

## Безопасность в чрезвычайных ситуациях (05.26.02, технические науки)

УДК 5.50.504.5

**Выбор методики определения вероятности обнаружения радиационной аномалии при динамическом контроле радиационной обстановки**

**The choice of methods for determining the probability of detecting a radiation anomaly with dynamic monitoring of the radiation environment**

*И.Ю. Сергеев*  
канд. тех. наук  
ФГБОУ ВО Сибирская  
пожарно-спасательная  
академия ГПС МЧС России

*I. Y. Sergeev*  
*Ph.D. of Engineering Sciences*  
*FSBEE HE Siberian Fire*  
*and Rescue Academy*  
*EMERCOM of Russia*

**Аннотация:**

Статья посвящена выбору методики определения вероятности обнаружения радиационной аномалии при динамическом контроле радиационной обстановки, необходимой для повышения оперативности мониторинга и радиационного контроля, а также задач и возможных направлений исследования.

**Ключевые слова:** радиационный контроль, мониторинг радиационной обстановки, вероятность обнаружения, радиоактивная аномалия, способ экспресс-контроля радиационной обстановки.

**Abstract:**

The article is devoted to the choice of methods for determining the probability of detecting a radiation anomaly in the dynamic monitoring of the radiation environment necessary to increase the efficiency of monitoring and radiation monitoring, as well as the tasks and possible directions of research.

**Key words:** radiation monitoring, monitoring of the radiation situation, probability of detection, radioactive anomaly, method of express control of the radiation situation.

Повышение уровня радиационной безопасности на определенной территории и субъекта в целом возможно путем использования способов радиационного мониторинга, основанных на применении эффективных средств контроля.

Основной задачей радиационного обследования территории является определение границ радиоактивного загрязнения и выявление точечных радиационных аномалий на территории в данных границах.

В работе [1] описана методика определения вероятности обнаружения локальных радиационных аномалий в зоне загрязнения, позволяющая установить рациональный шаг дискретности при динамическом обследовании территории.

Для территории формируется карта обследования с заданным шагом дискретности, проводится  $\gamma$ -съемка, в результате которой выявляются очаги радиоактивного загрязнения, которые характеризуются следующими параметрами: размером, глубиной залегания, удельной активностью, массой, видом радионуклида, мощностью экспозиционной дозы, регистрируемой дозиметрической системой на поверхности среды. Из выявленных аномалий выбираются точечные, используя логическое соотношение:

$$f(V) = \begin{cases} \text{true, если } V \leq V_0 \\ \text{false, если } V > V_0 \end{cases} \quad (1)$$

где  $V$  – объем, занимаемый аномалией;  $V_0$  – критический объем, зависящий от шага дискретности, больше которого аномалия считается объемной (площадной).

Точечные аномалии сортируются по виду радионуклида и активности с помощью выражения:

$$f^j(Q) = \begin{cases} 1, \text{ если } Q \geq Q_1 \\ 2, \text{ если } Q_2 \leq Q < Q_1, \\ 3, \text{ если } Q < Q_2 \end{cases} \quad (2)$$

где 1, 2, 3 – класс точечной радиоактивной аномалии, определяющий ее радиационную опасность;  $Q_1, Q_2$  – граничные значения активности аномалий, определяемые по результатам их обработки;  $j$  – тип радионуклида (наиболее характерные радионуклиды, встречающиеся в практике, –  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ). Если объем выборки для какого-либо класса не представителен, то классы объединяются в предположении, что закон распределения аномалий по глубине не зависит от типа радионуклида и активности точечного источника загрязнения.

Для каждого класса точечных аномалий находится их эмпирическое распределение в зависимости от глубины залегания, исходя из того, что оно подчиняется показательному закону:

$$F(h) = \lambda \exp(-\lambda h), \quad (3)$$

где  $h$  – глубина залегания аномалий;  $\lambda$  – оценка параметра показательного распределения.

Для оценки уровня значимости  $\alpha$ , при котором выполняется гипотеза о том, что непрерывная случайная величина, определяющая плотность распределения аномалий, необходимо:

найти по заданному эмпирическому распределению выборочную среднюю глубину залегания точечной аномалии  $h_g$ :

$$h_g = \frac{\sum_{i=1}^s n_i (h_i - h_{i+1})}{n}, \quad (4)$$

где  $n$  – объем выборки (количество обнаруженных аномалий);  $n_i$  – количество аномалий, обнаруженных в пределах интервала глубин  $(h_i - h_{i+1})$ ;  $s$  – число интервалов выборки;

принять в качестве оценки параметра  $\lambda$  показательного распределения  $\lambda = 1/h_g$ ;

найти вероятность попадания глубины залегания аномалии в частичные интервалы по формуле:

$$W_i = W(h_i < h < h_{i+1}) = e^{-\lambda h_i} - e^{-\lambda h_{i+1}}; \quad (5)$$

вычислить теоретические частоты:

$$n_i = n W_i; \quad (6)$$

сравнить эмпирические и теоретические частоты с помощью критерия Пирсона, приняв число степеней свободы  $k = s - 2$ , рассчитать наблюдаемое значение  $\chi^2_{\text{набл}}$  и сравнить его с  $\chi^2_{\text{кр}}$  (критическим). Если существует  $\alpha$ , при котором выполняется гипотеза, то с доверительной вероятностью  $W_g = 1 - \alpha$  показательная функция описывает плотность распределения генеральной совокупности аномалий. В противном случае надо искать другой класс функций.

Расчет априорных вероятностей обнаружения точечных аномалий при заданном значении шага дискретности в зависимости от глубины их залегания, активности, типа радионуклида можно провести в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1.

Модель среды принимается гетерогенной (двух- либо трехслойной); предполагается, что источник загрязнения находится в первом слое и имеет заданную активность и определенный тип радионуклида. При двухслойной модели в качестве первого слоя выбирается грунт с коэффициентом ослабления  $\mu_1$ , второго – воздух с коэффициентом ослабления  $\mu_2$ , при трехслойной модели между первым и вторым слоями располагается асфальт толщиной 20 см.

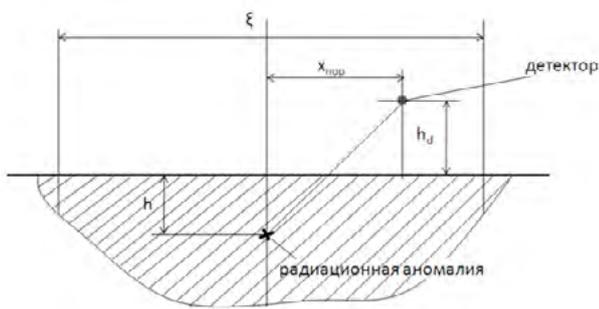


Рис. 1. Схема расчета вероятности обнаружения точечных аномалий

Расчет мощности дозы, создаваемой точечным источником  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , проводится в соответствии с выражением:

$$P - \left(\frac{QT}{l^2}\right) B_T \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i\right) \exp\left(-\sum_{i=1}^N \mu_i d_i\right), \quad (7)$$

где  $Q$  – активность точечного источника;  $T$  –  $\gamma$ -постоянная;  $l$  – расстояние от источника до детектора;  $\mu_i$  – коэффициент ослабления  $i$  среды;  $d_i$  – толщина  $i$  слоя по направлению детектирования;  $B_T$  – фактор накопления для гетерогенной среды. Последний рассчитывали по соотношению Бродера:

$$B_T \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i\right) = B_N \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i\right) + \sum_{i=1}^{N-1} B_N \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i\right) - B_{N+1} \left(\sum_{i=1}^N \mu_i d_i\right), \quad (8)$$

$$\text{где } B(\mu d) = 1 + a \mu d \exp(b \mu d). \quad (9)$$

Численные значения коэффициентов  $\mu$ ,  $a$ ,  $b$  в формуле Бергера (9) выбирают из справочников для соответствующих видов материалов и рассматриваемых радионуклидов.

Для определения порогового расстояния  $x_{\text{пор}}$  (максимального расстояния, на котором детектор может выделить аномалии на естественном радиационном фоне) необходимо:

в соответствии с выражениями (7–9) рассчитать мощность экспозиционной дозы  $P(x)$ , создаваемую точечным источником в каждой точке поверхности в направлении расположения дозиметрической системы для различных глубин залегания;

здать величину радиационного фона  $P_{\text{ф}}$ , соответствующую исследуемой области, и допустимую ошибку  $\epsilon$ ;

организовать сходящийся итерационный процесс, реализующий алгоритм:

$$|P(x) - 3P_{\text{ф}}| \leq \epsilon \quad (10)$$

из которого определить  $x_{\text{пор}}$ . Используя значение  $x_{\text{пор}}$ , можно оценить условную вероятность обнаружения точечной аномалии по соотношению:

$$W(A|C) = 2x_{\text{пор}} / \xi, \quad (11)$$

где,  $A$  – нахождение аномалии в исследуемом интервале глубин залегания;  $C$  – обнаружение аномалии в этом интервале при условии, что событие  $A$  выполнено.

На основании выше представленного, применяется следующий алгоритм определения оптимального расстояния расположения дозиметрической системы до аномалии:

- задается класс аномалии;
- затем шаг дискретности;
- рассчитывается условная вероятность обнаружения аномалий для каждого интервала глубины их залегания и различного расстояния расположения точки детектирования;

определяется полная вероятность обнаружения аномалии для совокупности различных расстояний от точки детектирования; с помощью итерационной процедуры выбирается расстояние детектирования, при котором обеспечивается максимальная вероятность обнаружения аномалии.

Таким образом, приведенная в статье методика оценки вероятности обнаружения радиоактивных аномалий дает возможность определить вероятность выявления источника при заданном шаге дискретности. Однако методика требует нахождения эмпирического закона распределения для точечных радиоактивных загрязнений, определение априорных условных вероятностей обнаружения точечных аномалий, что значительно усложняет процедуры контроля и вносит большую неопределенность в получаемые результаты. Кроме того, методика не позволяет определить условие выявления радиационной аномалии с заданной вероятностью при минимальном времени контроля.

Повышение эффективности радиационного мониторинга территорий можно добиться за счет увеличения экспрессности, вероятности обнаружения радиационных аномалий и расширения функциональных возможностей систем комплексной безопасности и применения способов экспресс-контроля [2].

В данной статье предлагается блок-схема методики определения вероятности обнаружения радиационной аномалии при динамическом контроле радиационной обстановки [3,4], которая представлена на рисунке 2. Она может являться методологической основой для количественной оценки вероятности обнаружения радиоактивных источников в методиках обоснования контроля радиационной обстановки.

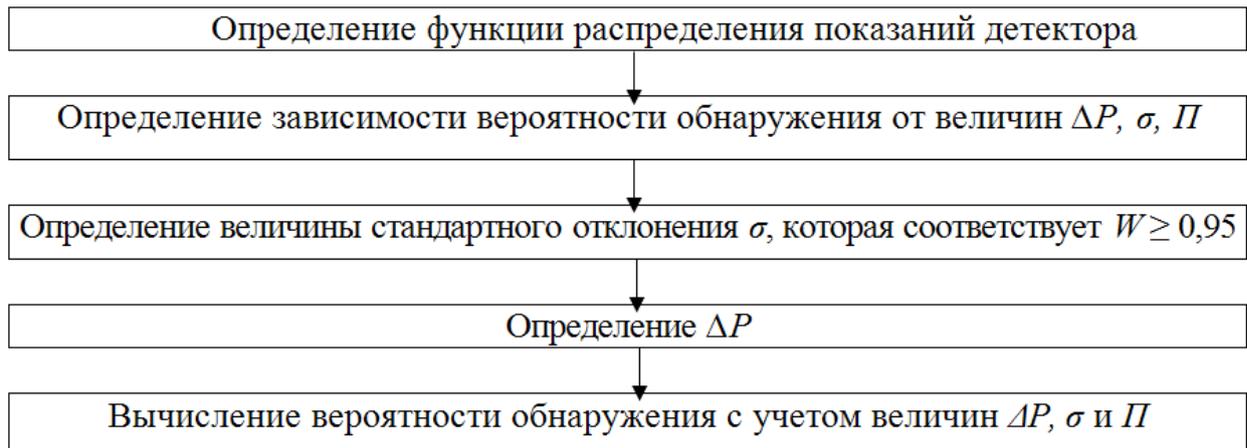


Рис. 2. Блок-схема методики определения вероятности обнаружения радиационной аномалии

### Литература

1. Соболев И.А., Беляев Е.Н. Руководство по методам контроля за радиоактивностью окружающей среды. – М.: «Медицина», 2002. – 432 с.
2. Сергеев И.Ю. Повышение эффективности радиационного мониторинга закрытого административного территориального образования с объектами атомной промышленности и прилегающих территорий. // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2018. № 3 (10). С. 9-12.
3. Валуев Н.П., Лысова О.В., Сергеев И.Ю. Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов. // Сборник докладов XX Международной научно-практической Конференции по проблемам защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций «Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий». Москва, 2015 года. С. 169-171.
4. Валуев Н.П., Лысова О.В., Сергеев И.Ю. Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов. // Сборник: Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий XX Международная научно-практическая конференция по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. МЧС России. 2015. С. 425-427.