

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ ГАММА-КВАНТОВ С ЭНЕРГИЕЙ ОТ 0.5 ДО 3.0 МЭВ ДЕТЕКТОРОМ ИЗ СВЕРХЧИСТОГО ГЕРМАНИЯ CANBERRA GC3019.

С.Ю. Трощиев

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ

E-mail: sergey.troschiev@gmail.com

Гамма-активационный эксперимент – это эксперимент, в ходе которого образец из исследуемого вещества облучается потоком гамма-квантов с энергией 10-100 МэВ, вследствие чего в образце протекают фотоядерные реакции с вылетом одного или нескольких нуклонов. В результате таких реакций в образце могут образовываться β -радиоактивные изотопы, периоды полураспадов которых лежат в широких пределах (от нескольких миллисекунд до 10^4 - 10^5 лет). Часто при β -распадах образуются ядра в возбужденных состояниях. Это возбуждение ядра снимается за счет испускания гамма-квантов с энергиями до 2-3 МэВ, спектр которых уникален для каждого ядра. После облучения образца спектр гамма-квантов, образующихся при β -распадах, измеряется детектором. Анализ измеренного спектра позволяет получить информацию о нестабильных изотопах, образовавшихся в образце, и их периодах полураспада.

Такие эксперименты важны для фундаментальных исследований, т.к. позволяют проанализировать результат взаимодействия гамма-квантов с веществом. Кроме того, гамма-активационная методика имеет широкое прикладное применение, например, позволяет контролировать примеси в образце на уровне 10^{-3} - 10^{-5} от содержания основного изотопа.

Одним из основных элементов в методике активационного анализа является детектор, с помощью которого измеряется остаточная гамма-активность образующихся продуктов распада. Наиболее эффективными детекторами для измерения наведенной гамма-активности являются детекторы из сверхчистого германия (HrGe-детекторы). Энергетическое разрешение таких детекторов может достигать 0.1%, что в десятки раз лучше, чем разрешение сцинтилляционных гамма-спектрометров. Временное разрешение HrGe-детекторов составляет 10^{-9} - 10^{-7} секунды.

При измерении спектра в ходе эксперимента по гамма-активационной методике обычно регистрируются гамма-кванты с энергиями 0.1-3.0 МэВ. При регистрации гамма-квантов с такими энергиями в кристалле HrGe-детектора могут происходить следующие процессы: фотоэффект, комптоновское рассеяние и рождение пар (если энергия гамма-кванта выше порога рождения электрон-позитронной пары, равного 1.022 МэВ). Во всех этих процессах энергия гамма-кванта или часть его энергии передается электрону вещества детектора, энергия которого измеряется в детекторе.

Рассмотрим более подробно все три процесса, влияющие на эффективность и спектр гамма-квантов, зарегистрированных детектором.

- 1) Фотоэффект – выбивание электрона с атомной оболочки. Энергия связи внешних электронов с ядром $E_{\text{связи}}$ составляет десятки эВ, тогда как энергия гамма-кванта E_{γ} в эксперименте не менее десяти кэВ. Функция отклика детектора, обусловленная фотоэффектом, имеет вид максимума на энергии $E_{\gamma} - E_{\text{связи}} \approx E_{\gamma}$.
- 2) Эффект Комптона – рассеяние гамма-кванта на электроны вещества. При этом гамма-квант передает электрону только часть своей энергии. За счет данного процесса в функции отклика детектора образуется комптоновская подложка – плато в области энергий от 0 МэВ до E_{γ} .
- 3) Рождение электрон-позитронных пар. После рождения пары электрон полностью теряет энергию в детекторе. Позитрон также тормозится, теряя энергию на ионизацию, и практически с нулевой энергией аннигилирует с электроном вещества. В результате их аннигиляции образуется два гамма-кванта с энергиями по 0.511 МэВ. Затем возможно три варианта развития событий:
 - а) Оба гамма-кванта поглощаются в веществе детектора. Образующийся при этом максимум в спектре совпадает по энергии с фотопиком.
 - б) Один гамма-квант поглощается в детекторе, а второй вылетает за пределы детектора. При этом образуется максимум при энергии $E_{\gamma} - 0.511 \text{ МэВ}$, называемый пиком одиночного вылета.
 - в) Оба аннигиляционных гамма-кванта вылетают из детектора. В результате в наблюдаемом спектре образуется максимум на энергии $E_{\gamma} - 1.022 \text{ МэВ}$, называемый пиком двойного вылета.

При расшифровке и анализе спектра существует опасность принять пик одиночного или двойного вылета, за фотопик при соответствующей энергии. Поэтому перед анализом спектра необходимо обнаружить пики одиночного и двойного вылетов и исключить их из рассмотрения.

Для исследования эффективности регистрации гамма-квантов с энергиями от 0.5 до 3 МэВ были проведены численные эксперименты для модели HpGe-детектора Canberra GC3019, использующегося в настоящее время в НИИЯФ МГУ для исследования многочастичных фотоядерных реакций при помощи импульсного разрезного микротрона RTM-70 на энергию электронов до 70 МэВ. Источник гамма-квантов находился на расстоянии 5 мм от корпуса детектора. Направления вылетов гамма-квантов из источника были равномерно распределены по телесному углу 2π в сторону расположения основного детектора. Вся система находилась в воздушной среде.

Спектры гамма-квантов, зарегистрированных HpGe-детектором, рассчитывались с помощью пакета библиотек для C++ GEANT4. При расчете учитывались все описанные выше физические процессы.

Расчеты выполнены для следующих значений энергии монохроматических потоков гамма-квантов, падающих на детектор: 0.1; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0 МэВ. Результаты расчета показаны на рисунке 1.

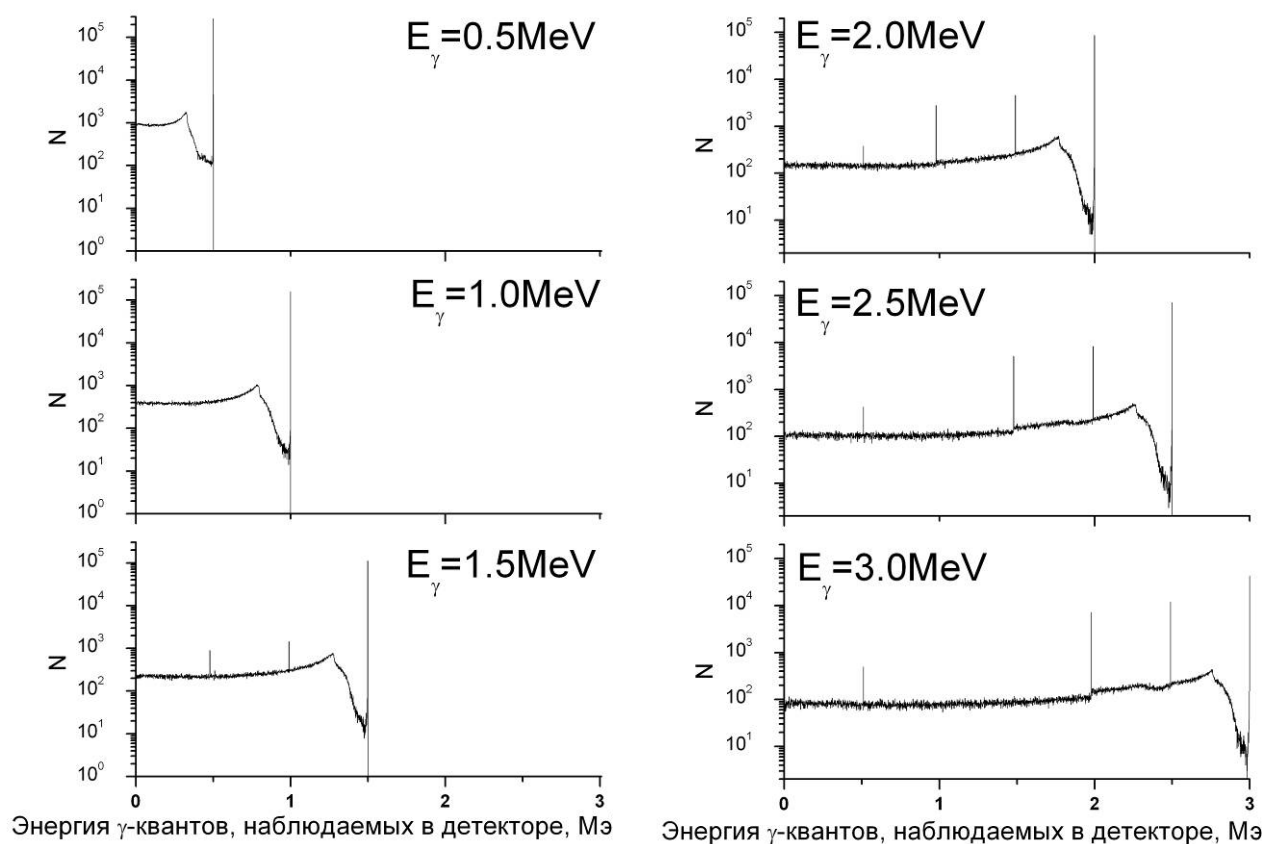


Рис. 1. Отклик детектора при регистрации гамма-квантов с энергией 0.5-3 МэВ.

Из рисунка 1 видно, что на энергии 0.5 МэВ и 1.0 МэВ наблюдаемый спектр состоит из фотопика и комптоновской подложки. При энергиях 1.5 МэВ и более высоких кроме фотопика и комптоновской подложки наблюдаются пик одиночного и пик двойного вылета, а также пик на энергии 0.511 МэВ, обусловленный рождением электрон-позитронных пар с последующей аннигиляцией позитрона в воздухе и в корпусе детектора.

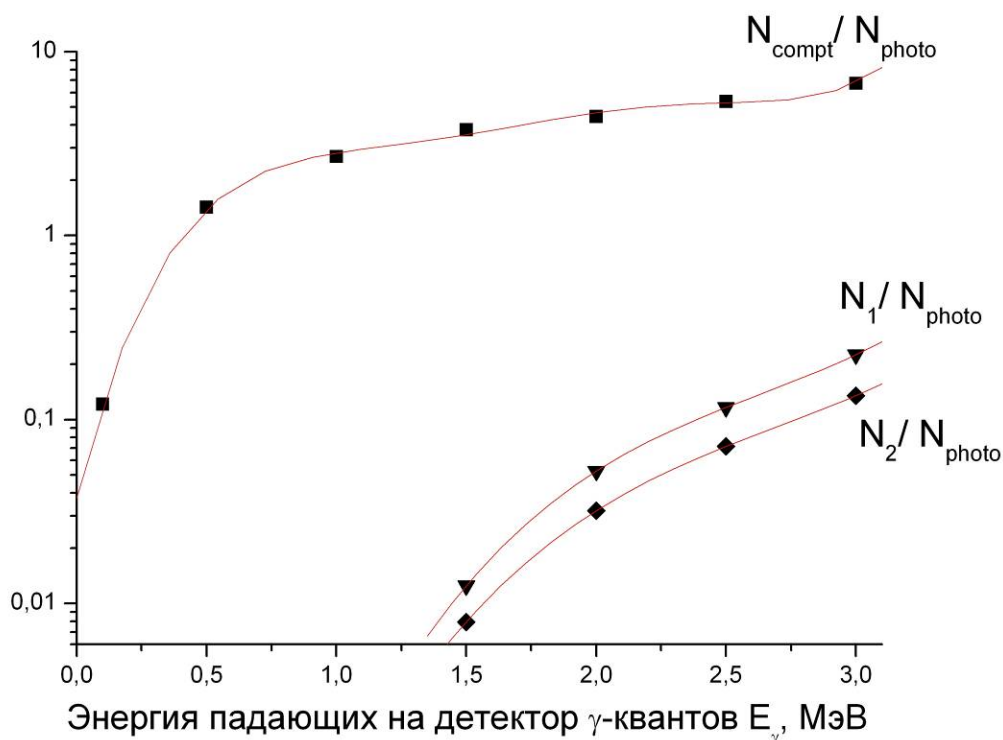


Рис. 2. Зависимость отношений величин фотопика N_{photo} , комптоновской подложки N_{compt} , пика одиночного вылета N_1 и пика двойного вылета N_2 от энергии падающих на детектор гамма-квантов.

Была исследована связь величины фотопика N_{photo} и суммы всех отсчетов детектора N_{compt} , соответствующих комптоновской подложке, в зависимости от энергии регистрируемых гамма-квантов. Для этого была построена зависимость величины $N_{\text{compt}}/N_{\text{photo}}$ от энергии гамма-квантов (см. рисунок 2). При энергиях 0.5-3.0 МэВ эта зависимость хорошо аппроксимируется функцией $Y_c = N_{\text{compt}}/N_{\text{photo}} = -1,42 + 5,70E_\gamma - 6,99E_\gamma^2 + 4,25E_\gamma^3 - 1,23E_\gamma^4 + 0,137E_\gamma^5$, где E_γ – энергия гамма-квантов, регистрируемых детектором. Такая аппроксимация используется для того, чтобы определять величину комптоновской подложки по известной величине фотопика.

Аналогичным образом была исследована связь величин N_{photo} фотопика с величиной пика одиночного вылета N_1 и пика двойного вылета N_2 . Эти зависимости могут быть аппроксимированы функциями $Y_1 = N_1/N_{\text{photo}} = -7,62 + 6,60E_\gamma - 2,29E_\gamma^2 + 0,29E_\gamma^3$ и $Y_2 = N_2/N_{\text{photo}} = -7,24 + 5,81E_\gamma - 1,95E_\gamma^2 + 0,24E_\gamma^3$ соответственно.

Одной из основных проблем при проведении эксперимента по гамма-активационной методике является выделение и анализ величины фотопиков низкоэнергетических фотонов на фоне комптоновской подложки от более высокоэнергетических фотонов. Для решения данной проблемы методом компьютерного моделирования было проанализировано несколько вариантов реализации схемы совпадений, призванной уменьшить величину комптоновской подложки, а также величину пиков одиночного и двойного вылета. Анализ различных вариантов схем совпадений позволяет одновременно исследовать утечку гамма-квантов из основного детектора.

В первой схеме используется второй германиевый детектор, установленный симметрично первому относительно исследуемого образца. Такой детектор регистрирует комптоновские гамма-кванты, рассеявшиеся в основном детекторе назад на большие углы.

Во второй схеме за рабочей областью HpGe детектора установлен NaI-детектор толщиной 2 см для регистрации гамма-квантов, рассеявшихся вперед на малые углы.

В третьей схеме HpGe-детектор окружен кольцевым детектором из NaI толщиной 2 см. Такой детектор позволяет регистрировать гамма-кванты, вылетающие в широкий диапазон углов через боковую поверхность основного детектора.

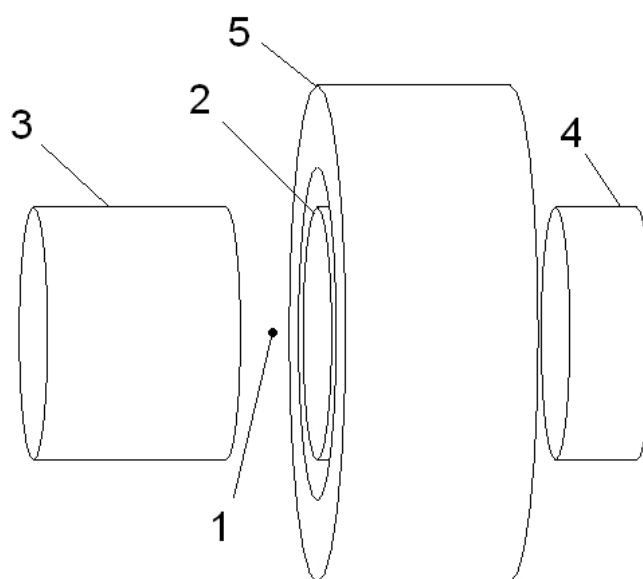


Рисунок 3. Различные варианты схем совпадений. 1 – источник гамма-квантов, 2 – основной детектор, 3 – детектор, регистрирующий гамма-кванты, рассеявшиеся под большим углами, 4 – детектор, регистрирующий гамма-кванты, рассеявшиеся под малыми углами, 5 – детектор, регистрирующий утечку гамма-квантов через боковую поверхность основного детектора.

Во всех трех схемах считается число событий с регистрацией гамма-квантов одновременно на основном и дополнительном детекторах. Затем такие события вычитаются из спектра, наблюдаемого в основном детекторе.

Для анализа эффективности приведенных схем были проведены численные эксперименты, результаты которых представлены в таблице 1. Все результаты представлены в процентах от полного числа попавших в основной детектор гамма-квантов. «Все зарегистрированные частицы» – выраженная в процентах полная эффективность регистрации гамма-квантов основным детектором. «Комптоновская подложка» – выраженное в процентах число отсчетов детектора после вычитания фотопика, пика одиночного вылета, пика двойного вылета и пика на энергии 0.511 МэВ.

Таблица 1. Результаты расчетов количества совпадений и величины комптоновской подложки для различных схем совпадения, выраженные в процентах.

Энергия гамма-кванта, МэВ	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Все зарегистрированные частицы	76.36	66.34	56.97	51.21	47.58	45.26	42.13
Кол-во совпадений в схеме 1	0.47	2.9	2.3	2.00	1.98	2.07	2.22
Кол-во совпадений в схеме 2	0.0019	3.13	3.38	3.32	3.33	3.41	3.59
Кол-во совпадений в схеме 3	0.131	12.45	11.72	10.66	10.33	10.39	11.13
Комптоновская подложка	8.24	39.01	41.82	42.19	39.04	38.35	35.84
Комптоновская подложка после вычитания совпадений по схеме 1	7.89	36.24	39.60	40.26	37.23	36.51	33.88
Комптоновская подложка после вычитания совпадений по схеме 2	8.24	36.10	38.64	39.14	36.04	35.39	32.82
Комптоновская подложка после вычитания совпадений по схеме 3	8.16	27.18	30.70	32.12	29.62	29.07	26.53

Результаты моделирования отражают основные свойства германиевых детекторов:

- Эффективность регистрации гамма-квантов детектором имеет максимальное значение при энергии 0.1 МэВ
- значительное (на порядок) падение эффективности регистрации гамма-квантов детектором при увеличении энергии гамма-квантов до 2-3 МэВ.

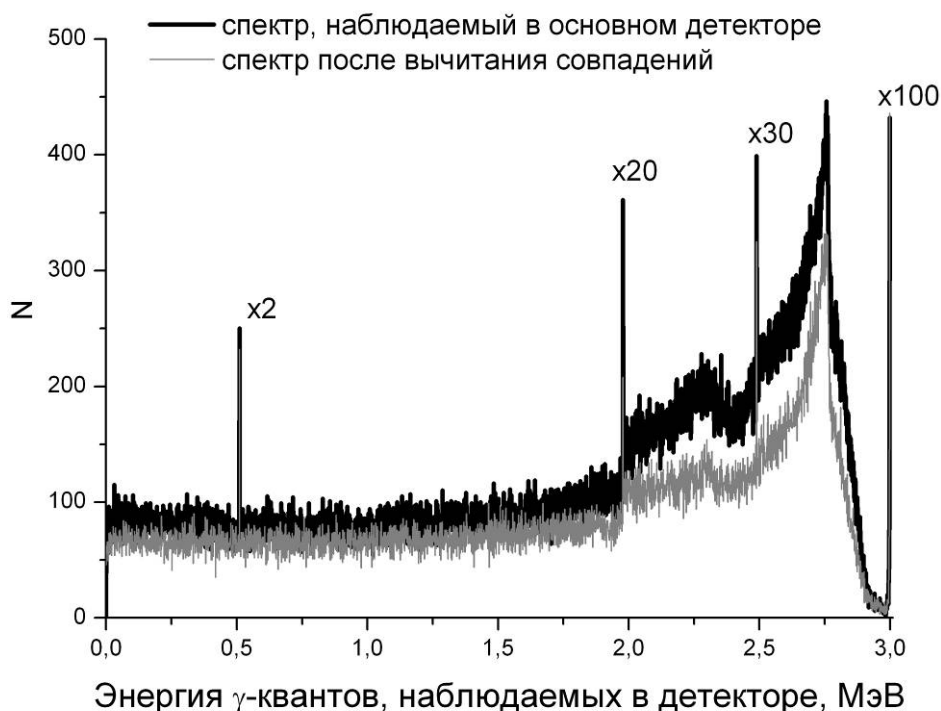


Рис. 4. Сравнение спектра, измеренного основным детектором, и спектра, полученного после вычитания совпадений по схеме 3.

Данные о количестве совпадений в различных схемах совпадений позволяют судить об угловом распределении вылетающих из детектора гамма-квантов. При энергии гамма-квантов выше 0.5 МэВ значительная часть (до 30%) рассеянных и аннигиляционных гамма-квантов регистрируется боковым детектором. 7-10% рассеянных и аннигиляционных гамма-квантов регистрируется детектором в схеме 2 после рассеяния на малые углы. Еще меньшее количество гамма-квантов (4-8%) регистрируется детектором в схеме 1 после рассеяния на большие углы. При энергии 0.1 МэВ, однако, утечка через переднюю стенку детектора максимальна, тогда как утечка под малыми углами подавлена за счет высокой величины сечения взаимодействия гамма-квантов низких энергий с материалом детектора.

Как видно из таблицы 1, наиболее эффективное подавление комптоновской подложки происходит при реализации схемы 3. Она позволяет уменьшить среднюю величину комптоновской подложки для гамма-квантов с энергией 2 МэВ на 24%, а для гамма-квантов с энергией 3 МэВ – на 26% по сравнению с исходным значением.

Были выполнены расчеты, в которых толщина кольцевого детектора была увеличена с 2 до 6 см. При этом средняя величина комптоновской подложки с исключением совпадений уменьшается на 31% для энергии гамма-квантов 2 МэВ и 34% для энергии гамма-квантов 3 МэВ.

При исключении совпадений по схеме 3 комптоновская подложка уменьшается равномерно во всем диапазоне энергий (см. рисунок 4). Схемы 1 и 2 уменьшают в основном высокоэнергетическую и низкоэнергетическую части спектра соответственно – это связано с увеличением переданной электрону энергией при комптоновском рассеянии при увеличении угла рассеяния.