

ПОРТАТИВНЫЙ ПОЛЕВОЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВОГО ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

© 2020 г. Д.О. Григоров^{1,*}, А.И. Потапов^{1,**}, Я.Г. Смородинский^{2,3,***}

¹ ФГБОУ «Санкт-Петербургский горный университет», Россия 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2

² Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

³ ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

E-mail: *russurcom@gmail.com; **apot@mail.ru; ***sm@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 06.03.2020; после доработки 17.04.2020

Принята к публикации 24.04.2020

Рассматривается устройство и расчет элементов конструкции сцинтилляционного гамма-спектрометра на основе кремниевого фотоэлектронного умножителя и кристалла CsI(Na) в качестве перспективной альтернативы сцинтилляционным гамма-спектрометрам на основе вакуумных ФЭУ. Применение кремниевых ФЭУ позволяет значительно сократить размеры, повысить надежность, снизить стоимость сцинтилляционных гамма-спектрометров и сделать их доступными широкому кругу пользователей. Помимо прочего в статье представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных при помощи рабочего прототипа сцинтилляционного гамма-спектрометра на основе кремниевого ФЭУ.

Ключевые слова: ФЭУ, фотоэлектронный умножитель, лавинный фотодиод, гамма-спектрометрия, радиометрический анализ, фотометрия, сцинтиллятор.

DOI: 10.31857/S0130308220070052

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент одним из ведущих направлений деятельности многих российских и зарубежных компаний, специализирующихся на выпуске приборов радиационного контроля, является разработка компактного и высокоточного гамма-спектрометра. Однако на сегодняшний день значительных успехов в этой сфере достигли в большей степени зарубежные компании, в то время как российскими производителями на данный момент не представлено ни одного промышленного образца подобного устройства, хотя спрос на них давно существует. Помимо прочего, цены на зарубежные портативные гамма-спектрометры весьма высоки, что препятствует их массовому применению. На сегодняшний день такое использование данного устройства является крайне необходимым для оперативной оценки степени загрязнения окружающей среды радиоактивными изотопами в условиях чрезвычайных ситуаций на объектах атомной промышленности [11], для разведки новых урановых месторождений [10] и особенно контроля загрязнения строительных материалов и продуктов питания. Кроме того, по нынешний день остро стоит проблема радиоактивного загрязнения в некоторых регионах РФ вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году. В особенности требуется постоянный контроль радиоактивного загрязнения в Брянской, Тульской, Калужской и Орловской областях.

1. КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРОВ

Возможность регистрации гамма-квантов гамма-спектрометрами зависит от процессов взаимодействия гамма-излучения с веществом. Наиболее известными являются три способа взаимодействия гамма-излучения с веществом: во-первых, это фотоэффект, во-вторых, комптоновское рассеяние и, в-третьих, образование электрон-позитронной пары [6].

Измерение энергий гамма-квантов осуществляется путем измерения энергий электронов (или позитронов), которые образовались в результате взаимодействия гамма-кванта с веществом детектора. До энергий порядка 1 МэВ регистрация гамма-квантов обуславливается комптоновским рассеянием, в области низких энергий (до 100 кэВ) — фотоэффектом, а при энергиях свыше 1 МэВ — появлением электрон-позитронных пар.

Возьмем для примера следующие условия: γ — квант, обладающий энергией E , прореагировал с материалом детектора, что послужило условием для возникновения фотоэффекта. Соответственно, кинетическую энергию вылетевшего из атома фотоэлектрона E_e можно определить согласно следующему равенству:

$$E_e = E - I, \quad (1)$$

где I — известная для каждого атома величина энергии ионизации, составляющая единицы-десятки электронвольт для атомов с небольшим порядковым номером. Так, энергия электрона E_e , измеренная в гамма-спектрометре, позволяет определить энергию зарегистрированного γ -кванта.

Классическая структурная схема сцинтилляционного γ -спектрометра представлена на рис. 1. Она включает в себя: сцинтилляционный кристалл, регистрирующий попадающее в него γ -излучение, фотоэлектронный умножитель, преобразующий световые вспышки в электрические импульсы, усилитель импульсов, а также амплитудный анализатор. Энергия зарегистрированного γ -кванта напрямую связана с амплитудой выходного сигнала с выводов ФЭУ. Наиболее приоритетной характеристикой конструкции гамма-спектрометра является линейность. Она определяется качеством изготовления, химическим составом сцинтиллятора и его размером, выбором компонентов при конструировании усилительного тракта, а также конструкцией фотоумножителя (некоторые модели ФЭУ нельзя использовать в сцинтилляционных γ -спектрометрах). Соотношение амплитуды электрического импульса и энергии зарегистрированного γ -кванта можно представить как

$$U_0 = aE_\gamma, \quad (2)$$

где a — коэффициент пропорциональности.

Контроль линейности конструкции γ -спектрометра осуществляется следующим способом: с помощью стандартных изотопных калибровочных источников типа ОСГИ, излучающих γ -кванты одной или нескольких известных энергий и обладающих известной активностью [8], осуществляется набор γ -спектров. Таким образом, наличие характеристики линейности представляет собой необходимое условие ввиду того, что каждому каналу многоканального амплитудного анализатора (амплитуде импульса) соответствует определенная энергия γ -кванта E_γ .

Энергия E_γ и номер канала N_k связаны линейным уравнением:

$$E_\gamma = aN_k + E_{\gamma 0}. \quad (3)$$

Параметры многоканального амплитудного анализатора (МКА) определяются количеством каналов (этот показатель зависит от разрядности используемого в МКА АЦП 8, 10, 12 бит и т.д.), нижним (пороговым) уровнем регистрации энергии гамма-кванта, который напрямую связан с минимально-регистрируемой амплитудой импульса, свободной от шумовой составляющей ($E < E_{\gamma 0}$). Таким образом, энергия $E_{\gamma 0}$ может быть определена в виде равенства:

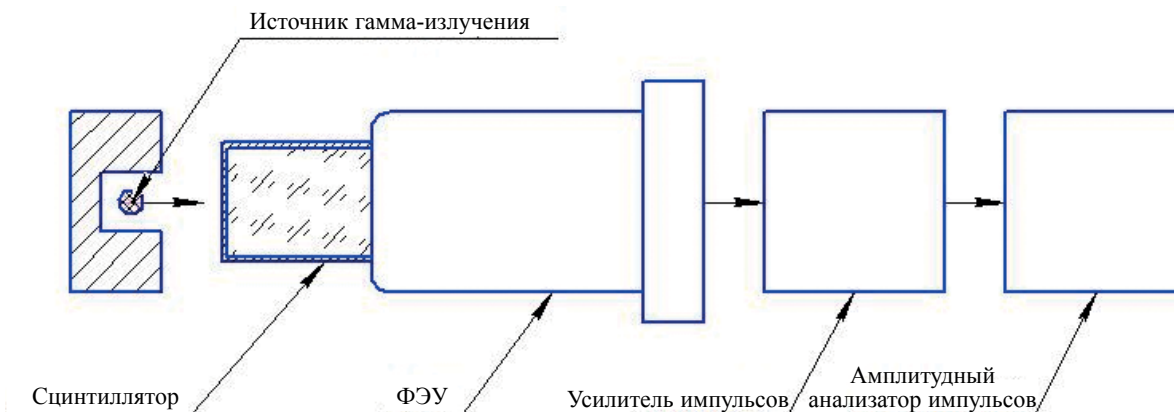


Рис. 1. Структурная схема сцинтилляционного гамма-спектрометра на основе вакуумного ФЭУ.

$$E_{\gamma 0} = aN_k, \quad (4)$$

где N_k — порог МКА, представленный в виде числа каналов.

Величина N_k находится путем аппроксимации прямой функции линейности вне области каналов МКА. В результате выражение для вычисления исходной энергии зарегистрированного γ -кванта выглядит следующим образом:

$$E_{\gamma} = a(N_k + N_k'). \quad (5)$$

Размеры, химический состав и свойства сцинтиллятора, параметры фотопреобразователя (ФЭУ, фотодиода, кремниевого ФЭУ) являются первостепенными характеристиками, определяющими эффективность устройства [6]. Однако стоит отметить, что в сравнении с полупроводниковыми детекторами такие спектрометры характеризуются достаточно низким разрешением. Так, например, для γ -квантов с энергией 662 кэВ $\Delta E/E \geq 5\%$ уменьшается с увеличением энергии E примерно как $E^{-1/2}$.

2. СРАВНЕНИЕ КРЕМНИЕВОГО ФЭУ С ДРУГИМИ ДЕТЕКТОРАМИ, ПРИМЕНЯЕМЫМИ В СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРАХ

При конструировании прототипа гамма-спектрометра мы остановились на варианте конструкции детектора, которая представляет собой сборку сцинтилляционного кристалла и кремниевого ФЭУ. На наш взгляд, на сегодняшний день данное решение является одним из наиболее оптимальных как по экономическим параметрам, так и по конструкционным.

Кремниевые фотоумножители (SIPM) являются достойной альтернативой вакуумным ФЭУ. В отличие от них кремниевые ФЭУ недорогие, миниатюрные, стойкие к механическим нагрузкам фотодетекторы. Напряжение смещения для них составляет обычно от 27 до 100 В [1, 2]. Помимо прочего, эти фотодетекторы обладают следующими преимуществами:

- высокое временное разрешение;
- высокий коэффициент усиления;
- низкое напряжение смещения;
- высокий уровень эффективности регистрации фотонов;
- высокая скорость счета;
- широкий спектральный диапазон;
- высокая степень механической прочности (в сравнении с от вакуумными ФЭУ);
- кремниевый ФЭУ не подвержен постепенному выгоранию от светового потока, в отличие от вакуумных фотоумножителей;
- кремниевые ФЭУ не требуют охлаждения для реализации счетчиков фотонов.

Данные характеристики делают кремниевые ФЭУ достойной альтернативой современным ФЭУ, применяемым для регистрации фотонов.

Ниже приведена сводная таблица сравнения вакуумных ФЭУ, лавинных фотодиодов и кремниевых ФЭУ, используемых в современных сцинтилляционных гамма-спектрометрах (табл.1).

Таблица 1

Сравнение вакуумных ФЭУ, лавинных фотодиодов и кремниевых ФЭУ

	Вакуумные ФЭУ	Лавинные фотодиоды	Кремниевые ФЭУ
Квантовая эффективность	25—40%	До 80%	До 80%
Возможность разрешения отдельных фотонов	+	—	+
Рабочее напряжение	1—3 кВ	100—500 В	27—100 В
Усиление	10^4 — 10^9	30—300	10^5 — 10^7
Механическая прочность	—	+	+
Устойчивость к яркому свету	—	+	+
Чувствительность к магнитным полям	+	—	—
Температурная стабильность	Высокая	Низкая	Высокая
Миниатюризация	Ограничена	Возможна	Возможна
Стоимость	Высокая	Низкая	Средняя

3. КРЕМНИЕВЫЙ ФОТОУМНОЖИТЕЛЬ: УСТРОЙСТВО И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В качестве фотодетектора в макете гамма-спектрометра был использован кремниевый фотоумножитель компании On semiconductor (США) серии MicroFC-60035 SMT. ФЭУ состоит из 4 ячеек размерами 3×3 мм. В свою очередь, каждая ячейка содержит в себе 4774 микроячейки [1]. Структура кремниевого ФЭУ представлена на рис. 2.

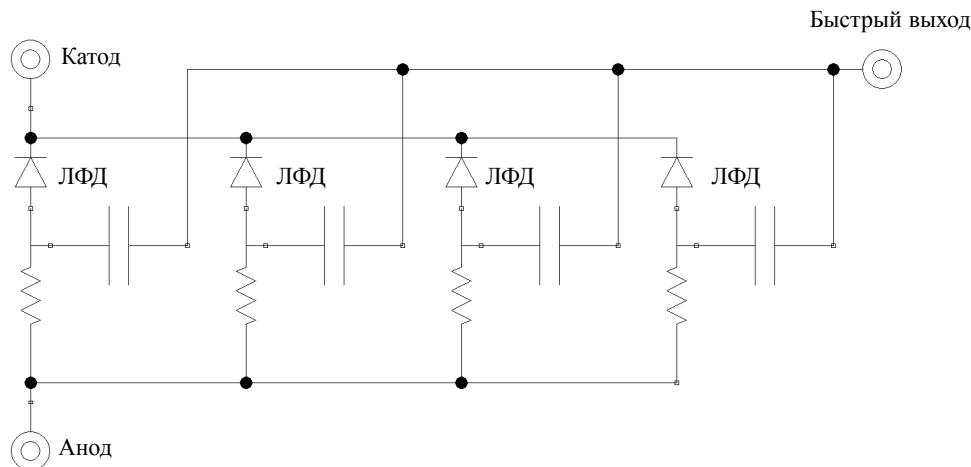


Рис. 2. Структура кремниевого ФЭУ.

Микроячейка по своей природе является лавинным фотодиодом. Выводы всех таких фотодиодов в кремниевом фотоумножителе соединены общими шинами (катод и анод). При попадании фотона, видимого для фотоумножителя диапазона спектра, в лавинном фотодиоде (микроячейке) создается электрон-дырочная пара, после образования которой образовавшиеся носители заряда ускоряются под действием приложенного к микроячейке электрического потенциала, в результате чего возникает лавинный процесс подобный тому, который можно наблюдать в счетчике Гейгера-Мюллера. При этом величина сигнала с единичной микроячейки никак не зависит от числа попавших в нее фотонов. Конструкция фотоумножителя, а именно тот факт, что все микроячейки подсоединены к одному аноду, обеспечивает прямую пропорциональность сигнала на выходе количеству «сработавших» микроячеек [4].

В теории, следствием возникновения каждого фотона (в результате сцинтилляции в кристалле) становится срабатывание только одной ячейки. Опираясь на данный факт, приходим к следующему выводу: отношение энергии частицы к количеству сработавших ячеек ФЭУ будет представлять собой отношение прямой пропорциональности. Между тем, при попадании нескольких фотонов в одну ячейку выходной сигнал будет таким же, каким бы он был при попадании одного фотона. При определенной величине плотности потока фотонов выходной сигнал кремниевых ФЭУ переходит в насыщение [1], которое можно описать формулой:

$$N_{\text{с.я.}} = M \times \left[1 - \exp\left(\frac{-PDE \times N_{\text{ф.}}}{M}\right) \right], \quad (6)$$

где $N_{\text{с.я.}}$ — количество сработавших микроячеек; M — общее количество микроячеек; PDE — эффективность регистрации фотонов; $N_{\text{ф.}}$ — количество фотонов, падающих на активную область кремниевого ФЭУ. Количество сработавших микроячеек $N_{\text{с.я.}}$ находится в прямой зависимости от используемого сцинтилляционного кристалла и энергии поглощенной сцинтилляционным кристаллом частицы.

В том случае, когда

$$M \gg PDE \times N_{\text{с.я.}},$$

выражение (6) упрощается и принимает вид:

$$N_{\text{с.я.}} \approx PDE \times N_{\text{ф.}} \quad (7)$$

Число $N_{\text{с.я.}}$ в уравнении (7) (число сработавших ячеек) линейно зависит от количества фотонов $N_{\text{ф.}}$, попавших на активную область кремниевого ФЭУ. Таким образом, можно сделать вывод о том, что выход сигнала на насыщение напрямую зависит от числа лавинных фотодиодов в кремниевом ФЭУ. Однако при увеличении количества ячеек в кремниевом ФЭУ происходит также увеличение шумов, что является следствием ложных срабатываний ячеек, так или иначе имеющих место при использовании кремниевых ФЭУ.

4. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СЦИНТИЛЛЯТОРА ДЛЯ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА

Для рассматриваемого прототипа гамма-спектрометра за основу был выбран детектор в виде сборки кремниевого фотоумножителя и сцинтиллятора CsI(Na) размером $7 \times 7 \times 30$ мм. Сцинтиллятор на основе CsI(Na) имеет следующие преимущества [5]:

легкость механической обработки (в отличие от NaI(Tl), имеющего свойство раскалываться или трескаться при механических или тепловых нагрузках). Использование пластичного йодида цезия позволяет изготавливать детекторы самых разных форм и размеров под практически любые требования;

максимум спектра излучения CsI(Na) приходится на 420 нм. Следовательно, данный кристалл хорошо согласуется со спектральной характеристикой стандартного бишелочного фотокатода ФЭУ [6], что не является помехой для его использования вместе с кремниевыми ФЭУ. При этом и время высвечивания составляет около 630 нс, что на треть меньше времени высвечивания CsI(Tl);

амплитуда импульса от CsI(Na) составляет 85% амплитуды импульса от NaI(Tl). Более того, по сцинтилляционной эффективности сцинтиллятор CsI(Na) не уступает NaI(Tl);

CsI(Na) гораздо менее гигроскопичен, чем NaI(Tl);

цена кристалла CsI(Na) является одной из самых низких для спектрометрических кристаллов.

5. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА

На рис. 3 представлена структурная схема гамма-спектрометра на основе кремниевого ФЭУ.

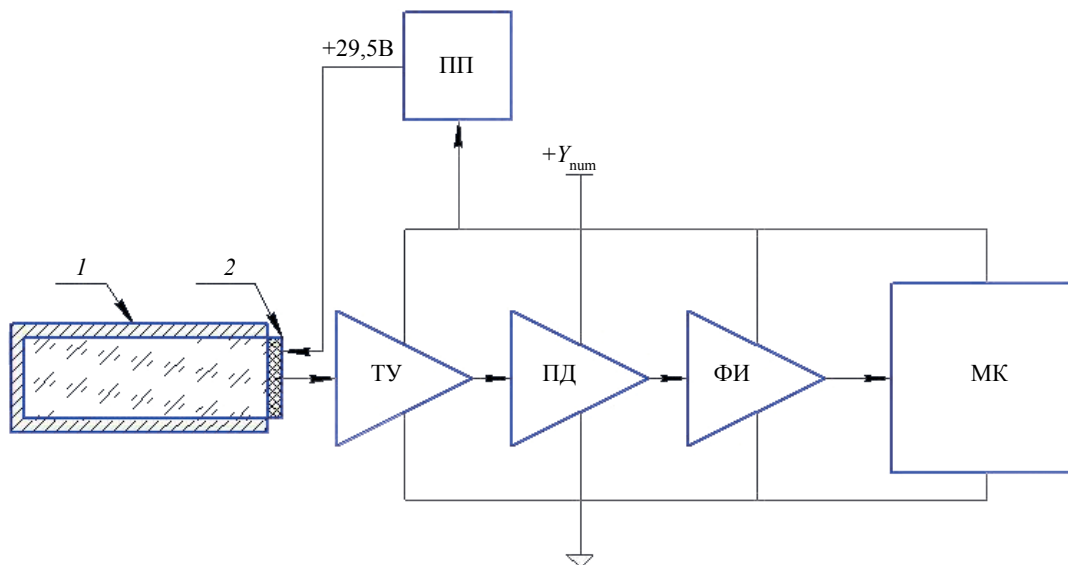


Рис. 3. Функциональная схема гамма-спектрометра на основе кремниевого ФЭУ:

1 — кристалл CsI(Na); 2 — кремниевый ФЭУ; ПП — повышающий преобразователь напряжения; ТУ — трансимпедансный усилитель; ПД — пиковый детектор; ФИ — формирователь импульса; МК — быстродействующий микроконтроллер со скоростью АЦП > 1 млн. выборок/с.

Детекторная сборка, состоящая из кристалла CsI(Na) (1) и кремниевого фотоумножителя (2), подключается к трансимпедансному предусилителю на основе быстродействующего операцион-

ного усилителя AD8062 (ГУ) и повышающему преобразователю (ПП), который создает необходимое для работы кремниевого ФЭУ напряжение смещения [1—3]. Далее сигнал отправляется на пиковый детектор (ПД), затем — на формирователь Гауссова импульса, одновременно являющийся буфером встроенного в микроконтроллер АЦП.

Рассмотрим работу устройства подробнее.

Гамма-квант, попадая в объем сцинтилляционного кристалла CsI(Na), при поглощении создает в нем импульс света (сцинтилляцию). Потом появившийся световой импульс продолжительностью ~620 нс регистрируется кремниевым фотоумножителем. При попадании видимого света на кремниевый ФЭУ начинается процесс ударной ионизации, после чего происходит лавинообразное появление электронов (их количество увеличивается до 10^6 раз), которыми обусловлен ток ФЭУ. Затем для преобразования тока фотоумножителя в напряжение с оптимальным отношением сигнал/шум используется трансимпедансный усилитель, состоящий из инвертирующего операционного усилителя (ОУ) с резистором обратной связи. Далее усиленный сигнал растягивается при помощи пикового детектора до величины ~6 мкс, чтобы сделать его пригодным для дальнейшей обработки. После пикового детектора сигнал попадает в формирователь Гауссова импульса (рис. 4), который представляет собой цепь, состоящую из буфера на основе ОУ и CR-RC цепей. Данная цепь выполняет двойную функцию: во-первых, Гауссов импульс является удобной аппроксимацией исходного импульса, за счет чего повышается соотношение сигнал/шум [6], а, во-вторых, играет роль буфера АЦП микроконтроллера, позволяя развязать источник сигнала от выбросов тока на входах АЦП во время выборки. Кроме согласования с источником сигнала буфер выполняет такие задачи, как усиление сигнала и преобразование уровня.

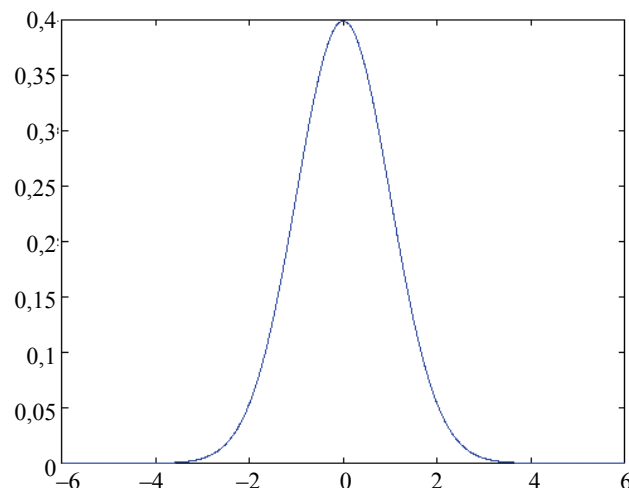


Рис.4. Форма Гауссова импульса.

После сигнал оцифровывается 12-битным АЦП микроконтроллера на основе процессора ARM Cortex M4 (STM32F407) со скоростью порядка 1 млн. выборок/с и затем уже программно обрабатывается при помощи медианного фильтра. Выбор медианного фильтра обусловлен, прежде всего, его высокой эффективностью обработки сигналов, подверженных воздействию импульсных помех, с которыми сопряжена работа кремниевого ФЭУ. После замера амплитуды импульса результат вносится в массив, состоящий из 4096 каналов. Массив представляет собой спектр, в одном столбце которого указаны номера каналов, а в другом — количество отсчетов на канал [7]. Затем при помощи программного обеспечения Fitzpeaks спектры считываются из внутренней памяти гамма-спектрометра. Кроме того, необходимо принять во внимание, что кремниевый ФЭУ обладает заметной чувствительностью к колебаниям температуры. Для решения этой проблемы в устройство был внедрен термодатчик. Показания термодатчика учитываются микроконтроллером, и в зависимости от температуры микроконтроллера корректирует напряжение смещения ФЭУ.

6. ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Используемое программное обеспечение Fitzpeaks изначально разрабатывалось для применения с полупроводниковыми гамма-спектрометрами, однако оно способно работать и сцинтилляционными гамма-спектрометрами.

FitzPeaks представляет собой бесплатное комбинированное ПО для гамма-спектрометрии общего назначения, способное обрабатывать спектральные данные, полученные на различных программно-аппаратных гамма-спектрометрических комплексах от таких производителей как Ortec, Canberra и др. Программа стабильно работает под управлением операционной системы Windows, начиная с версии Windows 2000 и заканчивая Windows 10.

Программа способна работать в различных режимах — от полностью автоматизированного анализа до полностью интерактивного режима. В интерактивных режимах представлены окна с множеством настроек, позволяющие пользователю вставлять новые пики в спектр, изменять ширину областей подгонки, изменять тип используемого фонового континуума и т. д.

Идентификация нуклидов и вычисление активности осуществляется путем формирования интерференционной матрицы и решения интерферирующих множеств методом взвешенных наименьших квадратов.

Программа имеет развитую библиотеку радионуклидов, которую можно легко дополнить с помощью встроенного в программное обеспечение средства редактирования библиотек. Кроме того, благодаря библиотеке возможна быстрая идентификация радионуклида, являющегося источником загрязнения.

На каждом этапе анализа создаются файлы отчетов, включая полный и краткий отчет о работе программы. Краткий отчет содержит параметры, хранящиеся в файле спектральных данных, найденные нуклиды и их описание, а также порог значения активности обнаружения. Этот отчет создается с помощью текстового файла-шаблона, который может быть легко изменен пользователем. Это позволяет пользователю выбрать, какие параметры должны быть перечислены, а также добавить любую дополнительную информацию в отчет.

Программа имеет возможность автоматического добавления результатов каждого анализа в базу данных или файл электронной таблицы, который совместим с большинством программ, подобных Microsoft Excel.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА

Для проверки работы опытного макета гамма-спектрометра нами были проведено несколько измерений различных радиоактивных источников, отличающихся друг от друга изотопным составом, происхождением и активностью.

На рис. 5 представлен спектр контрольного источника на основе америция-241 активностью 29,8 кБк. На спектре видно два пика: основной на 59,5 кэВ и меньший на 26,4 кэВ. Энергия пика

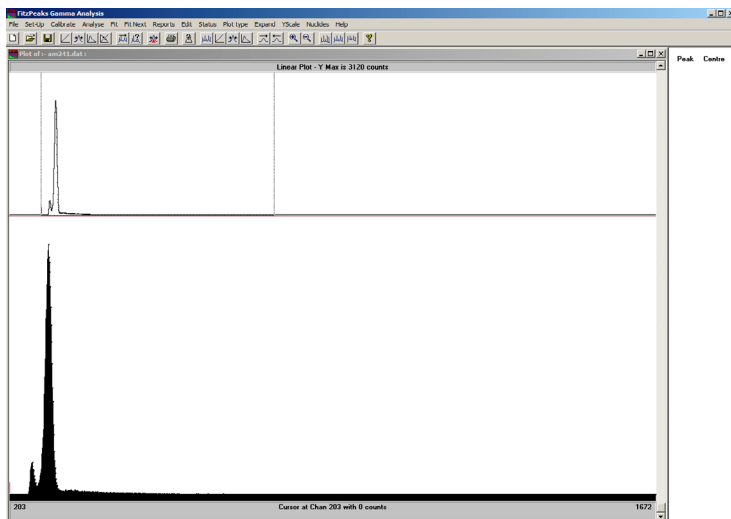


Рис. 5. Спектр 29,8 кБк америция-241 (время замера 300 с).

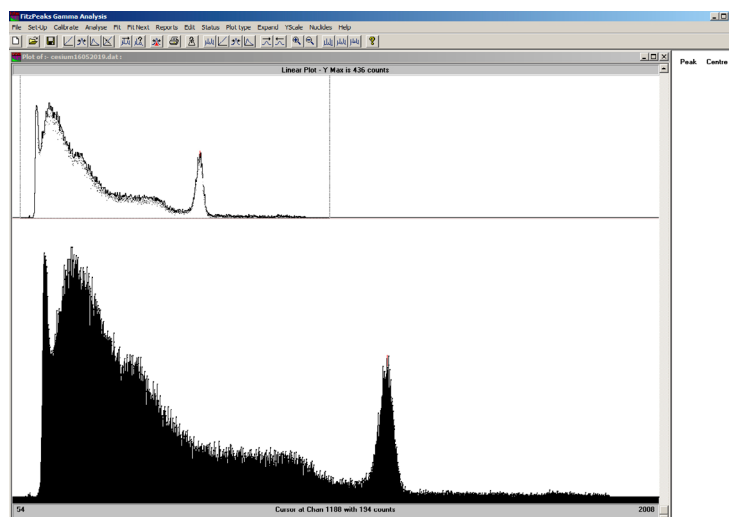


Рис. 6. Спектр пробы грунта с. Яловка (Брянская обл., Красногорский р-н) (время замера 300 с).

26,4 кэВ находится на границе нижнего диапазона гамма-спектрометра. Помимо гамма-излучения, ^{241}Am является также сильным α -источником, что делает его крайне опасным при попадании в окружающую среду. Активное повышение концентрации ^{241}Am сегодня происходит на территориях, значительно пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, где он образуется из трансуранового радионуклида ^{241}Pu , изотопы которого распространились в ближней зоне ЧАЭС в результате выброса активности в 1986 г. Поэтому определение активности и распространения данного радионуклида представляет собой одну из наиболее приоритетных задач при гамма-спектрометрии территорий, находящихся в радиусе 250 км от Чернобыльской АЭС. Кроме того, стоит упомянуть, что количество ^{241}Am на загрязненных территориях будет только возрастать в течение ближайших 40 лет в связи с распадом ^{241}Pu .

Ниже приведены образцы спектров, полученные с помощью опытного макета гамма-спектрометра.

На рис. 6 представлен гамма-спектр пробы грунта, отобранной в центре с. Яловка Красногорского района Брянской области. Село значительно пострадало в результате аварии на ЧАЭС в 1986 г. и на данный момент является зоной с правом на отселение. На данном спектре можно увидеть характерные пики, соответствующие изотопу ^{137}Cs : на 32 кэВ и на 662 кэВ. Данная проба обладает высоким уровнем активности 2,45 кБк /кг, что свидетельствует о сильном загрязнении территории в месте отбора пробы. Изотоп ^{137}Cs вместе с ^{90}Sr является основным радионуклидом, характеризующим загрязнение чернобыльского типа.

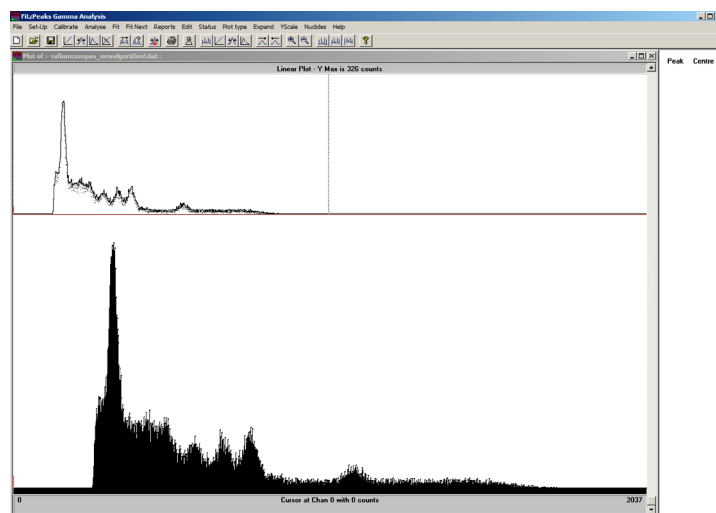


Рис. 7. Спектр образца грунта, загрязненного Ra-226, гора Бештау, г. Пятигорск (время замера 600 с).

На рис. 7 представлен спектр урансодержащего минерала, найденного на территории рекультивированной штольни (г. Пятигорск). На спектре виден характерный спектр радионуклида ^{226}Ra , образующегося в результате распада ^{238}U . Контроль активности данного изотопа является крайне важной задачей при радиационном контроле территорий урановых месторождений, строительных материалов, так как ^{226}Ra является сильным альфа-излучателем и источником возникновения радиоактивного газа ^{222}Rn [10]. Радон и его дочерние продукты распада обуславливают 75% всей эффективной дозы облучения, которую получает организм человека от природных и техногенных радионуклидов окружающей среды. В свою очередь, радий чрезвычайно радиационно токсичен. Его опасность также обуславливается тем, что при попадании в организм человека его поведение схоже с поведением кальция — порядка 80 % радия, поступившего в организм, накапливается в костной ткани и в дальнейшем становится причиной тяжелых поражений опорно-двигательного аппарата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных испытаний были определены следующие характеристики макета (кристалл $\text{CsI}(\text{Na})$ $30 \times 7 \times 7$ мм):

- диапазон регистрируемых энергий: 25 кэВ – 2 мэВ;
- разрешение по полуширине (англ. FWHM): 6%;
- скорость счета при естественном радиационном фоне: 13 имп/с;
- максимальная скорость счета: 70000 имп/с;
- ток потребления: 130 мА/ч при питании 5 В, из них 100 мА потребление микроконтроллера.

Преимущества кремниевого ФЭУ хорошо сказались на конструкционных и эксплуатационных качествах устройства, так как, в отличие от вакуумных ФЭУ, наличие высоковольтных источников питания и отсутствие электрических помех не являются обязательными условиями его работы ввиду невосприимчивости устройства к помехам [1]. Несмотря на малый объем используемого сцинтилляционного кристалла $\text{CsI}(\text{Na})$, гамма-спектрометр является довольно чувствительным устройством, обладающим достаточно высоким разрешением по полуширине для такого типа детекторов и имеющим достаточно широкий энергетический диапазон для регистрации основных природных и техногенных радионуклидов. Одним из вариантов увеличения быстродействия устройства является увеличение рабочего объема кристалла, а также применение матриц кремниевых фотоумножителей для уменьшения потерь света с увеличенной площади рабочего окна сцинтиллятора.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A Brief Introduction to Silicon Photomultiplier (SiPM) Sensors (Rev. 3), Semiconductor Components Industries LLC, USA, January, 2019, available at: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9795-D.PDF>
2. Biasing and Readout of ON Semiconductor SIPM Sensors (Rev. 3), Semiconductor Components Industries LLC, USA, April, 2019, available at: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9782-D.PDF>
3. Butt A.D. Development of a detector for gamma-ray spectroscopy based on silicon drift detector arrays and lanthanum bromide scintillator // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2015. V. 62. № 5. P. 2334—2342.
4. C-Series SiPM Sensors Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive (Rev. 6), Semiconductor Components Industries LLC, USA, November, 2018, available at: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MICROC-SERIES-D.PDF>
5. CsI(Tl), CsI(Na) Cesium Iodide Scintillation Material, Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc., France, 2016, available at: https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/csitl-and-na-material-data-sheet_69771.pdf
6. Photomultiplier Tubes. Basics and Applications. Third Edition (Edition 3a) / Текст: электронный / Hamamatsu Photonics K.K. Hamamatsu, Japan, 2007. URL: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf
7. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики / Изд. 2-е перер. и доп. М.: Атомиздат, 1977. 528 с.
8. Мильман И.И., Сурдо А.И., Моисейкин Е.В. и др. Аппаратурное обеспечение новых методов радиационного контроля // Дефектоскопия. 2016. № 3. С. 25—34.
9. Красноперов В.С., Атнашев Ю.Б., Моисейкин Е.В. и др. Дозиметрический комплекс для радиационного контроля «КОРУНД-201-ТЛ» // Дефектоскопия. 2014. № 1. С. 3—11.

10. Екидин А.А., Васянович М.Е., Наливайко А.В. Применение гамма-спектрометрии для выявления техногенного загрязнения почвы ураном // Принципы экологии. 2013. № 2. С. 29—35. URL: <http://esopri.ru/journal/article.php?id=2682>
 11. Ляшенко В.И., Зонов С.П., Коваленко Г.Д. Радиационной безопасности — надежное системное и приборное обеспечение // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 1. С. 141—153. URL: http://www.giab-online.ru/files/Data/2019/1/141_153_1_2019.pdf
 12. Потапов А.И., Умбетов У.У., Морокина Г.С. Радиационная безопасность в промышленности / Учеб. пособие. Тараз РК, изд. Формат-Принт, 2017. 212 с.
 13. Титов Б.Г., Грузнов В.М. Стабилизация отклика полевого гамма-спектрометра // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 7. С. 40—41. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/stabilizatsiya-otklika-polevogo-gamma-spektrometra>
 14. ГОСТ 26874—86. Спектрометры энергий ионизирующих излучений. Методы измерения основных параметров (с Изменениями N 1, 2). Технические требования. Введ. 2002-01-01. 1987-01-01. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1987. 27 с.
-