

ПРОБЛЕМИ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

УДК 539.1.08

Г.В. ЛИСИЧЕНКО, Ю.Л. ЗАБУЛОНОВ, В.М. БУРТНЯК

Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України та МНС України, м. Київ

ЗАСТОСУВАННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНОГО АЛГЕБРАЇЧНОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ДЖЕРЕЛА РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.

Запропоновано новий диференційний алгебраїчний метод для порівняння гістограм спектрів радіоактивного випромінювання. Описаний алгоритм застосування цього методу для виявлення нестационарних джерел радіоактивного випромінювання інтенсивності рівня фону. Наведені переваги даного методу.

Вступ

Можливість втрати контролю над радіоактивними речовинами, що зберігаються, в результаті чого може виникнути загроза для життя людей на значній території, змушує адміністративні органи різних рівнів в країнах світу, що мають ядерно-радіаційні матеріали (ЯРМ), вживати комплекс заходів по забезпеченню безпеки населення.

Надійне зберігання ЯРМ забезпечується системою фізичних бар'єрів на шляху їх поширення (виходу в навколишнє середовище), а також впровадженням системи технічних та організаційних заходів щодо захисту цих бар'єрів і забезпечення їх ефективності.

Вихідним моментом для реалізації заходів з контролю за ЯРМ є раннє виявлення небезпечних рівнів радіації і оповіщення про них керівних органів, на підставі чого приводяться в дію надзвичайні плани. У багатьох країнах світу ведеться посилена робота зі створення надійних систем контролю за ЯРМ, виявлення їх витоків та оповіщення про аварії, що трапилися.

Така робота проводиться в різних напрямках, головними з яких є:

- розвиток і вдосконалення математичних методів виявлення підвищення рівня радіоактивного випромінювання при контролі стаціонарних та рухомих об'єктів з ЯРМ;
- розвиток і вдосконалення математичних методів розрахунку поширення радіонуклідів у різних середовищах, моделей для оцінки дозових навантажень, а також їх верифікація на наявних даних експериментів і натурних спостережень;
- об'єднання зазначених методів і моделей у єдину систему;
- створення на цій основі систем виявлення, ідентифікації та прогнозування, що працюють в режимі реального часу і призначені для підтримки прийняття рішень при втраті контролю над ЯРМ.

Таким чином, створена система контролю та спостереження за об'єктами з ЯРМ повинна забезпечувати:

- безперервне спостереження за рівнем радіоактивності в середовищі, яке оточує ЯРМ;
- завчасне (до виникнення позаштатних ситуацій) виявлення невисоких рівнів радіоактивного випромінювання та оцінка можливих подій при його впливі;
- постійне прогнозування обстановки при порушенні контролю за ЯРМ.

Для виконання зазначених завдань вся система повинна бути побудована певним чином. Зокрема, контроль радіоактивності на підвідомчих територіях повинен виконуватись безперервно. Дані вимірювань повинні передаватися, як можна швидше оброблятися і поступати у відповідні служби [1]. Все це разом створює можливість для прогнозу обстановки.

В цілому, оснащення системи має бути таким, щоб інформація, яка видається нею, могла служити основою для розробки необхідних заходів безпеки.

Основним елементом такої системи є комплекс для реєстрації радіоактивних випромінювань. В якості такого реєстратора застосовуються спектрометри, які забезпечують можливість отримання спектрів гамма-випромінювання, що випромінюються радіоізопами. Існуючому на даний час парку приладів виявлення джерел радіаційного випромінювання притаманна висока похибка, основний внесок в яку, крім основної похибки, що становить величину порядку 20%, вносить енергетична залежність чутливості первинних вимірювальних перетворювачів. В даній роботі запропоновано диференційний алгебраїчний метод, що дозволяє підвищити миттєвість та достовірність виявлення джерела радіаційного випромінювання, який працює в масштабі реального часу.

Розробка методу

У результаті проведення спостереження за об'єктом з ЯРМ ми реєструємо n радіоактивних частинок, отриманих у заданому часовому інтервалі довжини t . Результат вимірювань утворює вибірку $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ з генеральної сукупності, причому розподіл кожного x_i описується розподілом Пуассона. Значення вибірки x укладаються між фіксованими значеннями X_0 і X_m . Вірогідність потрапляння вимірюваної величини x в інтервал від X_0 до X_m описується функцією розподілу [2]

$$F(x) = P(X_0 \leq x \leq X_m) \quad (1)$$

Функція $F(x)$. – розривна ступінчаста функція, що дорівнює нулю при $x < X_0$ і одиниці при $x > X_m$.

Компоненти вибірки x є результати незалежних, але однакових вимірювань. Отже $F(x) = f(x_1)f(x_2)\dots f(x_n)$, де $f(x_i)$ – розподіл i -ої компоненти змінної x .

Вибірku x , що містить результати окремих вимірювань, можна розбити на m інтервалів, таких, що x_i знаходиться в j -му інтервалі $X_{j-1} < x_i \leq X_j, j = \overline{1, m}$

Ймовірність P_j того, що окремий результат x_i міститься в j -му інтервалі, дорівнює

$$P_j(x_i) = \int_{X_{j-1}}^{X_j} f(x_i) dx_i \quad (2)$$

причому $\sum_{j=1}^m P_j = 1$

Частоту події «потрапляння радіоактивної частки» в інтервал $x_i \in (X_{j-1}, X_j)$ позначимо як N_j . Згрупований таким чином статистичний ряд часто оформляється графічно у вигляді так званої гістограми – статистичного аналога кривої розподілу. Гістограма зображує розподіл зареєстрованих радіоактивних часток. І якщо кожному розрядному інтервалу поставити у відповідність енергію зареєстрованої частки, то отримаємо спектральний розподіл енергій радіоактивного випромінювання.

У сучасних спектрометрах число таких розрядів становить 4096 одиниць ($m = 4096$) і відхилення між інтервалами дорівнює 1. Використовуючи визначення (2), отримуємо $P_j = 1/4096$. Враховуючи те, що спектрометричний аналіз проводиться в діапазоні енергії γ -квантів 0.05 - 3 MeV $P_j \approx 0.73$ KeV.

Дані вимірювання можна представляти гістограмами з різними способами інтервального розбиття діапазону вимірювання. Основною властивістю гістограм є те, що при великій кількості інтервалів збільшуються випадкові флуктуації чисел N_j і це виправдовує себе лише при достатньо великій вибірці n (у нашому випадку це можливо тільки при досить високій інтенсивності джерела випромінювання або тривалому часу вимірювання). При невеликій кількості інтервалів розбивки ми отримуємо велике значення N_j і тим самим згладжуємо зміни розподілу $F(x)$ у кожному окремому інтервалі, а також зменшуємо флуктуації цього числа (його відхилення від середнього).

При контролі і спостереженні за об'єктами з ЯРМ методом спектрометричного аналізу необхідно розрізняти на фоні фонового спектру сигнал або спектр, який належить до джерела випромінювання.

Проблема виявлення і розпізнавання джерела випромінювання по його енергетичним спектрам є актуальною протягом багатьох років. Системи ідентифікації джерела випромінювань, в своїй більшості, засновані на порівнянні відомої моделі фонового випромінювання (або його розподілу) з аналогічною моделлю, отриманою по вхідному вимірюваному спектру, який містить вже крім фону і випромінювання радіоактивного джерела. На рис. 1 відображений апаратний спектр фону, який вимірювався протягом 1 хвилини. На рис. 2. відображений апаратний спектр фону та джерела випромінювання ^{137}Cs . Час вимірювання становить 1 хвилину. На рис. 3. показаний спектр фону та джерела випромінювання ^{137}Cs . Джерело внесене в поле зору детектора на 5 секунд.

Якщо джерело випромінювання значно перевищує фоновий сигнал (рис. 2), то його виявлення не є складним завданням. В цьому випадку використовуються традиційні методи, наприклад, критерій Неймана-Пірсона. У залежності від радіонуклідного складу ЯРМ можна вирішити також і задачу ідентифікації джерел випромінювань. Для цього отримані спектри оброблюють або за допомогою традиційної методики обробки лінійчатих спектрів по фотопікам, або за допомогою матричного методу, при якому проводиться підгонка вимірюваного реального спектру сумою функцій відгуків спектрометра на спектри випромінювання радіонуклідів, які ймовірно входять до складу зразка.

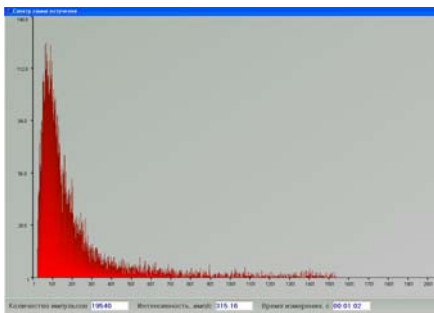


Рис. 1. Спектр фону (час вимірювання 1 хв.).

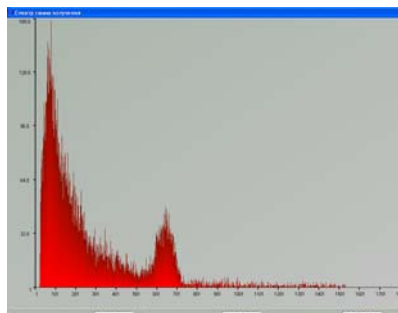


Рис.2. Спектр фону і джерела ^{137}Cs (час вимірювання 1 хв.)

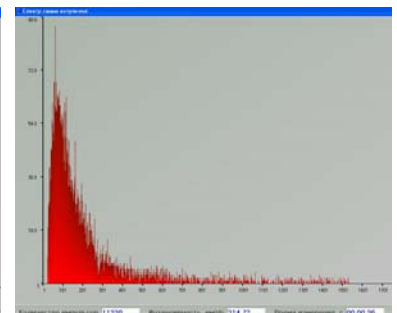


Рис. 3. Спектр фону і джерела ^{137}Cs (джерело внесене на 5 сек.)

Але якщо потрібно виявити джерело випромінювання низької активності (активність на рівні фону)(рис. 3), необхідно застосувати нові підходи та методи. Запропонований диференційний алгебраїчний метод виявлення джерела радіоактивного випромінювання заснований на порівнянні двох гістограм, отриманих при проведенні вимірювань. Усі гістограмні методи, які пропонувались досі, ґрунтуються на тому, що порівнюються теоретична крива розподілу $p(X)$ і гістограма, отримана в умовах спостереження за об'єктом з ЯРМ. У роботі [3] показано, що хороша відповідність між спостережуваними

величинами N_j та їх очікуваними значеннями так само мало ймовірно, як і наявність великих відхилень. Такі результати істотно обмежують область практичного застосування систем виявлення джерела радіоактивного випромінювання.

У табл. 1 представлені радіоактивні γ -випромінюючі ізотопи як природного, так і штучного походження, впорядковані за зростанням енергії випромінювання.

Розбіємо енергетичну шкалу спектрометра на M інтервальних груп, наприклад: на 5 груп - 1-а група 0.005 - 110 Кев; 2-а група 11-400 Кев; 3-тя група 401 - 1000 Кев; 4-а група 1001 - 2000 Кев ; 5-а група 2001 - 3000 Кев. Ширина інтервалу становить $M_j / = 1, M$. Запропоноване інтервальне розбиття енергетичної шкали не є універсальним та оптимальним для всіх задач. Кількість, ширина і положення енергетичних інтервалів для кожної конкретної задачі потрібно визначати окремо з умови максимальної стійкості виявлення радіоактивного джерела до варіацій значень швидкості рахунку в інтервалах.

Таблиця 1. Радіоактивні ізотопи γ -випромінювання та їх енергії.

Радіонуклід	Енергія γ -випромінювання, (KeV)	Період напіврозпаду	Варіант групування
²⁴³ Am	43,5	7370 років	Група 1: 0 – 110 KeV
²⁴¹ Am	59,5	432,6 років	
⁴⁴ Ti	68,9	60 років	
²⁴³ Am	74,7	7370 років	
⁴⁴ Ti	78,3	60 років	
¹³³ Ba	81,0	10,54 років	
¹⁰⁹ Cd	88,0	461,4 днів	
¹⁵³ Gd	97,4	240,4 днів	
¹⁵³ Gd	103,2	240,4 днів	
⁵⁷ Co	122,1	271,8 днів	Група 2: 111 – 400 KeV
⁵⁷ Co	136,5	271,8 днів	
¹³⁹ Ce	165,9	137,641 днів	
¹¹³ Sn	255,1	115,09 днів	
¹³³ Ba	276,4	10,54 років	
¹³³ Ba	302,9	10,54 років	
¹³³ Ba	356,0	10,54 років	
¹³³ Ba	383,85	10,54 років	
¹¹³ Sn	391,7	115,09 днів	
¹³⁴ Cs	563,2	2,0648 років	Група 3: 401 – 1000 KeV
¹³⁴ Cs	569,3	2,0648 років	
²⁰⁷ Bi	569,7	32,9 років	
¹³⁴ Cs	604,7	2,0648 років	
¹³⁷ Cs	661,7	30,018 років	
¹³⁴ Cs	795,8	2,0648 років	
⁵⁴ Mn	834,8	312,11 днів	
⁸⁸ Y	898,0	106,626 днів	
²⁰⁷ Bi	1063,6	32,9 років	Група 4: 1001 – 2000 Кев
⁶⁵ Zn	1115,54	244,06 днів	
⁴⁴ Ti	1157,0	60 років	
⁶⁰ Co	1173,2	5,271 років	
²² Na	1274,54	2,6027 років	
⁶⁰ Co	1332,5	5,271 років	
⁸⁸ Y	1836,1	106,626 днів	

Нехай в момент часу t_i в результаті проведених вимірювань і відповідної розбивки енергетичної шкали отримана гістограма H_i . Якщо ми маємо дві гістограми з різним числом подій, то амплітудні значення цих гістограм, природно, будуть різні, і їх важко буде порівнювати. Тому більш зручно представити гістограму в дещо іншому вигляді. Відкладемо по осі ординат не N_j , а величину

$$\frac{N_j}{(N \cdot M_j)} \cdot N = \sum_{j=1}^M M_j. \quad (3)$$

У цьому випадку, площа кожного стовпчика гістограми має розмірність ймовірності попадання результатів вимірювання в даний інтервал M_j , а сумарна площа під всією гістограмою дорівнює одиниці.

Отриману гістограму представимо у вигляді вектора в M -мірному евклідовому просторі (рис. 4). Компоненти вектора відповідають M інтервальним групам, що утворюють простір. Виявлення джерела випромінювання виражається через відхилення двох векторів. Отже, алгоритм виявлення прийме вигляд:

$$\varphi(H_i, H_{i+1}) = \begin{cases} 1, & D(H_i, H_{i+1}) \geq C(\alpha, H_0) \\ 0, & D(H_i, H_{i+1}) < C(\alpha, H_0) \end{cases} \quad (4)$$

Тут $C(\alpha, H_0)$ - гранична функція, яка залежить від рівня ймовірності помилкової тривоги α , і достатньої статистики визначеної з гістограми фону. $D(H_i, H_{i+1})$ - міра відхилення двох векторів.

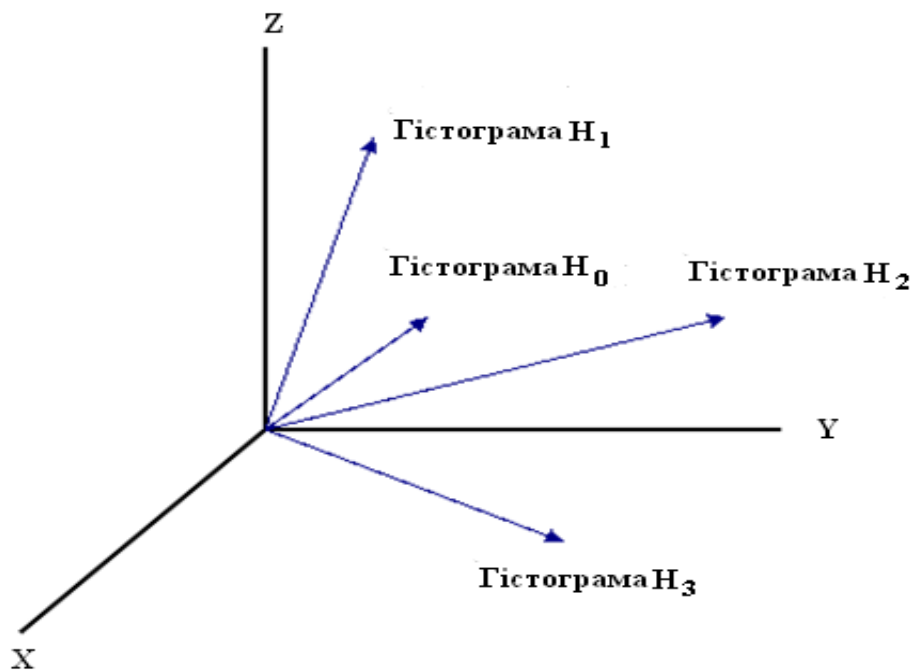


Рис. 4. Розподіл гістограм в 3-х мірному просторі

Відповідно до цього підходу проблема знаходження радіоактивного джерела інтерпретується як детермінована задача, яка полягає в тому, що потрібно знайти відхилення двох точок у просторі та порівняти отримане відхилення з деяким граничним значенням. Для строгого формулювання задачі необхідно ввести міру відхилення деякої певної точки H_i від вимірюного значення H_{i+1} $D = D(H_i, H_{i+1})$, яка і буде служити критерієм, що підлягає порівнянню з пороговим значенням. Природно вимагати, щоб ця міра була не негативною і оберталася в нуль тільки при збігу точок.

Для виявлення слабо інтенсивного джерела випромінювання необхідний достовірний критерій порівняння гістограм. Тому центральним моментом в описаному підході є вибір виду критерію D , який здійснюється на основі евристичних міркувань з урахуванням характеру розв'язуваної задачі. До числа найбільш поширених критеріїв такого типу відносяться квадратичний, модульний, косинусний, кореляційні і деякі інші критерії. Чим ближчі вектори, тим менше їх відхилення і тим більша ймовірність відсутності джерела випромінювання.

Нехай в момент часу t_1 в результаті проведених вимірювань та відповідної розбивки енергетичної шкали спектрометра отримана гістограма H_1 , а в момент часу t_2 – гістограма H_2 . Для порівняння двох гістограм H_1 та H_2 можливе використання наступних метрик (табл. 2) [4].

Таблиця 2. Метрики для порівняння гістограм

Назва метрики	Обчислення
Манхеттенська	$D_1 = \sum_{i=1}^M H_1(y_i) - H_2(y_i) $
Евклідова	$D_2 = \sum_{i=1}^M [H_1(y_i) - H_2(y_i)]^2$
Косинусна	$D_3 = 1 - \frac{ \sum_{i=1}^M H_1(y_i) \cdot H_2(y_i) }{\sqrt{\sum_{i=1}^M H_1(y_i)} \sqrt{\sum_{i=1}^M H_2(y_i)}}$
Кореляційна	$D_4 = \frac{\text{cov}(H_1, H_2)}{[\sigma(H_1) \cdot \sigma(H_2)]}$

де: $\text{cov}(H_1, H_2)$ - коваріація гістограм H_1 і H_2 ;

$\sigma(H)$ - середньоквадратичне відхилення елементів гістограми

$\mu(H)$ - математичне сподівання елементів гістограми

$$\begin{aligned} \text{cov}(H_1, H_2) &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [H_1(i) - \mu(H_1)] \cdot [H_2(i) - \mu(H_2)] \\ \sigma(H) &= \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [H(i) - \mu(H)]^2}, \\ \mu(H) &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M H(i) \end{aligned} \quad (5)$$

Методику обробки експериментальних даних, на якій базується виявлення джерела випромінювання, можна представити наступними етапами. Перший етап - це отримання апаратного спектру гамма-випромінювання, що характеризує фон та саме джерело випромінювання. Весь діапазон цього спектру розбиваємо на M інтервалів для побудови гістограми. Отримана таким чином гістограма підлягає нормуванню у відповідності з (3), що є вихідним матеріалом для процесу експертного порівняння. Далі кожна гістограма перетворюється у вектор в M мірному евклідовому просторі. Компоненти вектора відповідають M інтервалам, які створюють цей простір. На основі сусідніх векторів цієї послідовності вимірювань обчислюється міра подібності, і одержуємо стандартну метрику «відстані». Отримана таким чином «відстань» неузгодженості векторів є джерелом інформації про наявність джерела радіоактивного випромінювання.

На рис. 5. показана косинусна схожість α двох векторів H_1 і H_2 , отриманих в моменти часу відповідно t_1 і t_2 .

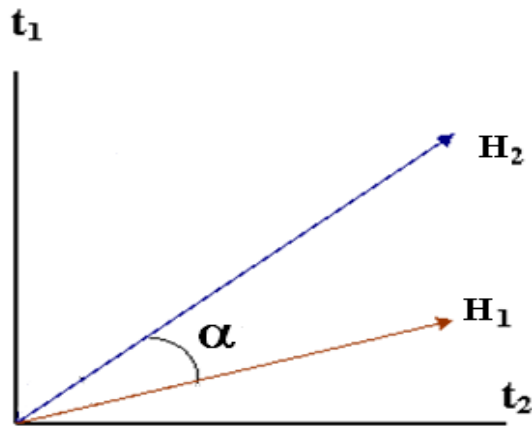


Рис. 5. Косинусна міра неузгодженості двох векторів.

На рис. 6 - 9. зображені тренди неузгодженості векторів (гістограм) обчислень для одного експерименту, в процесі якого показані результати трьохкратного внесення радіоактивного джерела в поле зору детектора на час 3, 5 і 7 секунд. Як видно із рисунків, усі запропоновані метрики чітко показують моменти внесення радіоактивного джерела в поле зору детектора.

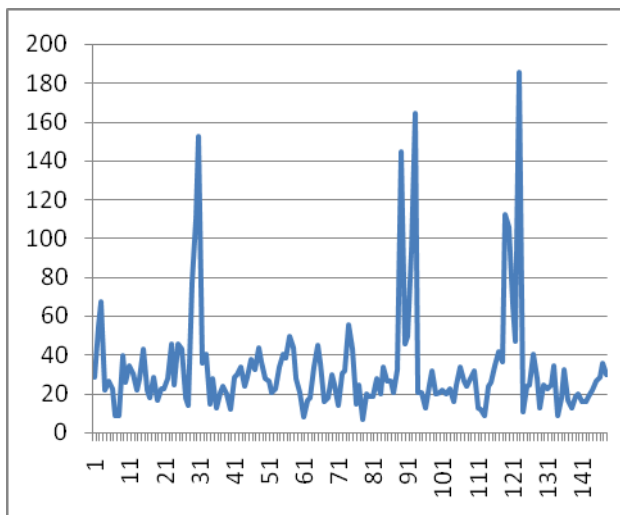


Рис. 6. Тренд неузгодженості векторів при використанні манхеттенської метрики

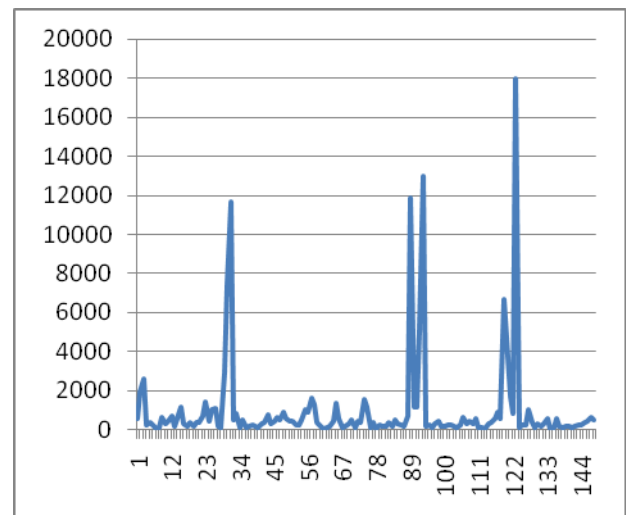


Рис. 7. Тренд неузгодженості векторів при використанні евклідової метрики

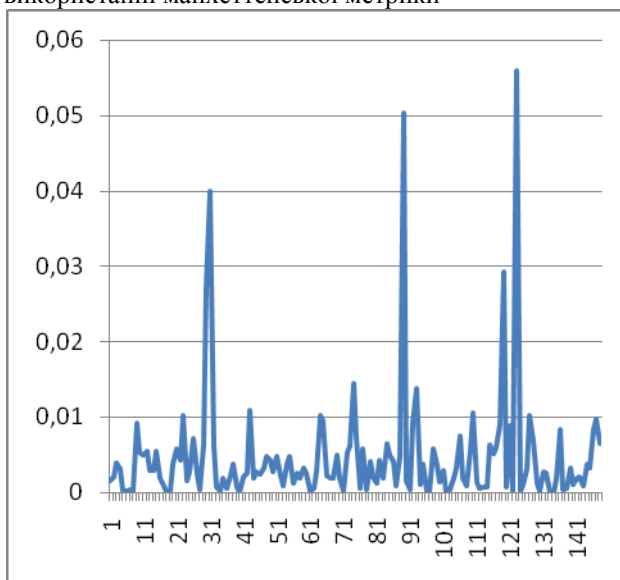


Рис. 8. Тренд неузгодженості векторів при використанні косинусної метрики

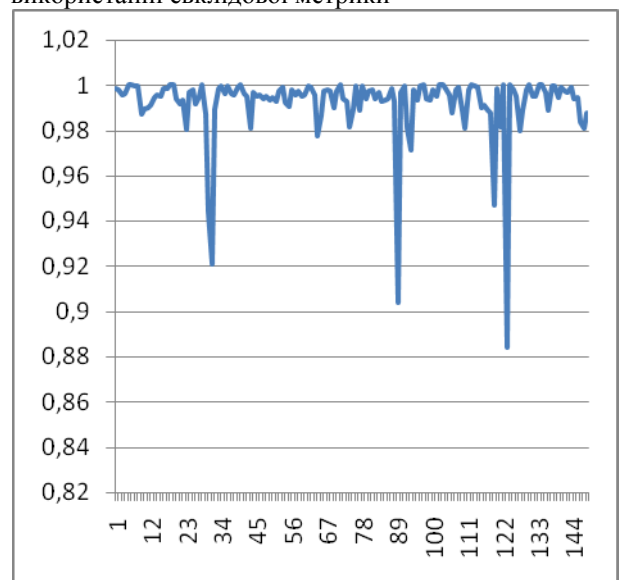


Рис. 9. Тренд неузгодженості векторів при використанні кореляційної метрики

Висновки

Пропонованому диференційному алгебраїчному методу виявлення слабо інтенсивного радіоактивного джерела притаманні такі переваги:

- Зменшення кількості розрядних інтервалів гістограми дозволяє пропорційно скоротити тривалість обчислень;
- Нормування гістограм підвищує ефективність пошуку радіоактивного джерела;
- Дозволяє оцінити ступінь неузгодженості гістограм;
- Стандартні метрики зручні при оцінці ступеню неузгодженості;
- Простота і витонченість методу перед іншими методами.

Незважаючи на значні переваги, в запропонованому методі відсутнє достатнє теоретичне обґрунтування для побудови розрядних інтервалів гістограми. Сутність цих інтервалів полягає в класифікації – віднесення отриманих даних вимірювань до деяких сукупностей, що володіють певними властивостями. Для виявлення радіоактивного джерела використовується контрольована класифікація – використовують заздалегідь визначені людиною ознаки і критерії.

1. Забулонов Ю.Л., Буртняк В.М. Система контроля и слежения за хранением ядерных материалов // Зб. наук. пр. Інституту проблем моделювання в енергетиці НАНУ. „Моделювання та інформаційні технології” – К., 2008. – Вип. 47. – С.107-118.

2. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 488 с.

3. Яноши Л. Теория и практика обработки результатов измерений. / Перевод с английского Н.П. Клепикова. 2-ое изд. – М.: Мир, 1968. – 464 с. (L. Janossy. Theory and Practice of the Evaluation of Measurements. Oxford, Oxford University Press, 1965.)

4. Сирая Т.Н., Грановский В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

Г.В. Лисиченко, Ю.Л. Забулонов, В.М. Буртняк

ПРИМЕНЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО АЛГЕБРАИЧЕСКОГО МЕТОДА ВЫЯВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ИСТОЧНИКА РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Предложен новый дифференциальный алгебраический метод для сравнения гистограмм спектров радиоактивного излучения. Описан алгоритм применения этого метода для выявления нестационарных источников радиоактивного излучения интенсивности уровня фона. Показаны достоинства данного метода.

G.V. Lysychenko, Y.L. Zabulonov, V.M. Burtnyak

APPLICATION OF DIFFERENTIAL ALGEBRAIC METHOD OF DETERMINATION OF NONSTATIONARY RADIOACTIVE SOURCE

New differential algebraic method for comparison of radiation spectra histograms is proposed. The algorithm of application of this method for detecting non-stationary radiation sources of the background level intensity is described. The advantages of this method are specified.