

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ И УСЛОВИЙ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ПОПАРНОГО КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В. Т. МИНЛИГАРЕЕВ, А. В. ЯШИН, Д. П. БАЧУРИН

32 Государственный научно-исследовательский испытательный институт
МО РФ, Москва, Россия, e-mail: 32gnii@mail.ru

Исследован метод попарного комплексирования радиометрических средств обнаружения радиоактивных веществ. Определены границы применимости метода для гамма-нейтронных полей.

Ключевые слова: *ионизирующие излучения, обнаружение источников, попарное комплексирование, границы метода.*

The method of pairwise aggregation of radiometric detection means of radioactive substances is studied. The applicability limits of this method for the gamma-neutron fields are determined.

Key words: *ionizing radiation, detection of sources, pairwise aggregation, boundaries of method.*

В настоящее время актуальными являются измерительные задачи по обнаружению, локализации и идентификации искусственных источников ионизирующих излучений (ИИИ). Как показывает практика, наиболее распространены гамма-нейтронные источники искусственного происхождения. Данные виды ИИИ характеризуются смешанным, в том числе и гамма-нейтронным излучением. Поля таких источников наиболее информативны по сравнению с альфа- и бета-источниками, так как позволяют обнаруживать их на расстоянии единиц и десятков метров даже в случае применения маскирующих мероприятий.

При обнаружении источников, содержащих в себе компоненты нескольких видов излучений (в данном случае нейтронное и сопутствующее

щее гамма-излучение), возникает необходимость измерять параметры полей разной физической природы [1, 2]. Один из распространенных методов измерений полей ИИИ для многих поисковых ситуаций – радиометрический. В его основе лежит интегральный счет импульсов нейтронов N_x или гамма-квантов N_y за фиксированное время наблюдения [3, 4]. Однако данный метод позволяет одновременно выявлять параметры источников только по одному виду излучения – гамма или нейтронному. Совместная обработка результатов измерений данных видов измерений в гамма-нейтронных радиометрах не предусмотрена. Для повышения надежности и достоверности обнаружения комбинированных ИИИ целесообразно проводить обнаружение по нескольким идентифицирующим признакам. Совместная обработка двух классифицирующих признаков, характеризующих потоки гамма-квантов и нейтронов, даст возможность значительно повысить достоверность измерений.

Теоретическое обоснование данной идеи рассмотрено в [1]. Для повышения достоверности обнаружения гамма-нейтронных источников предложено измерять число импульсов по двум каналам, обладающим разными спектральными диапазонами, с последующей совместной обработкой информации. При этом делается ряд допущений, важных для практического применения. Однако вопросы проверки справедливости сделанных допущений в [1] не рассматривались. С целью решения указанной задачи методом, описанным в [5], были экспериментально определены границы и условия применимости метода попарного комплексирования радиометрических средств обнаружения ИИИ. При этом последовательно решались задачи:

определения возможности применения модели нормального закона распределения функции плотности вероятности системы двух случайных величин – количества импульсов нейтронного и гамма-каналов (N_x, N_y) – для аппроксимации распределения Пуассона нормальным законом распределения;

исследования сигналов класса «фон» на предмет благоприятности и стабильности для достижения требуемой точности и достоверности измерений при выполнении задачи обнаружения ИИИ.

Измерения значений характеристик гамма-нейтронных полей классов «фон» и «сигнал» проводили на вторичном эталоне плотности потока нейтронов на расстояниях 1,5 – 5 м и в помещениях, где располагался эталон, на расстояниях 10 – 13 м до ИИИ. Естественный

гамма-нейтронный фон измеряли в помещениях и на открытом пространстве. Объектом обнаружения служил ИИИ ^{252}Cf типа ИНК-4, средством измерений – гамма-нейтронный радиометр СРПС22 (его метрологические характеристики приведены в табл. 1). Условия эксперимента обеспечивали независимость результатов наблюдений.

Т а б л и ц а 1

Метрологические характеристики гамма-нейтронного радиометра СРПС22

Характеристика	Значение
Диапазон измерений гамма-излучения	10 кэВ – 1,3 МэВ
Диапазон измерений нейтронного излучения	0,025 эВ – 14 МэВ
Чувствительность к нейтронам изотопа ^{252}Cf	10^{-3} имп·м ² /нейтр.
Чувствительность к гамма-квантам изотопа ^{137}Cs	10^3 имп·с на 1 мкЗв/ч

В большинстве практически важных случаев приемлемой моделью для описания случайного числа появления нейтронов и гамма-квантов в фиксированном промежутке времени считают распределение Пуассона [1, 3]:

$$P(x = b) = \lambda^b e^{-\lambda} / b!, \quad (1)$$

где $\lambda > 0$ – параметр распределения Пуассона; $b = 0, 1, 2 \dots$

При больших λ имеет место приближение, например, для x [3]:

$$P(x \leq b) = \Phi\left(\frac{b+0,5-\lambda}{\sqrt{\lambda}}\right), \quad (2)$$

где $\Phi(x)$ – нормальная (0, 1) функция распределения.

Именно на допущении (2) основан метод попарного комплексирования для обнаружения ИИИ, изложенный в [1]. В этом случае предполагают, что функция плотности вероятности системы двух случайных величин нейтронов x и гамма-квантов y описывается двухмерным нормальным законом распределения при определении значений характеристик типа:

«сигнал»

$$Z(x_1, y_1) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r_{11}^2}} \left\{ \frac{-1}{2\sqrt{1-r_{11}^2}} \left[\frac{(x-m_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2r_{11}(x-m_x)(y-m_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-m_y)^2}{\sigma_y^2} \right] \right\}, \quad (3)$$

«фон»

$$Z(x_2, y_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x_2}\sigma_{y_2}\sqrt{1-r_{22}^2}} \left\{ \frac{-1}{2\sqrt{1-r_{22}^2}} \left[\frac{(x-m_{x_2})^2}{\sigma_{x_1}^2} - \frac{2r_{22}(x-m_{x_2})(y-m_{y_2})}{\sigma_{x_2}\sigma_{y_2}} + \frac{(y-m_{y_2})^2}{\sigma_{y_2}^2} \right] \right\}, \quad (4)$$

где m_{x_1} , m_{x_2} , m_{y_1} , m_{y_2} – математические ожидания; σ_{x_1} , σ_{x_2} , σ_{y_1} , σ_{y_2} – средние квадратические отклонения; r_{11} , r_{22} – коэффициенты корреляции указанных систем случайных величин «сигнала» и «фона», соответственно.

При условии независимости результатов наблюдений выражения (3), (4) приобретают вид

$$Z(x_1, y_1) = \frac{1}{\sigma_{x_1}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m_{x_1}}{\sigma_{x_1}}\right)^2\right) \frac{1}{\sigma_{y_1}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y-m_{y_1}}{\sigma_{y_1}}\right)^2\right) = f_1(x_1)f_2(y_1); \quad (5)$$

$$Z(x_2, y_2) = \frac{1}{\sigma_{x_2}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m_{x_2}}{\sigma_{x_2}}\right)^2\right) \frac{1}{\sigma_{y_2}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y-m_{y_2}}{\sigma_{y_2}}\right)^2\right) = f_3(x_2)f_4(y_2), \quad (6)$$

где $f_1(x_1)$, $f_2(y_1)$, $f_3(x_2)$, $f_4(y_2)$ – функции плотностей вероятностей (ФПВ) значений интегрального счета импульсов нейтронов и гамма-квантов «сигнала» и «фона», соответственно.

С целью проверки одного из необходимых условий применимости метода попарного комплексирования для обнаружения ИИИ – возможности использования (2) при аппроксимации распределения (1) – был поставлен эксперимент по определению значений характеристик гамма-нейтронных полей классов «фон» и «сигнал» для последующей проверки принадлежности функций $f_1(x_1)$, $f_2(y_1)$, $f_3(x_2)$, $f_4(y_2)$ нормальному семейству распределений.

Были получены выборки результатов измерений параметров естественного фона нейтронного и гамма-излучений (N_{x_2} , N_{y_2}) и сигнала (N_{x_1} , N_{y_1}). Далее проверяя гипотезу о возможности использования моделей (5), (6), что, в конечном итоге, означало проверку принадлежности выборок N_{x_1} , N_{y_1} , N_{x_2} , N_{y_2} нормальному семейству распределений.

Для решения поставленной задачи определяли эмпирические модели законов распределения полученных выборок (рис. 1) в виде ФПВ, которым далее ставили в соответствие теоретические модели с помощью

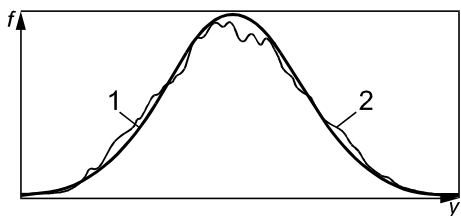


Рис. 1. Теоретическая (1) нормально распределенная и эмпирическая (2) функции плотностей вероятностей регистрации импульсов фонового гамма-излучения

модифицированного метода топографической идентификации. В отличие от изложенного в [6] здесь используется метод построения эмпирической ФПВ на основе ядерных функций [7] для повышения точности оценки энтропийного коэффициента и возможности построения области неопределенности идентифицирующих модель распределения координат (контрэксцесса и энтропийного коэффициента)

для произвольной доверительной вероятности на основе бит-струп-метода.

Полагали, что выборка принадлежит нормальному семейству распределений с доверительной вероятностью 0,98 в случае выполнения системы неравенств, задающих область неопределенности идентифицирующих параметров:

$$\left. \begin{aligned} k_n &\leq 2,066 \leq k_b; \\ \alpha_n &\leq 0,577 \leq \alpha_b, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $k_n, k_b, \alpha_n, \alpha_b$ – рассчитываемые соответственно нижние и верхние оценки энтропийного коэффициента и контрэксцесса для доверительной вероятности 0,99; 2,066 и 0,577 – значения энтропийного коэффициента и контрэксцесса для нормального семейства распределений [6].

Оценки областей неопределенности идентифицирующих параметров при доверительной вероятности 0,98 для естественного фона и сигнала приведены в табл. 2. Расчеты проводили с помощью программного комплекса оценки статистических характеристик, разработанного в среде *Visual Basic 6.0*, размерность выборки составляла 200.

Из экспериментальных результатов следует, что корректное использование метода попарного комплексирования для обнаружения источников нейтронного и сопутствующего гамма-излучений в каждом конкретном случае требует обязательной проверки выполнимости допущения об аппроксимации закона Пуассона нормальным законом распределения [5]. Дальнейшие исследования показали, что данная аппроксимация возможна при соблюдении следующих параметров:

**Оценки областей неопределенности идентифицирующих параметров
для гамма-нейтронных полей классов «фон» и «сигнал»**

Время экспозиции, с	Классы сигналов гамма-нейтронных полей	Нижняя и верхняя границы		Принадлежность нормальному закону распределения
		контрэксцесса	энтропийного коэффициента	
50	Нейтронный фон	0,641 – 0,671	1,912 – 1,989	–
100	Нейтронный фон	0,576 – 0,629	1,907 – 2,099	+
50	Гамма-фон	0,521 – 0,676	1,990 – 2,068	+
100	Гамма-фон	0,562 – 0,595	1,981 – 2,071	+
50	Нейтронный сигнал	0,582 – 0,624	1,991 – 2,065	–
100	Нейтронный сигнал	0,551 – 0,604	2,015 – 2,099	+
50	Гамма-сигнал	0,502 – 0,646	1,881 – 2,068	+
100	Гамма-сигнал	0,571 – 0,612	2,018 – 2,100	+

времени экспозиции при измерениях нейтронного потока $T_3 \geq 100$ с, гамма-потока $T_3 \geq 10$ с;

чувствительности радиометра по нейтронному каналу $\eta \geq \geq 10^{-3}$ имп·м²/нейтр.

Для установления границ применимости метода попарного комплексования была проведена экспериментальная проверка гипотезы о фоновой составляющей как о благоприятной и стабильной (среднее общее значение фона вне зон естественных радиационных аномалий может составлять до 0,25 мкЗв/ч). По естественному фону плотности потока нейтронов φ_x и гамма-квантов φ_y считается, что их средние значения $\overline{\varphi}_x = 5 \cdot 10^{-3}$ имп·с⁻¹·см²; $\overline{\varphi}_y = 10$ имп·с⁻¹·см². Однако для различных географических территорий Российской Федерации общий фон колеблется от 0,01 до 0,5 мкЗв/ч [3, 4].

Примеры результатов исследований радиационного фона представлены на рис. 2. Радиометрические измерения выполнялись в лабораторных условиях, а также на открытом пространстве при времени экспозиции $T_3 = 200$ с. Выборка состоит из 500 измерений, что составляет более 27 ч непрерывных наблюдений по каждому каналу в помещении и на открытом пространстве. Из рис. 2 следует, что гамма-фон в помещении выше и стабильнее, чем на открытом пространстве. Это обусловлено наличием природных радионуклидов ⁴⁰K, ⁸⁷Rb, ²³²Th в строительных материалах, а также скоплением в подвальных помещениях и на первых

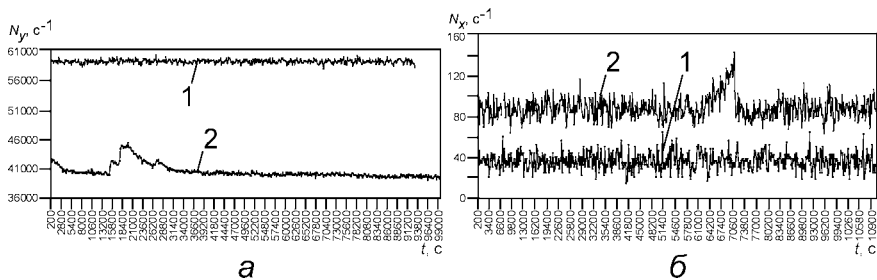


Рис. 2. Совмещенные гамма-фон (а) и нейтронный фон (б), измеренные на открытом пространстве и в помещении, соответственно кривые 1, 2

этажах радиоактивных газов, выделяющихся из почвы, таких как радон ^{222}Rn и торон ^{220}Tn , что делает фон в помещении выше. Нейтронный фон, напротив, ниже в помещении, но стабильнее, чем на открытом пространстве, вследствие того, что поток нейтронов атмосферы не способен проникать в полном объеме через многоэтажные здания. Выбросы на рис. 2 при измерениях внешнего гамма-нейтронного фона можно объяснить нестабильным характером космического излучения, образующего вторичные гамма-кванты и нейтроны при взаимодействии с молекулами атмосферы.

Такие соотношения фоновых составляющих являются характерными для большинства случаев радиационного контроля, когда внешний естественный фон не превышает среднего значения $0,25 \text{ мкЗв/ч}$ [3]. Представительная статистика фоновых измерений, а также максимально возможное время $T_{\text{э,max}}$ являются обязательными и важнейшими составляющими процесса обнаружения ИИИ как необходимое условие для обеспечения высокой точности и достоверности обнаружения.

Выводы. В результате проведенных экспериментов показана возможность аппроксимации закона Пуассона нормальным законом распределения интегрального счета импульсов для нейтронных сигналов при времени экспозиции $T_{\text{э}} \geq 100 \text{ с}$ и для измерения гамма-сигналов при $T_{\text{э}} \geq 10 \text{ с}$ применительно к ИИИ ^{252}Cf типа ИНК-4. Это обеспечивается благодаря корректному использованию метода попарного комплексирования радиометрических средств для обнаружения комбинированных гамма-нейтронных источников.

В большинстве практических случаев естественный гамма-фон в помещении может быть выше и стабильнее, чем на открытом прост-

ранстве, а нейтронный фон ниже в помещении, но стабильнее, чем на открытом пространстве. К благоприятным условиям измерений с применением метода попарного комплексирования относится значение гамма-составляющей фона не более 0,25 мкЗв/ч, т. е. в отдельных случаях фоновая составляющая может быть нестабильной и неблагоприятной и в значительной степени исказить результаты обнаружения ИИИ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Кириллов В. М.** Попарное комплексирование методов обнаружения источников излучений // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 68 – 72; **Kirilov V. M.** Pairwise combination of methods of detecting radiation sources // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 8. P. 913 – 917.

2. **Онищенко А. М.** Алгоритмы работы приборов контроля качества продукции // Измерительная техника. 1992. № 11. С. 19 – 22; **Onishchenko A. M.** Algorithms for the operation of product quality control instruments // Measurement Techniques. 1992. V. 35. N 11. P. 1266 – 1269.

3. **Кириллов В. М.** Физические основы радиационной и ядерной безопасности / Учеб. пособие. М.: ВА им. Ф. Э. Дзержинского, 1993.

4. **Иванов В. И.** Курс дозиметрии / Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1988.

5. **Бачурин Д. П., Минлигареев В. Т., Яшин А. В.** Экспериментальная проверка необходимого условия применимости метода попарного комплексирования для определения параметров источников ионизирующих излучений // Метрология. 2009. № 7. С. 38 – 44.

6. **Новицкий П. В., Зограф И. А.** Оценка погрешностей средств измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985.

7. **Лазарев В. М., Яшин А. В.** Практическая реализация метода весовых функций для построения оценок функции плотности распределения. // Измерительная техника. 2008. № 9. С. 39 – 41; **Lazarev V. M., Yashin A. V.** Practical implementation of the method of weight functions for the construction of estimators of the distribution density function // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 9. P. 976 – 979.

Дата принятия 25.08.2010 г.

