

# **ГAMMALAB: ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭМУЛЯЦИИ АППАРАТУРНЫХ ГАММА-СПЕКТРОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

Берлизов А.Н. (ИЯИ, г. Киев)

Даниленко В.Н., Ковальский Е.А., Скубо Ю.В., Соловьева С.Л., Федоровский С.Ю. (ООО  
«ЛСРМ», п. Менделеево)

## **Введение**

В статье представлен программный комплекс GammaLab, предназначенный для моделирования в реальном времени аппаратурных гамма-спектров полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов при измерениях широкого набора источников, имеющих произвольную пространственную конфигурацию и радионуклидный состав. Комплекс может использоваться в качестве симулятора для обучения работе со спектрометрическими устройствами и программным обеспечением во избежание затрат на покупку дорогостоящего оборудования и организацию работ с источниками ионизирующего излучения. С его помощью могут решаться задачи калибровки аппаратуры, а также тестирования программного обеспечения и методик измерения в случаях, когда аттестованные источники излучения с заданными свойствами (размерами, физико-химическими характеристиками, радионуклидным составом) отсутствуют, либо их изготовление требует значительных затрат. Для решения вышеперечисленных задач GammaLab позволяет создавать "гамма-спектрометрическую лабораторию" с виртуальными детекторами и источниками. Комплекс интегрирован в спектрометрическое программное обеспечение, поставляемое ООО «ЛСРМ» [1].

## **1. Краткое описание GammaLab**

### **1.1. Структура и возможности программного комплекса**

Комплекс GammaLab представляет собой набор программных модулей и баз данных, работающих под управлением единой графической оболочки. На рис.1 показана функциональная схема GammaLab с указанием назначения основных программных единиц, входящих в его состав.

С помощью GammaLab могут моделироваться гамма-спектры для полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов. Предусмотрены ситуации, когда для снижения уровня внешнего фона либо входной загрузки детекторы располагаются в специальных защитных коллиматорах. При моделировании используются реалистичные модели детекторов и коллиматоров, схематически показанные на рис. 2 и 3 соответственно. Специально разработанная графическая оболочка позволяет задавать геометрические размеры и материалы конструктивных элементов детектора и коллиматора. В качестве материалов может задаваться произвольная смесь химических элементов и соединений.

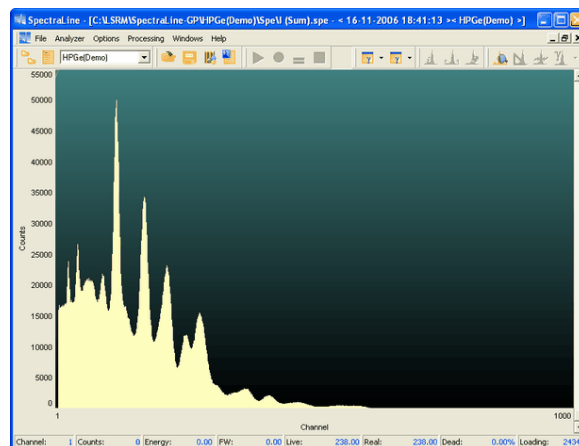
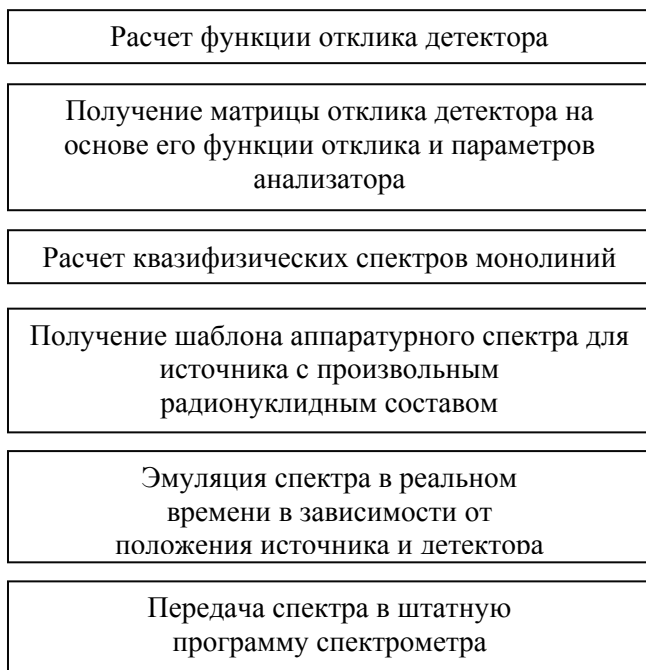


Рисунок 1. Функциональная схема комплекса GammaLab.

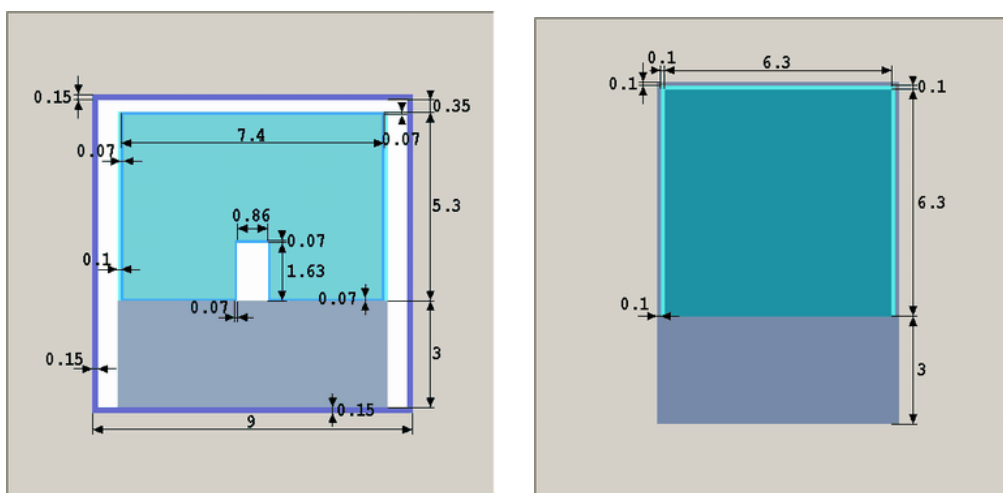


Рисунок 2. HPGe коаксиальный (слева) и сцинтилляционный (справа) детекторы.

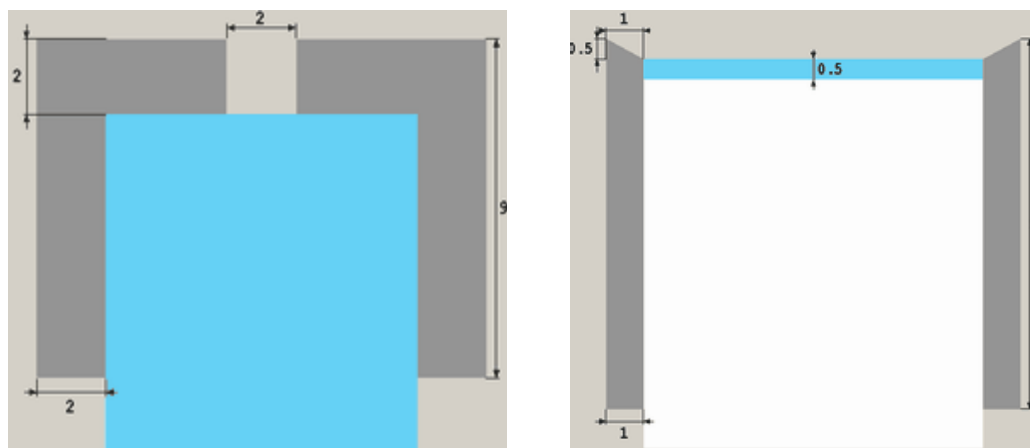


Рисунок 3. Модели коллиматоров: слева - коллиматор для защиты от окружающего фона, справа - коллиматор для снижения входной загрузки в случае измерения высокоактивных образцов.

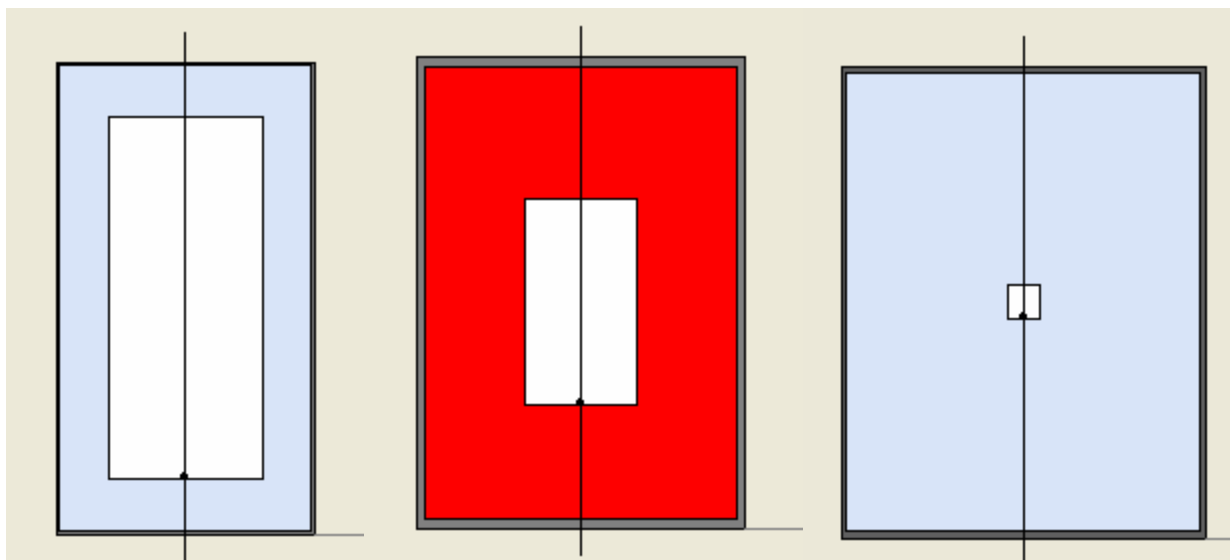


Рисунок 4 Схематичные изображения контейнеров КТ1-10, КИЗ-0.5 и КТ 1-0.3\0090 с точечным гамма-источником.

С помощью GammaLab могут производиться расчеты модельных гамма-спектров, как для точечных, так и объемных цилиндрических источников излучения. Имеется возможность рассмотрения важных с точки зрения практики ситуаций расположения источника в многослойном защитном контейнере. Как и в случае детектора и коллиматора, специальная графическая оболочка позволяет специфицировать геометрические размеры и материалы источника и оболочек контейнера. На рис.4 приведено несколько примеров имитации расположения точечного гамма-источника в реальных транспортных контейнерах.

Процесс моделирования гамма-спектров с помощью GammaLab состоит из двух этапов. На первом этапе генерируются так называемые шаблоны спектров - набор гамма-спектров, рассчитанных для данного радионуклидного состава источника излучения и данной геометрии измерения, включающей геометрию источника, контейнера, детектора и коллиматора. Шаблоны рассчитываются для совокупности точек пространства вокруг источника и набора ориентаций детектора в каждой такой точке. Также учитываются характеристики энергетической шкалы и энергетического разрешения виртуального гамма-спектрометра. На втором этапе на основе полученных шаблонов производится моделирование гамма-спектра в реальном времени для конкретного расположения и взаимной ориентации детектора и источника с отображением процесса набора спектра в штатной спектрометрической программе (SpectraLine [1]).

## 1.2. Расчет шаблонов гамма-спектров

В основу методики расчета шаблонов положен метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), как наиболее адекватный для решения данной задачи [2]. Примененная схема расчета схематически представлена на рис.5. Она базируется на оптимизированном подходе [3],

который позволяет использовать один и тот же набор стандартизованных функций отклика детектора для моделирования спектров от произвольных источников излучения.

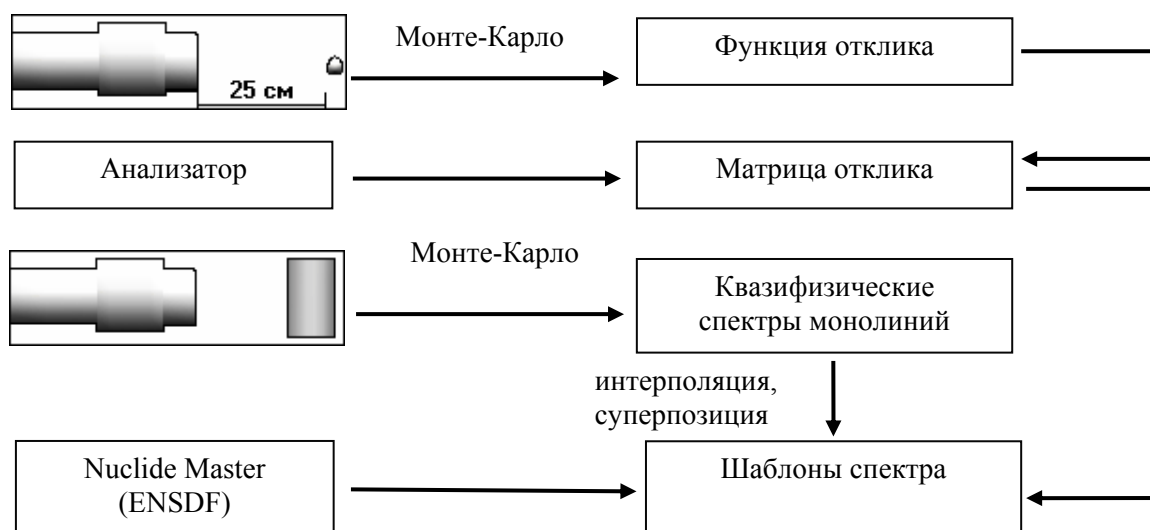


Рисунок 5. Схема расчета шаблонов спектров.

Вначале с использованием имитационной схемы Монте-Карло производится расчет нормализованных функций отклика детектора для стандартизованной геометрии измерения - точечный источник расположен на оси вращения детектора на расстоянии 25 см от его входного окна. Функции отклика рассчитываются для заданного энергетического диапазона (по умолчанию 30 кэВ - 3 МэВ) и логарифмической/линейной сетки по энергии регистрируемых гамма-лучей. В каждой расчетной точке функция отклика представляет собой совокупность эффективностей регистрации по пику полного поглощения, пику одиночного и двойного вылета, пику 511 кэВ, пику вылета рентгеновских характеристических квантов, а также параметров кусочно-непрерывной полиномиальной аппроксимации формы непрерывного комптоновского распределения. Транспорт фотонов производится с учетом основных типов взаимодействия - когерентного рассеяния, фотоэффекта, эффекта образования пар и комптоновского рассеяния. Для ускорения расчетов применяется моделирование источника по ценности, когда испускание гамма-лучей моделируется в пределах телесного угла детектора. На основе полученных функций отклика и параметров анализатора (число каналов, цена канала и энергетическое разрешение по линиям 122 кэВ и 1.33 МэВ) рассчитывается матрица отклика детектора с шагом по энергии, равным энергетической цене канала анализатора.

Далее методом Монте-Карло рассчитываются квазифизические спектры излучения для заданного диапазона энергий гамма-лучей, для заданной энергетической сетки и для заданного набора точек расположения спектрометра (детектор + коллиматор) и его ориентаций

относительно источника (контейнер + образец). Квазифизические спектры представляют собой свертку реального физического спектра излучения, испускаемого контейнеризованным источником, и полной эффективности регистрации детектирующей системы. Для увеличения эффективности моделирования используется локальная оценка потока фотонов в месте расположения детектора (метод точечного детектора), при котором учитывается вклад каждого фотона, испущенного источником, и каждого фотона, претерпевшего взаимодействие. При расчете спектров для сильноэкранированных источников дополнительно применяется еще один метод уменьшения дисперсии - т.н. экспоненциальное преобразование [2]. Квазифизические спектры в каждой расчетной точке, характеризуемой энергией гамма-лучей, взаимным положением и ориентацией спектрометра и источника, представляют собой совокупность интенсивностей прямого (нерассеянного) излучения источника, интенсивностей аннигиляционного излучения, а также параметров кусочно-непрерывной полиномиальной параметризации непрерывного распределения рассеянных фотонов.

По окончании Монте-Карловских расчетов с использованием разработанных процедур интерполяции производится суперпозиция квазифизических спектров монолиний в соответствии с интенсивностями линий излучения источника для получения суммарного спектра. Интенсивности линий излучения рассчитываются для заданной активности и радионуклидного состава источника на основе оригинальных данных библиотеки оцененных ядерных данных по структуре ядра ENSDF, содержащихся в пакете NuclideMaster [4]. Полученный суммарный квазифизический спектр далее сворачивается с матрицей отклика детектора для получения шаблона аппаратурного спектра для заданных параметров спектрометра (детектор + коллиматор + анализатор) и источника (контейнер + образец + радионуклиды). Данная процедура выполняется для каждой расчетной точки пространства и каждой ориентации детектора относительно источника.

### **1.3. Моделирование аппаратурных гамма-спектров в реальном времени**

Для моделирования аппаратурных спектров в реальном времени используется алгоритм быстрого моделирования, который заключается в перенормировке рассчитанных шаблонов с учетом конкретного положения и ориентации спектрометра относительно источника излучения. Поскольку в общем случае они отличаются от положения и ориентации спектрометра, для которых были проведены расчеты, применяется специальная процедура интерполяции и перенормировки шаблонов. Перенормировка заключается в учете фактического расстояния между источником и детектором, а также оценке относительной части видимой поверхности источника при заданном положении и ориентации спектрометра с учетом области видимости используемого коллиматора.

Процесс генерации аппаратурного спектра в реальном времени схематически показан на

рис.6. На макете рабочего места оператора отображаются детектор и измеряемый источник (один или несколько). Трехмерная графика позволяет оператору имитировать перемещение детектора и источников, а также задавать удобную ориентацию рабочего стола. После генерации "идеального" аппаратного спектра с помощью описанного выше алгоритма быстрого моделирования, он преобразуется в "реальный", учитывающий условия проведения измерений и текущее состояние аппаратуры. Разработанные алгоритмы генерации "реального" спектра позволяют имитировать статистический процесс накопления спектра, влияние окружающего радиационного фона (в том числе и от других источников), а также состояние аппаратуры и соответствующие аппаратурные эффекты (уширение пиков, сдвиг пиков, шумы электроники, просчеты) в зависимости от загрузки, времени прогрева аппаратуры и наличия/отсутствия высокого напряжения. Полученный "реальный" спектр передается в штатную программу спектрометра с использованием протокола передачи спектрометрических данных в окно анализатора, реализованный с помощью средств операционной системы (технология открытого интерфейса). На Рис. 7 показан процесс эмуляции набора спектра источников Cs-137 в контейнере КТ1-10 и Cs-137 в контейнере КТ1-5 сцинтилляционным детектором.

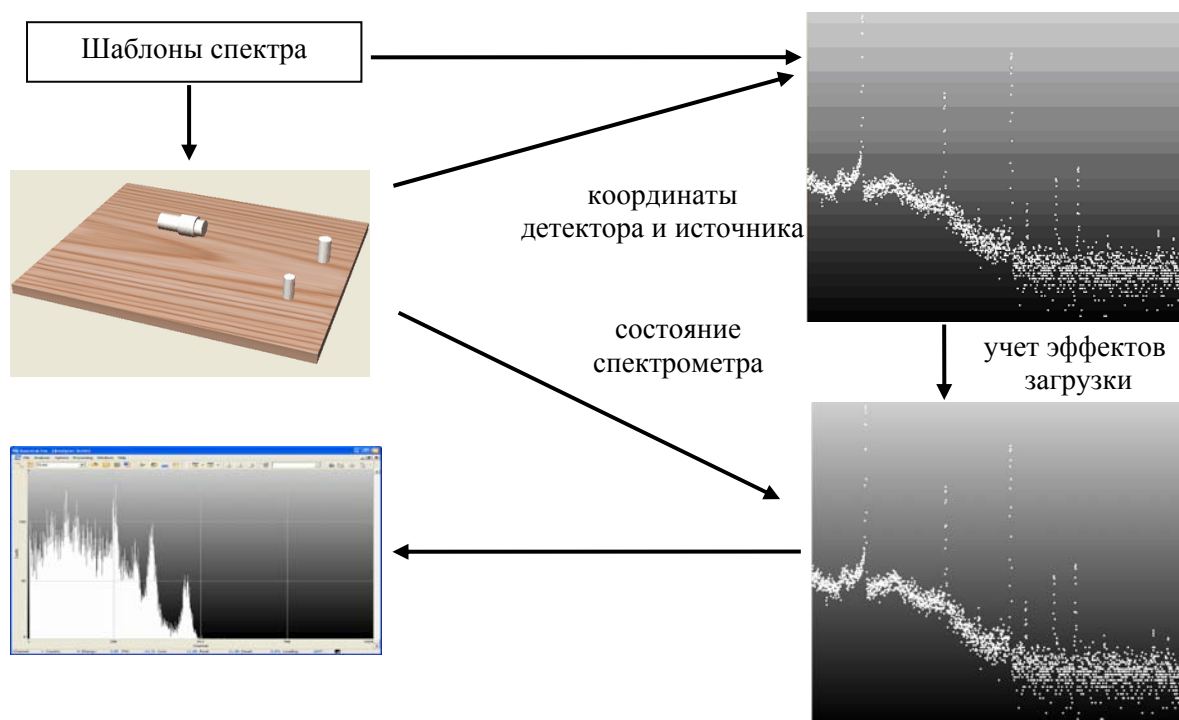


Рисунок 6. Схема моделирования аппаратурных спектров в реальном времени.

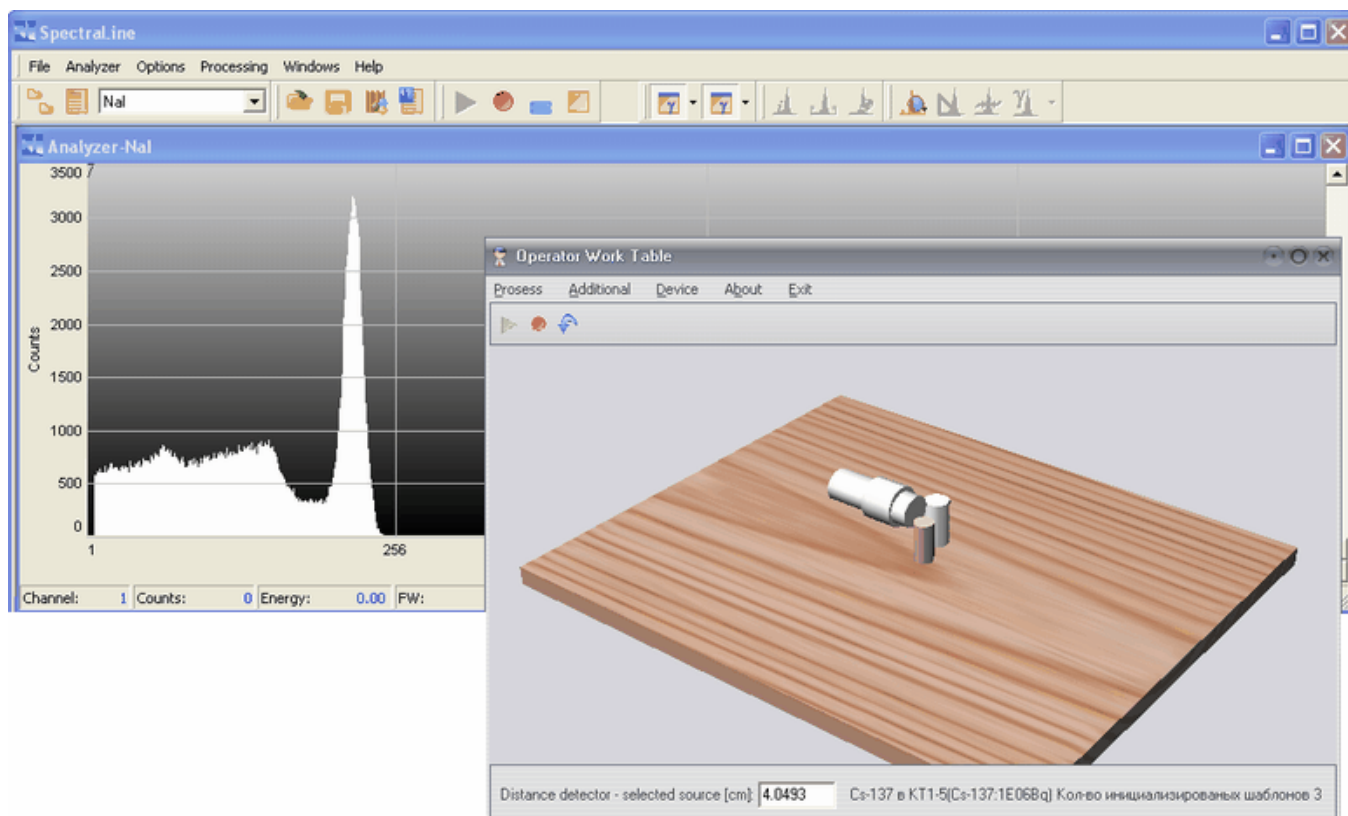


Рисунок 7. Эмуляция спектра источника Cs-137 в режиме реального времени.

## 2. Практические вопросы применения эмуляции гамма-спектров

### 2.1. Калибровочные процедуры

Моделирование аппаратурных гамма-спектров представляется особенно перспективным при анализе сложных гамма-спектров, требующих знания функции отклика детектора в широком диапазоне энергий. Такая потребность возникает при применении методов обработки спектров, использующих полную форму линии, либо при обработке непрерывных гамма-спектров. При анализе сцинтилляционных спектров существенную роль играет также правильное описание комптоновского распределения, форму которого трудно однозначно оценивать по измеренному спектру. Важное практическое применение модельных спектров связано с использованием метода обработки на основе эталонных гамма-спектров. Экспериментальное получение эталонных спектров для ряда важных прикладных задач практически невозможно. В частности, это касается гамма-спектров для отдельных радионуклидов, находящихся в цепочке распадов. В ряде случаев тяжело получить эталонные спектры для чистых радионуклидов, особенно короткоживущих, например, изотопов йода. Все это сильно ограничивает возможности метода эталонных спектров.

Следует подчеркнуть, что получение функции отклика детектора в широком диапазоне энергий представляет не тривиальную экспериментальную задачу. Прежде всего это связано с тем, что число приемлемых для целей калибровки радионуклидов, имеющих условно моноэнергетическое излучение - ограничено (это хорошо известные источники из набора ОСГИ -

Am-241, Ce -139, Hg-203, Sn-113, Cs-137, Mn-54, Zn-115), а получение функций отклика с использованием многореперных источников требует применения сложных интерполяционных процедур, которые вносят дополнительную неопределенность. В то же время, расчет функций отклика и получение эталонных спектров возможно с применением программного комплекса GammaLab. Это, однако, требует применения верифицированной математической модели детектора, для чего необходима разработка специальной процедуры.

В качестве примера на рис.8 представлен набор функций отклика в диапазоне 300-2500 кэВ для случая точечного источника и сцинтилляционного спектрометра на основе кристалла NaI (63×63 мм). На рис.9 приведен модельный аппаратурный спектр радионуклида Eu-152 в сравнении с реальным спектром, полученным для этого же детектора.

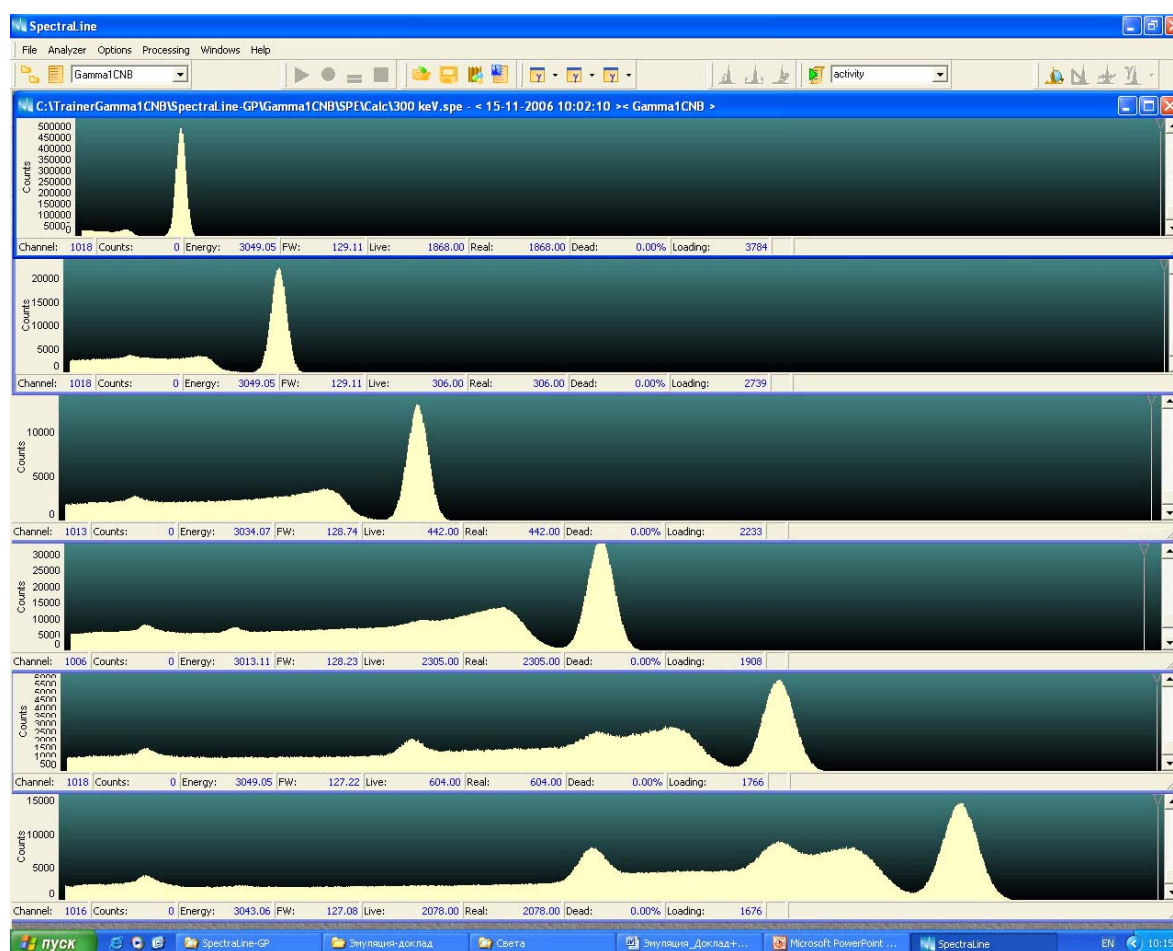


Рисунок 8. Функции отклика для точечного источника и детектора на основе кристалла NaI (63×63 мм), рассчитанные с помощью программного комплекса GammaLab.



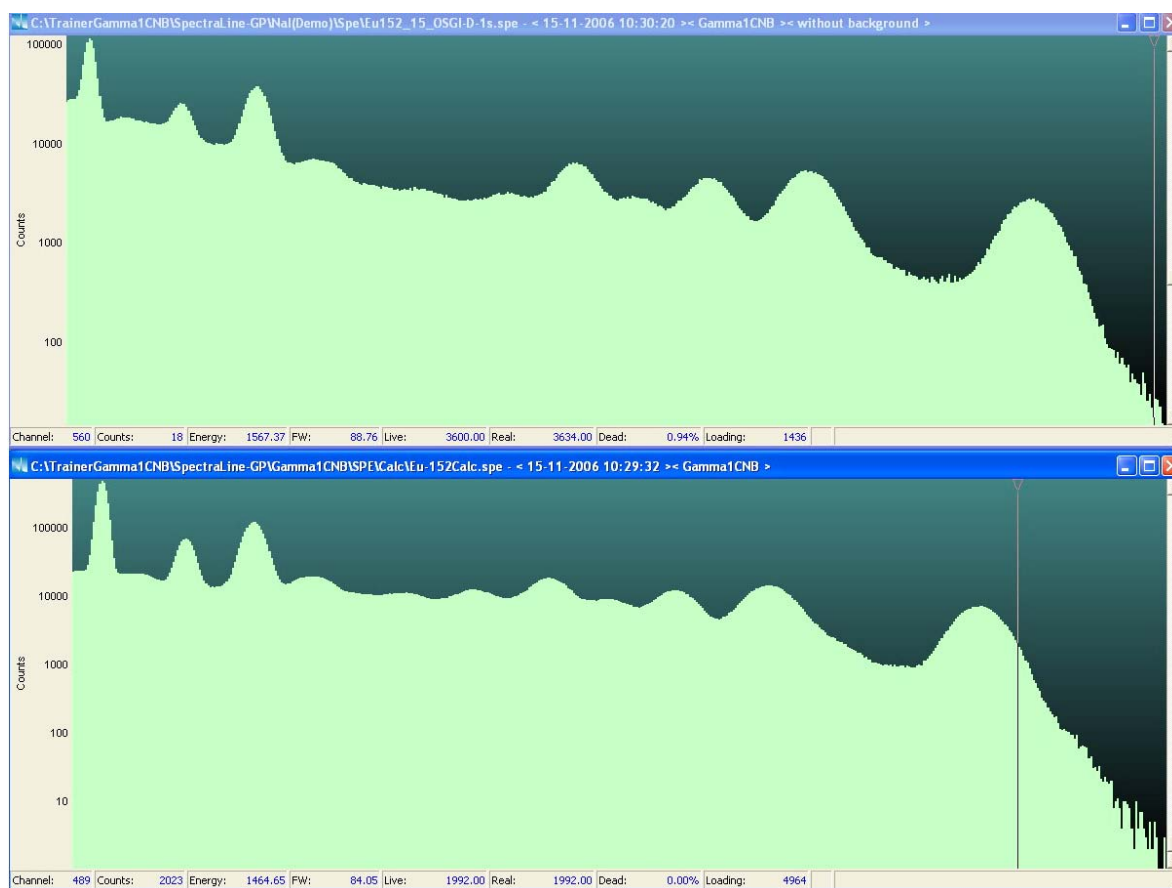


Рисунок 9. Модельный и реальный спектры Eu-152.

## 2.2. Тестирование программ обработки гамма-спектров

Практически важной областью применения пакета GammaLab, может, по-видимому, быть тестирование методов, алгоритмов и программ обработки линейчатых гамма-спектров. Традиционный подход к тестированию имеет ряд недостатков, среди которых:

- Требуется наличие стандартных сертифицированных калибровочных образцов с заданным радионуклидным составом и свойствами матрицы.
- Результаты тестирования часто зависят от выбора аппаратуры, так как на измеренный гамма-спектр налагаются неконтролируемые аппаратурные эффекты.

В то же время, с помощью пакета GammaLab можно подготовить набор тестовых спектров для различных источников, типов детекторов и условий измерения. Применение таких спектров для целей тестирования программ обработки имеет ряд очевидных преимуществ:

- Модельные спектры лишены неконтролируемых аппаратурных эффектов. С другой стороны эти эффекты могут быть наложены контролируемым образом.
- Могут быть смоделированы спектры для источников с произвольным точно заданным радионуклидным составом и активностью, чего нельзя сказать о реальных образцах.
- Единообразно могут быть получены как калибровочные спектры, так и спектры измеряемых

образцов с нужными свойствами (плотность, материал).

### 2.3. Процесс обучения

Программный комплекс GammaLab может использоваться для обучения работе со спектрометрическими устройствами. В состав комплекса входит программная оболочка WorkMaster, предназначенная для формирования и выполнения заданий в режиме администратора или оператора. Задание представляет собой запись, содержащую перечень образцов и их начальные координаты на рабочем столе, демонстрационный видеоролик и комментарии.

В режиме администратора WorkMaster позволяет создавать новые задания, дополняя или изменяя базу шаблонов гамма-спектров. В режиме оператора из предлагаемого списка выбирается существующее задание, после чего отображается рабочий стол и запускается штатная программа спектрометра. После запуска анализатора в режиме реального времени эмулируется набор спектра. Пример работы GammaLab в режиме обучения для случая точечного источника Th-232 и полупроводникового детектора представлен на рис.10.

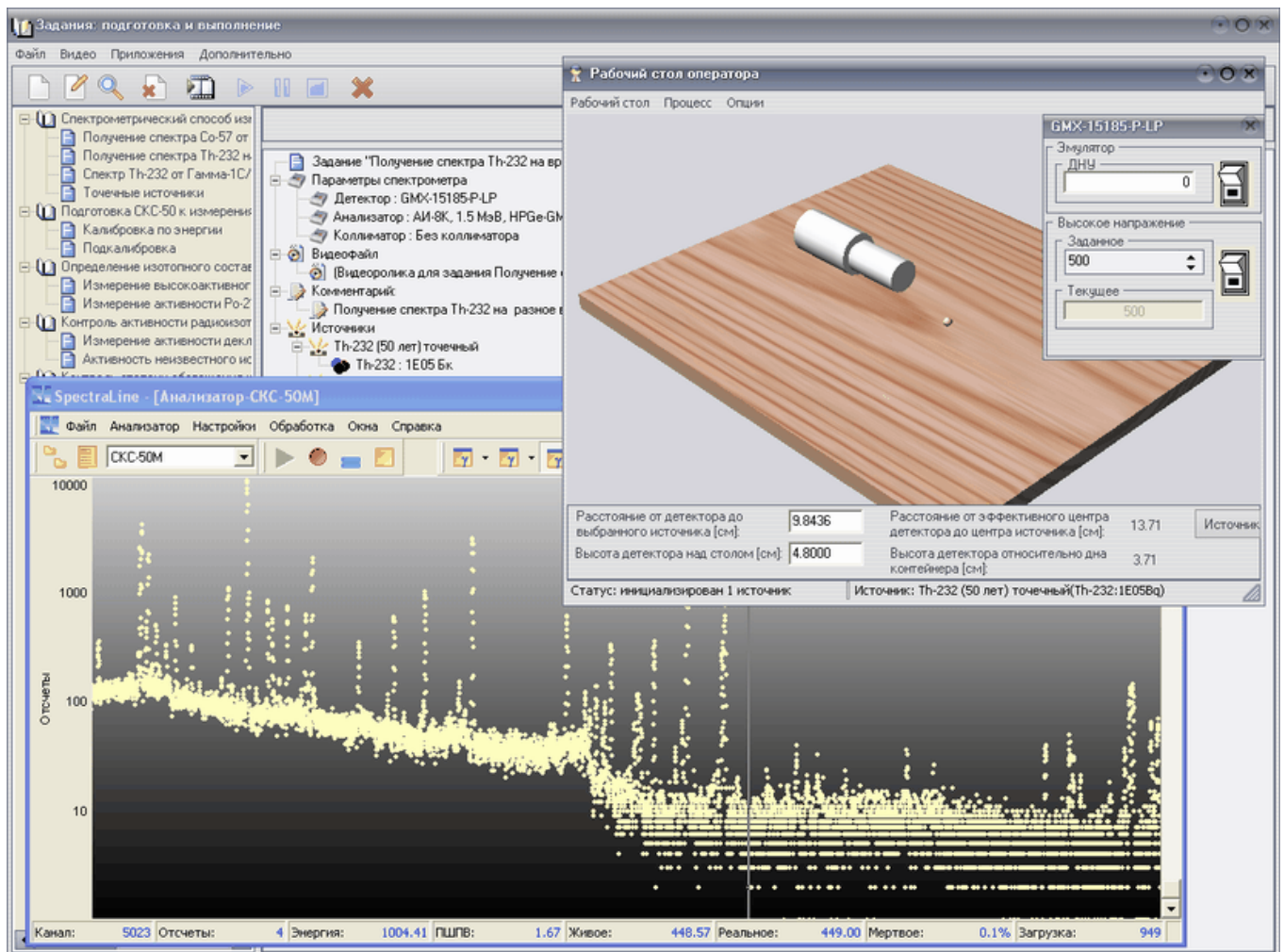


Рисунок 10. Оболочка программы WorkMaster.

## Список литературы

- [1] В.Н. Даниленко, Е.А. Ковальский, С.Ю. Федоровский, А.Ю. Юферов, “LSRM” – пакет прикладных программ для спектрометрического анализа. Состояние и перспективы. Тезисы V Международного совещания «Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии», Дубна, 2001, см. также <http://www.lsrn.ru>.
- [2] Н.Г. Гусев, В.А. Климанов, В.П. Машкович, А.П. Суворов, Защита от ионизирующих излучений, т.1, Физические основы защиты от излучений, под ред. Н.Г. Гусева, М.: Энергоатомиздат, 1989, 512 с.
- [3] J. Tickner, On the choice of estimators for the use with universal detector response functions, presented at Conference "Monte Carlo Method: Versatility Unbounded in a Dynamic World", Chattanooga, Tennessee, April 17-21, 2005, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL (2005).
- [4] Пакет программ LSRM-2000. Руководство пользователя. – п. Менделеево Солнечногорского р-на Московской обл.: ГП “ВНИИФТРИ”, ООО “ЛСРМ”, см. также <http://www.lsrn.ru>.