

УДК 543.429.3+517.443

О.М. Поп

Інститут електронної фізики НАН України, вул. Університетська, 21, 88017, м. Ужгород
e-mail: oksana_pop@i.ua

ВИКОРИСТАННЯ ФУР'Є-, ВЕЙВЛЕТ-ФІЛЬТРАЦІЇ ТА БУТСТРЕП-МЕТОД ПРИ ОБРОБЦІ СЛАБИХ ШКІВ В АПАРАТУРНИХ ГАММА-СПЕКТРАХ

У даній статті описані методи аналізу гамма-спектрів, отриманих (вимірних) напівпровідниковими детекторами: Фур'є- та Вейвлет- фільтрації, а також конкатенація (об'єднання). Два методи згладжування наведені для спектрів актинідів та металічних виробів. Також розглядаються практичні приклади використання прямого, оберненого та звичайного бутстреп-методів у задачах прикладної ядерної гамма-спектрометрії (ПЯГС) природної активності нуклідів.

Ключові слова: конкатенація, апаратурні гамма-спектри (АГС), прямий, обернений та звичайний бутстреп-методи.

Вступ

Ядерна гамма-спектрометрія (ЯГС) широко використовується для визначення радіонуклідів. Даний метод має досить багато переваг [1, 2]. Структура вимірних гамма-спектрів є простою. Аналіз гамма-спектрів полягає у визначенні якісної та кількісної інформації. Однак дуже важко аналізувати спектр, коли фотопік слабкий (маленький). Крім того, шум (фон) у гамма-спектрі є одним із факторів, що не дає побачити потрібний сигнал [3, 4]. Звичайно, що за таких умов втрата інформації може бути значною. Тому для таких цілей використовують різноманітні методи. Основним критерієм вибору методу є мінімізація шуму (фону) без втрати потрібної інформації. Одними з таких методів є широко використовуванні: Фур'є- та Вейвлет- фільтрації, конкатенація, бутстреп-метод.

Бутстреп-метод в ядерній гамма-спектрометрії

Метою статистичних методів є отримання даних у компактному, зручному і наочному вигляді, узагальнення їх за допомогою математичних моделей і розробка рішень про подальші оптимальні дії. У збірнику статей відомого американського статиста, професора Стенфордського

університету Б. Ефрона обговорюється метод обробки статистичних даних, який називається «бутстреп» [5].

Бутстреп відрізняється від традиційних методів тим, що він передбачає багаторазову обробку різних частин одних і тих же даних і зіставлення отриманих таким чином результатів.

Фур'є-, Вейвлет- фільтрації та конкатенація

Застосування методів, заснованих на використанні фільтрації для аналізу ядерних випромінювань, зокрема гамма-спектрів, було вперше запропоноване в роботах [3, 6]. Фур'є- та Вейвлет- фільтрації включають фільтрацію, відновлення та кількісне здобування інформації зі спектра [7-9].

Алгоритм фільтрації, згладжування аналізованих даних був досліджений з метою мінімізації шуму, зберігаючи при цьому форму сигналу. Тобто метою цифрової фільтрації є фільтрація спектра таким чином, щоб зберегти частину спектра, в якому нема перешкод від шуму та звести до мінімуму частину, що залишилася, в якій шум є домінуючим.

Фільтрація використовується для оцінки низьких, середніх та високих енергій для різних радіонуклідів.

Крім того, для мінімізації шуму в спектрі, використовують конкатенація.

Конкатенація – це приєднання декількох спектрів (2, 3 і т.д.) з подальшим згладжуванням даних спектрів. При цьому можна побачити «повторення» піків, що свідчить про те, що пік є аналітичним (не шум) [2].

Отже, метою даної роботи є виділення слабих піків, використовуючи Фур'є- та Вейвлет- фільтрацію, для подальшого їх аналізу.

Експеримент

У задачах ЯГС дуже часто зустрічається ситуація, коли на деякий сигнал накладається шум. Після виміру ми отримуємо апаратурні гамма-спектри (АГС). АГС – це впорядкована (тобто нестатистична) послідовність точок статистичної природи; з високими дисперсіями (сигнали + шум). Для того, аби в АГС позбутися шуму, використовують різні методи – великі маси зразків, великий час виміру та повторні виміри. Однак, кожний з цих методів має свої недоліки – не завжди можна отримати велику масу зразка та проводити виміри протягом тривалого часу. Тому на сьогодні для боротьби з шумом у спектрі використовують велику кількість методів. Одними з таких методів є Фур'є-, Вейвлет-фільтрації та конкатенація. Також для збільшення ймовірності виділення слабих сигналів у фоні використовують бутстреп-методи. На основі спостережень ми знаємо, що якщо слабкий сигнал у фоні (шумі) повторюється, тоді він є аналітичним (інваріантним – не шум). Ця ймовірність виділення слабих сигналів в АГС залежить від:

1. Значень сигналу: більший сигнал – більша ймовірність виділення слабих сигналів в АГС – «сигнал – інваріант (не шум)»;

2. Відношення сигнал/фон: більше відношення – більша ймовірність, що «сигнал – інваріант (не шум)». Це відношення можна збільшити, збільшивши чисельник (сигнал), та/або зменшивши знаменник (фон – шум);

3. Кількості повторів сигналу: більше повторів – більша ймовірність, що «сигнал – інваріант (не шум)».

4. Кількість позитивних повторів: більше позитивних повторів – більша ймовірність, що «сигнал – інваріант (не шум)»

5. Кількість всіх повторів, поки не буде визначено, що «сигнал – інваріант (не шум)».

В даному випадку повтор – це повторний вимір. Повтор сигналу – повтор виміру, в якому «сигнал – інваріант (не шум)». Тому, у даному випадку треба визначити – зробити один довгий вимір чи багато повторних коротких вимірів.

Ми використали повторні виміри з фіксованим часом T на експозицію. Нехай T – загальний час, виділений на виміри. ΔT – тривалість одного виміру, тоді:

$$I \cdot \Delta T = \Delta S, \quad (1)$$

де I – інтенсивність зареєстрованого гамма-випромінювання, імп/с, ΔS – площа сигналу (фотопіку гамма-лінії).

В інтенсивність I входить $I_{\text{сигн}}$ та $I_{\text{фон}}$:

$$I = I_{\text{сигн}} + I_{\text{фон}} \quad (2)$$

Поведінка (напр., дисперсія) статистичної $I_{\text{сигн}}$ та статистичної $I_{\text{фон}}$ може бути різною (з цієї статистичної причини) в різних проміжки часу ΔT :

$$I(\Delta T1) \neq I(\Delta T2) \neq \quad (3)$$

Кількість вимірів (повторів) n – зовнішній заданий параметр, оскільки збільшення позитивних повторів збільшує ймовірність прийняття рішення «сигнал – інваріант (не шум)». Тому збільшуємо загальну кількість n вимірів:

$$n = \frac{T}{\Delta T} \quad (4)$$

Особливостями ЯГС є те, що наші АГС обробляються SBS-40. Тому, при повторних коротких вимірах, ми бачимо, що обробка АГС-сум може давати різні результати: напр., ідентифікувати/не ідентифікувати деякі фотопіки. В АГС ділянки, де знаходяться сигнали, внаслідок цього будуть мати різні значення критерію "трех коренів з фону" для прийняття рішення «сигнал > фон».

Для перевірки нашого методу був знайдений статистичний критерій α у зразках актинідів та металічних виробів [10]. При цьому використовується площа піку ΔS :

$$\Delta S = S - F, \quad (5)$$

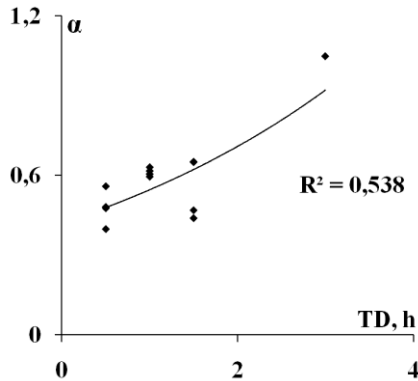


Рис. 1. Залежність критерію α від часу виміру TD (год.) при енергії 25 кеВ.

На рис. 1 та рис. 2 наведені залежності критерію α від часу виміру TD (h). Як видно, критерій α росте з часом виміру.

Для зразків навколишнього середовища розглядаються різні типи бутстреп-методів (у задачах ЯГС низької природної радіоактивності нуклідів (питома активність ≤ 10 Бк / кг)):

- *Прямий* (збільшення кількості елементів у вибірці) – метод базується на застосуванні короткотривалих вимірювань. Як елементи вибірки використовуються суми апаратурних гамма-спектрів (АГС), комбіновано одержані з АГС менших тривалостей. Отримані суми можна розглядати як нові додаткові АГС – додаткові виміри. Дана технологія дозволяє отримати додаткову множину АГС, в якій здійснюється пошук потрібних нам піків. Таким чином, ми використовуємо такі властивості лінії в АГС, як самоподібність та інваріантність.

- *Обернений* (зменшення кількості елементів у вибірці) – метод використовує відомий метод зменшення дисперсії значень шляхом виключення точок на «хвостах» розподілу частотей їх значень. При цьому виконується умова робастності – стійкості середнього значення всіх значень. Тут як елементи вибірки використовують результати обробки АГС, напр., гамма-активності або інтенсивності нуклідів. Ми

де S – площа піку з шумом, F – фон (шум). Критерій α розраховувався наступним чином:

$$\alpha = \frac{\Delta S}{\sqrt{\Delta S + 2F}} \quad (6)$$

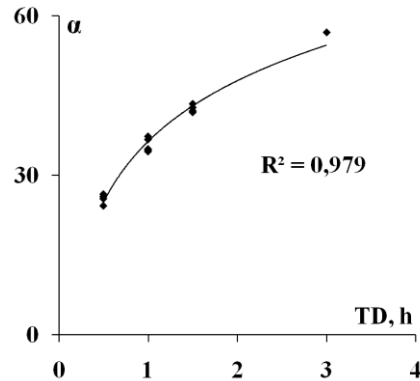


Рис. 2. Залежність критерію α від часу виміру TD (год.) при енергії 63 кеВ.

зменшуємо вибірку, щоб зменшити дисперсію. Межею є мінімальна дисперсія, при якій зберігається середнє значення та тип розподілу (його симетричність).

- *Звичайний* (збільшення кількості вибірок) – модифікація двох попередніх методів: використовує штучне розмноження вибірок. Звичайний метод служив як деякий опорний метод. У даному випадку основою була ідея бутстреп-методу [11] – розмноження вибірок: спочатку здійснюють розрахунки для всієї множини точок; потім цю множину розкладають на k підмножин і повторяють розрахунки, послідовно відкидаючи кожен з підмножин. Цей метод називають методом «складного ножа» (Тьюкі). Модифікацією є розгляд всієї підмножини з послідовним виключенням однієї точки. Зрозуміло, що в цих методах збільшується кількість підмножин.

Обробка апаратурних гамма-спектрів

Описується спосіб, що використовує Фур'є- та Вейвлет- фільтрації для спектрів, які отримані Ge(Li) детектором багатоканального аналізатора. Виміри зразків актинідів та металічних виробів проводилися у відділі фотоядерних процесів ІЕФ НАН України. Отримані спектри були у координатах $N=f(S)$, тому була здійснена калі-

бровка у координати $E=f(S)$. Далі здійснювалася обробка спектрів, використовуючи Фур'є-, Вейвлет- фільтрації та конкатенацію. Для характеристики піків був використаний критерій – гаусівська форма піку.

Апаратні гамма-спектри актинідів. Для аналізу спектрів металічних виробів були застосовані методи фільтрації спектрів актинідів із сильними піками. Кожен зі зразків вимірювався багаторазово протягом тривалості одного виміру $ТСх = 0,5\text{год}; 1\text{год}; 2\text{год}$ (прямий бутстреп-метод). При цьому ми отримували різні спектри. Число піків дуже велике і розподілене по всій області енергій. Дані спектри профільтовані такими типами фільтрів як FFT Threshold та Wavelet Daubechies (N=8) з отриманням спектрів без шуму. Відфільтровані спектри схожі на оригінальні. Це вказує на те, що фільтри відповідно відібрані і досягається ефективне фільтрування (згладжування). При цьому слабкі піки виділяються.

Крім того, спектри піддавались конкатенації (додавання спектрів) з наступним використанням Фур'є- та Вейвлет- фільтрації. Отримані спектри також схожі на оригінальні, без шуму, з виділенням слабких піків. При конкатенації повторення піку в АГС дає змогу ефективніше виділяти слабкі піки.

На рис. 3-5 наведено спектри та ділянки АГС (залежність енергії від імпульсу) при енергії 25 кеВ без фільтрації (рис. 3) та з проведеною FFT Threshold (рис. 4), Wavelet Daubechies (N=8) (рис. 5) фільтрацією.

Як видно з рисунків, у спектрах без фільтрації досить великий шум (рис. 3). Після використання Фур'є-фільтрації у спектрі досить добре виділяються слабкі піки (рис. 4), на відміну від Вейвлет-фільтрації (рис. 5).

На рис. 6-8 наведено спектри та ділянки АГС (залежність енергії від імпульсу) після проведення конкатенації без фільтрації (рис. 6) та з проведеною FFT Threshold (рис. 7), Wavelet Daubechies (N=8) (рис. 8) фільтрацією.

Отже, як видно з даних рисунків, використання Фур'є-фільтрації є більш ефективним для згладжування та виділен-

ня слабких піків. Крім того, при конкатенації сигнали повторюються, чим ефективніше виділяються слабкі піки.

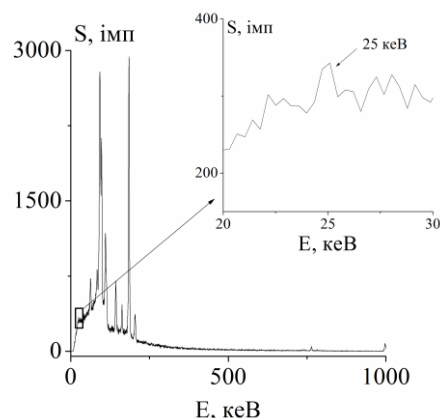


Рис. 3. Спектр та ділянка АГС (залежність енергії від імпульсу) при енергії 25 кеВ без фільтрації.

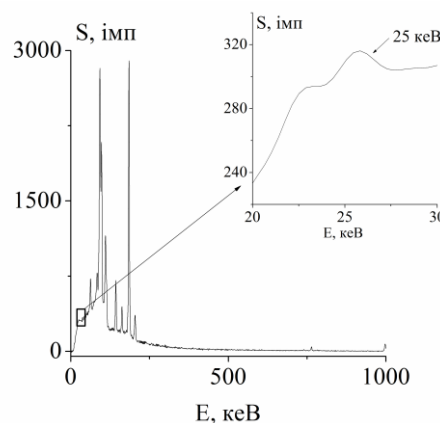


Рис. 4. Спектр та ділянка АГС (залежність енергії від імпульсу) при енергії 25 кеВ із фільтрацією FFT Threshold.

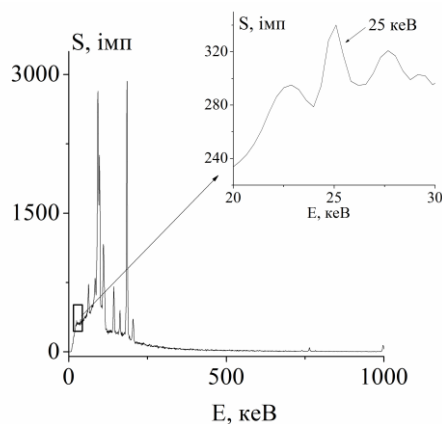


Рис. 5. Спектр та ділянка АГС (залежність енергії від імпульсу) при енергії 25 кеВ із фільтрацією Wavelet Daubechies (N=8).

Апаратні гамма-спектри металів.

Для перевірки висновків зі спектрами актинідів, відповідні методи були застосовані до набору спектрів для зразків мета-

лічних виробів. Дані зразки були вибрані оскільки часто вони є єдиним залишком, який свідчить про археометалургійну діяльність людини. Крім того, зразки мета-

лічних виробів важко піддаються вимірюванню ЯГС через слабу активність у них гамма-активних нуклідів. Тому у цих зразках більшість піків дуже слабкі.

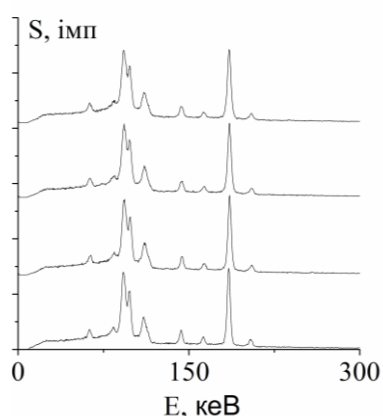


Рис. 6. Конкатенація АГС з часом виміру 0,5год. (TD) без фільтрації.

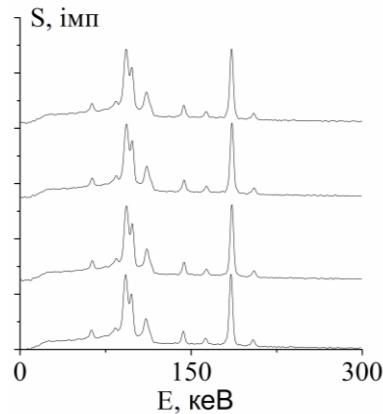


Рис. 7. Конкатенація АГС з часом виміру 0,5год. (TD) з фільтрацією FFT Threshold.

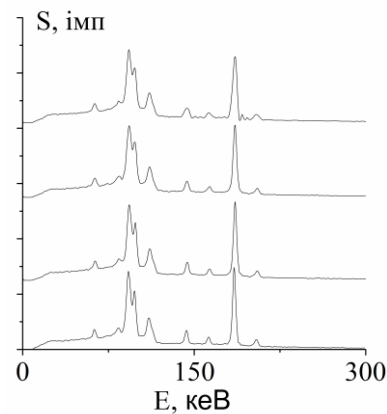


Рис. 8. Конкатенація АГС з часом виміру 0,5год. (TD) з фільтрацією Wavelet Daubechies (N=8).

Як і спектри актинідів, спектри металічних виробів вимірювалися багаторазово протягом тривалості одного виміру $T_{Cx} = 0,5\text{год}; 1\text{год}; 2\text{год}$. Після цього був застосований прямий бутстреп-метод. Потім спектри були профільтовані такими типами фільтрів: FFT Threshold та Wavelet Daubechies (N=8) з отриманням

нових спектрів. Відфільтрований спектр досить схожий на оригінальний, але без шуму, з хорошим виділенням слабких піків.

Спектри піддавались конкатенації з наступним використанням Фур'є- та Вейвлет- фільтрації. Отримані спектри також досить схожі на оригінальні, без шуму, з виділеними слабких піків.

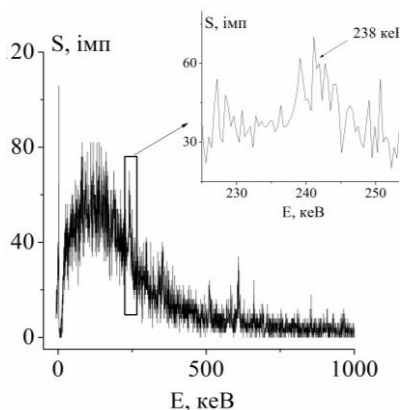


Рис. 9. Спектр та ділянка АГС (залежність енергії від імпульсу) при енергії 238 кеВ без фільтрації.

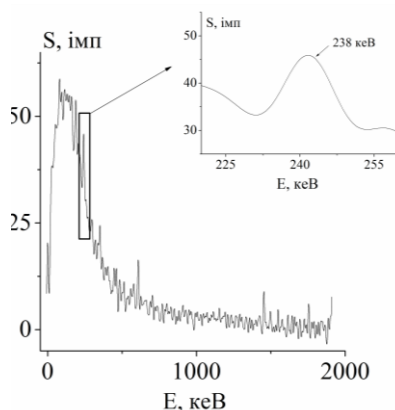


Рис. 10. Спектр та ділянка АГС (залежність енергії від імпульсу) при енергії 238 кеВ із фільтрацією FFT Threshold.

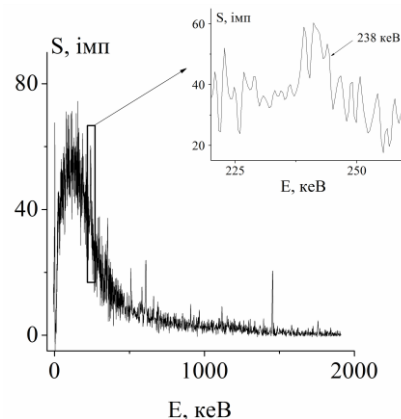


Рис. 11. Спектр та ділянка АГС (залежність енергії від імпульсу) при енергії 238 кеВ із фільтрацією Wavelet Daubechies (N=8).

На рис. 9-11 наведено спектри та ділянки АГС (залежність енергії від імпульсу) при енергії 238 кеВ без фільтрації (рис. 9) та з проведеною FFT Threshold (рис. 10), Wavelet Daubechies (N=8) (рис. 11) фільтрацією. Як

видно з рисунків, після використання Фур'є-фільтрації слабкі піки добре виділяються з-поміж інших сигналів, на відміну від спектрів, де не застосовувались методи фільтрації або із застосуванням Вейвлет-фільтрації.

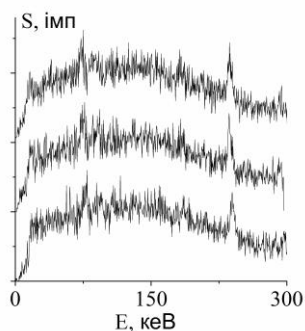


Рис. 12. Конкатенація АГС з часом виміру 4 год. (TD) без фільтрації.

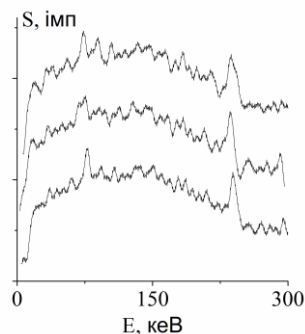


Рис. 13. Конкатенація АГС з часом виміру 4 год. (TD) з фільтрацією FFT Threshold.

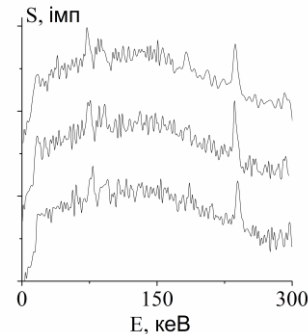


Рис. 14. Конкатенація АГС з часом виміру 4 год. (TD) з фільтрацією Wavelet Daubechies (N=8).

На рис. 12-14 наведено ділянки спектрів (залежність енергії від імпульсу) після проведення конкатенації без фільтрації (рис. 12) та з проведеною FFT Threshold (рис. 13), Wavelet Daubechies (N=8) (рис. 14) фільтрацією.

Як видно з рисунків, при конкатенації краще виділяються слабкі піки: у фоні (шумі) слабкий ефект (сигнал) повторюється, чим дає змогу визначити сигнал як інваріантний (аналітичний – не шум).

Висновки

Показано, що використовуючи різні типи бутстреп-методу, можна виявити аналітичний сигнал.

Виявлено, що використаний фільтр FFT Threshold дає хороший результат для подальшого аналізу спектрів із слабкими піками. Зокрема, це є актуальним при низьких енергіях.

Встановлено, що конкатенація також дає змогу визначати аналітичні піки, а використання фільтрації – відділяти сигнали від шуму (фону).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Поп О.М. Часова залежність інтерференцій аналітичних ліній радіоактивних нуклідів рядів ^{232}Th , ^{235}U та ^{238}U // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. – 2012. – Випуск 32. – С. 45-50.
2. Guillot L. Extraction of full absorption peaks in airborne gamma-spectrometry by filtering techniques coupled with a study of the derivatives. Comparison with the window method // Journal of Environmental Radioactivity. – 2001. – V. 53 – P. 381-398.
3. Inouye T. Application of fourier transforms to the analysis of spectral data // Nuclear instruments and methods. – 1969. – V. 67 – P. 125–132.
4. Thakur N. Alakh and Arnold R. James A sensitive continuum analysis method for gamma ray spectra // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 1993. – V. 325 – P. 529–536.
5. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа, М.: Финансы и статистика, 1988. – 263 с.
6. Inouye T. The super resolution of gamma-ray spectrum // Nuclear instruments and methods. – 1964. – V. 30 – P. 224–228.
7. Madan V.K., Sinha R.K. Digital smoothing of census data employing Fourier transforms // Computational Statistics & Data Analysis. – 1995. – V. 20 – P. 285–294.
8. Garcia-Toraño Eduardo. On the Application of Fourier-transform-based Methods to the Analysis of Alpha-particle Spectra // Appl. Radiat. Isot. – 1992. – Vol. 43. – No. 1/2 – P. 229–245.
9. Madan V.K. Application of Digital Signal Processing to Nuclear Spectroscopy // Proceedings of the DAE Symp. on Nucl.

Phys. 55 (2010), P. 121.

10. Тустановский В.Т. Оценка точности и чувствительности активационного анализа, М.: Атомиздат, 1976. – 192 с.

11. Большаков А.А., Каримов Р.Н. Методы обработки многомерных данных и временных рядов, М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 522 с.

Стаття надійшла до редакції 30.05.2013

О.М. Поп

Institute of Electron Physics, Ukr.Nat.Acad.Sci.

University Str., 21, 88017, Uzhhorod

FOURIER, WAVELET FILTERING AND BOOTSTRAP METHOD USED IN THE PROBLEMS OF PROCESSING THE NUCLEAR GAMMA-SPECTROSCOPY WEAK PEAKS PROCESSING

This paper considers the methods of analysis of gamma spectra obtained (measured) semiconductor detectors: Fourier and Wavelet filtering, and concatenation (union). Two methods of smoothing are shown for the spectra of actinide and metal products. The practical examples of using the direct, reverse and normal bootstraps (the methods used in the problems of applied nuclear gamma-spectrometry of the natural nuclide activity) have been considered.

Keywords: concatenation, apparatus gamma-spectra, direct, inverse and standard bootstrap techniques.

О.М. Поп

Институт электронной физики НАН Украины

ул. Университетская, 21, 88017, г. Ужгород

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУРЬЕ-, ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРАЦИИ И БУТСТРЕП-МЕТОДА ПРИ ОБРАБОТКЕ СЛАБЫХ ПИКОВ В АППАРАТУРНЫХ ГАММА-СПЕКТРАХ

В данной статье описаны методы анализа гамма-спектров, полученных (измеренных) полупроводниковыми детекторами: Фурье- и Вейвлет-фильтрации, а также конкатенация (объединение). Два метода сглаживания приведены для спектров актиноидов и металлических изделий. Также рассматриваются практические примеры использования прямого, обратного и обычного бутстреп-методов в задачах прикладной ядерной гамма-спектрометрии (ПЯГС) естественной активности нуклидов.

Ключевые слова: конкатенация, аппаратурные гамма-спектры, прямой, обратный и обычный бутстреп-методы.