

УДК 539.1.08

Буртняк В.М.¹, Забулонов Ю.Л.¹, Золкін І.О.¹, Дивизинюк М.М.²,
Гончаренко Ю.Ю.²

¹ Інститут геохімії навколишнього середовища НАН та МНС України

² Севастопольський національний університет ядерної енергії та промисловості

ВИЯВЛЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ДЖЕРЕЛ РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО МЕТОДУ

Вступ.

В даний час в усьому світі велика увага приділяється питанням протидії незаконного обігу та розповсюдженню ядерно-радіаційних матеріалів (ЯРМ). Важливим інструментом забезпечення функціонування державної системи обліку та контролю ядерних матеріалів та виконання вимог міжнародних угод з нерозповсюдження ядерної зброї є спеціалізовані технічні засоби, а саме системи автоматизованого контролю та спостереження (САКС), які використовуються при виробництві та зберіганні ЯРМ матеріалів [1].

Головним завданням, яке покладається на САКС, є виявлення аномального підвищення рівня радіоактивного випромінювання в місцях спостереження і контролю за ЯРМ, а також проведення ідентифікації цього джерела. Успішне виконання цього завдання ускладнюється наступними факторами:

- для отримання при вимірюванні достовірних результатів необхідно мати достатню статистику, що приводить до значної кількості вимірювань;
- при вимірах необхідно враховувати фон, який створюється природним радіоактивним випромінюванням і самим ЯРМ. Причому цей фон схильний до значних флуктуацій і може бути на рівні випромінювання, яке необхідно виявити;
- джерело випромінювання може мати прихований характер та короткий часовий термін впливу, що вимагає від системи регулярної оперативної інформації із застосуванням ретроспективного аналізу;
- для успішної ідентифікації необхідний детальний аналіз енергетичного розподілу радіоактивного випромінювання, а сама процедура ідентифікації повинна супроводжуватися кількісною оцінкою вмісту радіонуклідів. Неможливість отримання функції відгуку, яка залежить не тільки від зразка ЯРМ, але і від його оточення;
- важко передбачувані варіанти ймовірних форм та видів радіаційного терору вимагають комплексного контролю та регулярного зіставлення результатів різних вимірів.

Таким чином, створення радіаційної підсистеми комплексної системи безпеки, яка мінімізує вплив вищеперелічених факторів та забезпечує високу ймовірність виявлення радіоактивних речовин і контроль з різних видів випромінювань на ймовірних каналах постачання засобів терору, набуло особливої актуальності.

Вихідними даними для виконання цих завдань є спектрометричні дані радіоактивного розпаду контрольованих ЯРМ та оточуючого їх фону. У результаті проведених вимірювань, на виході сучасного спектрометра отримуємо не істинний гамма-спектр, а так званий дискретний апаратурний спектр радіоактивного випромінювання - гістограму розподілу часток ядерного випромінювання по каналам аналізатора в відповідності з їх амплітудами або, іншими словами число гамма-квантів в залежності від їх енергії (номера каналу). За допомогою спектрометра знаходять як число часток, так і енергію кожної частки.

Розробка методу.

Нехай, в результаті проведення спостереження за об'єктом з ЯРМ ми реєструємо *n* радіоактивних часток, які отримані у заданому часовому інтервалі тривалістю *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 деякими фіксованими значеннями X_0 і X_m .

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

Тоді, сумарне число всіх частинок N_0 , які попали в інтервал $[X_0, X_m]$ дорівнює:

$$\sum_{i=1}^m N(x_i) = N_0, \quad (1)$$

де $N(x_i)$ кількість частинок, з енергією x_i

Якщо розділити праву і ліву частини рівності (1) на повне число частинок N_0 , одержимо

$$\sum_{i=1}^m f(x_i) = 1, \quad (2)$$

де функція $f(x_i) = \frac{N(x_i)}{N_0}$ показує, яка доля зареєстрованих частинок енергії x_i потрапляє в інтервал $[X_{i-1}, X_i], i = \overline{1, m}$ або ймовірність того, що зареєстрована частинка має енергію x_i .

Рівняння (1) і (2) є формами запису дискретного спектру випромінювання, які розрізняються тільки нормуванням. У першому записі спектр випромінювання нормований на повне число частинок N_0 , а в другій формі запису - на одиницю. На практиці частіше використовують спектр випромінювання в формі (2), так як він не залежить від повного числа частинок N_0 , яке може змінюватись.

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

$$P_j(x_i) = \int_{x_{j-1}}^{x_j} f(x_i) dx_i \quad (3)$$

Причому $\sum_{j=1}^m P_j = 1$

Дані вимірювання радіоактивного випромінювання, які одержані спектрометром 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 наявності достатньо великої вибірки n (у нашому випадку це можливо тільки при досить високій інтенсивності джерела випромінювання або тривалому часі проведення вимірювання). При зменшенні кількості інтервалів розбивки ми отримуємо збільшення кількісного 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 енергетичному спектру є актуальною протягом багатьох років. Алгоритми ідентифікації джерела випромінювання, в своїй більшості, засновані на порівнянні відомої моделі фонового випромінювання (або його розподілу) з аналогічною моделлю, яка отримана по вхідному вимірюваному спектру, в якому міститься 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.

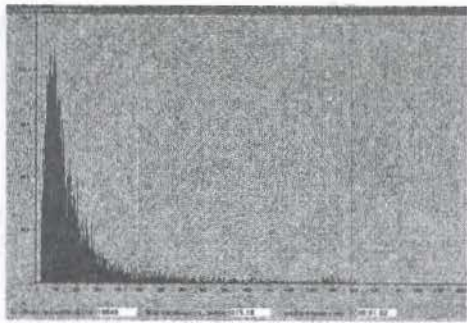


Рис. 1. Спектр фону (час вимірювання 1хв.).

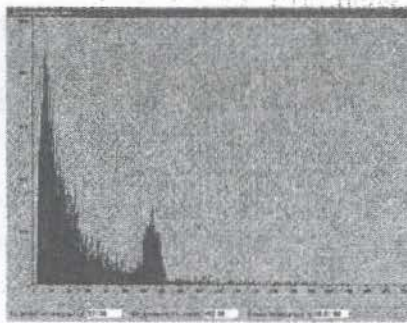


Рис.2. Спектр фону і джерела ^{137}Cs (час вимірювання 1 хв.)

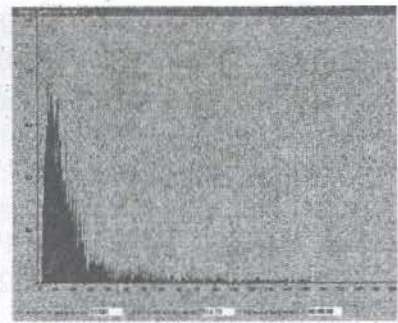


Рис. 3. Спектр фону і джерела ^{137}Cs (джерело внесене на 5 сек.)

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 фото пікам, або за допомогою матричного методу, при якому проводиться підгонка вимірюваного реального спектру сумою функцій відгуків спектрометра на спектри випромінювання радіонуклідів, які імовірно входять до складу зразка.

Але якщо потрібно виявити джерело випромінювання низької активності (активність на рівні фону)(рис. 3), то стандартними методами це зробити неможливо. Необхідні нові підходи та методи. В роботі пропонується новий 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 [2] показано, що хороша відповідність між спостережуваними величинами N_j та їх очікуваними значеннями так само малоімовірна, як і наявність великих відхилень. Такі результати істотно обмежують область практичного застосування систем виявлення джерела радіоактивного випромінювання.

Для порівняння гістограм пропонується застосовувати інформаційний підхід, згідно з яким з відомих виразів К. Шеннона [3] обчислюємо значення критерію порівняння:

$$A = 1 - H/H_0; H = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot \log P_i) = \sum_{i=1}^n (N_i/N_0 \cdot \log N_i/N_0); H_0 = \log n; (4)$$

де: N_0 - максимальна і H - поточна ентропії масивів даних; P_i - ймовірність прийняття системою вимірювання i -того стану; n - число класів гістограми; N_i - число влучень радіоактивних часток в даний клас; N_0 - число спостережень; $0 \leq A \leq 1$.

Значення H буде дорівнювати нулю, якщо будь-яке із P_i дорівнює 1, а всі інші – нулю. Тобто невизначеність в інформації відсутня. В цьому випадку всі значення N_i потрапляють в один клас і $H = 1 \cdot \log(1) = 0$. Оскільки загальна кількість класів гістограми величина незмінна і рівна M , то $H_0 = \text{const}$. Тоді: $A = 1 - 0/\log M = 1$. Коли всі N_0 значення потрапляють в один клас, гістограма в цьому випадку буде виглядати вкрай стислою. Тобто система вимірювання буде повністю детермінованою і володіє сильною жорсткістю.

Інший граничний випадок, коли гістограма рівномірно розподілена по всіх класах. У цьому випадку ентропія H приймає найбільше значення (P_i рівні між собою) і невизначеність в інформації буде максимальною:

$$N_i = m; M = N_0/m; H = (M \cdot 1 / M) \cdot \log (1 / M) = \log M; A = 1 - \log M / \log M = 0.$$

Система вимірювання стає повністю ймовірнісною, з слабою жорсткістю і поведінка її слабо передбачувана.

Для порівняння гістограм розіб'ємо енергетичну шкалу спектрометра на M інтервальних груп, наприклад: на 5 груп - 1-а група 0:005 - 110 Кев; 2-я група 11-400 Кев; 3-тя група 401 - 1000 Кев; 4-я група 1001 - 2000 Кев ; 5-а група 2001 - 3000 Кев. Ширина інтервалу становить M_j ; $j = \overline{1, M}$. 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.

Нехай в момент часу t_i в результаті проведених вимірювань і відповідної розбивки енергетичної шкали отримана гістограма N_j . 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

$$N_j / (N \cdot M_j), N = \sum_{j=1}^M M_j. \quad (5)$$

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.

При дослідженні інформаційного методу було проведено ряд вимірювальних експериментів. Вимірювання проводилось спектрометром з сцинтиляційним детектором типу БДЕГ-63. Одержані в результаті вимірювань в моменти часу t_i і t_{i+1} гістограми порівнювались за критерієм (4). Тренди значень критерію приведені на рис. 4 - 7. Узагальнені результати вимірювань приведені в табл. 1. При експерименті № 1 проводилось обчислення критерію при вимірюванні спектру фону (рис. 4). При експерименті № 2 проводилось обчислення критерію при короткочасному (менше 5 с.) внесенні в поле зору детектора тестового джерела гамма випромінювання. Внесення джерела випромінювання проводилось на 103 і 163 с. (рис. 5). При експерименті № 3 проводилось обчислення критерію при короткочасному та більш тривалому (більше 10 с.) внесенні тестового джерела гамма випромінювання (рис. 6). Дані експерименту № 5, де проводилось обчислення критерію при постійній наявності в полі зору детектора джерела гамма випромінювання приведені на рис. 7.

При обчисленні критерію (4) порівнювались гістограми енергій радіоактивного випромінювання з однаковими площами (значення отримані за час вимірювання 1 с.) та при незмінній кількості класів гістограми, що дорівнює 5. Розраховувалась величина A_i для кожного моменту часу вимірювання t_i . Середні значення критерію за час вимірювання приведені в табл. 1.

На підставі даних, які одержані в процесі проведених експериментів, ми прийшли до висновку, що зміщення модальних інтервалів, зміна їх амплітуди та збільшення розмаху є ознакою внесення джерела радіоактивного випромінювання в полі зору детектора, а час, протягом якого спостерігається збільшення середнього значення A_i може служити показником тривалості знаходження джерела в полі зору детектора.

Слід зазначити, зміщення модального інтервалу гістограми розподілу енергій зареєстрованих імпульсів є не середньостатистичним, а індивідуальним показником активності радіоактивного джерела (рис. 8-9).

Середні значення критерію за час проведення експерименту

	Середнє (за весь інтервал)	Середнє (інтервал фонового випромінювання)	Середнє (інтервал внесення джерела)
Експеримент 1	0.739 ± 0.015	-	-
Експеримент 2	0.742 ± 0.028	0.738 ± 0.016	0.812 ± 0.046
Експеримент 3	0.778 ± 0.073	0.738 ± 0.016	0.918 ± 0.006
Експеримент 4	0.918 ± 0.006	-	-



Рис. 4. Тренд параметра А при вимірюванні фонового випромінювання

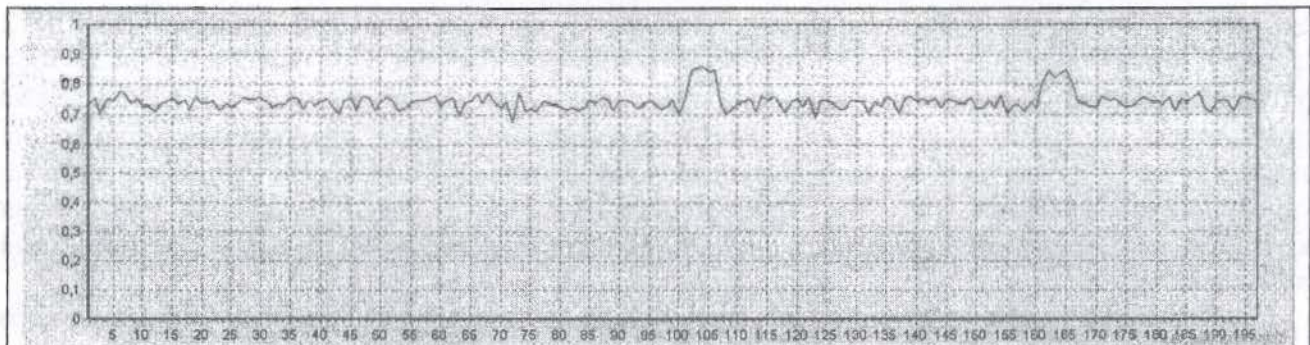


Рис. 5. Тренд параметра А при 2-х разовому внесенні в поле зору детектора джерела вимірювання на час протягом 5 с.

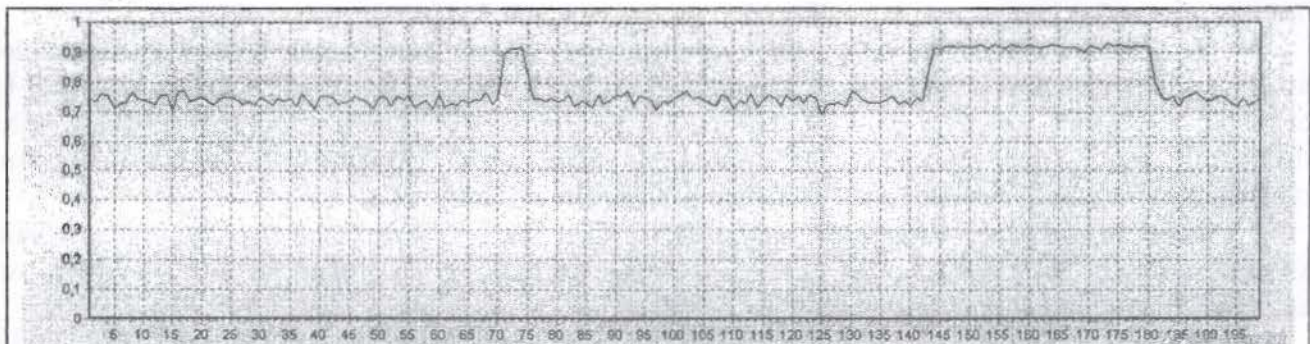


Рис. 6. Тренд параметра А при внесенні в поле зору детектора джерела вимірювання на час 20 с.

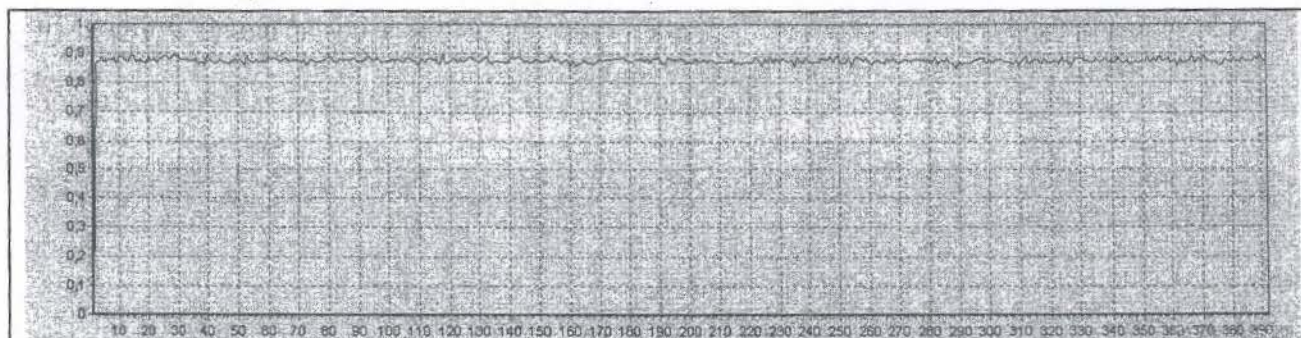


Рис. 7. Тренд параметра А при внесенні в поле зору детектора джерела вимірювання на весь час вимірювання

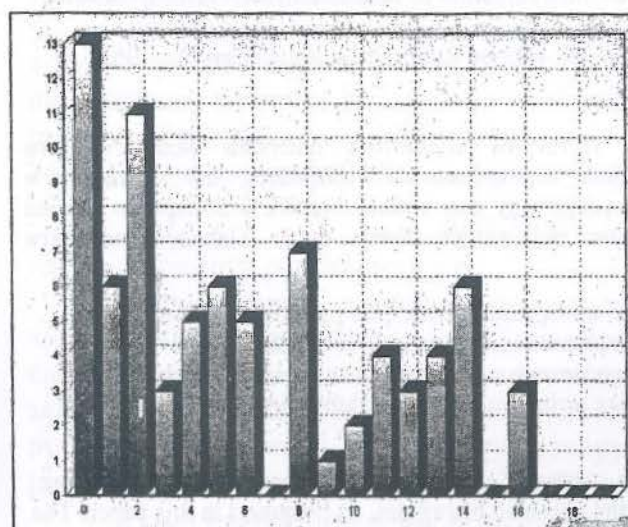


Рис.8. Модальний інтервал та амплітуда моди для гістограми фону ($m = 0$; $A_m = 13$)

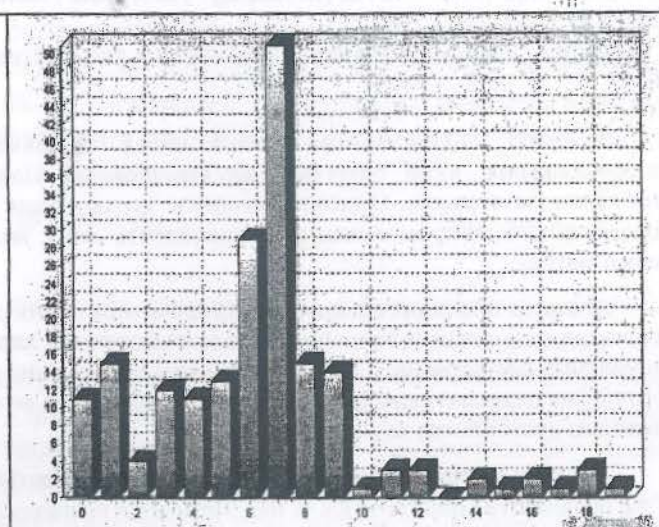


Рис.9. Модальний інтервал та амплітуда моди для гістограми при наявності джерела випромінювання ($m = 7$; $A_m = 59$)

В результаті проведення експериментів було отримано наступне: при внесенні радіоактивного джерела ^{137}Cs у поле зору детектора величина А, незважаючи на низьку активність, в середньому підвищилася з $0,738 \pm 0,016$ до $0,918 \pm 0,006$. Цей факт вказує на те, що реагування системи на появу радіоактивного джерела стало більш детермінованим.

Як зазначалося вище, при порівнянні гістограм величина критерію А є чутливим кількісним показником ступеню відмінності гістограм щодо її попереднього значення. Отримані експериментальні дані показують (табл. 1), що при збільшенні часу знаходження джерела радіоактивного випромінювання спостерігалось підвищення достовірності виявлення джерела радіації, що призводить до зменшення часу реагування системи виявлення у відповідь на збурення радіаційного фону.

Висновки

Пропонованому інформаційному методу виявлення слабо інтенсивного радіоактивного джерела притаманні наступні переваги:

- Зменшення кількості розрядних інтервалів гістограми дозволяє пропорційно скоротити тривалість обчислень;
- Нормування гістограм підвищує ефективність пошуку радіоактивного джерела;
- Застосування теорії К. Шеннона дозволило одержати числовий показник кількості інформації для подій з різними ймовірностями, які містяться в гістограмах-розподілах енергій радіоактивних часток;

- Незначна кількість математичних операцій при реалізації методу дозволяє оцінювати ступінь неузгодженості гістограм в режимі реального часу;
- Система виявлення слабо інтенсивного джерела радіоактивного випромінювання, побудована на базі інформаційного методу, є детермінованою, причому детермінованість збільшується при збільшенні часу впливу джерела радіаційного випромінювання.

Література

1. Забулонов Ю.Л., Буртяк В.М.. Система контроля и слежения за хранением ядерных материалов. // 36. наук. пр. Інституту проблем моделювання в енергетиці НАНУ. „Моделювання та інформаційні технології”– К., 2008. - Вип. 47. – С.107-118.
2. Л. Яноши. 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.)
3. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. — 830 с.

В статті запропоновано новий метод порівняння гістограм апаратних спектрів радіоактивного випромінювання, який базується на вимірюванні кількісних характеристик інформації, що міститься в одержаних гістограмах. Описано алгоритм застосування цього методу для виявлення нестационарних джерел радіоактивного випромінювання інтенсивність яких незначно перевищує рівень фону. Наведені переваги даного методу.

В статье предложен новый метод сравнения гистограмм аппаратных спектров радиоактивного излучения, основанный на измерении количественных характеристик информации, содержащейся в полученных гистограммах. Описан алгоритм применения этого метода для выявления нестационарных источников радиоактивного излучения, интенсивность которых незначительно превышает уровень фона. Показаны достоинства данного метода.

A new method for comparing histograms of the hardware spectra of radioactive radiation, based on measuring of the quantitative characteristics of the information contained in the obtained histogram, is proposed in this paper. The algorithm of applying this method to detect nonstationary sources of radiation with background level intensity is described. The advantages of this method are shown.

Рецензент : д.т.н., проф. Азаров О.Д.
Надійшла: 22.02.2011

УДК 004.942 + 623.454.862

Дивизинюк М.М.¹, Гончаренко Ю.Ю.¹,
Ревунова Е.Г.², Забулонов Ю.Л.², Одукалец Л.А.²

¹ Севастопольский национальный университет ядерной энергии та промисловості
² Інститут геохімії навколишнього середовища НАН та МНС України

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМУМА ОШИБКИ ПРИ РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МЕТОДОМ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЕКЦИЙ

Введение

Во многих практических приложениях требуется решать дискретную обратную задачу вида:

$$\Phi x = y, \quad (1)$$

где матрица $\Phi \in \mathbb{R}^{N \times N}$ и вектор $y \in \mathbb{R}^N$, искаженный аддитивным шумом $\varepsilon \in \mathbb{R}^N$ $y = y_0 + \varepsilon$, известны и получены в результате оцифровки интегрального уравнения первого рода [1, 2, 3]. Требуется оценить вектор сигнала $x \in \mathbb{R}^N$.

В случае, когда y содержит шум, ряд сингулярных чисел σ_i матрицы Φ плавно спадает к нулю, Φ имеет высокое число обусловленности $\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$, задачу оценки x называют