

УДК 539.1.074.55: 539.166

І.С. Потокі

Інститут електронної фізики НАН України, 88017, Ужгород, вул. Університетська, 21
e-mail: nuclear@email.uz.ua

ПАРАМЕТРИЧНИЙ ОПИС АБСОЛЮТНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДЕТЕКТОРІВ ДЛЯ ВИМІРУ АКТИВНОСТІ ОБ'ЄМНИХ ПРОБ

Запропоновано параметричний опис залежності абсолютної ефективності напівпровідникового Ge(Li)-детектора від енергії γ -випромінювання для двох геометричних умов вимірювань комбінованого об'ємного джерела в посудині Марінеллі ємністю 1 дм³ та в циліндричному контейнері ємністю 0.5 дм³.

Ключові слова: Ge(Li)-детектор, ефективність, геометрія вимірювання.

Вступ

Для отримання експериментальної інформації про вміст природних і техногенних радіонуклідів у об'єктах навколишнього середовища та їх питомої активності широко застосовується метод напівпровідникової гамма-спектрометрії [1-3], який є перспективним завдяки сучасним можливостям автоматизації накопичення та обробки експериментальної інформації, відсутності проміжних операцій і незалежності місця проведення аналізу від місць відбору проб.

Незважаючи на оперативність і порівняно низьку собівартість гамма-спектрометричного методу детектування радіонуклідів, успіх його безпосереднього застосування залежить від ряду чинників. Основний з них – це геометрія вимірів, яка дуже впливає на ефективність реєстрації і залежить від об'єму проби. Тому, щоб досягти низьких рівнів детектування, потрібно використовувати оптимальні розміри проб і геометрію вимірів.

Крім того, точність даного методу досліджень по визначенню активності природних та техногенних радіонуклідів залежить від точності калібрувань напівпровідникових детекторів та правильної апроксимації залежності ефективності реєстрації від енергії гамма-квантів [4, 5].

У даній роботі запропоновано параметричний опис залежності абсолютної ефективності напівпровідникового

Ge(Li)- детектору з об'ємом кристалу 100 см³ від енергії γ -квантів для двох геометричних умов вимірів: комбіновані джерела γ -випромінювання знаходяться у посудині Марінеллі ємністю 1 дм³ та в спеціальному контейнері ємністю 0.5 дм³.

Параметричний опис залежності абсолютної ефективності від енергії гамма-квантів

Апроксимація енергетичної залежності ефективної реєстрації γ -квантів має деякі особливості. Вона проводиться в подвійному логарифмічному масштабі, тобто будується залежність наступного вигляду:

$$\lg \varepsilon(E) = f(\lg E) \quad (1)$$

де E – енергія, ε – ефективність реєстрації.

Калібрувальні точки для побудови функції залежності енергія – ефективність реєстрації визначаються згідно [6, 7]:

$$\varepsilon_i(E_i) = \frac{I_i}{A^{(k)} \cdot \frac{G_i^{(k)}}{100}} \quad (2)$$

де $\varepsilon_i(E_i)$ – значення ефективності i -ої калібрувальної точки з енергією E_i , I_i – інтенсивність піку, що відповідає i -ій калібрувальній точці, $A^{(k)}$ – активність k -

ого радіонукліду, зіставленого i -ї калібрувальній точці в бекерелях, $G_i^{(k)}$ – вихід γ -квантів на 100 розпадів для лінії k -ого нукліду, зіставленого i -ї калібрувальній точці.

Для визначення ефективності напівпровідникових (Ge(Li)-, HPGe-) детекторів запропоновані чисельні методи розрахунку, що враховують як фізичні процеси, що відбуваються при поглинанні і розсіюванні фотонів, так і певну геометрію експерименту [8-12].

Криву ефективності можна умовно розділити на дві характерні ділянки (див. рис. 2), кожна з яких вимагає окремої апроксимуючої функції. Враховуючи обмежену кількість експериментальних точок, слід вибрати відносно невелике число параметрів, достатнє для якісного опису кривої (у межах одного стандартного відхилення).

$$\ln \varepsilon = a_1 \ln \frac{E}{E_0} + a_2 \left(\ln \frac{E}{E_0} \right)^2 + a_3 \left(\ln \frac{E}{E_0} \right)^3 - \frac{a_4}{E^\gamma} \quad (5)$$

Запропоноване параметричний опис абсолютної ефективності від енергії гамма-квантів реалізоване для напівпровідникового коаксіального Ge(Li)- детектору, характеристики якого надано у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики напівпровідникового детектору

Тип детектору	Ge(Li)
Модель	ДГДК-100В
Серійний №	1627
Виробник	Латв. РСР
Об'єм кристалу, см ³	100
Радіус кристалу, мм	22,1
Віддаль від кришки детектору до поверхні кристалу, мм	7,0
Товщина кришки детектору, мм	1,0
Діаметр кришки детектору, мм	90
Висота кришки детектору, мм	123

Для більшості випадків гамма-спектрометрії інтервал енергій фотонів знаходиться у межах від 50 до 3000 кеВ. У заданому інтервалі виміряних точок ефективності потрібно мати певну інтерполяційну формулу для обчислення ефективності при інших енергіях.

Для цієї задачі використовують такі дві функції [6, 7]:

$$\ln \varepsilon = \sum a_i \ln \left(\frac{E}{E_0} \right)^i, \text{ для } E \geq 200 \text{ кеВ} \quad (3)$$

та

$$\ln \varepsilon = \sum \frac{a_i}{E^i}, \text{ для } E \leq 200 \text{ кеВ} \quad (4)$$

де ε – ефективність детектора, E_0 рівне 1 кеВ.

Обмежуючись можливим найменшим числом параметрів, виберемо форму ефективності як

Калібрувальні виміри проводилися на сертифікованому γ -спектрометричному комплексі "SBS-40" для двох геометричних умов вимірів.

Джерела γ -випромінювання розміщувалися у посудині Марінеллі об'ємом 1 дм³ (геометрія 1) та в циліндричному контейнері об'ємом 0,5 дм³ (геометрія 2), які встановлювали по центру кришки детектора.

Геометричні розміри посудини Марінеллі: внутрішній діаметр – 9,6 см, зовнішній діаметр – 15 см, висота наповнення посудини – 8,9 см, товщина стінок – 0,2 см, а циліндричного контейнеру: діаметр основи – 11.03 см, висота наповнення – 5,30 см, товщина стінок – 0,08 см, ємність – 0,1 дм³.

В процесі експерименту використовували атестовані джерела γ -випромінювання: ⁵⁷Co + ¹³⁷Cs + ⁵⁴Mn + ⁶⁰Co + ²⁴¹Am, ⁴⁴Ti + ¹⁵²Eu, ¹³⁷Cs + ⁴⁰K, ¹³⁷Cs, ⁴⁰K та ¹⁵²Eu.

На рис. 1 представлені спектри γ -випромінювання калібрувальних джерел.

Час набору спектрів для всіх джерел становив 1 годину.

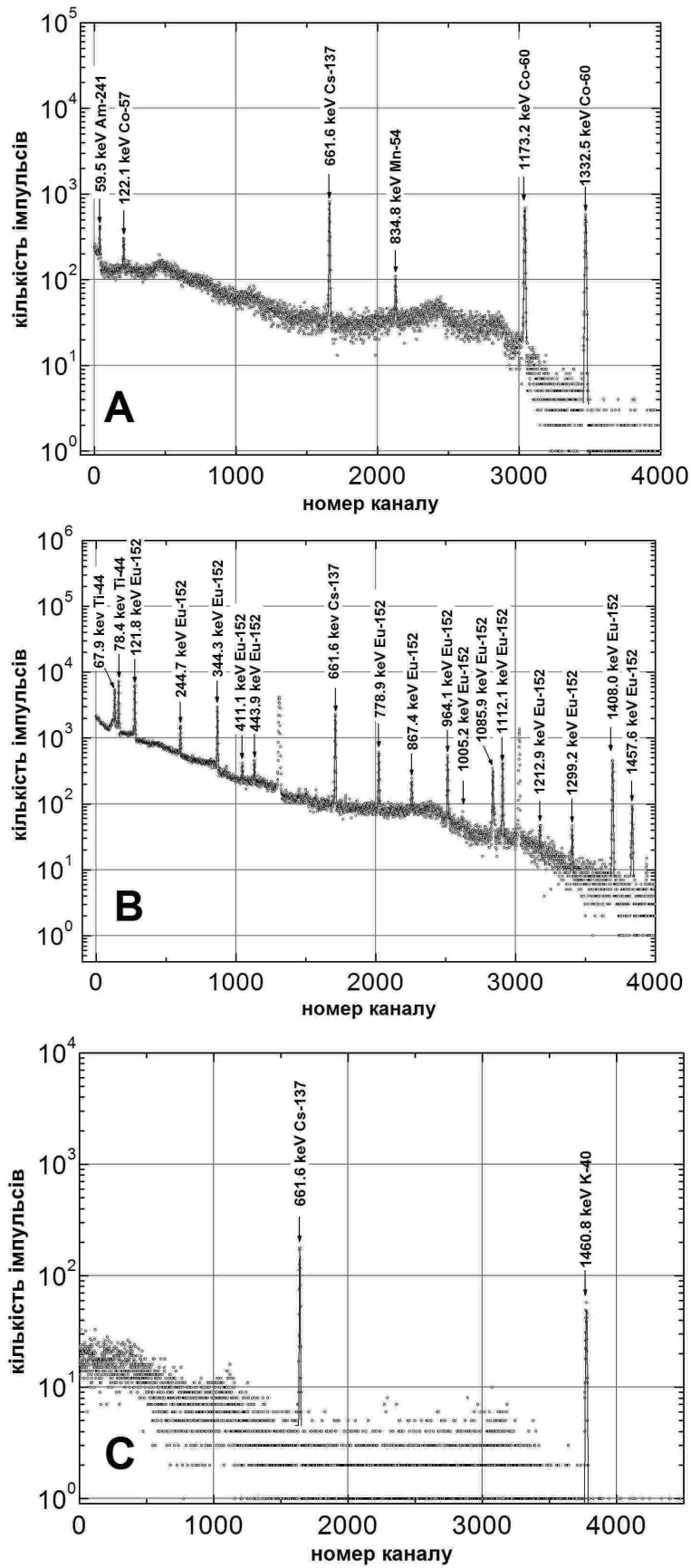


Рис. 1. Спектри γ -випромінювання джерел (А – комбіноване джерело $^{57}\text{Co} + ^{137}\text{Cs} + ^{54}\text{Mn} + ^{60}\text{Co} + ^{241}\text{Am}$ у посудині Марінеллі (1 дм³), В – комбіноване джерело $^{44}\text{Ti} + ^{152}\text{Eu}$ у посудині Марінеллі (1 дм³), С – комбіноване джерело $^{40}\text{K} + ^{137}\text{Cs}$ в циліндричному контейнері.

Статистичні похибки інтенсивності піків γ -ліній, які використовувалися для аналізу, не перевищували 3 %.

Під час проведення вимірів здійснювався контроль спектрометричного комплексу по наступних параметрах: дрейф каналів, роздільна здатність та ефективність реєстрації випромінювання гамма-квантів. Зміна вказаних параметрів протягом часу вимірів не перевищувала 1%.

Результати опису залежності абсолютної ефективності Ge(Li)- детектору від енергії γ -квантів представлено на рис. 2 (А – джерела у стакані Марінееллі, В – джерела у циліндричному контейнері). Крива – результат описання формулою (5), точки – експериментальні значення.

Значення калібрувальних точок абсолютної ефективності в зазначеному інтервалі енергій одержано за допомогою наступних параметрів:

– у випадку посудини Марінееллі:

$a_1 = 0,259475$; $a_2 = -0,288185$; $a_3 = 5494,152$;
 $a_4 = 0,018431$; $\gamma = 1,813677$; $E_0 = 1$ кеВ;

– у випадку циліндричного контейнеру:
 $a_1 = -0,190909$; $a_2 = -0,219507$;

– $a_3 = 4421,445$; $a_4 = 0,016064$; $\gamma = 1,844209$;
 $E_0 = 1$ кеВ, відповідно.

Якість опису у цих випадках з врахуванням зазначеної статистичної похибки χ^2 на степінь свободи $\sim 1,5$.

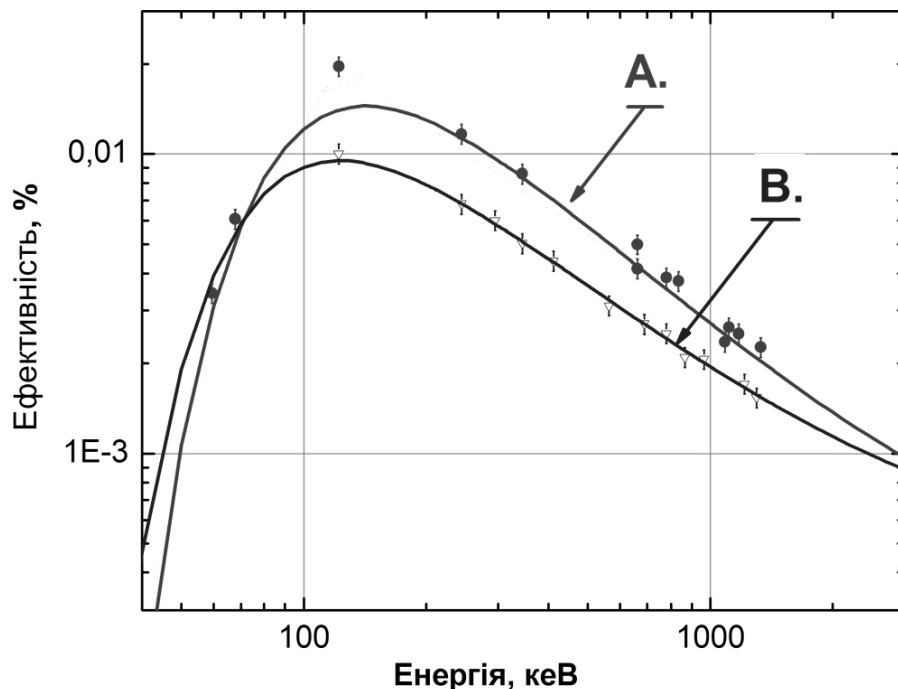


Рис. 2. Залежність абсолютної ефективності Ge(Li)- детектору від енергії гамма-квантів (А – джерела у стакані Марінееллі, В – джерела у циліндричному контейнері).

Висновки

У даній роботі запропоновано параметричний опис абсолютної ефективності Ge(Li)- детектора для двох геометричних умов вимірів: комбіновані джерела гамма-випромінювання у стакані Марінееллі ємністю 1 дм³ та в циліндричному контейнері ємністю 0.5 дм³.

За допомогою цих співвідношень можна обчислити ефективність гамма-спектрометрів при проведенні вимірів з джерелами заданої форми і розмірів для

великої кількості нуклідів, активність яких визначається в процесі експерименту; врахувати поправку залежності самопоглинання гамма-квантів від їх енергії для проб з заданою густиною, що дозволяє відмовитися від довготривалого та трудомісткого процесу виготовлення еталонних зразків для калібрування.

Автор висловлює подяку науковому керівнику Парлагу О.О. за постановку та Ленделу О.І. за допомогу при проведенні розрахунків програмою "MINUIT".

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Иохельсон С.Б. Гамма-спектрометрический анализ проб почвы // В кн.: Радиоактивность почв и метод ее определения. М.: Наука. 1966. С. 239-257.
2. Хайкович И.М., Фоминых В.И., Крисюк Э.М., Белячков Ю.А. Метрологическое обеспечение измерения удельной активности и массовой доли природных радиоактивных элементов в пробах почв и пород методом спектрометрии гамма-излучения // Атомная энергия. – 1993. – Т. 75, В. 5. – С. 350–361.
3. Парлаг О.О., Маслюк В.Т., Пуга П.П. та ін. Склад гамма-активних природних та техногенних компонент поверхневих шарів ґрунту // Вісник УжНУ. Серія Хімія. – 2001. – В. 6. - С. 98 – 102.
4. МИ 2143-91 Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре // ГК СССР по УКПС. Москва. – 1991. – 17 с.
5. Hernandez F. Efficiency Calibration of HPGe detectors // In: Optimisation of environmental gamma spectrometry using Monte Carlo methods. – Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis: Univ.-bibl. (Comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the Faculty of Science and Technology) – 2002. – P.58.
6. Knoll G.F. Radiation Detection and Measurement // Third edition. - NY: John Wiley & Sons, Inc., 2000. – P. 116-119.
7. ГОСТ 29115-91 Блоки детектирования гамма-излучения спектрометрические на основе полупроводниковых детекторов. Методы измерения основных параметров // Комитет стандартизации и метрологии СССР. Москва. – 1991. – 29 с.
8. Mowatt R.S. A semi-empirical efficiency curve for a Ge(Li) detector in energy range 50–1400 keV // Nucl. Instrum. Methods – 1969. – V. 70. – P. 237–244.
9. Singh R. Validity of various semi-empirical formulae and analytical functions for the efficiency of Ge(Li) detectors // Nucl. Instrum. Methods – 1976. – V. 136. – P. 543–549.
10. Kis Z., Fazekas B., Östör J. et al. Comparison of efficiency functions for Ge gamma-ray detectors in a wide energy range // Nucl. Instrum. Methods – Phys. Res. A – 1998. – V. 418. – P. 374–386.
11. Švec A. Analytical efficiency curve for coaxial germanium detectors // Applied Radiation and Isotopes – 2008. – V. 66, Is. 6-7. – P. 786–791.
12. Lendel A., Parlag O. Semyempirical description of Ge(Li)- or Ge- detectors efficiency for wide energy region // Abstracts 58 International Conference on Nuclear spectroscopy and structure of atomic nucleus. “Nucleus 2008”. 23–27 june, 2008. Moscow. – P. 313.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2012

I.S. Potoki

Institute of Electron Physics, National Academy of Sciences of Ukraine
88017, Uzhhorod, University Str., 21

PARAMETRIC DESCRIPTION OF THE ABSOLUTE EFFICIENCY OF SEMICONDUCTOR DETECTORS FOR MEASURING OF BULK SAMPLE ACTIVITY

The parametric description of γ -radiation energy dependence of the absolute efficiency of Ge(Li) semiconductor detectors is proposed for two geometrical measuring conditions: the combined bulk source placed in Marinelli vessel by volume of 1 dm³ and in the special container by volume of 0.5 dm³.

Key words: Ge(Li)-detector, efficiency, source-detector geometry.

И.С. Потоки

Институт электронной физики НАН Украины

88017, Ужгород, ул. Университетская, 21

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АБСОЛЮТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОСТИ ОБЪЕМНЫХ ПРОБ

Предложено параметрическое описание зависимости абсолютной эффективности полупроводникового Ge(Li)-детектора от энергии γ -излучения для двух геометрических условий измерений: комбинированного объемного источника в сосуде Маринелли емкостью 1 дм³ и в специальном контейнере емкостью 0.5 дм³.

Ключевые слова: Ge(Li)-детектор, эффективность, геометрия измерения.