ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ЗАДАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА

Р.В. Лукашевич
Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»
г Минск, Республика Беларусь

Исследуем вероятность обнаружения известного радионуклида низкой активности с известными параметрами. Задача состоит в обнаружении источника при использовании нескольких заданных параметров. Метод предполагает, что несколько равномерно распределенных статистических измерений проводятся в интересующей нас области, содержащей точечный источник (рис. 1).

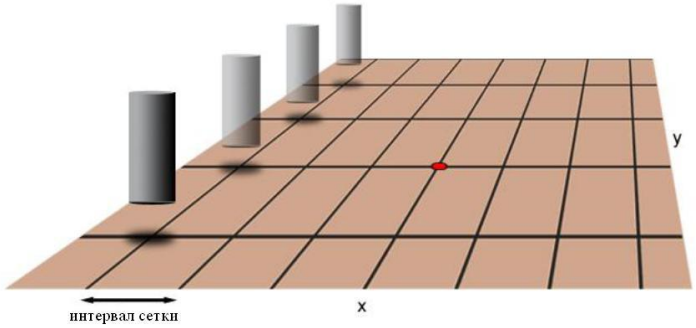

Рисунок 1 - Измерения детектора в *x*- и *y*-направлениях с равными интервалами.

Исследование картины предполагает, что измерения детектором проведены в каждом узле, определенном длиной интервалов сетки. Таким образом, детектор последовательно занимает все узлы сетки. Учитывая глубину, на которой расположен источник в среде и его интенсивность, может быть достигнута вероятность определения положения источника на основании всех измерений. Вероятность обнаружения основана на нескольких факторах, таких как: фоновая скорость счета, пространственная плотность статистических измерений и время подсчета каждого измерения.

Моделируемая эффективность отображения.

Первый шаг в понимании вероятности обнаружения лежит в уяснении эффективности обнаружения как функции исходного положения источника и детектора. Для работы будем использовать *GEANT4* (*GEometry ANd Tracking*) — программу для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло. Программа разработана в *CERN* на объектно-ориентированном языке программирования *C++*.

Используя *GEANT4*, смоделируем отклик детектора на постоянной высоте над поверхностью, с источником на поверхности и на известной глубине почвы. Отклик детектора моделируется в каждом узле сетки в области, начинающейся в положении (x,y)=(0,0), который предполагает, что детектор расположен выше источника и смещается по осям x и y через интервалы в один сантиметр. Границы моделируемой области зависят от среды и интенсивности источника. Для работы используем пик энергетических потерь, однако метод одинаково подходит и для всего спектра.

Для работы моделируется блок детектирования на основе сцинтилляционного детектора NaI(Tl) Ø63x63 мм. Рисунок 2 показывает два моделируемых отклика детектора в точке 10 см от поверхности почвы. Верхняя сетка представляет собой отклик детектора на поверхностный источник ^{137}Cs и нижняя сетка – тот же самый источник, но на глубине 5 см ниже уровня поверхности почвы. Рисунок 3 демонстрирует полный отклик на поверх-

ностный источник от точки (0, 0) над источником до 30 см в стороны в *x* и *y* направлениях. Моделируемый отклик сетки детектора с желаемыми параметрами используется, чтобы оценить вероятность обнаружения.

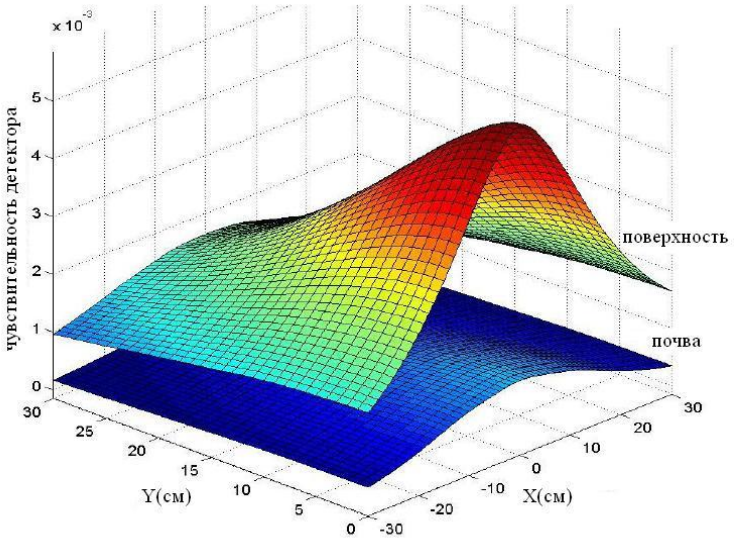

Рисунок 2 - Позиционное моделирование ^{137}Cs на поверхности и в пределах 5 см почвы.

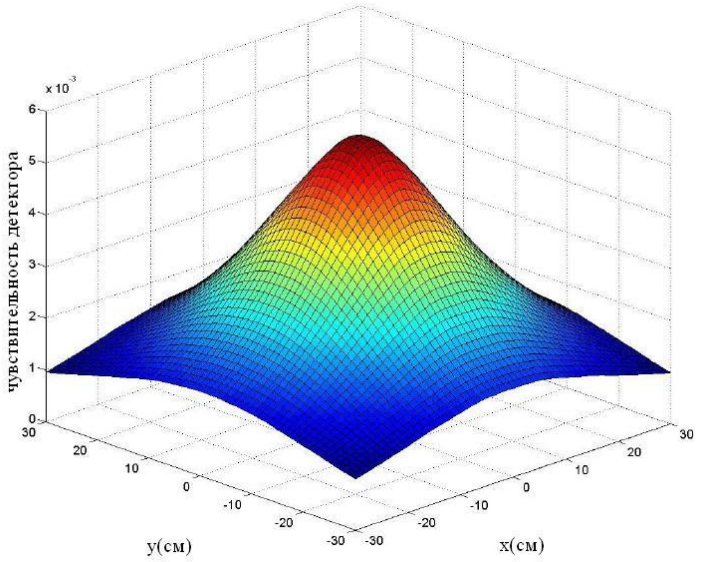

Рисунок 3 - Полное позиционное моделирование ^{137}Cs на поверхности.

Задача предполагает, что сетка статистических измерений покрывает всю область осуществления выборки. Измерения проводились в течение определенного времени, исходя из достаточного количества отсчетов для хорошей статистики, и детектор перемещается от одной, определенной пользователем точки, к следующей точке измерения. Процесс повторялся по *x* и *y* осям, пока вся область не была покрыта. Рисунок 4 демонстрирует образец осуществления выборки с интервалом 10 см.

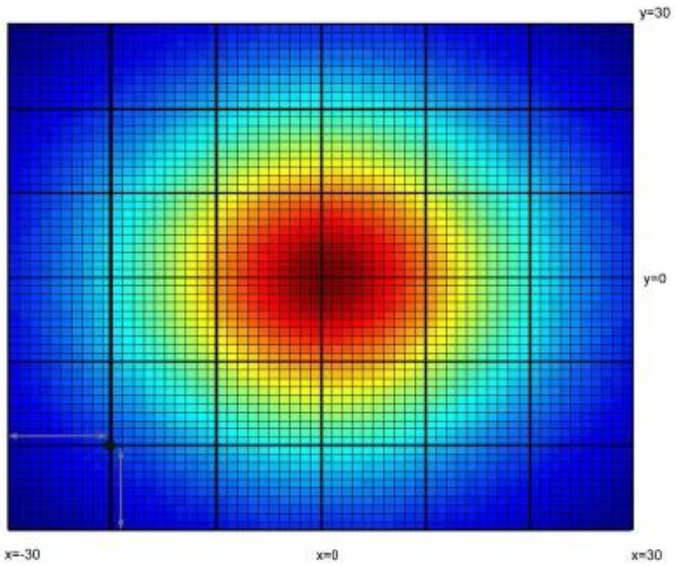

Рисунок 4 – Интервалы сетки детектора в 10 см, наложенные на матрицу эффективности обнаружения.

Разрешение фонового сигнала.

Актуальным вопросом является способность разделить скорость счета от источника и фоновую скорость счета, особенно при работе с низким уровнем чистой скорости счета источника.

Так как радиоактивный распад является случайным событием, он должен быть описан в статистических терминах. Статистическая вариация числа отсчетов, полученных от радиоактивного источника, задается биномиальным распределением. Для большого количества отсчетов, как правило, равных или превышающих 30, биномиальное распределение близко к Гауссовскому (нормальному) распределению.

К сожалению, вне моделируемого мира, фоновое излучение играет большую роль в способности определить обоснованность обнаружения источника. Счет от внешних источников гамма радиации (земной и космической) будет соответствовать той же самой статистической модели счета, что и источник, поэтому не требуется метод для разделения двух распределений.

Рисунок 5 показывает отношения между исходным и фоновым распределениями. Решающая граница L_c - это наименьшее значение выше среднего фона, на котором скорость счета от источника может с достоверностью считаться действительной, обозначив α и β:

$$L_c = k_\alpha \sigma_b = S - k_\beta \sigma_s$$

k_a и k_β число стандартных отклонений (σ) от среднего значения, S является средней скоростью счета от источника, а B - средним значением фона. Используем нормальное распределение $\sigma_\beta = \sqrt{B}$ и $\sigma_s = \sqrt{S+B}$. Решение для k_β дает число стандартных отклонений (σ_s) от L_c:

$$k_\beta = \frac{S - k_\alpha \sqrt{B}}{\sqrt{S+B}}$$

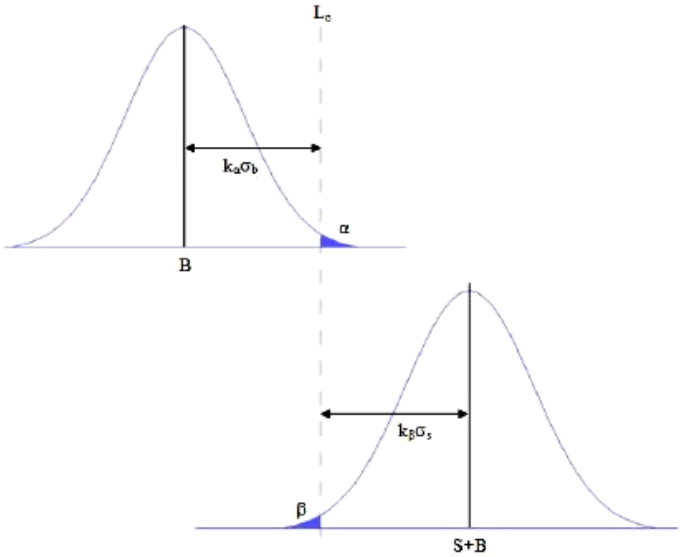

Рисунок 5 - Проверка гипотез исходного и фонового распределений

Выбирая средний фон в области измерений и желаемый процент ложных срабатываний (α), L_c становится фиксированным порогом. Значения выше этого порога считаются статистически положительными значениями. Любое количество от исходного распределения, которые находятся ниже порога L_c, определяется β, не могут быть отличны с какой-либо определенностью от фона.

Процент положительных значений, определяемых $1\text{-}\beta$, может быть получен при любом значении S. Число положительных значений определяется, принимая стандартное интегральное распределение k_β:

$$p(k_\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{k_\beta} e^{-\frac{t}{2}} dt$$

где t - нормальная случайная переменная.

Процесс повторяется для каждого положения сетки с помощью программы *QtOctave* - *Qt* интерфейса к популярной программе для математических расчетов *Octave*, аналога *Matlab*, в среде *Linux*.

Поддерживая низкий процент ложных срабатываний, общая вероятность обнаружения значительно увеличивается, однако способность обнаружения снижается.

Общая вероятность того, что источник обнаружен в любом из мест в сетке, рассчитывается на основе совместной вероятности на каждом интервале детектора R:

$$P(R) = P(\overline{P_{0,0}} \cap \overline{P_{R_1,0}} \cap \ldots \cap \overline{P_{R_n,R_m}}) = [P_{0,0}][P_{R_1,0}]\ldots[P_{R_n,R_m}]$$

Расчетная вероятность, вычисленная для объекта рассмотрения, показана на рисунке 4 и предполагает, что первое местоположение детектора – всегда край сетки. Данный шаг детектора с измерениями эффективности отображения всегда будет приводить к измерениям, проведенным непосредственно над источником. Кроме того, интервал измерения детектора в 20 см может привести к нереалистичному сценарию всегда наличия двух измерений, колеблющихся между источником. В случае точечного источника есть существенное изменение в вероятности обнаружения, когда детектор смещен от источника.

Эффекты начального положения детектора

Для изучения влияния случайных местонахождений, итерационный процесс повторяется для каждого сантиметра между углом сетки и длиной ячейки сетки в *x*-и *y*- направлениях. Для уточнения этого пункта, рисунок 1 демонстрирует модель детектора измерений. В этом примере начальное положение первого измерения детектора приведет к одному измерению, находящемуся непосредственно над источником. Реально, использование конфигурации сетки со случайным стартовым местоположением для измерений не

всегда будет приводить к измерению непосредственно над источником. В результате, вместо одного измерения непосредственно над источником, возможен вариант когда два измерения охватывают источник с двух сторон.

Это смещение может привести к резким изменениям способности обнаружения, особенно когда длина интервалов сетки становится большой. Чтобы учесть изменение вероятности, рассмотрим всевозможные местонахождения с разрешением в один см в *x*- и *y*-направлениях. Используем пример выше и примем интервалы сетки равные 10 см. Синяя область на рисунке 6 представляет все 100 (10 см x 10 см) возможных стартовых местоположений детектора.

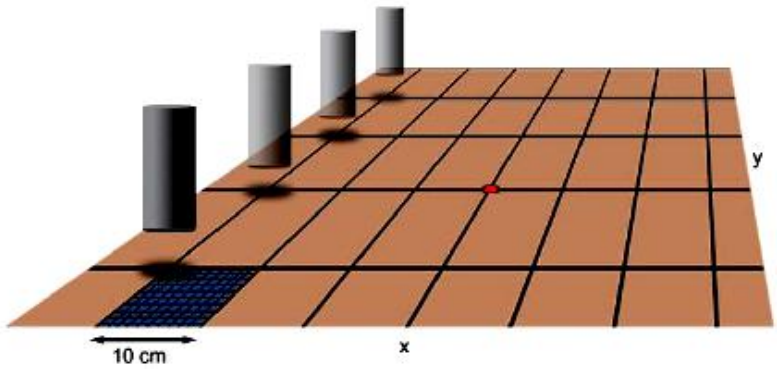

Рисунок 6 - Возможное стартовое местоположение для первого измерения.

Рисунок 7 демонстрирует изменение полной вероятности обнаружения положительных значений для каждого стартового местоположения синей области рисунка 6 для источника ^{137}Cs активностью 10 кБк в почве. Отклик числа предполагает, что L_c был установлен, используя измерение фона и процент ложных срабатываний на уровне 1%. Как и ожидалось, начиная с центра сетки, обследование дает меньшую вероятность, поскольку измерения колеблются между исходным местоположением. В этом случае различие незначительно между минимальной вероятностью 0.845 и максимальной вероятностью 0.885. Использование больших интервалов сетки между положениями детектора приведет к гораздо большей разнице между минимальными и максимальными вероятностями.

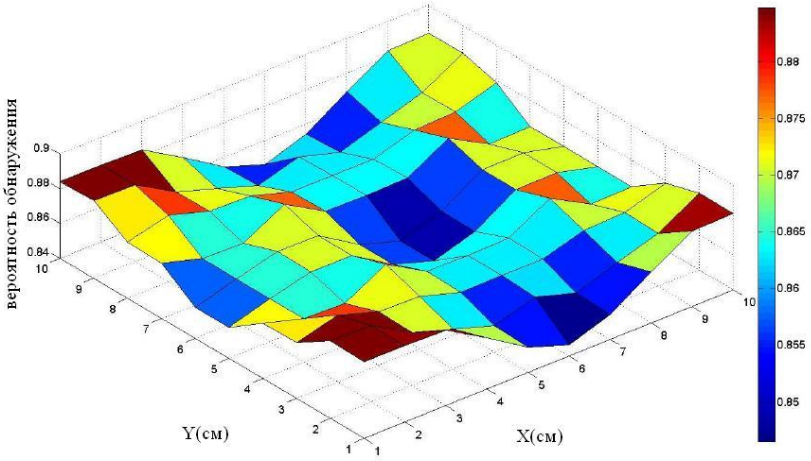

Рисунок 7 - Зависимость стартового местоположения для интервала сетки 10 см от вероятности истинного положительного обнаружения.

Тогда для учета изменений отклика на различные стартовые позиции, полная вероятность для всей области выглядит так:

$$P = \frac{(P(R)_{1,1} + P(R)_{1,2} + ... + P(R)_{n,n})}{n^2}.$$

Модель предполагает, что размер полной моделируемой сетки выбран таким образом, что процент положительных значений очень низок к краям, предоставляя нужный (искомый) источник и фоновые параметры. Для высокоактивных источников, границы сетки могут быть расширены намного дальше, и моделируемые приращения будут иметь более низкую плотность.

Результаты

Вероятность обнаружения источника ^{137}Cs, основана на подсчете импульсов пика с энергией 662 кэВ, была выполнена для двух моделируемых экспериментов. Первый эксперимент представлял собой измерения точечного источника на поверхности детектором на высоте 10 см от поверхности. Второй эксперимент представлял собой измерения детектора на той же самой высоте, но с источником на глубине 5 см почвы. Уровень ложных срабатываний был установлен в 0,1% и положительными значениями меньше чем 5% пренебрегли. Метод был представлен, используя интервал с шагом измерения детектором в 10 см, но моделирования были выполнены для нескольких различных интервалов. Отклик измерений детектора для обоих экспериментов показан на рисунке 9, используя вероятность обнаружения по всей области.

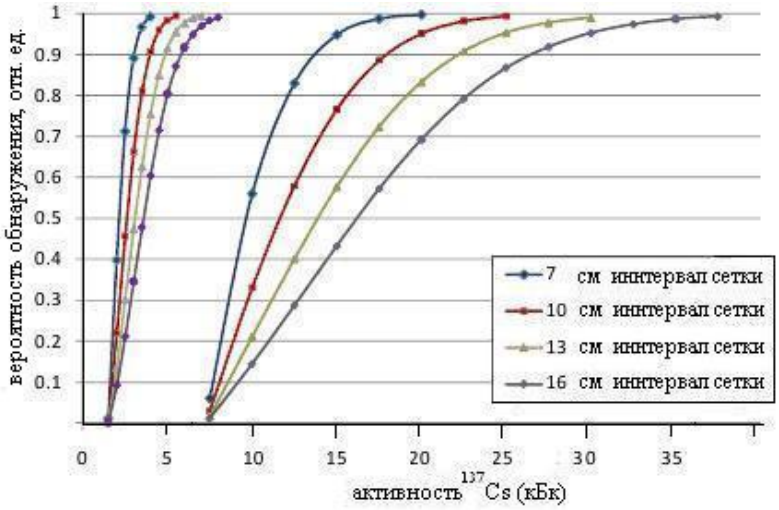

Рисунок 8 – Вероятность обнаружения для детектора NaI(Tl) Ø63x63 мм источника ^{137}Cs (662 кэВ) в воздухе (слева) и в почве (справа).

График наглядно демонстрирует изменение обнаружения, основанный на интервале сетки детектора. Как и ожидалось, низко активный источник может быть обнаружен с большей вероятностью, используя меньший интервал измерения. Результаты показывают, что для детектора на основе сцинтилляционного детектора NaI(Tl) Ø63x63 мм минимально обнаруживаемая активность для источника ^{137}Cs составляет 1.6 кБк. Для сценария, когда источник ^{137}Cs находится в почве, минимально обнаруживаемая активность составляет 8.1 кБк. Как в случае с источником на поверхности, более плотный интервал сетки приводит к более высокой вероятности обнаружения при более низкой активности.

Описанный метод может использоваться для определения достоверности обнаружения захороненного источника с известной активностью, его исходным положением, интервалами измерения детектора и фона.