94	0,87	0,81	0,76
150	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	1,01	0,94	0,87	0,82	0,76
160	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	1,02	0,94	0,88	0,82	0,77
170	1,00	0,98	0,96	0,94	0,93	1,02	0,95	0,88	0,82	0,77
180	1,00	0,98	0,97	0,95	0,93	1,02	0,95	0,89	0,83	0,78
190	1,00	0,99	0,97	0,95	0,93	1,02	0,95	0,89	0,83	0,78
200	1,01	0,99	0,97	0,95	0,93	1,02	0,95	0,89	0,84	0,79

Tabulka 13b Hodnoty poměru zeslabení v písku a gelu dané vztahem (VII-4) pro výšku vzorku 1,6 cm (masťovka 50 ml) a 6,3 cm (masťovka 200 ml) v oblasti ROI 50-200 keV

Výška (cm)	Písek									
	1,6					6,3				
Hustota (g/cm ³)	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
E (keV)	Poměr zeslabení písek / gel					Poměr zeslabení písek / gel				
50	0,77	0,76	0,74	0,73	0,71	0,52	0,50	0,48	0,46	0,44
60	0,82	0,80	0,79	0,77	0,76	0,57	0,54	0,52	0,50	0,48
70	0,84	0,83	0,82	0,80	0,79	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52
80	0,86	0,84	0,83	0,82	0,81	0,63	0,60	0,58	0,56	0,54
90	0,87	0,86	0,85	0,83	0,82	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56
100	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,66	0,64	0,62	0,60	0,58
110	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,67	0,65	0,63	0,61	0,59
120	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60
130	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,69	0,66	0,64	0,62	0,61
140	0,89	0,88	0,87	0,86	0,86	0,69	0,67	0,65	0,63	0,61
150	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62
160	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62
170	0,90	0,89	0,88	0,87	0,87	0,71	0,69	0,67	0,65	0,63
180	0,90	0,89	0,88	0,88	0,87	0,71	0,69	0,67	0,65	0,63
190	0,90	0,90	0,89	0,88	0,87	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64
200	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 53 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 13c Hodnoty poměru zeslabení v sušeném mléce a gelu dané vztahem (VII-4) pro výšku vzorku 1,6 cm (masťovka 50 ml) a 6,3 cm (masťovka 200 ml) v oblasti ROI 50-200 keV

Výška (cm)	Mléko sušené									
	1,6					6,3				
Hustota (g/cm ³)	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
E (keV)	Poměr zeslabení mléko sušené / gel					Poměr zeslabení mléko sušené / gel				
50	1,14	1,13	1,12	1,11	1,10	1,55	1,50	1,44	1,39	1,34
60	1,10	1,09	1,08	1,07	1,06	1,39	1,34	1,30	1,25	1,21
70	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04	1,31	1,27	1,22	1,18	1,15
80	1,07	1,06	1,05	1,04	1,03	1,26	1,22	1,18	1,14	1,11
90	1,06	1,05	1,04	1,03	1,02	1,23	1,19	1,16	1,12	1,09
100	1,06	1,05	1,04	1,03	1,02	1,21	1,18	1,14	1,10	1,07
110	1,05	1,04	1,03	1,03	1,02	1,20	1,16	1,13	1,09	1,06
120	1,05	1,04	1,03	1,02	1,02	1,19	1,15	1,12	1,09	1,05
130	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1,18	1,14	1,11	1,08	1,05
140	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1,17	1,14	1,11	1,07	1,05
150	1,04	1,04	1,03	1,02	1,01	1,17	1,13	1,10	1,07	1,04
160	1,04	1,03	1,03	1,02	1,01	1,16	1,13	1,10	1,07	1,04
170	1,04	1,03	1,03	1,02	1,01	1,16	1,13	1,10	1,07	1,04
180	1,04	1,03	1,03	1,02	1,01	1,15	1,12	1,09	1,06	1,04
190	1,04	1,03	1,02	1,02	1,01	1,15	1,12	1,09	1,06	1,03
200	1,04	1,03	1,02	1,02	1,01	1,15	1,12	1,09	1,06	1,03

Tabulka 13d Hodnoty poměru zeslabení v matrici (voda, mléko, maso) a gelu dané vztahem (VII-4) pro výšku vzorku 1,6 cm (masťovka 50 ml) a 6,3 cm (masťovka 200 ml) v oblasti ROI 50-200 keV

E (keV)	Voda		Mléko (tekuté)		Maso	
Hustota (g/cm ³)	1,00		1,03		1,05	
Výška (cm)	1,6	6,3	1,6	6,3	1,6	6,3
50	1,05	1,18	1,00	0,99	1,05	1,16
60	1,03	1,10	0,97	0,90	1,02	1,08
70	1,02	1,05	0,95	0,86	1,01	1,04
80	1,01	1,03	0,95	0,84	1,01	1,02
90	1,00	1,02	0,94	0,83	1,00	1,00
100	1,00	1,01	0,94	0,82	1,00	0,99
110	1,00	1,00	0,94	0,82	1,00	0,99
120	1,00	1,00	0,94	0,82	1,00	0,99
130	1,00	0,99	0,94	0,82	0,99	0,98
140	1,00	0,99	0,94	0,82	0,99	0,98
150	1,00	0,99	0,94	0,82	0,99	0,98
160	1,00	0,99	0,94	0,82	0,99	0,98
170	1,00	0,99	0,94	0,82	0,99	0,98
180	1,00	0,99	0,94	0,82	0,99	0,98
190	1,00	0,99	0,94	0,82	0,99	0,98
200	1,00	0,99	0,94	0,82	0,99	0,98

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 54 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Korekci na samoabsorpci lze tedy spočítat pro jednotlivé energie (kanály) oblasti ROI buď přímo dosazením (VII-2) do vztahu (VII-4) pro zvolenou matici a její hustotu nebo pomocí zmíněné literatury [10] nebo pomocí tab. 13a – 13d.

Dále je nutné

- získanými korekcemi na zeslabení vynásobit počty impulsů (cps/(Bq/kg)) v jednotlivých kanálech oblasti ROI. Takto se získá pro každou z matic sada odečítacích spekter (v rozsahu jednotlivých kanálů oblasti ROI) a sada „odečítacích“ celkových počtů impulsů v oblasti ROI. Pro půdní matrice lze uvažovat pro každou o 5 až 6 spektrech (2 až 3 pro U-řadu, tj. U_{Nat} , ^{226}Ra a případně ^{210}Pb , po jednom pro Th-řadu, ^{40}K a ^{137}Cs), pro mléko a maso po 1 spektru (^{40}K). Aktivita ^{137}Cs bude v ostatních maticích ve většině případů tak nízká, že odečítací spektrum nebude potřeba; podobně nebudou odečítací spektra zřejmě potřeba pro další RN emitující záření gama. Ukázka simulovaných spekter pro matici suchá půda o hustotě $1,1 \text{ g/cm}^3$ pro geometrii 50 ml masťovky na detektoru o účinnosti 10 % je uvedena na obr. 17. Celkové počty impulsů v oblasti ROI (v cps/(Bq/kg)) jsou uvedeny v tab. 14.
- spektra získaná v bodu a) vynásobit aktivitou RN v hodnoceném vzorku (nebo aktivitou obvyklou pro daný typ vzorku). Spektra sečíst. Výsledné spektrum je v cps. Toto je vhodné provádět až dle naměřených aktivit RN emitujících záření gama v neznámém vzorku (s podezřením na obsah ^{90}Sr).

VII.2 Postup získání referenčních spekter pomocí MC simulace

Výhodou MC simulace je, že referenční spektra lze získat pro libovolný RN a matici.

Nevýhodou MC simulace spekter je nutná znalost vnitřních parametrů a rozměrů detektoru, které musí být definovány ve vstupním souboru. Parametry udávané výrobcem detektorů jsou většinou nedostatečné. Při zadání přibližných rozměrů se rozdíl mezi měřením a MC simulací běžně pohybuje okolo 10 až 20 % (porovnání účinností v píku úplné absorpce v oblasti 30 keV - 3 MeV). Při znalosti přesnějších parametrů a rozměrů detektoru lze běžně dosáhnout rozdílu mezi měřením a MC simulací do 3 %.

Kromě zadání správné geometrie a definice materiálů je nutné správně definovat energetickou a prostorovou distribuci zdroje, šířku kanálů a Gaussovské rozšíření píků úplné absorpce. Příklad definice parametrů zdroje je uveden níže.

Simulovaná spektra jsou automaticky normována na cps/Bq a jsou bez pozadí.

Postup získání referenčních spekter je podobný, jaký byl již uveden pro případ přípravy referenčních spekter (srovnávacích, odečítacích) měřením.

VII.2.1 Příprava referenčních srovnávacích spekter pomocí MC simulace

K přípravě je nutné:

- Nasimulovat jednotlivá spektra (^{90}Sr , RN U, Th a Ac řady, ^{40}K , ^{137}Cs a případně dalších RN) pro danou geometrii a matici (v cps/Bq) o dané hustotě.
- Přepočítat spektra vynásobením počtu impulsů hmotností vzorku (v kg) na cps/(Bq/kg).
- Spektra RN U, Th a Ac řady, ^{40}K , ^{137}Cs a případně další vynásobit aktivitou RN (v Bq/kg) v hodnoceném vzorku (nebo aktivitou obvyklou pro daný typ vzorku). Spektra sečíst. Výsledné spektrum je v cps.
- Spektrum ^{90}Sr vynásobit aktivitami ^{90}Sr v rozmezí 1 – 1000 kBq/kg (podobně jako na obr. 14). Výsledné spektrum je v cps.
- Sečíst spektrum získané v bodě c) odděleně s jednotlivými spektry získanými v bodě d). Výsledné spektrum je v cps.

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 55 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Bod c) a e) je vhodné provádět až dle naměřených aktivit RN emitujících záření gama v neznámém vzorku (s podezřením na obsah ^{90}Sr).

VII.2.2 Příprava referenčních odečítacích spekter pomocí MC simulace

K přípravě je nutné:

- Nasimulovat spektra jednotlivých RN přírodních přeměnových řad (U, Th, Ac), ^{40}K , ^{137}Cs a případně další (v cps/Bq) pro danou geometrii a matici o dané hustotě.
- Přepočítat spektra vynásobením počtu impulsů hmotností vzorku (v kg) na cps/(Bq/kg).
- Spektra U, Th a Ac řady, ^{40}K , ^{137}Cs a případně další vynásobit aktivitou RN v hodnoceném vzorku (nebo aktivitou obvyklou pro daný typ vzorku). Spektra sečíst. Výsledné spektrum je v cps. Toto je vhodné provádět až dle naměřených aktivit RN emitujících záření gama v neznámém vzorku (s podezřením na obsah ^{90}Sr).

Významnost příspěvku ostatních RN ke spektru BZ lze odhadnout z [obr. 10](#).

Příspěvky RN U, Th a Ac řady a RN ^{40}K , ^{137}Cs a ^{90}Sr do oblasti ROI (50 - 200 keV) získané pomocí MC simulace pro běžné matrice jsou shrnuty v [tab. 14a – 14f](#) (gel, půda suchá, písek, mléko, mléko sušené, maso). Vzhledem k tomu, že poměr aktivit mezi U-řadou a Ac-řadou v rovnováze je 0,045, lze příspěvky Ac-řady považovat za zanedbatelné. Ukázka simulovaných spekter pro matici suchá půda o hustotě $1,1 \text{ g/cm}^3$ pro geometrii 50 ml masťovky na detektoru o účinnosti 10 % je uvedena na [obr. 17](#).

Poznámka: Rovnováha přírodních řad může být v některých maticích narušena, např. ^{226}Ra nemusí být v rovnováze s ^{238}U , ^{214}Pb (^{214}Bi) s ^{226}Ra , ^{210}Pb s ^{226}Ra apod; v takovém případě je vhodné započítávat příspěvky jednotlivých RN odděleně.

Tabulka 14 Počty impulsů v ROI 50 – 200 keV pro U řadu celou a rozdělenou na dvě části od ^{238}U po ^{214}Po a od ^{210}Pb po ^{210}Po

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 56 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 14a Gel 0,985 g/cm³. Příspěvek nuklidů do oblasti ROI (50-200 keV) geometrie masťovky 50 a 200 ml, HPGe detektor s relativní účinností 10%, MC simulace

Gel (0,985 g/cm ³)		Masťovka 50 ml		Masťovka 200 ml	
		cps/(Bq/kg)	Poměr cps k Sr 90	cps/(Bq/kg)	Poměr cps k Sr 90
Sr 90 / Y 90		2,73E-04	1,0	2,72E-04	1,0
U řada		3,77E-03	13,8	7,72E-03	28,3
	Pb 214	1,77E-03	6,5	3,71E-03	13,6
	Bi 214	9,70E-04	3,6	2,16E-03	7,9
	Th 234	4,39E-04	1,6	7,13E-04	2,6
	Pa 234m	2,73E-04	1,0	5,55E-04	2,0
	Ra 226	1,76E-04	0,6	3,08E-04	1,1
	Ra 226 ^{*)}	3,04E-03	11,1	6,41E-03	23,6
	Bi 210 ^{**)}	9,00E-05	0,3	1,77E-04	0,6
Th řada		5,67E-03	20,8	1,16E-02	42,6
	Pb 212	2,07E-03	7,6	4,26E-03	15,6
	Tl 208	1,75E-03	6,4	3,42E-03	12,6
	Ac 228	1,46E-03	5,4	3,14E-03	11,5
	Bi 212	2,32E-04	0,8	4,89E-04	1,8
	Ra 224	8,32E-05	0,3	1,51E-04	0,6
	Th 228	6,42E-05	0,2	1,23E-04	0,5
Ac řada		1,12E-02	41,2	2,07E-02	76,2
	U 235	4,28E-03	15,7	6,90E-03	25,3
	Ra 223	2,90E-03	10,6	5,77E-03	21,2
	Th 227	1,16E-03	4,3	2,43E-03	8,9
	Fr 223	1,12E-03	4,1	2,14E-03	7,9
	Th 231	4,78E-04	1,8	8,13E-04	3,0
K 40		3,18E-05	0,1	7,76E-05	0,3
Cs 137		6,76E-04	2,5	1,55E-03	5,7
Pozadí (cps)		4,24E-01			

Poznámky:

- Vzhledem k tomu, že poměr aktivit mezi U-řadou a Ac-řadou v rovnováze je 0,045, lze příspěvky Ac řady považovat za zanedbatelné.
- Hodnota uvedená vedle názvu řady může být vyšší než je součet hodnot uvedených hlavních příspěvovatelů
- ^{*)} Ra 226 - součet příspěvků od ²²⁶Ra a všech jeho dceřiných produktů v rovnováze
- ^{**)} Aktivita Bi 210 se stanoví pomocí spektrometrie gama z aktivity ²¹⁰Pb, s kterým je ve většině případů v rovnováze

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 57 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 14b Suchá půda s hustotou 1,1 g/cm³. Příspěvek nuklidů do oblasti ROI (50-200 keV) geometrie masťovky 50 a 200 ml, HPGe detektor s relativní účinností 10%, MC simulace

Půda suchá (1,1 g/cm ³)	Masťovka 50 ml		Masťovka 200 ml	
	cps/(Bq/kg)	Poměr cps k Sr 90	cps/(Bq/kg)	Poměr cps k Sr 90
Sr 90 / Y 90	3,66E-04	1,0	7,29E-04	1,0
U řada	4,32E-03	11,8	8,95E-03	12,3
Pb 214	1,99E-03	5,4	4,10E-03	5,6
Bi 214	1,12E-03	3,1	2,49E-03	3,4
Th 234	4,82E-04	1,3	9,06E-04	1,2
Pa 234m	3,52E-04	1,0	7,05E-04	1,0
Ra 226	1,96E-04	0,5	3,94E-04	0,5
Ra 226 ^{*)}	3,46E-03	9,4	7,30E-03	10,0
Bi 210	1,24E-04	0,3	2,46E-04	0,3
Th řada	6,40E-03	17,5	1,35E-02	18,5
Pb 212	2,29E-03	6,3	4,62E-03	6,3
Tl 208	2,00E-03	5,5	4,42E-03	6,1
Ac 228	1,66E-03	4,5	3,52E-03	4,8
Bi 212	2,87E-04	0,8	5,96E-04	0,8
Ra 224	9,31E-05	0,3	2,04E-04	0,3
Th 228	7,08E-05	0,2	1,37E-04	0,2
Ac řada	1,25E-02	34,2	2,49E-02	34,1
U 235	4,77E-03	13,0	9,58E-03	13,1
Ra 223	3,21E-03	8,8	6,25E-03	8,6
Th 227	1,29E-03	3,5	2,65E-03	3,6
Fr 223	1,24E-03	3,4	2,29E-03	3,1
Th 231	5,28E-04	1,4	1,00E-03	1,4
K 40	3,60E-05	0,1	8,71E-05	0,1
Cs 137	7,69E-04	2,1	1,75E-03	2,4
Pozadí (cps)	4,24E-01			

Poznámky:

- Vzhledem k tomu, že poměr aktivit mezi U-řadou a Ac-řadou v rovnováze je 0,045, lze příspěvky Ac řady považovat za zanedbatelné.
- Hodnota uvedená vedle názvu řady může být vyšší než je součet hodnot uvedených hlavních přispěvovatelů
- ^{*)} Ra 226 - součet příspěvků od ²²⁶Ra a všech jeho dceřiných produktů v rovnováze
- ^{**)} Aktivita Bi 210 se stanoví pomocí spektrometrie gama z aktivity ²¹⁰Pb, s kterým je ve většině případů v rovnováze

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 58 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 14c Písek 2,3 g/cm³. Příspěvek nuklidů do oblasti ROI (50-200 keV) geometrie masťovky 50 a 200 ml, HPGe detektor s relativní účinností 10%, MC simulace

Písek (2,3 g/cm ³)	Masťovka 50 ml		Masťovka 200 ml	
	cps/(Bq/kg)	Poměr cps k Sr 90	cps/(Bq/kg)	Poměr cps k Sr 90
Sr 90 / Y 90	8,14E-04	1,0	1,50E-03	1,0
U řada	9,92E-03	12,2	2,03E-02	13,5
Pb 214	4,55E-03	5,6	9,16E-03	6,1
Bi 214	2,78E-03	3,4	6,46E-03	4,3
Th 234	9,79E-04	1,2	1,62E-03	1,1
Pa 234m	7,94E-04	1,0	1,50E-03	1,0
Ra 226	4,28E-04	0,5	8,10E-04	0,5
Ra 226^{*)}	8,11E-03	10,0	1,71E-02	11,4
Bi 210	2,72E-04	0,3	5,09E-04	0,3
Th řada	1,50E-02	18,4	3,15E-02	21,0
Pb 212	5,12E-03	6,3	9,71E-03	6,5
Tl 208	4,91E-03	6,0	1,13E-02	7,5
Ac 228	3,91E-03	4,8	8,35E-03	5,6
Bi 212	6,70E-04	0,8	1,37E-03	0,9
Ra 224	2,32E-04	0,3	5,01E-04	0,3
Th 228	1,49E-04	0,2	2,61E-04	0,2
Ac řada	2,72E-02	33,4	5,06E-02	33,6
U 235	1,04E-02	12,8	1,96E-02	13,0
Ra 223	6,81E-03	8,4	1,22E-02	8,1
Th 227	2,95E-03	3,6	5,83E-03	3,9
Fr 223	2,48E-03	3,0	4,12E-03	2,7
Th 231	1,08E-03	1,3	1,83E-03	1,2
K 40	9,97E-05	0,1	2,70E-04	0,2
Cs 137	1,93E-03	2,4	4,64E-03	3,1
Pozadí (cps)	4,24E-01			

Poznámky:

- Vzhledem k tomu, že poměr aktivit mezi U-řadou a Ac-řadou v rovnováze je 0,045, lze příspěvky Ac řady považovat za zanedbatelné.
- Hodnota uvedená vedle názvu řady může být vyšší než je součet hodnot uvedených hlavních příspěvovatelů
- ^{*)} Ra 226 - součet příspěvků od ²²⁶Ra a všech jeho dceřiných produktů v rovnováze
- ^{**)} Aktivita Bi 210 se stanoví pomocí spektrometrie gama z aktivity ²¹⁰Pb, s kterým je ve většině případů v rovnováze

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 59 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 14d Mléko. Příspěvek nuklidů do oblasti ROI (50-200 keV) geometrie masťovky 50 a 200 ml, HPGe detektor s relativní účinností 10%, MC simulace

Mléko (1,033 g/cm ³)		Masťovka 50 ml		Masťovka 200 ml	
		cps/(Bq/kg)	Poměr cps k Sr 90	cps/(Bq/kg)	Poměr cps k Sr 90
Sr 90 / Y 90		2,39E-04	1,0	4,68E-04	1,0
U řada		3,90E-03	16,3	8,24E-03	17,6
	Pb 214	1,88E-03	7,9	3,96E-03	8,5
	Bi 214	9,96E-04	4,2	2,23E-03	4,8
	Th 234	4,69E-04	2,0	9,27E-04	2,0
	Pa 234m	2,45E-04	1,0	4,84E-04	1,0
	Ra 226	1,86E-04	0,8	3,79E-04	0,8
	Ra 226^{*)}	3,16E-03	13,2	6,78E-03	14,5
	Bi 210	7,40E-05	0,3	1,49E-04	0,3
Th řada		6,00E-03	25,1	1,28E-02	27,5
	Pb 212	2,21E-03	9,3	4,62E-03	9,9
	Tl 208	1,83E-03	7,7	4,10E-03	8,8
	Ac 228	1,53E-03	6,4	3,31E-03	7,1
	Bi 212	2,52E-04	1,1	4,57E-04	1,0
	Ra 224	8,89E-05	0,4	1,98E-04	0,4
	Th 228	6,85E-05	0,3	1,38E-04	0,3
Ac řada		1,16E-02	48,7	2,42E-02	51,8
	U 235	4,53E-03	19,0	9,24E-03	19,7
	Ra 223	3,09E-03	12,9	6,23E-03	13,3
	Th 227	1,24E-03	5,2	2,62E-03	5,6
	Fr 223	9,38E-04	3,9	2,34E-03	5,0
	Th 231	5,01E-04	2,1	1,01E-03	2,2
K 40		3,40E-05	0,1	8,28E-05	0,2
Cs 137		7,10E-04	3,0	1,63E-03	3,5
Pozadí (cps)		4,24E-01			

Poznámky:

- Vzhledem k tomu, že poměr aktivit mezi U-řadou a Ac-řadou v rovnováze je 0,045, lze příspěvky Ac řady považovat za zanedbatelné.
- Hodnota uvedená vedle názvu řady může být vyšší než je součet hodnot uvedených hlavních přispěvovatelů
- ^{*)} Ra 226 - součet příspěvků od ²²⁶Ra a všech jeho dceřiných produktů v rovnováze
- ^{**)} Aktivita Bi 210 se stanoví pomocí spektrometrie gama z aktivity ²¹⁰Pb, s kterým je ve většině případů v rovnováze

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 60 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 14e Mléko sušené. Příspěvek nuklidů do oblasti ROI (50-200 keV) geometrie masťovky 50 a 200 ml, HPGe detektor s relativní účinností 10%, MC simulace

Mléko sušené (0,47 g/cm ³)	Masťovka 50 ml		Masťovka 200 ml	
	cps/(Bq/kg)	Poměr cps k Sr 90	cps/(Bq/kg)	Poměr cps k Sr 90
Sr 90 / Y 90	1,09E-04	1,0	2,06E-04	1,0
U řada	1,67E-03	15,3	3,52E-03	17,1
Pb 214	7,91E-04	7,3	1,70E-03	8,3
Bi 214	4,18E-04	3,8	8,87E-04	4,3
Th 234	2,11E-04	1,9	4,42E-04	2,1
Pa 234m	1,12E-04	1,0	2,12E-04	1,0
Ra 226	8,15E-05	0,8	1,70E-04	0,8
Ra 226 ^{*)}	1,33E-03	12,3	2,84E-03	13,8
Bi 210	3,04E-05	0,3	6,29E-05	0,3
Th řada	2,54E-03	23,3	5,28E-03	25,7
Pb 212	9,58E-04	8,8	2,02E-03	9,8
Tl 208	7,63E-04	7,0	1,54E-03	7,5
Ac 228	6,48E-04	6,0	1,37E-03	6,7
Bi 212	9,69E-05	0,9	1,93E-04	0,9
Ra 224	3,57E-05	0,3	7,78E-05	0,4
Th 228	3,03E-05	0,3	6,34E-05	0,3
Ac řada	5,18E-03	47,7	1,09E-02	53,1
U 235	1,98E-03	18,3	4,14E-03	20,1
Ra 223	1,37E-03	12,6	2,86E-03	13,9
Th 227	5,30E-04	4,9	1,13E-03	5,5
Fr 223	5,47E-04	5,0	1,15E-03	5,6
Th 231	2,27E-04	2,1	4,75E-04	2,3
K 40	1,33E-05	0,1	3,17E-05	0,2
Cs 137	2,93E-04	2,7	6,36E-04	3,1
Pozadí (cps)	4,24E-01			

Poznámky:

- Vzhledem k tomu, že poměr aktivit mezi U-řadou a Ac-řadou v rovnováze je 0,045, lze příspěvky Ac řady považovat za zanedbatelné.
- Hodnota uvedená vedle názvu řady může být vyšší než je součet hodnot uvedených hlavních příspěvovatelů
- ^{*)} Ra 226 - součet příspěvků od ²²⁶Ra a všech jeho dceřiných produktů v rovnováze
- ^{**)} Aktivita Bi 210 se stanoví pomocí spektrometrie gama z aktivity ²¹⁰Pb, s kterým je ve většině případů v rovnováze

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 61 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 14f Maso. Příspěvek nuklidů do oblasti ROI (50-200 keV) geometrie masťovky 50 a 200 ml, HPGe detektor s relativní účinností 10%, MC simulace

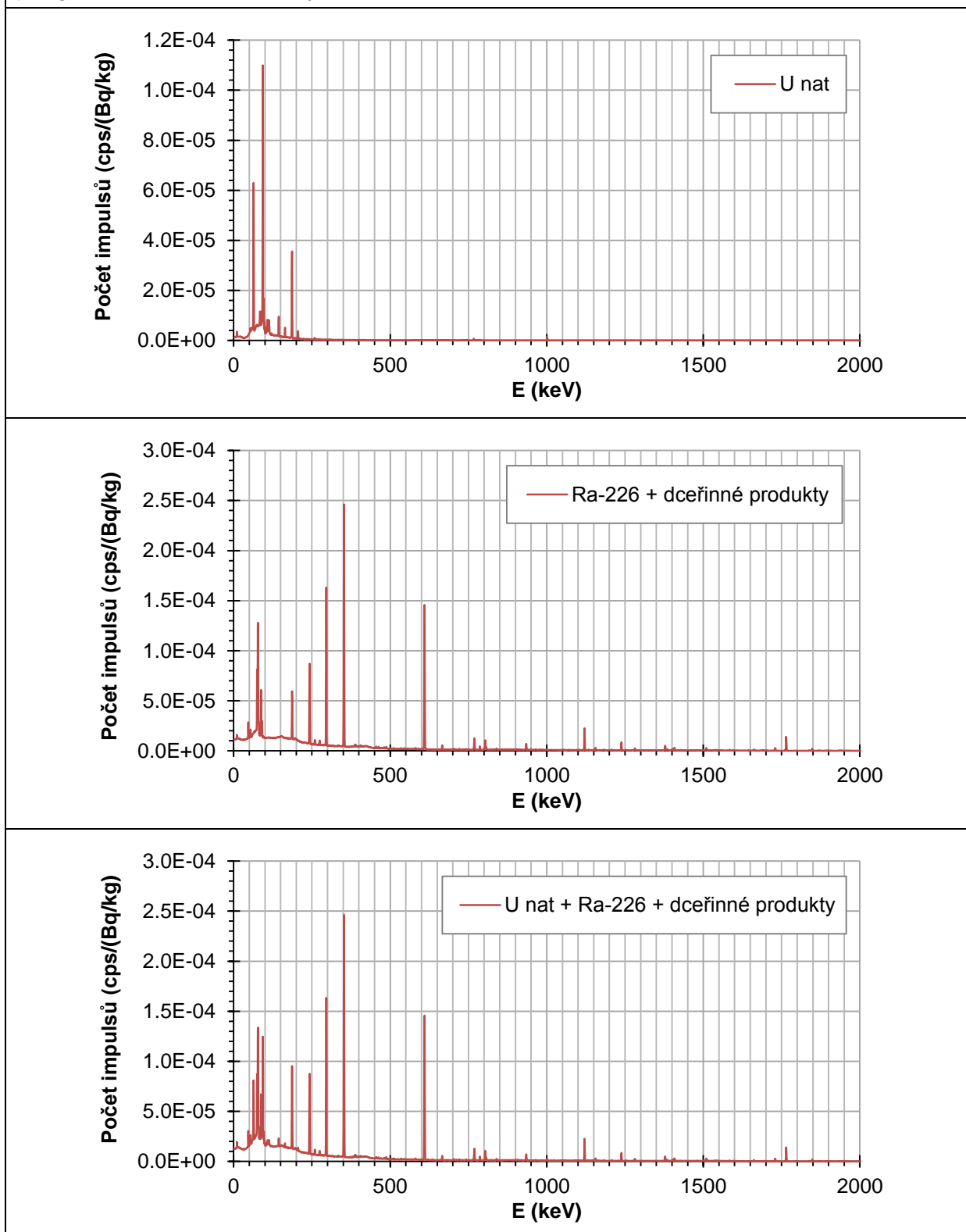
Maso (1,052 g/cm ³)	Masťovka 50 ml		Masťovka 200 ml	
	cps/(Bq/kg)	Poměr cps k Sr 90	cps/(Bq/kg)	Poměr cps k Sr 90
Sr 90 / Y 90	2,23E-04	1,0	4,58E-04	1,0
U řada	3,94E-03	17,6	8,32E-03	18,2
Pb 214	1,91E-03	8,6	4,03E-03	8,8
Bi 214	1,00E-03	4,5	2,25E-03	4,9
Th 234	4,77E-04	2,1	9,43E-04	2,1
Pa 234m	2,36E-04	1,1	4,58E-04	1,0
Ra 226	1,89E-04	0,8	3,85E-04	0,8
Ra 226^{*)}	3,20E-03	14,3	6,87E-03	15,0
Bi 210	6,88E-05	0,3	1,39E-04	0,3
Th řada	6,05E-03	27,1	1,30E-02	28,5
Pb 212	2,25E-03	10,1	4,70E-03	10,3
Tl 208	1,85E-03	8,3	4,16E-03	9,1
Ac 228	1,56E-03	7,0	3,36E-03	7,3
Bi 212	2,16E-04	1,0	4,45E-04	1,0
Ra 224	9,06E-05	0,4	2,02E-04	0,4
Th 228	6,97E-05	0,3	1,40E-04	0,3
Ac řada	1,21E-02	54,1	2,46E-02	53,8
U 235	4,61E-03	20,7	9,41E-03	20,6
Ra 223	3,15E-03	14,1	6,34E-03	13,9
Th 227	1,27E-03	5,7	2,67E-03	5,8
Fr 223	1,21E-03	5,4	2,37E-03	5,2
Th 231	5,16E-04	2,3	1,03E-03	2,2
K 40	3,45E-05	0,2	8,38E-05	0,2
Cs 137	7,22E-04	3,2	1,61E-03	3,5
Pozadí (cps)	4,24E-01			

Poznámky:

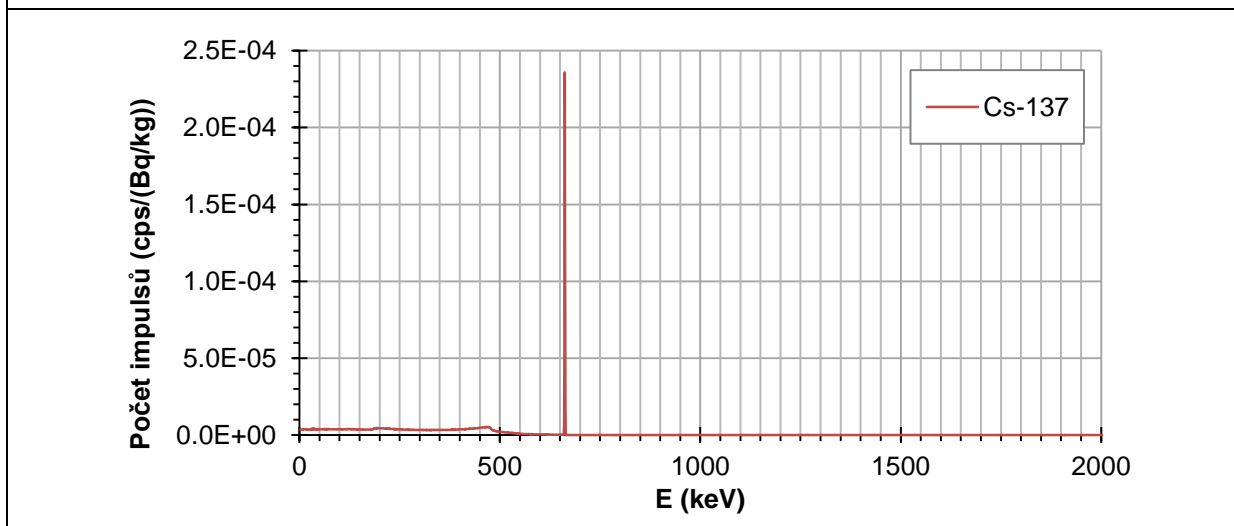
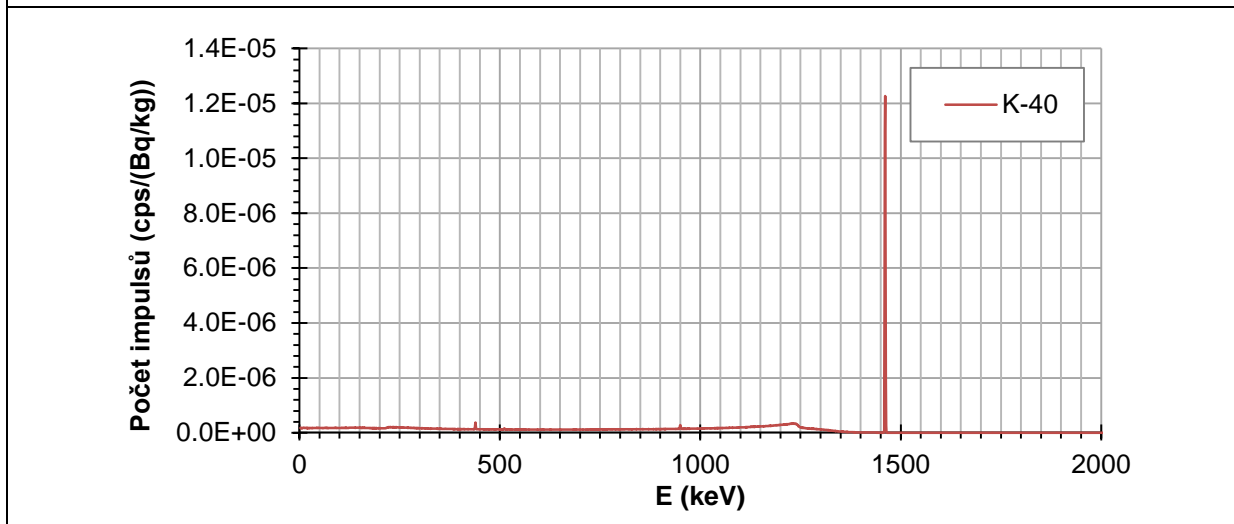
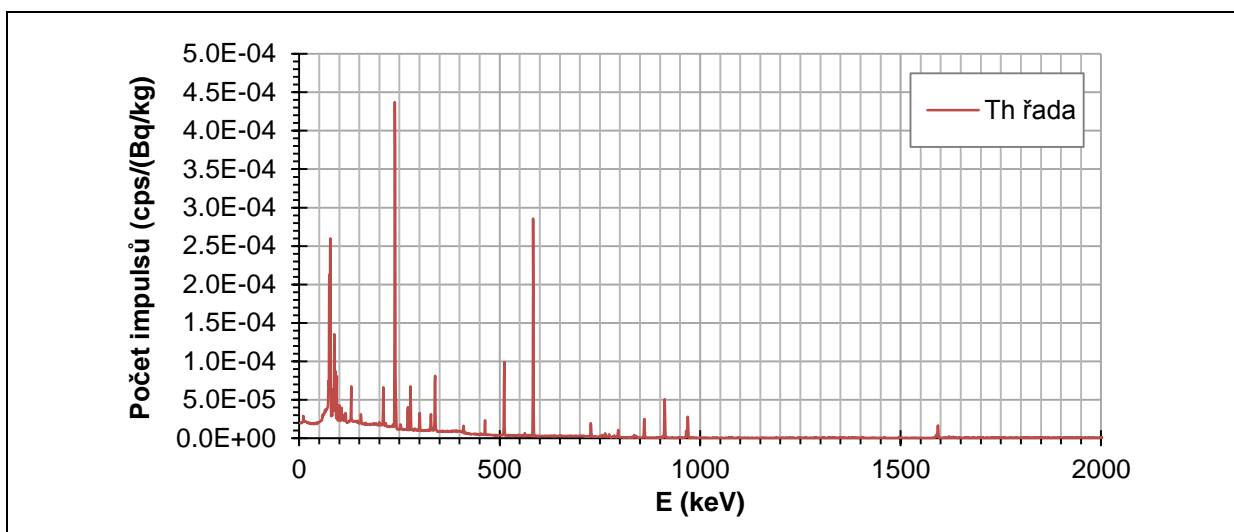
- Vzhledem k tomu, že poměr aktivit mezi U-řadou a Ac-řadou v rovnováze je 0,045, lze příspěvky Ac řady považovat za zanedbatelné.
- Hodnota uvedená vedle názvu řady může být vyšší než je součet hodnot uvedených hlavních příspěvovatelů
- ^{*)} Ra 226 - součet příspěvků od ²²⁶Ra a všech jeho dceřiných produktů v rovnováze
- ^{**)} Aktivita Bi 210 se stanoví pomocí spektrometrie gama z aktivity ²¹⁰Pb, s kterým je ve většině případů v rovnováze

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 62 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Obrázek 17 Ukázka simulovaných spekter pro matrici suchá půda o hustotě $1,1 \text{ g/cm}^3$ pro geometrii 50 ml masťovky na detektoru o účinnosti 10 %. MC simulace



Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 63 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015



Poznámka: šířka kanálu 0,75 keV.

Z uranové řady do oblasti ROI (50-200 keV) nejvíce přispívají ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{234}Th , $^{234\text{m}}\text{Pa}$, ^{226}Ra a ^{210}Bi . Příspěvek těchto RN představuje 99 %. Pokud bereme RN od ^{226}Ra níže (tzn. ^{226}Ra , ^{214}Pb , ^{214}Bi a ^{210}Bi), celkový příspěvek je 80 %.

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 64 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Z thoriové řady do oblasti ROI (50-200 keV) nejvíce přispívají ²¹²Pb, ²⁰⁸Tl, ²²⁸Ac, ²¹²Bi, ²²⁴Ra a ²²⁸Th. Jejich příspěvek do ROI představuje 100 %. Podrobnosti jsou shrnuty v [tab. 15](#).

Tabulka 15 Matrice - půda suchá s hustotou 1,1 g/cm³. Příspěvek nuklidů do oblasti ROI (50-200 keV) – U a Th řada, geometrie masťovky 50 ml, HPGe detektor s relativní účinností 10%, MC simulace.

	cps/(Bq/kg)	% řady	Radionuklidy
U řada	4.32E-03	100	U řady
U řada (redukována)	4.26E-03	99	Pb 214, Bi 214, Th 234, Pa 234m, Ra 226, Bi 210
Od Ra 226 níže	3.46E-03	80	Ra 226, Pb 214, Bi 214, Bi 210
Th řada	6.40E-03	100	Th řady
Th řada (redukována)	6.39E-03	100	Pb 212, Tl 208, Ac 228, Bi 212, Ra 224, Th 228
Od Th 232 níže	6.40E-03	100	Th 232, Pb 212, Tl 208, Ac 228, Bi 212, Ra 224, Th 228

Poznámky

- „redukována“ - součet příspěvků nuklidů dané řady uvedených ve sloupci Radionuklidy
- „Od Ra 226 níže“ a „od Th 232 níže“ znamená součet příspěvků daného nuklidu a jeho dceřiných produktů, uvedených ve sloupci Radionuklidy

Relativní velikost příspěvků od RN emitujících záření gama do oblasti ROI závisí na velikosti příspěvku do oblasti ROI z BZ ⁹⁰Sr. Velikost těchto příspěvků pro uvedené matrice pro běžně se vyskytující aktivity RN emitujících záření gama pro celou škálu aktivit ⁹⁰Sr pro geometrii 50 ml a 200 ml v masťovce je uvedena v [tab. 16](#); tabulky byly zkonstruovány na základě dat z [tab. 14](#). Z [tab. 16](#) plyne, že například až od aktivity ⁹⁰Sr 30-40 kBq/kg, je příspěvek přírodních RN o průměrné aktivitě (50 Bq/kg U-řady, 50 Bq/kg Th-řady, 500 Bq/kg ⁴⁰K) do oblasti ROI na úrovni 10 % a méně.

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 65 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 16a-1 Gel, mast'ovka 50 ml. Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰Sr pro různé aktivity RN emitujících záření gama a různé aktivity ⁹⁰Sr pro HPGe 10%

Sr 90	A (kBq/kg)	1	5	10	20	30	40	50	100	200	500	1000	
	cps	0,273	1,365	2,73	5,46	8,19	10,92	13,65	27,3	54,6	136,5	273	
	A (Bq/kg)	cps	Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰ Sr										
U řada	10	3,77E-02	0,1381	0,02762	0,01381	0,0069	0,0046	0,00345	0,00276	0,00138	0,00069	0,00028	0,00014
Th řada	10	9,00E-04	0,0033	0,00066	0,00033	0,00016	0,00011	8,2E-05	6,6E-05	3,3E-05	1,6E-05	6,6E-06	3,3E-06
K 40	100	4,78E-02	0,17509	0,03502	0,01751	0,00875	0,00584	0,00438	0,0035	0,00175	0,00088	0,00035	0,00018
Součet		8,64E-02	0,31648	0,0633	0,03165	0,01582	0,01055	0,00791	0,00633	0,00316	0,00158	0,00063	0,00032
U řada	50	1,89E-01	0,69048	0,1381	0,06905	0,03452	0,02302	0,01726	0,01381	0,0069	0,00345	0,00138	0,00069
Th řada	50	4,50E-03	0,01648	0,0033	0,00165	0,00082	0,00055	0,00041	0,00033	0,00016	8,2E-05	3,3E-05	1,6E-05
K 40	500	2,39E-01	0,87546	0,17509	0,08755	0,04377	0,02918	0,02189	0,01751	0,00875	0,00438	0,00175	0,00088
Součet		4,32E-01	1,58242	0,31648	0,15824	0,07912	0,05275	0,03956	0,03165	0,01582	0,00791	0,00316	0,00158
U řada	100	3,77E-01	1,38095	0,27619	0,1381	0,06905	0,04603	0,03452	0,02762	0,01381	0,0069	0,00276	0,00138
Th řada	100	9,00E-03	0,03297	0,00659	0,0033	0,00165	0,0011	0,00082	0,00066	0,00033	0,00016	6,6E-05	3,3E-05
K 40	1000	4,78E-01	1,75092	0,35018	0,17509	0,08755	0,05836	0,04377	0,03502	0,01751	0,00875	0,0035	0,00175
Součet		8,64E-01	3,16484	0,63297	0,31648	0,15824	0,10549	0,07912	0,0633	0,03165	0,01582	0,00633	0,00316
Cs 137	10	6,76E-03	0,02476	0,00495	0,00248	0,00124	0,00083	0,00062	0,0005	0,00025	0,00012	5E-05	2,5E-05
	100	6,76E-02	0,24762	0,04952	0,02476	0,01238	0,00825	0,00619	0,00495	0,00248	0,00124	0,0005	0,00025
Pozadí		4,24E-01	1,55311	0,31062	0,15531	0,07766	0,05177	0,03883	0,03106	0,01553	0,00777	0,00311	0,00155

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 66 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 16a-2 Gel, mast'ovka 200 ml. Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰Sr pro různé aktivity RN emitujících záření gama a různé aktivity ⁹⁰Sr pro HPGe 10%

Sr 90	A (kBq/kg)	1	5	10	20	30	40	50	100	200	500	1000	
	cps	0,272	1,36	2,72	5,44	8,16	10,88	13,6	27,2	54,4	136	272	
	A (Bq/kg)	cps	Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰ Sr										
U řada	10	7,72E-02	0,28382	0,05676	0,02838	0,01419	0,00946	0,0071	0,00568	0,00284	0,00142	0,00057	0,00028
Th	10	1,77E-03	0,00651	0,0013	0,00065	0,00033	0,00022	0,00016	0,00013	6,5E-05	3,3E-05	1,3E-05	6,5E-06
K	100	8,13E-02	0,2989	0,05978	0,02989	0,01494	0,00996	0,00747	0,00598	0,00299	0,00149	0,0006	0,0003
Součet		1,60E-01	0,58923	0,11785	0,05892	0,02946	0,01964	0,01473	0,01178	0,00589	0,00295	0,00118	0,00059
U řada	50	3,86E-01	1,41912	0,28382	0,14191	0,07096	0,0473	0,03548	0,02838	0,01419	0,0071	0,00284	0,00142
Th	50	8,85E-03	0,03254	0,00651	0,00325	0,00163	0,00108	0,00081	0,00065	0,00033	0,00016	6,5E-05	3,3E-05
K	500	4,07E-01	1,49449	0,2989	0,14945	0,07472	0,04982	0,03736	0,02989	0,01494	0,00747	0,00299	0,00149
Součet		8,01E-01	2,94614	0,58923	0,29461	0,14731	0,0982	0,07365	0,05892	0,02946	0,01473	0,00589	0,00295
U řada	100	7,72E-01	2,83824	0,56765	0,28382	0,14191	0,09461	0,07096	0,05676	0,02838	0,01419	0,00568	0,00284
Th	100	1,77E-02	0,06507	0,01301	0,00651	0,00325	0,00217	0,00163	0,0013	0,00065	0,00033	0,00013	6,5E-05
K	1000	8,13E-01	2,98897	0,59779	0,2989	0,14945	0,09963	0,07472	0,05978	0,02989	0,01494	0,00598	0,00299
Součet		1,60E+00	5,89228	1,17846	0,58923	0,29461	0,19641	0,14731	0,11785	0,05892	0,02946	0,01178	0,00589
Cs 137	10	1,55E-02	0,05699	0,0114	0,0057	0,00285	0,0019	0,00142	0,00114	0,00057	0,00028	0,00011	5,7E-05
	100	1,55E-01	0,56985	0,11397	0,05699	0,02849	0,019	0,01425	0,0114	0,0057	0,00285	0,00114	0,00057
Pozadí		4,24E-01	1,55882	0,31176	0,15588	0,07794	0,05196	0,03897	0,03118	0,01559	0,00779	0,00312	0,00156

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 67 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 16b-1 Půda suchá 1,1 g/cm³, mast'ovka 50 ml. Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰Sr pro různé aktivity RN emitujících záření gama a různé aktivity ⁹⁰Sr pro HPGe 10%

Sr 90	A (kBq/kg)	1	5	10	20	30	40	50	100	200	500	1000	
	cps	0,366	1,83	3,66	7,32	10,98	14,64	18,3	36,6	73,2	183	366	
Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰ Sr													
U řada	10	4,32E-02	0,11803	0,02361	0,0118	0,0059	0,00393	0,00295	0,00236	0,00118	0,00059	0,00024	0,00012
Th řada	10	1,24E-03	0,00339	0,00068	0,00034	0,00017	0,00011	8,5E-05	6,8E-05	3,4E-05	1,7E-05	6,8E-06	3,4E-06
K 40	100	5,28E-02	0,14426	0,02885	0,01443	0,00721	0,00481	0,00361	0,00289	0,00144	0,00072	0,00029	0,00014
Součet		9,72E-02	0,26568	0,05314	0,02657	0,01328	0,00886	0,00664	0,00531	0,00266	0,00133	0,00053	0,00027
U řada	50	2,16E-01	0,59016	0,11803	0,05902	0,02951	0,01967	0,01475	0,0118	0,0059	0,00295	0,00118	0,00059
Th řada	50	6,20E-03	0,01694	0,00339	0,00169	0,00085	0,00056	0,00042	0,00034	0,00017	8,5E-05	3,4E-05	1,7E-05
K 40	500	2,64E-01	0,72131	0,14426	0,07213	0,03607	0,02404	0,01803	0,01443	0,00721	0,00361	0,00144	0,00072
Součet		4,86E-01	1,32842	0,26568	0,13284	0,06642	0,04428	0,03321	0,02657	0,01328	0,00664	0,00266	0,00133
U řada	100	4,32E-01	1,18033	0,23607	0,11803	0,05902	0,03934	0,02951	0,02361	0,0118	0,0059	0,00236	0,00118
Th řada	100	1,24E-02	0,03388	0,00678	0,00339	0,00169	0,00113	0,00085	0,00068	0,00034	0,00017	6,8E-05	3,4E-05
K 40	1000	5,28E-01	1,44262	0,28852	0,14426	0,07213	0,04809	0,03607	0,02885	0,01443	0,00721	0,00289	0,00144
Součet		9,72E-01	2,65683	0,53137	0,26568	0,13284	0,08856	0,06642	0,05314	0,02657	0,01328	0,00531	0,00266
Cs 137	10	7,69E-03	0,02101	0,0042	0,0021	0,00105	0,0007	0,00053	0,00042	0,00021	0,00011	4,2E-05	2,1E-05
	100	7,69E-02	0,21011	0,04202	0,02101	0,01051	0,007	0,00525	0,0042	0,0021	0,00105	0,00042	0,00021
Pozadí		4,24E-01	1,15847	0,23169	0,11585	0,05792	0,03862	0,02896	0,02317	0,01158	0,00579	0,00232	0,00116

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 68 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 16b-2 Půda suchá 1,1 g/cm³, mast'ovka 200 ml. Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰Sr pro různé aktivity RN emitujících záření gama a různé aktivity ⁹⁰Sr pro HPGe 10%

Sr 90	A (kBq/kg)	1	5	10	20	30	40	50	100	200	500	1000	
	cps	0,729	3,645	7,29	14,58	21,87	29,16	36,45	72,9	145,8	364,5	729	
	A (Bq/kg)	cps	Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰ Sr										
U řada	10	8,95E-02	0,12277	0,02455	0,01228	0,00614	0,00409	0,00307	0,00246	0,00123	0,00061	0,00025	0,00012
Th	10	2,46E-03	0,00337	0,00067	0,00034	0,00017	0,00011	8,4E-05	6,7E-05	3,4E-05	1,7E-05	6,7E-06	3,4E-06
K	100	1,00E-01	0,13717	0,02743	0,01372	0,00686	0,00457	0,00343	0,00274	0,00137	0,00069	0,00027	0,00014
Součet		1,92E-01	0,26332	0,05266	0,02633	0,01317	0,00878	0,00658	0,00527	0,00263	0,00132	0,00053	0,00026
U řada	50	4,48E-01	0,61385	0,12277	0,06139	0,03069	0,02046	0,01535	0,01228	0,00614	0,00307	0,00123	0,00061
Th	50	1,23E-02	0,01687	0,00337	0,00169	0,00084	0,00056	0,00042	0,00034	0,00017	8,4E-05	3,4E-05	1,7E-05
K	500	5,00E-01	0,68587	0,13717	0,06859	0,03429	0,02286	0,01715	0,01372	0,00686	0,00343	0,00137	0,00069
Součet		9,60E-01	1,3166	0,26332	0,13166	0,06583	0,04389	0,03291	0,02633	0,01317	0,00658	0,00263	0,00132
U řada	100	8,95E-01	1,22771	0,24554	0,12277	0,06139	0,04092	0,03069	0,02455	0,01228	0,00614	0,00246	0,00123
Th	100	2,46E-02	0,03374	0,00675	0,00337	0,00169	0,00112	0,00084	0,00067	0,00034	0,00017	6,7E-05	3,4E-05
K	1000	1,00E+00	1,37174	0,27435	0,13717	0,06859	0,04572	0,03429	0,02743	0,01372	0,00686	0,00274	0,00137
Součet		1,92E+00	2,6332	0,52664	0,26332	0,13166	0,08777	0,06583	0,05266	0,02633	0,01317	0,00527	0,00263
Cs 137	10	1,75E-02	0,02401	0,0048	0,0024	0,0012	0,0008	0,0006	0,00048	0,00024	0,00012	4,8E-05	2,4E-05
	100	1,75E-01	0,24005	0,04801	0,02401	0,012	0,008	0,006	0,0048	0,0024	0,0012	0,00048	0,00024
Pozadí		4,24E-01	0,58162	0,11632	0,05816	0,02908	0,01939	0,01454	0,01163	0,00582	0,00291	0,00116	0,00058

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 69 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 16c-1 Písek, mast'ovka 50 ml. Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰Sr pro různé aktivity RN emitujících záření gama a různé aktivity ⁹⁰Sr pro HPGe 10%

Sr 90	A (kBq/kg)	1	5	10	20	30	40	50	100	200	500	1000	
	cps	0,814	4,07	8,14	16,28	24,42	32,56	40,7	81,4	162,8	407	814	
Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰ Sr													
U řada	10	9,92E-02	0,12187	0,02437	0,01219	0,00609	0,00406	0,00305	0,00244	0,00122	0,00061	0,00024	0,00012
Th řada	10	2,72E-03	0,00334	0,00067	0,00033	0,00017	0,00011	8,4E-05	6,7E-05	3,3E-05	1,7E-05	6,7E-06	3,3E-06
K 40	100	1,08E-01	0,13268	0,02654	0,01327	0,00663	0,00442	0,00332	0,00265	0,00133	0,00066	0,00027	0,00013
Součet		2,10E-01	0,25789	0,05158	0,02579	0,01289	0,0086	0,00645	0,00516	0,00258	0,00129	0,00052	0,00026
U řada	50	4,96E-01	0,60934	0,12187	0,06093	0,03047	0,02031	0,01523	0,01219	0,00609	0,00305	0,00122	0,00061
Th řada	50	1,36E-02	0,01671	0,00334	0,00167	0,00084	0,00056	0,00042	0,00033	0,00017	8,4E-05	3,3E-05	1,7E-05
K 40	500	5,40E-01	0,66339	0,13268	0,06634	0,03317	0,02211	0,01658	0,01327	0,00663	0,00332	0,00133	0,00066
Součet		1,05E+00	1,28943	0,25789	0,12894	0,06447	0,04298	0,03224	0,02579	0,01289	0,00645	0,00258	0,00129
U řada	100	9,92E-01	1,21867	0,24373	0,12187	0,06093	0,04062	0,03047	0,02437	0,01219	0,00609	0,00244	0,00122
Th řada	100	2,72E-02	0,03342	0,00668	0,00334	0,00167	0,00111	0,00084	0,00067	0,00033	0,00017	6,7E-05	3,3E-05
K 40	1000	1,08E+00	1,32678	0,26536	0,13268	0,06634	0,04423	0,03317	0,02654	0,01327	0,00663	0,00265	0,00133
Součet		2,10E+00	2,57887	0,51577	0,25789	0,12894	0,08596	0,06447	0,05158	0,02579	0,01289	0,00645	0,00258
Cs 137	10	1,93E-02	0,02371	0,00474	0,00237	0,00119	0,00079	0,00059	0,00047	0,00024	0,00012	4,7E-05	2,4E-05
	100	1,93E-01	0,2371	0,04742	0,02371	0,01186	0,0079	0,00593	0,00474	0,00237	0,00119	0,00047	0,00024
Pozadí		4,24E-01	0,52088	0,10418	0,05209	0,02604	0,01736	0,01302	0,01042	0,00521	0,0026	0,00104	0,00052

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 70 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 16c-2 Písek, masťovka 200 ml. Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰Sr pro různé aktivity RN emitujících záření gama a různé aktivity ⁹⁰Sr pro HPGe 10%

Sr 90	A (kBq/kg)	1	5	10	20	30	40	50	100	200	500	1000	
	cps	1,5	7,5	15	30	45	60	75	150	300	750	1500	
Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰ Sr													
U řada	10	2,03E-01	0,13533	0,02707	0,01353	0,00677	0,00451	0,00338	0,00271	0,00135	0,00068	0,00027	0,00014
Th	10	5,09E-03	0,00339	0,00068	0,00034	0,00017	0,00011	8,5E-05	6,8E-05	3,4E-05	1,7E-05	6,8E-06	3,4E-06
K	100	1,83E-01	0,122	0,0244	0,0122	0,0061	0,00407	0,00305	0,00244	0,00122	0,00061	0,00024	0,00012
Součet		3,91E-01	0,26073	0,05215	0,02607	0,01304	0,00869	0,00652	0,00521	0,00261	0,0013	0,00052	0,00026
U řada	50	1,02E+00	0,67667	0,13533	0,06767	0,03383	0,02256	0,01692	0,01353	0,00677	0,00338	0,00135	0,00068
Th	50	2,55E-02	0,01697	0,00339	0,0017	0,00085	0,00057	0,00042	0,00034	0,00017	8,5E-05	3,4E-05	1,7E-05
K	500	9,15E-01	0,61	0,122	0,061	0,0305	0,02033	0,01525	0,0122	0,0061	0,00305	0,00122	0,00061
Součet		1,96E+00	1,30363	0,26073	0,13036	0,06518	0,04345	0,03259	0,02607	0,01304	0,00652	0,00261	0,0013
U řada	100	2,03E+00	1,35333	0,27067	0,13533	0,06767	0,04511	0,03383	0,02707	0,01353	0,00677	0,00271	0,00135
Th	100	5,09E-02	0,03393	0,00679	0,00339	0,0017	0,00113	0,00085	0,00068	0,00034	0,00017	6,8E-05	3,4E-05
K	1000	1,83E+00	1,22	0,244	0,122	0,061	0,04067	0,0305	0,0244	0,0122	0,0061	0,00244	0,00122
Součet		3,91E+00	2,60727	0,52145	0,26073	0,13036	0,08691	0,06518	0,05215	0,02607	0,01304	0,00521	0,00261
Cs 137	10	4,64E-02	0,03093	0,00619	0,00309	0,00155	0,00103	0,00077	0,00062	0,00031	0,00015	6,2E-05	3,1E-05
	100	4,64E-01	0,30933	0,06187	0,03093	0,01547	0,01031	0,00773	0,00619	0,00309	0,00155	0,00062	0,00031
Pozadí		4,24E-01	0,28267	0,05653	0,02827	0,01413	0,00942	0,00707	0,00565	0,00283	0,00141	0,00057	0,00028

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 71 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 16d-1 Mléko, masťovka 50 ml. Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰Sr pro různé aktivity RN emitujících záření gama a různé aktivity ⁹⁰Sr pro HPGe 10%

Sr 90	A (kBq/kg)	1	5	10	20	30	40	50	100	200	500	1000	
	cps	0,239	1,195	2,39	4,78	7,17	9,56	11,95	23,9	47,8	119,5	239	
	A (Bq/kg)	cps	Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰ Sr										
U řada	10	3,90E-02	0,16318	0,03264	0,01632	0,00816	0,00544	0,00408	0,00326	0,00163	0,00082	0,00033	0,00016
Th řada	10	7,40E-04	0,0031	0,00062	0,00031	0,00015	0,0001	7,7E-05	6,2E-05	3,1E-05	1,5E-05	6,2E-06	3,1E-06
K 40	100	5,01E-02	0,20962	0,04192	0,02096	0,01048	0,00699	0,00524	0,00419	0,0021	0,00105	0,00042	0,00021
Součet		8,98E-02	0,3759	0,07518	0,03759	0,01879	0,01253	0,0094	0,00752	0,00376	0,00188	0,00075	0,00038
U řada	50	1,95E-01	0,8159	0,16318	0,08159	0,04079	0,0272	0,0204	0,01632	0,00816	0,00408	0,00163	0,00082
Th řada	50	3,70E-03	0,01548	0,0031	0,00155	0,00077	0,00052	0,00039	0,00031	0,00015	7,7E-05	3,1E-05	1,5E-05
K 40	500	2,51E-01	1,04812	0,20962	0,10481	0,05241	0,03494	0,0262	0,02096	0,01048	0,00524	0,0021	0,00105
Součet		4,49E-01	1,8795	0,3759	0,18795	0,09397	0,06265	0,04699	0,03759	0,01879	0,0094	0,00376	0,00188
U řada	100	3,90E-01	1,6318	0,32636	0,16318	0,08159	0,05439	0,04079	0,03264	0,01632	0,00816	0,00326	0,00163
Th řada	100	7,40E-03	0,03096	0,00619	0,0031	0,00155	0,00103	0,00077	0,00062	0,00031	0,00015	6,2E-05	3,1E-05
K 40	1000	5,01E-01	2,09623	0,41925	0,20962	0,10481	0,06987	0,05241	0,04192	0,02096	0,01048	0,00419	0,0021
Součet		8,98E-01	3,759	0,7518	0,3759	0,18795	0,1253	0,09397	0,07518	0,03759	0,01879	0,00752	0,00376
Cs 137	10	7,10E-03	0,02971	0,00594	0,00297	0,00149	0,00099	0,00074	0,00059	0,0003	0,00015	5,9E-05	3E-05
	100	7,10E-02	0,29707	0,05941	0,02971	0,01485	0,0099	0,00743	0,00594	0,00297	0,00149	0,00059	0,0003
Pozadí		4,24E-01	1,77406	0,35481	0,17741	0,0887	0,05914	0,04435	0,03548	0,01774	0,00887	0,00355	0,00177

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 72 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 16d-2 Mléko, masťovka 200 ml. Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰Sr pro různé aktivity RN emitujících záření gama a různé aktivity ⁹⁰Sr pro HPGe 10%

Sr 90	A (kBq/kg)		1	5	10	20	30	40	50	100	200	500	1000
	cps		0,468	2,34	4,68	9,36	14,04	18,72	23,4	46,8	93,6	234	468
	A (Bq/kg)	cps	Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰ Sr										
U řada	10	8,24E-02	0,17607	0,03521	0,01761	0,0088	0,00587	0,0044	0,00352	0,00176	0,00088	0,00035	0,00018
Th	10	1,49E-03	0,00318	0,00064	0,00032	0,00016	0,00011	8E-05	6,4E-05	3,2E-05	1,6E-05	6,4E-06	3,2E-06
K	100	1,01E-01	0,21581	0,04316	0,02158	0,01079	0,00719	0,0054	0,00432	0,00216	0,00108	0,00043	0,00022
Součet		1,85E-01	0,39506	0,07901	0,03951	0,01975	0,01317	0,00988	0,0079	0,00395	0,00198	0,00079	0,0004
U řada	50	4,12E-01	0,88034	0,17607	0,08803	0,04402	0,02934	0,02201	0,01761	0,0088	0,0044	0,00176	0,00088
Th	50	7,45E-03	0,01592	0,00318	0,00159	0,0008	0,00053	0,0004	0,00032	0,00016	8E-05	3,2E-05	1,6E-05
K	500	5,05E-01	1,07906	0,21581	0,10791	0,05395	0,03597	0,02698	0,02158	0,01079	0,0054	0,00216	0,00108
Součet		9,24E-01	1,97532	0,39506	0,19753	0,09877	0,06584	0,04938	0,03951	0,01975	0,00988	0,00395	0,00198
U řada	100	8,24E-01	1,76068	0,35214	0,17607	0,08803	0,05869	0,04402	0,03521	0,01761	0,0088	0,00352	0,00176
Th	100	1,49E-02	0,03184	0,00637	0,00318	0,00159	0,00106	0,0008	0,00064	0,00032	0,00016	6,4E-05	3,2E-05
K	1000	1,01E+00	2,15812	0,43162	0,21581	0,10791	0,07194	0,05395	0,04316	0,02158	0,01079	0,00432	0,00216
Součet		1,85E+00	3,95064	0,79013	0,39506	0,19753	0,13169	0,09877	0,07901	0,03951	0,01975	0,0079	0,00395
Cs 137	10	1,63E-02	0,03483	0,00697	0,00348	0,00174	0,00116	0,00087	0,0007	0,00035	0,00017	7E-05	3,5E-05
	100	1,63E-01	0,34829	0,06966	0,03483	0,01741	0,01161	0,00871	0,00697	0,00348	0,00174	0,0007	0,00035
Pozadí		4,24E-01	0,90598	0,1812	0,0906	0,0453	0,0302	0,02265	0,01812	0,00906	0,00453	0,00181	0,00091

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 73 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 16e-1 Mléko sušené, mast'ovka 50 ml. Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰Sr pro různé aktivity RN emitujících záření gama a různé aktivity ⁹⁰Sr pro HPGe 10%

Sr 90	A (kBq/kg)	1	5	10	20	30	40	50	100	200	500	1000	
	cps	0,109	0,545	1,09	2,18	3,27	4,36	5,45	10,9	21,8	54,5	109	
	A (Bq/kg)	cps	Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰ Sr										
U řada	10	1,67E-02	0,15321	0,03064	0,01532	0,00766	0,00511	0,00383	0,00306	0,00153	0,00077	0,00031	0,00015
Th řada	10	3,04E-04	0,00279	0,00056	0,00028	0,00014	9,3E-05	7E-05	5,6E-05	2,8E-05	1,4E-05	5,6E-06	2,8E-06
K 40	100	2,27E-02	0,20826	0,04165	0,02083	0,01041	0,00694	0,00521	0,00417	0,00208	0,00104	0,00042	0,00021
Součet		3,97E-02	0,36426	0,07285	0,03643	0,01821	0,01214	0,00911	0,00729	0,00364	0,00182	0,00073	0,00036
U řada	50	8,35E-02	0,76606	0,15321	0,07661	0,0383	0,02554	0,01915	0,01532	0,00766	0,00383	0,00153	0,00077
Th řada	50	1,52E-03	0,01394	0,00279	0,00139	0,0007	0,00046	0,00035	0,00028	0,00014	7E-05	2,8E-05	1,4E-05
K 40	500	1,14E-01	1,04128	0,20826	0,10413	0,05206	0,03471	0,02603	0,02083	0,01041	0,00521	0,00208	0,00104
Součet		1,99E-01	1,82128	0,36426	0,18213	0,09106	0,06071	0,04553	0,03643	0,01821	0,00911	0,00364	0,00182
U řada	100	1,67E-01	1,53211	0,30642	0,15321	0,07661	0,05107	0,0383	0,03064	0,01532	0,00766	0,00306	0,00153
Th řada	100	3,04E-03	0,02789	0,00558	0,00279	0,00139	0,00093	0,0007	0,00056	0,00028	0,00014	5,6E-05	2,8E-05
K 40	1000	2,27E-01	2,08257	0,41651	0,20826	0,10413	0,06942	0,05206	0,04165	0,02083	0,01041	0,00417	0,00208
Součet		3,97E-01	3,64257	0,72851	0,36426	0,18213	0,12142	0,09106	0,07285	0,03643	0,01821	0,00729	0,00364
Cs 137	10	2,93E-03	0,02688	0,00538	0,00269	0,00134	0,0009	0,00067	0,00054	0,00027	0,00013	5,4E-05	2,7E-05
	100	2,93E-02	0,26881	0,05376	0,02688	0,01344	0,00896	0,00672	0,00538	0,00269	0,00134	0,00054	0,00027
Pozadí		4,24E-01	3,88991	0,77798	0,38899	0,1945	0,12966	0,09725	0,0778	0,0389	0,01945	0,00778	0,00389

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 74 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 16e-2 Mléko sušené, mast'ovka 200 ml. Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰Sr pro různé aktivity RN emitujících záření gama a různé aktivity ⁹⁰Sr pro HPGe 10%

Sr 90	A (kBq/kg)	1	5	10	20	30	40	50	100	200	500	1000	
	cps	0,206	1,03	2,06	4,12	6,18	8,24	10,3	20,6	41,2	103	206	
	A (Bq/kg)	cps	Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰ Sr										
U řada	10	3,52E-02	0,17087	0,03417	0,01709	0,00854	0,0057	0,00427	0,00342	0,00171	0,00085	0,00034	0,00017
Th	10	6,29E-04	0,00305	0,00061	0,00031	0,00015	0,0001	7,6E-05	6,1E-05	3,1E-05	1,5E-05	6,1E-06	3,1E-06
K	100	4,75E-02	0,23058	0,04612	0,02306	0,01153	0,00769	0,00576	0,00461	0,00231	0,00115	0,00046	0,00023
Součet		8,33E-02	0,40451	0,0809	0,04045	0,02023	0,01348	0,01011	0,00809	0,00405	0,00202	0,00081	0,0004
U řada	50	1,76E-01	0,85437	0,17087	0,08544	0,04272	0,02848	0,02136	0,01709	0,00854	0,00427	0,00171	0,00085
Th	50	3,15E-03	0,01527	0,00305	0,00153	0,00076	0,00051	0,00038	0,00031	0,00015	7,6E-05	3,1E-05	1,5E-05
K	500	2,38E-01	1,15291	0,23058	0,11529	0,05765	0,03843	0,02882	0,02306	0,01153	0,00576	0,00231	0,00115
Součet		4,17E-01	2,02255	0,40451	0,20225	0,10113	0,06742	0,05056	0,04045	0,02023	0,01011	0,00405	0,00202
U řada	100	3,52E-01	1,70874	0,34175	0,17087	0,08544	0,05696	0,04272	0,03417	0,01709	0,00854	0,00342	0,00171
Th	100	6,29E-03	0,03053	0,00611	0,00305	0,00153	0,00102	0,00076	0,00061	0,00031	0,00015	6,1E-05	3,1E-05
K	1000	4,75E-01	2,30583	0,46117	0,23058	0,11529	0,07686	0,05765	0,04612	0,02306	0,01153	0,00461	0,00231
Součet		8,33E-01	4,0451	0,80902	0,40451	0,20225	0,13484	0,10113	0,0809	0,04045	0,02023	0,00809	0,00405
Cs 137	10	6,36E-03	0,03087	0,00617	0,00309	0,00154	0,00103	0,00077	0,00062	0,00031	0,00015	6,2E-05	3,1E-05
	100	6,36E-02	0,30874	0,06175	0,03087	0,01544	0,01029	0,00772	0,00617	0,00309	0,00154	0,00062	0,00031
Pozadí		4,24E-01	2,05825	0,41165	0,20583	0,10291	0,06861	0,05146	0,04117	0,02058	0,01029	0,00412	0,00206

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 75 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 16f-1 Maso, masťovka 50 ml. Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰Sr pro různé aktivity RN emitujících záření gama a různé aktivity ⁹⁰Sr pro HPGe 10%

Sr 90	A (kBq/kg)		1	5	10	20	30	40	50	100	200	500	1000
	cps		0,223	1,115	2,23	4,46	6,69	8,92	11,15	22,3	44,6	111,5	223
	A (Bq/kg)	cps	Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰ Sr										
U řada	10	3,94E-02	0,17668	0,03534	0,01767	0,00883	0,00589	0,00442	0,00353	0,00177	0,00088	0,00035	0,00018
Th řada	10	6,88E-04	0,00309	0,00062	0,00031	0,00015	0,0001	7,7E-05	6,2E-05	3,1E-05	1,5E-05	6,2E-06	3,1E-06
K 40	100	5,16E-02	0,23139	0,04628	0,02314	0,01157	0,00771	0,00578	0,00463	0,00231	0,00116	0,00046	0,00023
Součet		9,17E-02	0,41116	0,08223	0,04112	0,02056	0,01371	0,01028	0,00822	0,00411	0,00206	0,00082	0,00041
U řada	50	1,97E-01	0,88341	0,17668	0,08834	0,04417	0,02945	0,02209	0,01767	0,00883	0,00442	0,00177	0,00088
Th řada	50	3,44E-03	0,01543	0,00309	0,00154	0,00077	0,00051	0,00039	0,00031	0,00015	7,7E-05	3,1E-05	1,5E-05
K 40	500	2,58E-01	1,15695	0,23139	0,1157	0,05785	0,03857	0,02892	0,02314	0,01157	0,00578	0,00231	0,00116
Součet		4,58E-01	2,05578	0,41116	0,20558	0,10279	0,06853	0,05139	0,04112	0,02056	0,01028	0,00411	0,00206
U řada	100	3,94E-01	1,76682	0,35336	0,17668	0,08834	0,05889	0,04417	0,03534	0,01767	0,00883	0,00353	0,00177
Th řada	100	6,88E-03	0,03085	0,00617	0,00309	0,00154	0,00103	0,00077	0,00062	0,00031	0,00015	6,2E-05	3,1E-05
K 40	1000	5,16E-01	2,3139	0,46278	0,23139	0,1157	0,07713	0,05785	0,04628	0,02314	0,01157	0,00463	0,00231
Součet		9,17E-01	4,11157	0,82231	0,41116	0,20558	0,13705	0,10279	0,08223	0,04112	0,02056	0,00822	0,00411
Cs 137	10	7,22E-03	0,03238	0,00648	0,00324	0,00162	0,00108	0,00081	0,00065	0,00032	0,00016	6,5E-05	3,2E-05
	100	7,22E-02	0,32377	0,06475	0,03238	0,01619	0,01079	0,00809	0,00648	0,00324	0,00162	0,00065	0,00032
Pozadí		4,24E-01	1,90135	0,38027	0,19013	0,09507	0,06338	0,04753	0,03803	0,01901	0,00951	0,0038	0,0019

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 76 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Tabulka 16f-2 Maso, masťovka 200 ml. Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰Sr pro různé aktivity RN emitujících záření gama a různé aktivity ⁹⁰Sr pro HPGe 10%

Sr 90	A (kBq/kg)		1	5	10	20	30	40	50	100	200	500	1000
	cps		0,458	2,29	4,58	9,16	13,74	18,32	22,9	45,8	91,6	229	458
	A (Bq/kg)	cps	Poměr počtu impulsů v ROI 50-200 keV daného RN k počtu impulsů v ROI ⁹⁰ Sr										
U řada	10	8,32E-02	0,18166	0,03633	0,01817	0,00908	0,00606	0,00454	0,00363	0,00182	0,00091	0,00036	0,00018
Th	10	1,39E-03	0,00303	0,00061	0,0003	0,00015	0,0001	7,6E-05	6,1E-05	3E-05	1,5E-05	6,1E-06	3E-06
K	100	1,03E-01	0,22489	0,04498	0,02249	0,01124	0,0075	0,00562	0,0045	0,00225	0,00112	0,00045	0,00022
Součet		1,88E-01	0,40959	0,08192	0,04096	0,02048	0,01365	0,01024	0,00819	0,0041	0,00205	0,00082	0,00041
U řada	50	4,16E-01	0,9083	0,18166	0,09083	0,04541	0,03028	0,02271	0,01817	0,00908	0,00454	0,00182	0,00091
Th	50	6,95E-03	0,01517	0,00303	0,00152	0,00076	0,00051	0,00038	0,0003	0,00015	7,6E-05	3E-05	1,5E-05
K	500	5,15E-01	1,12445	0,22489	0,11245	0,05622	0,03748	0,02811	0,02249	0,01124	0,00562	0,00225	0,00112
Součet		9,38E-01	2,04793	0,40959	0,20479	0,1024	0,06826	0,0512	0,04096	0,02048	0,01024	0,0041	0,00205
U řada	100	8,32E-01	1,81659	0,36332	0,18166	0,09083	0,06055	0,04541	0,03633	0,01817	0,00908	0,00363	0,00182
Th	100	1,39E-02	0,03035	0,00607	0,00303	0,00152	0,00101	0,00076	0,00061	0,0003	0,00015	6,1E-05	3E-05
K	1000	1,03E+00	2,24891	0,44978	0,22489	0,11245	0,07496	0,05622	0,04498	0,02249	0,01124	0,0045	0,00225
Součet		1,88E+00	4,09585	0,81917	0,40959	0,20479	0,13653	0,1024	0,08192	0,04096	0,02048	0,00819	0,0041
Cs 137	10	1,61E-02	0,03515	0,00703	0,00352	0,00176	0,00117	0,00088	0,0007	0,00035	0,00018	7E-05	3,5E-05
	100	1,61E-01	0,35153	0,07031	0,03515	0,01758	0,01172	0,00879	0,00703	0,00352	0,00176	0,0007	0,00035
Pozadí		4,24E-01	0,92576	0,18515	0,09258	0,04629	0,03086	0,02314	0,01852	0,00926	0,00463	0,00185	0,00093

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 77 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Příklad zadání parametrů zdroje pro MC simulaci spektra

Do vstupního souboru programu pro MC simulace (MCNP) je mimo jiné nutné definovat energetickou a prostorovou distribuci zdroje.

Příspěvky od záření gama, X a beta je vhodnější zadávat jednotlivě a simulovat tak zvlášť jednotlivá spektra.

Jako definici zdroje je nutné zadat energie záření gama, X a beta (MeV) a jejich zastoupení. Příklad zadání energetické distribuce ²¹²Pb je uveden níže. Součet jednotlivých výtěžků je automaticky normován na 1, proto se doporučuje zadat parametr WGT tak, aby jeho hodnota byla rovna skutečné hodnotě součtu jednotlivých výtěžků.

```

c Pb-212 gamma
sdef par=2 erg=d1 wgt=0.47367
si l L 0.238632 0.300087 0.115183 0.415200 0.176680
sp l D 0.433000 0.032800 0.005920 0.001430 0.000520

c Pb-212 X-ray
sdef par=2 erg=d1 wgt=0.500507
si l L 0.009420 0.010731 0.010839 0.011712 0.012480 0.012691
      0.012967 0.013023 0.013211 0.013393 0.015247 0.015582
      0.015685 0.015709 0.074138 0.074815 0.077107 0.086830
      0.087349 0.087892 0.089784 0.090074
sp l D 0.003300 0.006600 0.058600 0.00086 0 0.000930 0.002700
      0.014600 0.036700 0.003100 0.00203 0 0.00780 0 0.000920
      0.001430 0.001120 0.000177 0.104100 0.17500 0 0.020900
      0.040100 0.001200 0.014600 0.003740

c Pb-212 beta
sdef par=3 erg=d1 wgt=0.9997
si l L 0.335170 0.573800 0.158530
sp l D 0.825000 0.123000 0.051700

```

Dále je potřeba správně nastavit šířku kanálů a Gaussovské rozšíření píků. Gaussovské rozšíření píků se zadá pomocí speciální modifikace funkce skórování FTn

FTn ID₁ P_{1,1} P_{1,2} P_{1,3} ... ID₂ P_{2,1} P_{2,2} P_{2,3} ...

Konkrétní zadání bude mít následující podobu

FT8 GEB a b c

FT8 znamená modifikaci Tally F8, která se používá při simulaci odezvy detektoru. Parametry a, b, c GEB (Gaussian Energy Broadening) jsou specifikovány pomocí FWHM

$$\text{FWHM} = a + b\sqrt{E + cE^2}$$

Nastavení šířky energetických kanálů na 0,745 keV pro oblast 1 keV (0,001 MeV) až 3 MeV se zadá následovně

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 78 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ⁹⁰ Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

E8 0 1e-5 0.001 4025i 3.000

Kromě energetické distribuce zdroje je nutné zadat ještě jeho prostorovou distribuci. Pokud není zadána, jako zdroj je specifikován nehmotný bod umístěný v bodě (0, 0, 0).

Specifikace zdroje ²¹²Pb (jednotlivě pro gama, X a beta záření) v masťovce 200 ml bude

sdef erg=d1 pos= 0 0 6.6 rad=d2 ext=d3 axs= 0 0 -1 par=3 cel=13 wgt=0.4737

si1 L 0.238632 0.300087 0.115183 0.415200 0.176680

sp1 D 0.433000 0.032800 0.005920 0.001430 0.000520

si2 0 3.15

sp2 -21 1

si3 0 6.3

sp3 -21 0

sdef erg=d1 pos= 0 0 6.6 rad=d2 ext=d3 axs= 0 0 -1 par=3 cel=13 wgt=0.5005

si1 L 0.009420 0.010731 0.010839 0.011712 0.012480 0.012691

0.012967 0.013023 0.013211 0.013393 0.015247 0.015582

0.015685 0.015709 0.074138 0.074815 0.077107 0.086830

0.087349 0.087892 0.089784 0.090074

sp1 D 0.003300 0.006600 0.058600 0.00086 0 0.000930 0.002700

0.014600 0.036700 0.003100 0.00203 0 0.00780 0 0.000920

0.001430 0.001120 0.000177 0.104100 0.17500 0 0.020900

0.040100 0.001200 0.014600 0.003740

si2 0 3.15

sp2 -21 1

si3 0 6.3

sp3 -21 0

sdef erg=d1 pos= 0 0 6.6 rad=d2 ext=d3 axs= 0 0 -1 par=3 cel=13 wgt=0.9997

si1 L 0.335170 0.573800 0.158530

sp1 D 0.825000 0.123000 0.051700

si2 0 3.15

sp2 -21 1

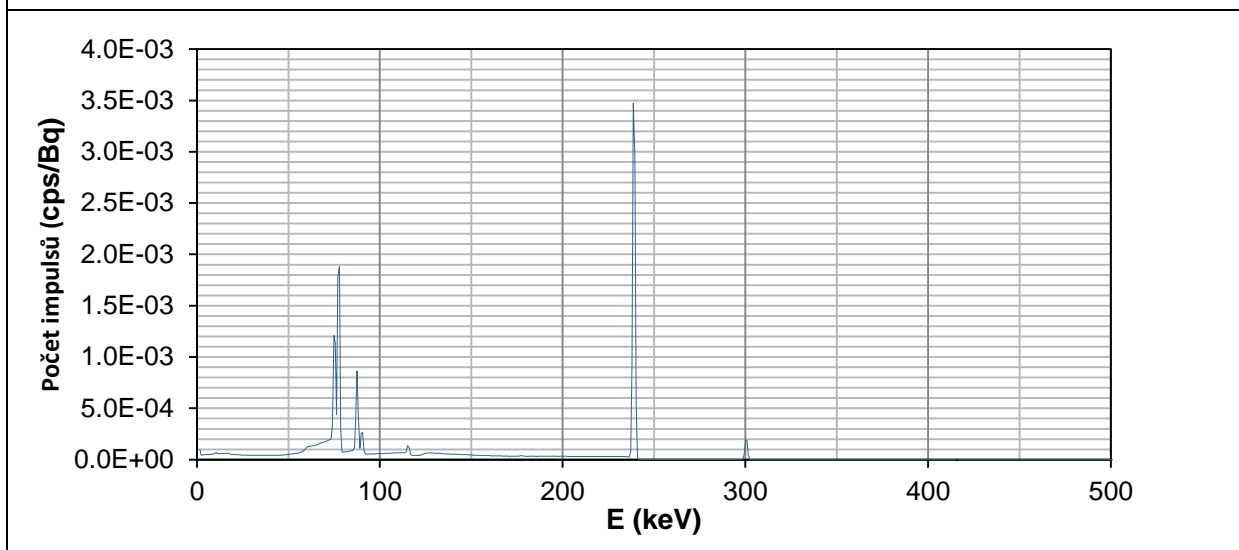
si3 0 6.3

sp3 -21 0

Nasimulované spektrum ²¹²Pb v masťovce 200 ml (půda), dané součtem jednotlivých spekter záření gama, X a beta, je uvedeno na [obr. 18](#).

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika	List: 79 z 79
	Detekce a stanovení aktivity ^{90}Sr ve vzorcích životního prostředí měřením brzdného záření	Datum účinnosti: 1. 7. 2015

Obrázek 18 Spektrum ^{212}Pb v suché půdě s hustotou $1,1 \text{ g/cm}^3$ v masťovce 200 ml. MC simulace.



Poznámka: HPGe detektor s 10% relativní účinností, šířka kanálu: 0,748 keV.