

# Обзор отечественных радиометрических и спектрометрических систем, которые могут быть использованы для целей учета и контроля ядерных материалов

## Содержание

Обозначения и сокращения.....	3
Введение .....	4
1 Сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы гамма и рентгеновского излучения.....	6
1.1 Неорганические сцинтилляторы .....	6
1.1.1 Монокристалл $NaI(Tl)$ .....	6
1.1.2 Йодид цезия $CsI(Tl)$ и $CsI(Na)$ .....	7
1.1.3 Ортогерманат висмута $BGO$ .....	8
1.1.4 Фториды ( $BaF_2$ , $CaF_2-Eu$ ).....	9
1.1.5 Иттрий алюминидные оксиды ( $YAP$ ).....	11
1.1.6 Оксид бериллия $BeO$ .....	11
1.1.7 Галогениды лантана $LaBr_3(Ce)$ , $LaCl_3(Ce)$ .....	12
1.1.8 Оксид цинка $ZnO$ .....	14
1.1.9 Силикат лютеция $Lu_2SiO_5:Ce$ .....	15
1.1.10 Вольфрамат кадмия $CdWO_4$ .....	17
1.2 Органические сцинтилляторы .....	18
1.3 Жидкие сцинтилляторы.....	20
1.4 Нанокристаллические сцинтилляторы.....	21
1.5 Ксеноновые гамма-камеры .....	23
1.6 Полупроводниковые детекторы .....	26
1.6.1 Германиевые ППД .....	26
1.6.2 Арсенид галлия $GaAs$ .....	28
1.6.3 Теллурид кадмия $CdTe$ .....	29
1.6.4 Диодид ртути $HgI_2$ .....	32
2 Детекторы нейтронного излучения.....	34
3 Газовые счётчики.....	37
3.1 Газонаполненные счётчики.....	37
3.2 Детекторы излучений на основе газовых электронных умножителей .....	38
4 Твердотельные ФЭУ (фотодиоды).....	39
4.1 Лавинный фотодиод .....	39
4.2 Кремниевый фотоэлектронный умножитель .....	40
4.3 PIN фотодиод.....	42
4.4 Металл-диэлектрик полупроводниковый фотодиод .....	43
4.5 Сравнение детекторов вторичного излучения .....	44
4.6 Сцинтилляторы, используемые в комбинации с фотодиодом .....	44
5 Спектросмещающие световоды.....	45
6 Заключение по детекторам.....	45
7 Российские гамма-спектрометры .....	47
7.1 НПП «Доза» г. Зеленоград .....	47
7.1.1 Гамма-спектрометр сцинтилляционный «Прогресс-гамма».....	47
7.1.2 Гамма-спектрометр полупроводниковый «Прогресс-ППД».....	48
7.1.3 Программный комплекс "Прогресс-2000".....	49
7.1.4 Спектрометрический комплекс "МУЛЬТИРАД" с программным обеспечением "ПРОГРЕСС". НТЦ «Амплитуда» г. Зеленоград.....	49
7.2 ЗАО НТЦ «Аспект» г. Дубна .....	51
7.2.1 Спектрометр энергии гамма-излучения сцинтилляционный ГАММА-1С.....	51
7.2.2 Спектрометр энергии гамма-излучения полупроводниковый ГАММА-1П.....	52
7.2.3 Анализаторы серии АИ на базе ПК.....	54

	2
7.2.4 Программное обеспечение .....	55
7.3 ООО «Парсек» г. Дубна .....	56
7.3.1 Спектрометрические аналого-цифровые преобразователи .....	56
7.4 ЗАО "Техноэксан" г. Санкт-Петербург.....	59
7.4.1 Многоканальный анализатор амплитуд импульсов МСА .....	59
7.4.2 Программное обеспечение .....	61
7.5 НТЦ «Радэк» г. Санкт-Петербург.....	61
7.5.1 Спектрометр гамма-излучений РКГ-1К.....	61
7.5.2 Спектрометр-радиометр МКГБ-01 .....	61
7.5.3 Программа AScinti-W .....	62
7.6 ЦНИИ робототехники и технической кибернетики г. Санкт-Петербург.....	62
7.6.1 Полевой гамма-спектрометр .....	62
7.6.1 Гамма-спектрометр поисковый ГСП-01 .....	63
7.7 Группа предприятий «Грин Стар» г. Москва.....	64
7.7.1 Комплексы спектрометрические СКС-07П_Г1...36.....	64
7.7.2 Комплекс спектрометрический СКС-07П_Г37...48.....	65
7.7.3 Специализированные комплексы спектрометрические СКС-07П-Г .....	66
7.7.4 Процессор импульсных сигналов SBS-75 .....	70
7.7.5 Процессор импульсных сигналов SBS-70 .....	71
7.7.6 Процессоры импульсных сигналов SBS-77, SBS-78 и SBS-79.....	72
7.7.8 Процессор импульсных сигналов «Колибри».....	74
7.7.9 Специализированное программное обеспечение.....	75
7.8 Сравнительный анализ гамма-спектрометров.....	77
7.8.1 Сравнительный анализ гамма-спектрометров российских производителей по техническим характеристикам.....	77
7.8.2 Сравнительный анализ гамма – спектрометров российских производителей.....	78
8 Современные российские радиационные мониторы.....	81
8.1 Научно производственный центр "Аспект", г. Дубна .....	81
8.2 ОСРК, РНЦ «Курчатовский институт», г. Москва .....	82
8.3 ЗАО «СНИИП-КОНВЕЛ», г. Москва .....	83
8.4 ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская область. ....	84
8.5 ФГУП ВНИИА им. Н. Л. Духова, г. Москва .....	86
9 Алгоритмы обработки данных радиационных мониторов .....	87
9.1 Критерий Неймана-Пирсона .....	88
9.2 Метод скользящего среднего .....	90
9.3 Критерий отношения правдоподобий .....	91
9.4 Цифровой рекурсивный фильтр .....	92
9.5 Метод априорной вероятности .....	93
9.6 Метод полусумм.....	94
9.7 Метод относительной дисперсии .....	95
Использованные литературные источники .....	96

## Обозначения и сокращения

АЦП – амплитудно-цифровой преобразователь;

БД – блок детектирования;

ГС - гамма-спектрометры;

г. э. у. – газовый электронный умножитель (Gas Electron Multiplier);

ЖС - жидкие сцинтилляторы;

МДП - металл-диэлектрик полупроводник;

ОЧГ – особо чистый германий;

ПК – персональный компьютер;

ПМ – органические и пластмассовые сцинтилляторы;

ПО - программное обеспечение;

ППД - полупроводниковые детекторы;

ПШПВ (FWHM) - энергетическое разрешение спектрометра, рассчитанная исходя из ширины аппаратного пика на половине его максимальной высоты;

РМ - радиационные мониторы;

СГУиК – система государственного учёта и контроля;

УиК – учёт и контроль;

ФД – фотодиод;

ФЭУ - фотоэлектронный умножитель;

ЯМ - ядерный материал;

$T$  – длительность сцинтилляции, соответствующее максимуму высвечивания сцинтиллятора;

$\tau$  – временная характеристика сцинтилляционного высвечивания;

$\lambda_{max}$  – максимальная длина волны спектра высвечивания сцинтиллятора.

## Введение

В настоящее время ряд отечественных радиометрических и спектрометрических систем, применяемых в СГУиК, морально и физически устарели и требуют замены их, чтобы обеспечить выполнение требований УиК ЯМ и современных метрологических требований. Опыт показал, что эксплуатация иностранной аппаратуры вызывает проблемы при ее эксплуатации для целей УиК ЯМ, включая высокую стоимость такой аппаратуры, а также невозможность установить эту аппаратуру в зоны ограниченного доступа. Эта ситуация приводит к необходимости приоритетного оснащения предприятий Росатома российской аппаратурой, удовлетворяющей требованиям УиК ЯМ, а также чтобы обеспечить долговременное функционирование и живучесть систем УиК ЯМ на предприятиях Росатома.

Ключевыми элементами радиометрических и спектрометрических систем, используемыми для УиК ЯМ, являются детекторы излучений, системы накопления данных и алгоритмы анализа данных. В последнее время появились новые типы детекторов, которые могут быть использованы в современных приборах для измерений характеристик ЯМ. Оснащение существующих российских приборов современными российскими детекторами улучшит характеристики этих приборов и значительно повысит их пригодность для замены иностранных измерительных систем на российские.

Радиационные мониторы (РМ) и гамма-спектрометры (ГС) являются одними из основных средств учёта и контроля ядерных материалов. Гамма-спектрометры, традиционно представляя класс приборов аналитического контроля, в последние годы стремятся ассимилировать в состав радиационных мониторов. Развитие портальных технологий ведёт к реализации возможности идентификации ядерного материала (ЯМ) или радиоактивных источников в реальном времени за период контроля, осуществляемого с помощью радиационного монитора.

Радиационный монитор является средством контроля несанкционированного передвижения ядерных и других радиоактивных материалов и предназначен для обнаружения случайного, кратковременного, слабого превышения контролируемого сигнала над уровнем фона. Наиболее существенный вклад в реализацию максимальной чувствительности РМ вносят эффективность детекторов, регистрирующих излучения радиоактивных материалов, и мощность используемых алгоритмов статистической обработки данных.

За рубежом разработка и изготовление первых РМ датируется началом 70-х. За это время разные разработчики использовали в своих вариантах РМ различные алгоритмы статистической обработки, но в основном узкий круг детекторов, ограниченный кристаллами  $\text{NaI(Tl)}$ , пластмассовыми сцинтилляторами и  $^3\text{He}$  счётчикам нейтронов. С момента появления первых российских радиационных мониторов в конце 80-х годов прошлого столетия появился ряд новых алгоритмов обработки и средств детектирования, в том числе защищённых патентами.

Создание принципа амплитудно-временной трансформации в 1950 году дало практическую возможность построения одного из сложных приборов для измерения ионизирующих излучений –

многоканального анализатора. В конце 50-х годов в СССР был разработан промышленный многоканальный анализатор АИ-100. Предпосылки для совершенствования анализатора возникли с появлением полупроводниковых приборов – диодов, транзисторов, стабилитронов. Первые образцы промышленных отечественных гамма-спектрометров - приборов для исследования энергетического распределения гамма-излучения - выпущены в 1956 – 1958 гг. На данный момент, гамма - спектрометры представляют довольно сложные устройства, сосредоточившие накопленный опыт в микроэлектронике и вычислительной технике, базирующиеся на программируемых логических интегральных схемах, и содержащие быстродействующие спектрометрические детекторы. Следует отметить, что если на начальной стадии развития гамма – спектрометры создавались отдельными специалистами, то сейчас их разработка требует коллективных усилий групп специалистов – физиков, инженеров по электронике, конструкторов, программистов, метрологов и технологов.

Появление новых материалов и качественное улучшение уже существующих за последние два десятилетия позволило существенно расширить ряд детекторов гамма-квантов и нейтронов, которые уже используются в гамма-спектрометрах и возможность использования которых в радиационных мониторах ещё предстоит исследовать. Это - особо чистый германий,  $CdTe$ ,  $HgI_2$ ,  $BGO$ ,  $BaF_2$ ,  $LaBr_3$ ,  $LiGdBO$ ,  $CWO$ , микротрубки из органических сцинтилляторов и другие.

Обобщая преимущества новых материалов, можно сказать, что они охватывают все основные технические характеристики детектора – энергетическое разрешение, эффективность регистрации, возможность и удобство обработки, доступность и стоимость. Некоторые из новых возможностей уже реализованы в серийном производстве. Однако, многие известны лишь из отдельных публикаций. При этом информация о сравнительных характеристиках различных детекторов ограничена.

В последнее время в качестве регистраторов конкурентоспособными по сравнению с фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) становятся фотодиоды, используемые в качестве регистраторов вспышек в сцинтилляторе. Конкурентоспособность по сравнению с вакуумным ФЭУ достигается благодаря высокому квантовому выходу, более низкому рабочему напряжению, большей стабильности, механической прочности. Возможность использования системы сцинтиллятор-фотодиод в гамма-спектрометрах уже реализуется, чего нельзя сказать о радиационных мониторах.

Обзор и анализ новых детекторов, средств регистрации сцинтиллятор-фотодиод, алгоритмов обработки информации, а также серийно выпускаемых блоков детектирования, гамма-спектрометров и радиационных мониторов являются предметом данной работы. Некоторые из хорошо и давно известных сцинтилляторов, например,  $LiI(Tl)$ ,  $LiI(Eu)$ , антрацен, нафталин, стильбен,  $ZnS(Ag)$  в данной работе не рассматривались.

## 1 Сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы гамма и рентгеновского излучения

### 1.1 Неорганические сцинтилляторы

Сцинтилляционные детекторы на базе неорганических монокристаллов являются классическими детекторами, используемыми при регистрации гамма и рентгеновского излучения. Ранний период развития теории и практики использования сцинтилляторов освещен в монографии Биркса [1]. Основной областью применения этих кристаллов - гамма-спектрометрия низких энергий до 3 МэВ и прикладные радиометрические измерения.

В 70-х годах неорганические сцинтилляторы стали вытесняться из спектрометрии низких энергий более прецизионными полупроводниковыми детекторами. Однако, неорганические сцинтилляторы остаются вне конкуренции при регистрации малых потоков частиц, не требующих большого разрешения, в спектрометрических детекторах больших размеров и многоканальных спектрометрических установках с 4 $\pi$ -геометрией.

Монокристаллы  $NaI(Tl)$  и  $CsI(Tl)$  и сейчас являются базовыми детекторами гамма и рентгеновского излучения, используемыми для решения прикладных задач на основе ядерно-физических методов анализа и контроля, не смотря на появление новых перспективных сцинтиллирующих материалов. Их характеристики достаточно хорошо известны и широко представлены [2,3].

#### 1.1.1 Монокристалл $NaI(Tl)$

Монокристаллический йодистый натрий, активированный таллием, открыт Р.Хофштадтером более пятидесяти лет назад. Этот сцинтиллятор отличается высоким световыходом — на образование одного фотона в нем затрачивается около 25 эВ. Спектр люминесценции хорошо согласуется со спектральной чувствительностью стандартных фотокатодов ФЭУ. Монокристалл имеет высокую прозрачность к свету собственного излучения и сравнительно прост в изготовлении. Большим недостатком кристалла является его высокая гигроскопичность.

В комнатных условиях световыход  $NaI(Tl)$  максимален. Ниже 0 °С и выше 60 °С световыход существенно падает. Понижение температуры сопровождается ухудшением собственного разрешения монокристалла в результате возникновения неоднородности светового выхода. Отмечается [4], что в большей степени это проявляется с увеличением концентрации активатора, т.е. при низких температурах предпочтительна меньшая концентрация таллия. От температуры оказывается зависящим и время высвечивания сцинтиллятора. С ростом температуры оно уменьшается, сначала круто до 150 нс около 60°С, а затем более плавно до 100 нс [4].

Температурный коэффициент составляет 0,22 -0,5 %/°C и зависит от образца. При резком изменении температуры возможно разрушение кристалла.

Для небольшого кристалла энергетическое разрешение определяется в основном статистикой фотоэлектронов. Стандартным является измерение энергетического разрешения для фотонов с энергией 662 кэВ от радиоактивного источника  $^{137}\text{Cs}$ . Полученное на кристалле диаметром  $D = 25$  мм и высотой  $H = D$  наилучшее разрешение составило 5,6 % [5]. Обычно же разрешение составляет 6,5—7,5 % для кристаллов размером до  $D = H = 8$  см и 7,5—10 % — при больших размерах.

### 1.1.2 Йодид цезия $\text{CsI(Tl)}$ и $\text{CsI(Na)}$

Необходимость герметичной упаковки кристаллов  $\text{NaI(Tl)}$  вносит соответствующее ограничение на одновременное их применение в качестве детекторов гамма-квантов, а также заряженных частиц низких энергий. В этом отношении предпочтителен монокристалл  $\text{CsI(Tl)}$ , который почти негигроскопичен. Небольшие течи не приведут к разрушению монокристалла, как в случае  $\text{NaI(Tl)}$ . Однако при длительном использовании  $\text{CsI(Tl)}$  должен быть изолирован в сухую окружающую среду.

Пластическая природа йодистого цезия обеспечивает легкость его механической обработки, в противоположность тенденции йодистого натрия раскалываться или трескаться при механических или тепловых ударах. Использование йодида цезия позволяет изготавливать детекторы самых разнообразных форм и размеров.

Спектр излучения  $\text{CsI(Tl)}$  имеет максимум при  $\lambda = 550$  нм и плохо согласуется с характеристикой стандартного фотокатода S-11. С таким фотокатодом амплитуда сигнала от  $\text{CsI(Tl)}$  составляет обычно 45 % от амплитуды сигнала, получаемого от  $\text{NaI(Tl)}$ . Для  $\text{CsI(Tl)}$  более подходит фотокатод типа S-20. При большей чувствительности фотокатода в зеленой области и постоянной времени формирования сигнала порядка 5 мкс его амплитуда увеличивается до 85 %. Необходимость в такой длительности сигнала возникает из-за большого времени высвечивания кристалла (~1 мкс), что является, конечно, недостатком данного сцинтиллятора.

Сцинтилляционная эффективность  $\text{CsI(Tl)}$  даже несколько выше, чем у  $\text{NaI(Tl)}$ . Согласно [6], при энергетических потерях 1 МэВ в  $\text{NaI(Tl)}$  образуется  $4 \cdot 10^4$ , а в  $\text{CsI(Tl)}$  —  $4,5 \cdot 10^4$  фотонов. Радиационная длина  $\text{CsI(Tl)}$   $X_0 = 1,85$  см, т.е. меньше, чем у  $\text{NaI(Tl)}$ .

Значительно лучше согласуется со спектральной характеристикой фотокатода S-11 кристалл, активированный не таллием, а натрием. При этом и время высвечивания уменьшается до 630 нс. Амплитуда импульса от  $\text{CsI(Na)}$  составляет 85 % амплитуды импульса от  $\text{NaI(Tl)}$  [7]. Более того, согласно [8], по сцинтилляционной эффективности первый из них не уступает второму, но  $\text{CsI(Na)}$  гораздо менее гигроскопичен, чем  $\text{NaI(Tl)}$ . Недостатком  $\text{CsI(Na)}$  и  $\text{CsI(Tl)}$ , как и  $\text{NaI(Tl)}$ ,

является довольно высокое послесвечение — до 5 % через 3—6 мс, что значительно ограничивает скорость счета.

Энергетическое разрешение  $CsI(Tl)$  хуже, чем у  $NaI(Tl)$  на 3-5 % при одинаковых условиях измерения.

Иодит цезия имеет чрезвычайно низкий уровень собственной радиоактивности.

Технология изготовления иодидов цезия, особенно  $CsI(Tl)$ , не отличается большой сложностью.  $CsI(Tl)$  относительно дешёв, в том числе и при больших размерах.

### 1.1.3 Ортогерманат висмута $BGO$

Химическая формула этого сцинтиллятора [9,10], именуемого обычно  $BGO$ , -  $Bi_4Ge_3O_{12}$ . В монокристалле центрами свечения являются ионы висмута и они не нуждаются в активаторах. Главное достоинство  $BGO$  — его малая радиационная длина  $X_0$  — 1,13 см. При том же самом объеме кристалл  $BGO$  позволяет получить гораздо большую эффективность регистрации фотонов, чем рассмотренные выше кристаллы.

Спектр люминесценции кристалла несколько правее ( $\lambda_{\text{макс}} = 480$  нм), чем спектр чувствительности фотокатода S-11. Коэффициент преломления кристалла  $n = 2,13$  существенно выше, чем у стекла фотоумножителя. Оба эти фактора приводят к снижению количества фотоэлектронов.

Технической трудностью является также образование воздушных пузырьков внутри объема кристалла при его изготовлении. На пузырьках происходит рассеяние и, соответственно, потери света. По сравнению с  $NaI(Tl)$  количество фотоэлектронов от  $BGO$  может составлять от 8 % до 16 % в зависимости от качества кристалла и его размеров. Приведено даже значение 20 % [11].

Время высвечивания  $BGO$  при комнатной температуре составляет 300 нс, т.е. ненамного хуже, чем у  $NaI(Tl)$ . Однако в отличие от последнего послесвечение в миллисекундной области у  $BGO$  очень мало — 0,005%. Поэтому в целом  $BGO$  более быстродействующий, чем  $NaI(Tl)$ . Длительность световспышки  $BGO$  сильно зависит от температуры. При 0°C она составляет 400 нс, а при 40 °C - 200 нс. Сильна зависимость от температуры и для световыхода. Температурный коэффициент составляет 1,55 % /°C для комнатных условий [12]. Уменьшение температуры ниже 100 °K повышает световыход в 2 раза [13]

Значительно меньший результирующий световой выход  $BGO$  по сравнению с  $NaI(Tl)$  сопровождается соответственно ухудшением энергетического разрешения. К числу лучших результатов относится разрешение 9,3% по гамма-излучению  $^{137}Cs$  на кристалле фирмы Harshaw Ø 25x25 мм, полученном из дважды перекристаллизованного сырья [14]. Из-за недостаточной прозрачности кристаллов  $BGO$  к собственному излучению наблюдается существенная зависимость разрешения от их размеров. Так, если при размере Ø 25x25 мм разрешение было

10,5%, то в кристалле  $\varnothing 25 \times 100$  мм, изготовленном из того же сырья, разрешение составило 13,3 % [15]. Для кристалла  $\varnothing 50 \times 200$  мм получено разрешение 13 % [16].

Достоинствами *BGO* являются его хорошие механические свойства при обработке и негигроскопичность.

Показано [17], что детектор на основе кристалла *BGO* сравнительно небольших размеров  $\varnothing 75 \times 25$  мм<sup>2</sup> сопоставим по эффективности регистрации гамма-квантов с энергией 4-17 МэВ со сцинтиллятором *NaI(Tl)*  $\varnothing 150 \times 100$  мм<sup>2</sup>.

В работе [18] представлен один из возможных вариантов использования сцинтиллятора *BGO* вместе с *NaI(Tl)* и *CsI(Tl)* при поиске радиоактивных источников и определении направления, с которого происходит гамма-излучение.

Для учёта и контроля ЯМ *BGO* используют в технологии быстрого счётчика нейтронных совпадений [19]. Возможность использования сцинтиллятора *BGO* для регистрации одновременно гамма и нейтронного излучения показана в ряде исследований [20, 21]. При этом используется пластмассовый сцинтиллятор BC454, активированный бором и тонкие пластины *BGO*. На рисунке 1.1.1 представлен спектр гамма-излучения, полученный с таким детектором. При этом линия 478 кэВ соответствует регистрации в *BGO* излучения возбуждённого ядра  ${}^7\text{Li}$  реакции  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ . Линия 93 кэВ – соответствует поглощению  $\alpha$ -частицы и ядра лития в пластике BC454.

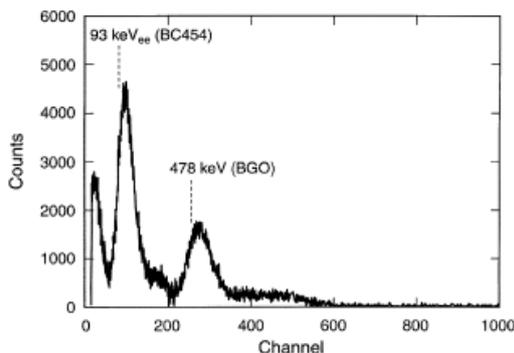


Рисунок 1.1.1 – Спектр гамма-излучения

Совпадение этих двух пиков позволяет судить о наличии нейтронного излучения, причём за время несколько микросекунд, что значительно меньше, чем можно зарегистрировать нейтроны  ${}^3\text{He}$ -счётчиками. Такой временной выигрыш весьма существенен в колодезных счётчиках нейтронных совпадений и позволяет уменьшить погрешность измерения массы урана с 26 до 7 % и «мёртвое время» счётчика с 52 до 3,7 мкс.

#### 1.1.4 Фториды (*BaF<sub>2</sub>*, *CaF<sub>2</sub>-Eu*)

##### Фторид бария *BaF<sub>2</sub>*

Для прецизионных временных измерений применяют обычно пластические сцинтилляторы, отличающиеся коротким временем высвечивания. Однако их радиационная длина велика 42 см, что ограничивает их применение при больших энергиях гамма-излучения.

Кристалл  $BaF_2$  имеет быструю компоненту 0,6 и 0,76 нс, что вывело сцинтилляционную  $\gamma$ -спектрометрию больших энергий на новый уровень развития [22].

Основная доля света сцинтилляций в  $BaF_2$  приходится на компоненту с  $\lambda_{\text{макс}} = 320$  нм, имеющую  $\tau = 620$  нс. Быстрая люминесценция происходит в области длин волн  $\sim 200$  нм. Для регистрации ультрафиолетового света требуется фотоумножитель с кварцевым стеклом. Коэффициенты преломления  $BaF_2$  и стекла достаточно близки друг к другу. Согласно [23] при 320 нм  $BaF_2$  имеет  $n = 1,495$ ; для  $\lambda = 200$  нм  $n = 1,63$ , а для кварца  $n = 1,53$  [24].

Приводимые в [25, 26, 27] данные по световому выходу кристалла весьма разноречивы. Это 8-30% от светового выхода  $NaI(Tl)$ . Кроме качества кристалла, на результатах измерений могут сказываться также технические трудности, возникающие при оценке световых выходов для разных спектральных диапазонов люминесценции. Световой выход  $BaF_2$  относительно  $NaI(Tl)$  можно принять равным 5 % для быстрой компоненты и 16% для медленной.

Кристалл обладает слабой гигроскопичностью. Для стабилизации световых выходов требуется герметизация кристалла. В работе [28] стенки кристалла были отполированы и покрыты, кроме светособирающей грани, белой пудрой  $Al_2O_3$ . Для покрытия используют также  $MgO$ , но наиболее популярной становится намотка тефлоновой ленты в несколько слоев (до  $\sim 0,3$  мм) [29]. В ультрафиолетовой области тефлон обеспечивает коэффициент отражения 0,95 [24].

Основным достоинством  $BaF_2$  является то, что с этим относительно тяжелым кристаллом может быть получено такое же временное разрешение, как и с пластическим сцинтиллятором. Так, на небольшом кристалле размером  $\varnothing 2 \times 1$  см от гамма-лучей радиоактивного источника  $^{60}Co$  получено временное разрешение 80 пкс [28]. Энергетическое разрешение монокристалла  $\varnothing 40 \times 20$  мм по линии 662 кэВ составляет 18 % [30].

### **Фторид кальция $CaF_2-Eu$**

Кристаллы  $CaF_2-Eu$  относятся к перспективным сцинтилляционным материалам при регистрации рентгеновского излучения и  $\beta$ -спектрометрии на фоне гамма- и нейтронного излучения [31].

Оптимальная концентрация примеси, обеспечивающая получение наибольшего выхода сцинтилляций, составляет 0,5-0,7 % по массе. Абсолютный энергетический выход составляет 50 % относительно  $NaI(Tl)$ . Спектр основного свечения согласуется со спектральной чувствительностью фотокатодов многих ФЭУ.

Влияние температуры на спектр свечения незначительно в диапазоне от  $-100$  до  $100$  °С. Кристаллы характеризуются низким уровнем послесвечения.

Спектр энергии гамма-излучения  $^{137}Cs$ , измеренный с помощью кристалла  $CaF_2-Eu$  характеризуется резким превышением комптоновского участка над фотопиком. Для уменьшения погрешности определения параметров фотопика необходимо набирать большую статистику при больших временах экспозиции – 20-30 мин. Энергетическое разрешение при этом – 9,5-10 %.

Тепловое тушение люминесценции и соответственно уменьшение светового выхода сцинтилляций начинается с 20 °С. Температурный коэффициент светового выхода составляет 0,4-0,5 %/°С [31].

В работе [32] сцинтиллятор  $CaF_2-Eu$  совместно с жидким сцинтиллятором успешно использован в двухкомпонентном фосвич счётчике, используемом для регистрации нейтронов и заряженных частиц.

### 1.1.5 Иттрий-алюминиевые оксиды (YAP)

Иттрий-алюминиевые оксиды - кристаллы  $Y_2Al_5O_{12}$  (гранат) и  $YAlO_3$  (перовскит, YAP) хорошо известны в лазерной технике [33]. Активация их церием (0,1 —1,0 вес. %) позволяет получить из них сцинтилляторы. По своим характеристикам он близок к  $CsI(Tl)$ , но со значительно большим быстродействием.

$Y_2Al_5O_{12}(Ce)$  имеет световой выход порядка 4 % от того, что имеет  $NaI(Tl)$ ,  $T = 70$  нс и  $\lambda_{max} = 550$  нм [34]. Световой выход  $YAlO_3(Ce)$  при концентрации  $CeO_2$ , равной 0,2 вес. %, составляет 40%,  $T = 28$  нс,  $n = 1,93$  и  $\lambda_{max} = 350-390$  нм [35,36]. Время высвечивания можно уменьшить в два раза дополнительной соактивацией ионами  $Yb$  (1 % вес.), но световой выход при этом падает до 6%. На люминесценцию кристаллофора  $Y_3Al_5O_{12}$  тушащее воздействие оказывают ионы  $Pb^{2+}$  [37].

В работе [38] получены монокристаллы высокого оптического качества размером 8x10x1,5 см. Кристаллы негигроскопичны, химически стойки и обладают высокими механическими качествами.

Детекторы на основе  $YAP:Ce$  обеспечивают высокое разрешение в области мягких гамма-квантов и рентгеновского излучения. Энергетическое разрешение для  $\alpha$ -частиц  $^{226}Ra$  с энергией 7687 кэВ составляет 2,5% и практически постоянно в широком диапазоне энергий [38].

Сцинтилляторы  $YAP:Ce$  могут быть перспективными при создании  $\alpha$ -спектрометров с хорошим энергетическим разрешением, низким уровнем фона и приемлемой стоимостью. Возможно также изготовление оптических микротрубок на основе этого сцинтиллятора.

### 1.1.6 Оксид бериллия $BeO$

Оксид бериллия находит широкое практическое применение благодаря хорошему сочетанию тепловых, механических, электрических и оптических свойств [39]. В радиационной технике  $BeO$  чаще используется в  $\alpha$  и  $\beta$ -спектрометрии.

Световой выход  $BeO$  оценивается как 40-75 % относительно световыхода  $CsI(Tl)$ . Кривая затухания сцинтилляций состоит из трёх компонент: 20 нс, 115 нс и 1,85 мкс [40].

Монокристаллы оксида бериллия активируются литием и натрием в виде вольфраматов. Содержание  $Li$  составляет  $(4-6) \cdot 10^{-2}$  мас. %,  $Na$  -  $2 \cdot 10^{-2}$  мас. %.

Сцинтилляционная эффективность  $BeO(Li)$  и  $BeO(Na)$  немного отличаются для  $\alpha$  и  $\beta$ -излучения. Активация литием даёт преимущества при регистрации  $\alpha$ -частиц, для  $\beta$ -излучения небольшое преимущество у  $BeO(Na)$ .

В монокристаллических образцах ярко проявляется термостимулированное спонтанное свечение, что обуславливает их использование в качестве термолюминесцентных детекторов ионизирующих излучений.

### 1.1.7 Галогениды лантана $LaBr_3(Ce)$ , $LaCl_3(Ce)$

В 2001 г. корпорацией Saint-Gobain (Франция) была запатентована (международные патенты WO 01/60944, WO 01/60945) новая группа сцинтилляционных кристаллов – галогениды лантана допированные церием  $LaBr_3(Ce)$  и  $LaCl_3(Ce)$ . Возможность коммерческого изготовления кристаллов  $LaBr_3(Ce)$  и  $LaBr_3(Ce)$  больших размеров в последнее время является наиболее значимым достижением современных технологий в приложении к сцинтилляционным методам регистрации ионизирующих излучений. Сочетание превосходных спектрометрических свойств с хорошими счётными свойствами этих сцинтилляторов позволили специалистам даже задать вопрос: не устарел ли традиционный кристалл  $NaI(Tl)$ ? [41].

$LaBr_3$  действительно не только не уступает, а по некоторым параметрам превосходит  $NaI(Tl)$ . Кристаллы выращиваются относительно больших размеров [42] с использованием технологий синтеза Чохральского (Czochralsky) и Bridgman. В работе [42] исследуются кристаллы  $LaBr_3(Ce)$ , выращенные по методу Bridgman с использованием наноматериалов  $LaBr_3$  и  $CeBr_3$  с 99,99 % степенью очистки. Температура плавки кристаллов составляла 783 °С плотность кристалла - 5,3 г/см<sup>3</sup>. Максимум эмиссии спектра сцинтиллятора  $LaBr_3$  приходится на 350 нм.

В работе [43] для кристаллов размером 5x5 и высотой 4 и 5 мм энергетическое разрешение для энергии фотонов 140 кэВ было получено 7,5 %, а для кристалла высотой 10 мм 12 %.

В более поздних работах кристаллы с разным процентным содержанием церия 0,2-10 % имеют лучшее энергетическое разрешение, которое находится в диапазоне 2,9-3,9 % [44].

Наилучшее разрешение 2,8 % для энергии фотонов 662 кэВ было получено в работе [45].

Промышленные образцы спектрометров на основе  $LaBr_3(Ce)$  имеют энергетическое разрешение для энергий гамма-излучения более 350 кэВ приблизительно вдвое меньше энергетического разрешения детекторов на основе традиционных кристаллов  $NaI(Tl)$  аналогичного размера. Эффективность регистрации на 10 - 70 % выше, чем у детекторов на основе традиционных кристаллов  $NaI(Tl)$  аналогичного размера [46].

Весьма наглядно преимущества бромида лантана по сравнению с  $BaF_2$  и  $NaI$  представлены в работе [47]. Сравнительные спектры, полученные с этими сцинтилляторами представлены на рисунке 1.1.2.

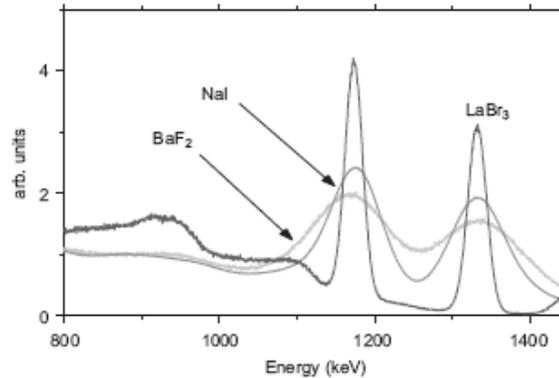


Рисунок 1.1.2 – Энергетические спектры  $^{60}\text{Co}$ , измеренные с помощью  $1''\times 1''$   $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ,  $2''\times 3''$   $\text{BaF}_2$  и  $3''\times 3''$   $\text{NaI}$

В работе [48] уникальные характеристики сцинтиллятора  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  используются для регистрации 14,1 МэВ нейтронов и  $\beta$ -излучения с энергией до 2 МэВ.

$\text{LaCl}_3$  – так же как и  $\text{LaBr}_3$  это новый кристалл, который по своим свойствам не уступает кристаллу  $\text{NaI}(\text{Tl})$ . Так же как и  $\text{LaBr}_3$  этот кристалл может быть синтезирован по технологиям Bridgman and Czochralsky [49]. Плотность кристалла составляет  $3,64 \text{ г/см}^3$ .  $\text{LaCl}$  имеет эмиссию спектра сцинтиллятора в районе 350 и 420 нм. По данным работы [49] этот кристалл имеет следующие характеристики:

- световой выход - 50 ф.эл./кэВ (70 % для  $\tau = 20 \text{ нс}$ , 30 %  $\tau = 213 \text{ нс}$ );
- радиационная длина  $X_0$  - 2.8 см;
- время высвечивание -  $<30 \text{ нс}$ .

В работе [50] исследовались характеристики кристалла объемом  $1 \text{ см}^3$  с концентрацией церия от 0,1 до 20 %. Было отмечено, что с увеличением концентрации  $\text{Ce}$  в указанных пределах кристалл становился более быстрым, но его полный световой выход уменьшался. В качестве оптимальной была выбрана концентрация  $\text{Ce}$ , равная 10 %.

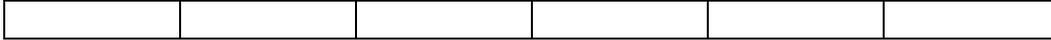
Такой кристалл позволил получить на фотонах с энергией 662 кэВ энергетическое разрешение 3,2 % (ПШПВ) На кристалле большего объема ( $\text{Ø}25\times 25 \text{ мм}$ ) разрешение составило 4,2 %, в то время как  $\text{NaI}(\text{Tl})$  таких же размеров показал разрешение 6,7 % [51].

Оба сцинтиллятора  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  и  $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$  обладают собственной внутренней активностью, обусловленной наличием нестабильного изотопа  $^{138}\text{La}$  и загрязнением  $^{227}\text{Ac}$ , таблица 1.1 [47].

Собственная активность и сильная анизотропия температурного коэффициента линейного расширения являются существенными недостатками этого сцинтиллятора.

Таблица 1.1 - Собственная  $\beta$ -активность кристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$

Изотоп	Распад	$E_{\beta-}$ , кэВ	$I_{\beta-}$ , %	$E_{\gamma}$ , кэВ	$I_{\gamma}$ , %
$^{138}\text{La}$	$\beta$ -	$252\pm 12$	34	789	34
	EC		66	1436	66
$^{211}\text{Pb}$	$\beta$ -	$1378\pm 8$	100		
$^{207}\text{Tl}$	$\beta$ -	$1423\pm 5$	100		



### 1.1.8 Оксид цинка $ZnO$

Сцинтиллирующее свойство  $ZnO$  в виде порошка известно достаточно давно [52]. Сравнительно недавно это вещество было изготовлено в кристаллическом состоянии путем использования высокотемпературного нагрева ( $1900^{\circ}C$ ), приводящего к расплавке порошка, и высокого давления [53]. Размеры кристалла составили  $\varnothing 8 \times 5$  мм. Активированный индием кристалл испускал свет при  $\lambda_{\text{макс}} = 395$  нм интенсивностью  $10^4$  фотон/МэВ, что примерно равно интенсивности быстрого пластмассового сцинтиллятора. Время нарастания световой вспышки составило меньше 100 пс, а время спада  $< 1$  нс. Ширина на полувысоте импульса с быстрого ФЭУ (Hamamatsu R1564U-06) при сочленении с пластмассовым сцинтиллятором равнялась  $\sim 1$  нс, а с кристаллом  $ZnO \sim 0,65$  нс, что является рекордным значением. В работе [54] приводится значение  $\lambda_{\text{макс}} = 380$  нм и время высвечивания:  $\tau = 440$  пс со спадом до 3,8 нс. По данным [54] при активации  $ZnO$  Ga и In эти параметры уменьшаются: время высвечивания 100 нс со спадом до 1 нс. С понижением температуры  $\tau$  уменьшается и при  $85^{\circ}K$  составляет 290 пс, что для сцинтилляционных кристаллов не типично. Обычно их охлаждение приводит к увеличению времени высвечивания.

$ZnO$  — материал более плотный, чем пластмассовый сцинтиллятор, негигроскопичен, стабилен в широкой области температур, механически и радиационно прочен, недорог. Кристаллы  $ZnO$  рассматриваются как перспективные сцинтилляторы для прецизионных временных измерений в широком температурном диапазоне. Спектрометрические свойства  $ZnO$  немного лучше пластмассовых сцинтилляторов [55]. На рисунке 1.1.3 показаны их сравнительные спектры.

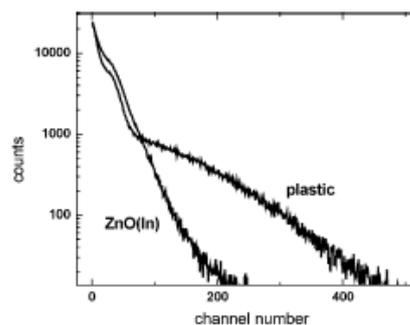


Рисунок 1.1.3 – Спектры, полученные с помощью пластмассового и  $ZnO(In)$  цинтилляторов

Добавление  ${}^6Li$  позволяет получить детектор нейтронов, рассчитанный на большие загрузки [56]. Керамика  $ZnO:Zn$  обладает также хорошими термолюминесцентными свойствами [55]. Спектр высвечивания в сравнении с  $BGO$  показан на рисунке 1.1.4.

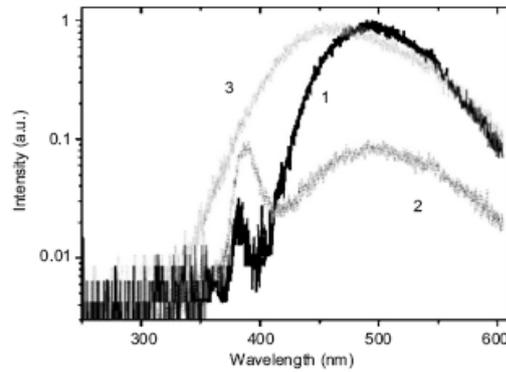


Рисунок 1.1.4 – Спектры высвечивания керамики  $ZnO:Zn$  (1), поликристалла  $ZnO$  (2) и  $BGO$  (3)

### 1.1.9 Силикат лютеция $Lu_2SiO_5:Ce$

$Lu_2SiO_5:Ce$  или  $LSO$  принадлежит к группе ортосиликатов редкоземельных элементов.

Эффективность детектора зависит в значительной степени от физических свойств сцинтиллятора. Так как кристалл  $LSO$  имеет моноклинную симметрию, то сцинтиллятор не является изотропным и имеет выделенные оптические оси. Коэффициент сбора света с разных граней может быть различным.

$LSO$  обладает:

- высоким световыходом;
- хорошим энергетическим разрешением;
- стойкостью к воздействию агрессивных сред;
- химической и радиационной устойчивостью;
- малым временем высвечивания;
- высокой плотностью.

Остаются вопросы, связанные с особенностями кристаллической структуры  $LSO$  и соответственно с его эксплуатационными характеристиками:

- моноклинность кристалла;
- двухосность и наличие двух независимых центров высвечивания;
- сильна нелинейная зависимость световыхода от энергии;
- наличие термолюминесценции;
- активация кристалла с последующим послесвечением;
- загрязненность собственными радиоактивными изотопами.

В работе [57] проводились исследования кристаллов  $LSO$  по определению световыхода. Результаты представлены в таблице 1.2 и на рисунке 1.1.5.

Таблица 1.2 - Зависимость абсолютного световыхода от энергии гамма-квантов

$E_\gamma$ , кэВ	6.0	16.0	30.0	60.0	662.0
------------------	-----	------	------	------	-------

Световыход, ф.эл./кэВ	13,3	16,3	23,2	23,9	27,6
--------------------------	------	------	------	------	------

Так как коэффициент преломления *LSO* довольно велик, для обеспечения хорошего оптического контакта между сцинтиллятором и фотокатодом вводится тонкий слой вещества с показателем преломления  $\sim 1,5$ . Для этой цели применяли различные минеральные или силиконовые масла [58]. Иногда прикрепляли сцинтиллятор к фотокатоду фотоумножителя при помощи специального оптического клея. Увеличение световыхода кристалла со смазкой по отношению к световыходу кристалла без смазки оказалось равным 1,87.

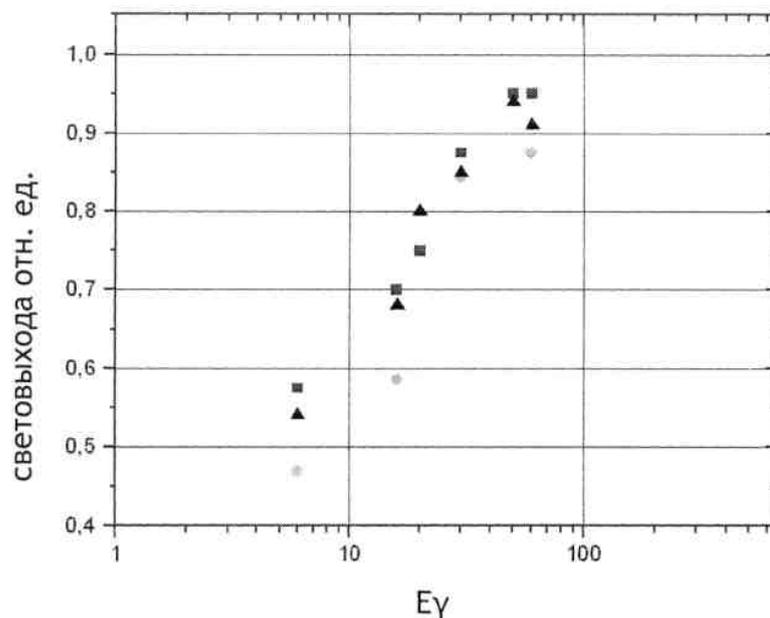


Рисунок 1.1.5 - График зависимости световыхода от энергии гамма-квантов

В ходе выполнения работы исследовались различные типы упаковок исследуемого кристалла. Наибольшая величина выхода света сцинтилляционной вспышки достигалась при упаковке кристалла в усеченный конус из майлара с тонкой боковой поверхностью, как показано на рисунке 1.1.6. Величина световыхода кристалла с упаковкой типа «конус» по отношению к величине световыхода кристалла без упаковки равно 2,16.

Исследуемые кристаллы были выращены методом Чохральского в НИИ «Полус» [58]. Образцы вырезались различной формы от тонких длинных «спичек» до кубиков с различными геометрическими размерами. Наименьшая толщина исследуемых кристаллов составляла 0,7 мм.

При изготовлении кристаллов используется редкоземельный металл лютеций, который имеет радиоизотопы. Исходная шихта содержит, как стабильный, так и радиоактивный изотопы лютеция  $^{176}\text{Lu}$ , чей распад сопровождается испусканием гамма квантов с энергией 201,8 и 306,8 кэВ [57].

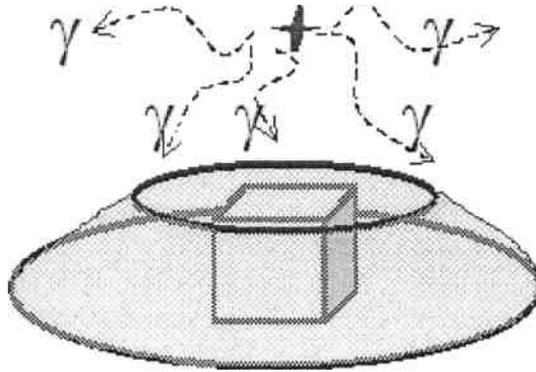


Рисунок 1.1.6 - Схематичное изображение светотражающего конуса

Было изучено послесвечение кристаллов  $Lu_2SiO_5(Ce)$  размером  $1 \times 1 \times 1$  мм, с разной концентрацией  $Ce$  [57,58], при облучении их в течение 10 минут солнечным светом, рисунок 1.1.7. Было установлено, что послесвечение состоит из нескольких компонентов, длительность которых меняется от нескольких минут до нескольких часов. При этом интенсивность и длительность послесвечения зависит от концентрации  $Ce$  в кристалле и дозы облучения [59]. Дефекты в кристаллической решетке в виде вакансий и дислокаций, точечных дефектов и трещин, примеси чужеродных атомов способствуют интенсивности и длительности послесвечения.

Спектр  $\gamma$ -квантов с энергией 511 кэВ легко отличим от шумового спектра сцинтиллятора. Результаты по энергетическому разрешению хорошо коррелируют с результатами, полученными в публикации [60].

#### 1.1.10 Вольфрамат кадмия $CdWO_4$

Монокристаллы вольфрамата кадмия  $CdWO_4$  или  $CWO$  являются сравнительно новым сцинтилляционным материалом, полученным в 90-х годах. Кристаллы высокого качества выращивают методом Чохральского до размеров  $\varnothing 60 \times 150$  мм [61].

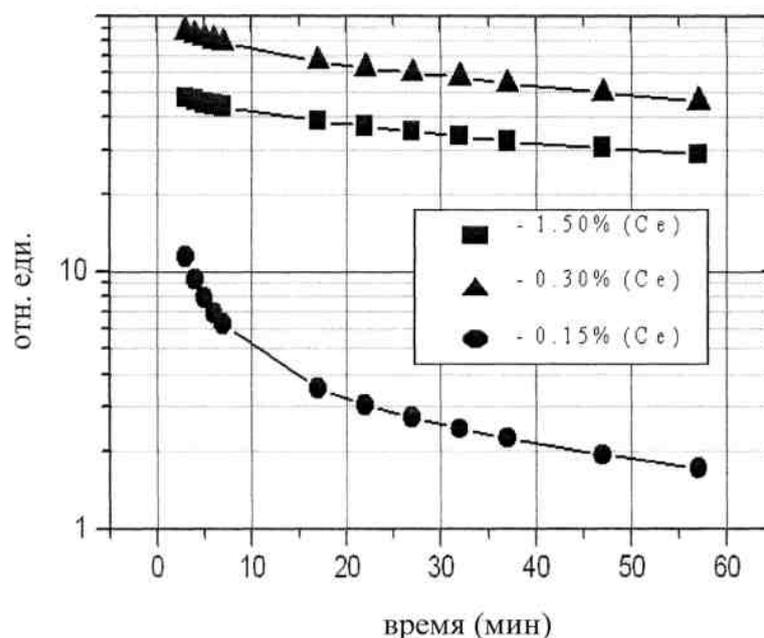


Рисунок 1.1.7 - Послесвечение кристаллов  $Lu_2SiO_5(Ce)$ .

В основном спектр излучения лежит в серо-голубой области 500-600 нм, хотя некоторые кристаллы имеют спектр в красной области – 650-700 нм. Световыход составляет 19,5 ф./кэВ.

Энергетическое разрешение этого кристалла для энергии 662 кэВ составляет 7,5 % [62], что находится на уровне разрешения  $NaI(Tl)$ . Поэтому  $CWO$  не обладает исключительными спектрометрическими характеристиками.

Ниже (глава 2) представлена реализация  $CWO$  для регистрации нейтронов.

Наибольшее распространение  $CWO$  получил в томографии и рентгеновских сканирующих установках отдельно и в сочетании с  $ZnSe(Te)$  и  $CsI(Tl)$  [63].

## 1.2 Органические сцинтилляторы

Органические сцинтилляторы обычно представляют собой двух, трёхкомпонентные смеси. Первичные центры флуоресценции возбуждаются за счёт потери энергии налетающими частицами. При распаде этих возбуждённых состояний излучается свет в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Длина поглощения этого ультрафиолета, однако, весьма мала: центры флуоресценции непрозрачны для их собственного излученного света. Вывод света осуществляется добавлением к сцинтиллятору второго компонента, поглощающего первично излученный свет и переизлучающего его изотропно с большими длинами волн (так называемого сместителя спектра, или шифтера).

Две активных компоненты в органических сцинтилляторах или растворяются в органической жидкости или смешиваются с органическим материалом так, чтобы образовать полимерную структуру. При такой технологии можно производить жидкий или пластиковый сцинтиллятор любой геометрической формы.

Органические сцинтилляторы имеют гораздо меньшие времена высвечивания (порядка единиц — десятков наносекунд) по сравнению с неорганическими, но имеют меньший световыход.

Органические сцинтилляторы широко используют для детектирования и спектрометрии гамма - излучения, поскольку обратное рассеяние от поверхности такого сцинтиллятора существенно меньше, чем от детектора с большим атомным номером. Для этой цели чаще всего применяют пластиковые сцинтилляторы с геометрией, обеспечивающей уменьшение эффекта обратного рассеяния.

Органические сцинтилляторы (ПМ) чаще всего представлены полиморфным состоянием стирола, винилтолуола, винилксилола, метилметакрилата, химически чистого соляра и т.п., с различными люминесцентными добавками – паратерфенила, дифенилоксазола, бензола, оксазола, РОРОРа и т. д. [3].

Заполимеризованная структура превращается в твёрдый пластмассовый сцинтиллятор, рисунок 1.2.1.

У различных производителей и тем более в разных странах чаще всего используют свои условные обозначения ПМ сцинтилляторов. В РФ ПМ сцинтилляторы обозначаются как ПСХХХ. Трёхзначное число определяет составляющие детектора. Число сотен определяет основное тело детектора, число десятков – люминесцентная добавка, число единиц – наличие спектросмещающих добавок.

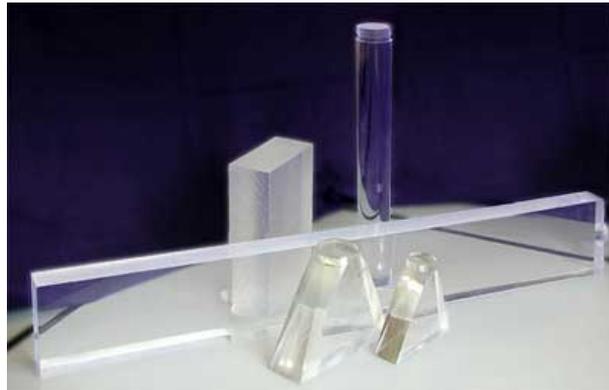


Рисунок 1.2.1 – Пластмассовые сцинтилляторы

Во многих случаях пластмассы имеют преимущества перед неорганическими сцинтилляторами благодаря своим свойствам. Прежде всего - это их быстрое действие, прозрачность и возможность обеспечения высокой эффективности регистрации благодаря большому объёму и практически любой конфигурации при сравнительно низкой стоимости и высокой температурной стабильности светового выхода и простоте обработки.

Основным минусом ПМ сцинтилляторов являются их худшее энергетическое разрешение по сравнению с неорганическими сцинтилляторами.

Традиционный метод получения ПМ детекторов – механическая обработка заготовок сцинтилляционной композиции, получаемых полимеризацией раствора люминесцирующих добавок в мономере. В дополнение к этому методу с конца 80-х годов используется получение ПМ сцинтиллятором из расплава без последующей механической обработки [64]. Этот метод позволяет улучшить термостабильность ПМ детекторов.

Детекторы на основе ПМ позволяют получить временное разрешение до 80 пс. Максимальные размеры ПМ сцинтилляторов ограничены длиной ослабления света собственного излучения, достигающей 5 м. При этом псевдопик полного поглощения появляется только при больших объёмах ПМ. Собственное разрешение ПМ представлено на рисунке 1.2.2 [65].

Обычно ПМ применяют в качестве охранных детекторов или в схемах совпадений, при контроле радиоактивной загрязнённости или при регистрации отдельных реакций на фоне множественных событий взаимодействия ионизирующих частиц с веществом. При этом на чувствительность детектора существенно влияет собственный радиационный фон ПМ.

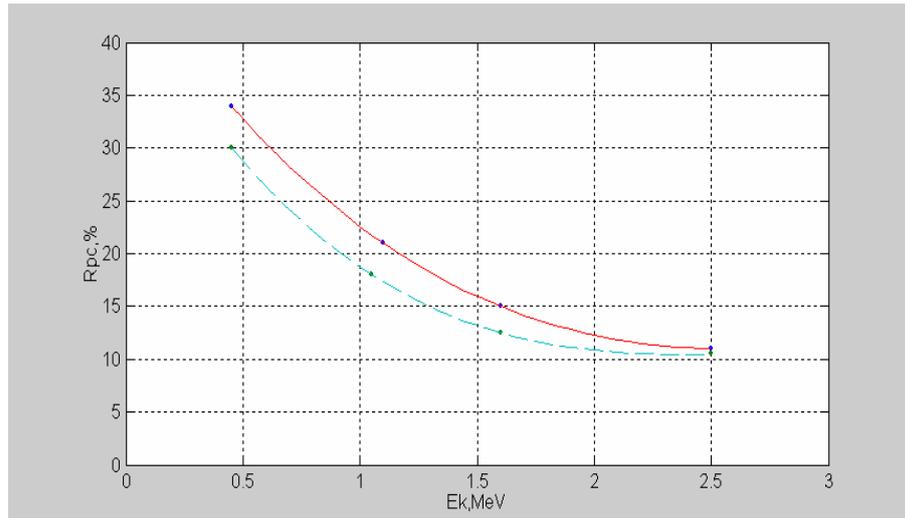


Рисунок 1.2.2 – Собственное разрешение ПМ детектора цилиндрической (—) и прямоугольной (---) формы равного объёма

Удельная фоновая активность ПМ детекторов представлена в таблице 1.3 [66].

Таблица 1.3 – Удельная фоновая частота следования импульсов на 1 кг сцинтиллятора за 1 с

Детектор		Энергетический диапазон, МэВ				
Основа	Размеры, мм	0,1-0,8	0,8-1,2	1,2-1,8	1,8-3,5	0,1-3,5
Полистирол	80x80x40	9,390	0,026	0,026	0,016	9,441
Полистирол	150x150	0,314	0,032	0,011	0,004	0,361
<i>NaI(Tl)</i>	63x63	0,156	0,022	0,018	0,007	0,203

Источником собственного радиационного фона являются радионуклиды уран-ториевого ряда. Альфа-активные члены этого ряда дают основной вклад в область энергий гамма-квантов до 0,5 МэВ. Содержание урана в ПМ может составлять  $(2-40) \cdot 10^{-9}$  г/г, что находится на уровне нижнего предела регистрации для ПМ.

### 1.3 Жидкие сцинтилляторы

Жидкие сцинтилляторы (ЖС) являются в основном органическими соединениями - основой, в которые вводится сцинтиллирующая добавка. В качестве основы используется широкий ряд углеводородов - метилметакрилат, метилнафталин, толуол, фенилэтиламин и т. п. Сцинтиллирующие добавки также отличаются разнообразием – паратерфенил, оксазол, фенилоксазол, бифенилил. Для регистрации нейтронов в раствор вводятся также добавки такие как *Li, B, Cd, Gd*.

Также как для ПМ сцинтилляторов у различных производителей и тем более в разных странах чаще всего используют свои условные обозначения. В РФ ЖС обозначаются как ЖС-ХХ. Двухзначное число определяет вещество детектора, добавки и их концентрацию [3].

ЖС не являются спектрометрическими. Основное их преимущество в возможности обеспечить сколь угодно большой объем сцинтиллятора. В связи с этим ЖС часто используются в фундаментальных исследованиях физики высоких энергий. Есть случаи использования ЖС в практике радиационного мониторинга. Однако эта реализация не нашла дальнейшего распространения по причине близости характеристик монитора к характеристикам монитора с ПМ сцинтилляторами, но большей массе, более сложной конструкции и необходимости деликатного обращения с прибором.

ЖС обладают высокой  $n$ - $\gamma$  разделяющей способностью, т. е. разделением по форме импульса нейтронной и гамма компонент излучения [67]. В таблице 1.4 представлена разделяющая способность различных сцинтилляторов, определяемая коэффициентом  $\xi$

$$\xi = \sigma_n / \sigma_\gamma, \quad (1.1)$$

где  $\sigma_n$  и  $\sigma_\gamma$  - отношения числа зарегистрированных импульсов в медленном компоненте к их числу в быстром компоненте для случаев нейтронного и гамма возбуждений соответственно.

Таблица 1.4 – Коэффициенты  $n$ - $\gamma$  разделяющей способности ( $t_n$  и  $t_\gamma$  – длительности нейтронного и гамма импульсов)

Сцинтиллятор	$t_n$ , нс	$t_\gamma$ , нс	$\xi$ , отн. ед.
NE-213	350	950	6,3
ЖС-13	1130	2900	7,4
ЖС-65	500	1400	6,1
ЖС-76	530	1450	2,4
ЖС-77	470	1450	4,5
Стильбен	65	160	8,0

Возможность разделения  $n$ - $\gamma$  импульсов может уменьшить вероятность ложных срабатываний портальных мониторов, когда они установлены в местах наличия нейтронного излучения.

#### 1.4 Нанокристаллические сцинтилляторы

В ИФТТ РАН освоены несколько методов синтеза нанокристаллических сцинтилляторов [68] из водных растворов или растворов в расплавах легкоплавких веществ типа нитрата аммония. Оксиды или нитраты исходных компонентов (например, оксида лютеция  $Lu_2O_3$ ) первоначально растворялись в этих расплавах, а затем производился низкотемпературный пиролиз. Непрореагировавший растворитель при этом испарялся, оставляя так называемый прекурсор в виде аморфной смеси синтезируемого состава (например, бората лютеция  $LuBO_3$ ), и остатков

исходных нитратов и оксидов. Последующий низкотемпературный отжиг прекурсора приводил к окончательному разложению нитратов с выделением газообразной окиси азота. При этом газ, выделяющийся путем микровзрывов, разделял и измельчал зерна кристаллизующегося бората лютеция до наноразмеров.

Особенности структурных и светоизлучательных характеристик оксидных и фторидных наносцинтилляторов открывают обширные перспективы их практических применений. Ниже описываются следующие направления использования наносцинтилляторов:

1. Радиационные детекторы с улучшенными энергетической чувствительностью, энергетическим, пространственным и угловым разрешениями (просвечивающие инспекционные установки антитеррористического, охранного и таможенного назначения, приборы для медицинской диагностики, системы радиационного мониторинга окружающей среды).
2. Радиационные детекторы с существенно повышенной радиационной прочностью (оперативный автоматический контроль действующих атомных реакторов и хранилищ радиоактивных веществ непосредственно внутри горячих радиационных зон), обладающие возможностями раздельного измерения радиационных потоков гамма, бета и альфа излучений, протонов и нейтронов.
3. Сверхскоростные радиационные детекторы для времяпролетной регистрации объемных высокоразрешающих изображений внутренних органов человеческого организма, выявления спрятанных в закрытых объемах опасных веществ и предметов и т.д.
4. Высокоразрешающая экспрессная диагностика *in vivo* внутри живых организмов вирусов, бактерий, канцерогенных и других патогенных биоорганелл. Оперативное уничтожение обнаруженных патогенных биоорганелл непосредственно во время сеанса диагностики.

Возможность и эффективность выстраивания из наносцинтилляторов регулярных структур типа фотонных кристаллов требует дополнительного обсуждения. Во-первых, проблема доставки света, излучаемого наносцинтилляторами, к фотодетектору имеет самостоятельное значение безотносительного того, будут ли наносцинтилляторы составлять фотонный кристалл или нет. Эта проблема обусловлена сильным рассеянием света на границах наночастиц, из-за чего, как показывает практический опыт, светосбор сцинтилляционного света фотодиодами возможен при толщинах слоев наночастиц до 0,5 мкм, а далее начинаются сильные потери света из-за многократных отражений. Вследствие этого реальные наносцинтилляционные детекторы устраиваются путем закрепления достаточно тонких слоев наночастиц (не толще вышеуказанных 0,5 мкм) на подложках, прозрачных для излучаемого ими света, по которым свет и доставляется к фотодетекторам. Эти подложки могут быть сделаны в виде пластин, световодных стержней или капилляров, во внутренние полости которых помещаются наночастицы, а прозрачные стенки служат световодами, доставляющими свет к фотодетекторам.

## 1.5 Ксеноновые гамма-камеры

В восьмидесятых годах началась разработка цилиндрических ксеноновых гамма-спектрометров с экранирующей сеткой. Уже первые образцы таких детекторов [69] позволили получить достаточно хорошее энергетическое разрешение (2,7 % на энергии 662 кэВ) и обеспечить высокую эффективность регистрации гамма-квантов (около 15 %). Современные экземпляры гамма-детекторов на основе сжатого ксенона [70] обладают значительно лучшими параметрами.

Общая схема ксенонового гамма-детектора показана на рис. 1.5.1. Все внутренние элементы детектора, кроме анода, изготовлены из нержавеющей стали и металлокерамики. Внешние элементы детектора изготовлены из фторопласта и сплавов алюминия. Конструкция камеры рассчитана на внутреннее давление до 100 атм.

Ионизационная камера имеет свой блок электроники. В нём располагаются зарядочувствительный усилитель, разъемы для подачи высокого напряжения на экранирующую сетку и корпус камеры, небольшой высоковольтный фильтр для стабилизации напряжения на экранирующей сетке и малогабаритный высоковольтный источник питания. Питание высоковольтного блока питания осуществляется напряжением - 24 В, а на его выходах создаются напряжения 12,5 кВ и 21,5 кВ для экранирующей сетки и катода цилиндрической ионизационной камеры. При этом его потребление составляет не более 20 Вт.

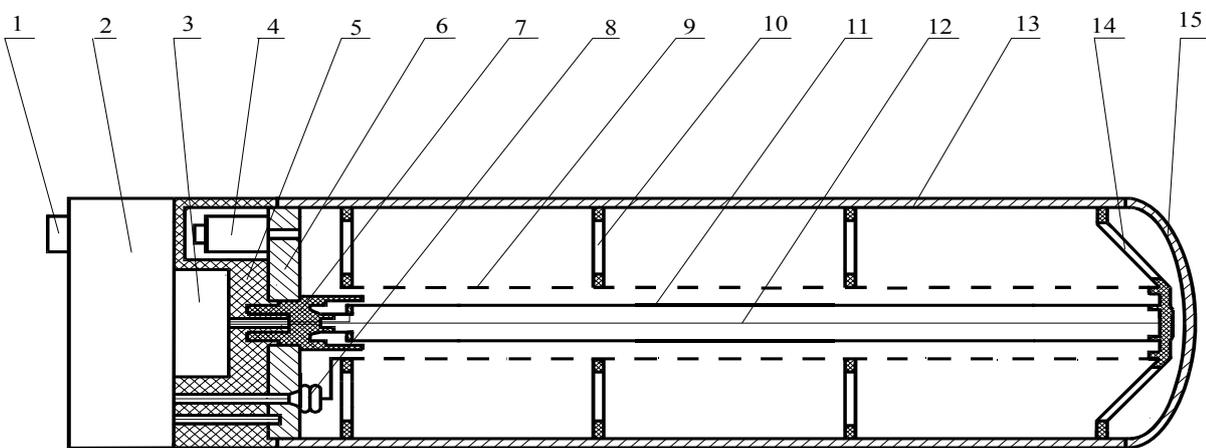


Рис. 1.5.1 - Общая схема гамма-спектрометра цилиндрической конфигурации с экранирующей сеткой. 1 - разъем, 2 - высоковольтный источник питания, 3 - зарядочувствительный усилитель, 4 - вентиль, 5 - тефлоновый изолятор, 6 - фланец, 7 - металлокерамический гермоввод, 8 - высоковольтный вход для экранирующей сетки, 9 - экранирующая сетка, 10 - виброзащитные керамические изоляторы, 11 - анод, 12 - металлическая нить с нулевым потенциалом, 13 - корпус, 14 - фигурный керамический изолятор, 15 - эллипсоидальная крышка.

Внешнее изоляционное покрытие, выполненное из тефлоновой пленки, изолирует корпус камеры с высоким электрическим потенциалом от внешней среды.

Общие технические характеристики гамма-детектора на основе ионизационной камеры с экранирующей сеткой приведены ниже:

- рабочий энергетический диапазон регистрируемых гамма-квантов составляет 50 – 5000 кэВ и зависит от объема детектора;
- высокое энергетическое разрешение: 2 % - для энергии 662 кэВ ( $^{137}\text{Cs}$ ) и 1.5% для энергии 1170 кэВ ( $^{60}\text{Co}$ );
- степень активации нейтронами в 20 раз меньше по сравнению со сцинтилляционными детекторами на основе  $\text{NaI}$ ;
- не требуется использование жидкого азота или каких-либо дополнительных систем охлаждения; диапазон рабочих температур ксеноновых гамма-детекторов - 10-200 °С;
- возможность создания гамма-спектрометров с рабочим объемом от 0,2 до 10 литров (0.1–5 кг ксенона) для различных условий применения;
- отсутствие зависимости энергетического разрешения от объема рабочего вещества (ксенона);
- ресурс работы более десяти лет;
- значительно более низкая стоимость по сравнению с полупроводниковыми спектрометрами.

Одним из достоинств данного детектора является его высокое, по сравнению со сцинтилляционными детекторами энергетическое разрешение. С точки зрения энергетического разрешения они занимают промежуточное положение между полупроводниковыми и сцинтилляционными детекторами и обеспечивают разрешение порядка 13-16 кэВ.

Типичные спектры гамма-источников, измеренные данным детектором в течение 2000 с при расположении гамма-источников перпендикулярно и параллельно главной оси детектора на расстоянии 100 см от его чувствительно поверхности, приведены на рис. 1.5.2.

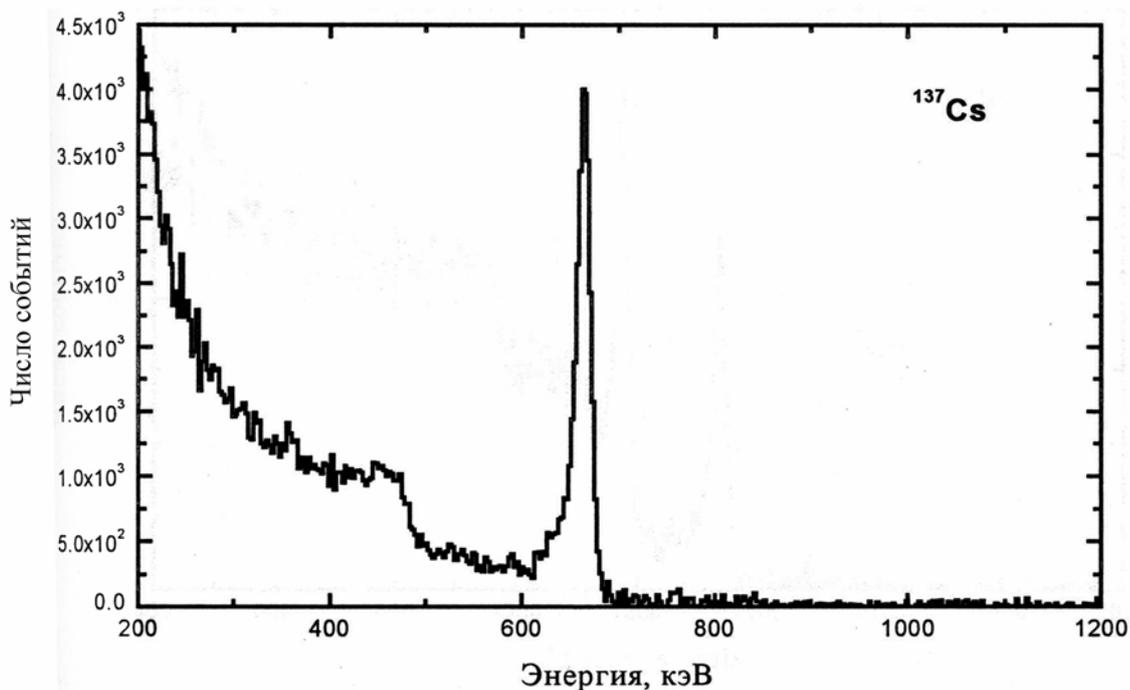


Рис. 1.5.2 - Спектр гамма-источника  $^{137}\text{Cs}$ , измеренный  $\text{Xe}$ -детектором в перпендикулярном направлении на расстоянии 100 см от гамма-детектора в течении 2000 с, ПШПВ=15,5 кэВ

Зависимость энергетического разрешения ксенонового детектора и  $\text{NaI(Tl)}$  от энергии гамма-квантов приведена на рис. 1.5.3. Эта зависимость имеет характерный спадающий вид: большим энергиям соответствует меньшее энергетическое разрешение. Для сравнения на этом же рисунке приведены значения энергетического разрешения, измеренные для сцинтилляционного кристалла  $\text{NaI(Tl)}$  диаметром 200 мм и высотой 100 мм. Из этого рисунка видно, что энергетическое разрешение гамма-детектора на сжатом ксеноне во всем рассматриваемом диапазоне энергий по крайней мере в 4-5 раз лучше, чем у сцинтилляционного гамма-детектора.

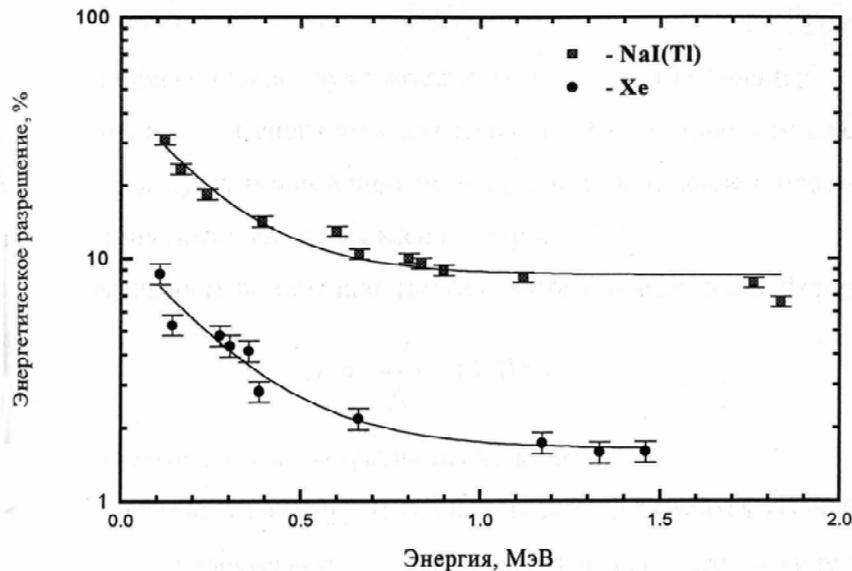


Рис. 1.5.3 - Зависимость энергетического разрешения гамма-детектора от энергии гамма-квантов для ксенонового и сцинтилляционного детекторов

Ксеноновый детектор имеет две эффективности регистрации для бокового и торцевого измерений. Измерение эффективности регистрации пика полного поглощения гамма-квантов проводились при расположении гамма-источников на расстоянии 1 м от детектора. Полученные результаты для наиболее характерных энергий гамма-линий приведены в таблице 1.5 [71].

Таблица 1.5 - Эффективность регистрации гамма-детектора для характерных энергий гамма-излучения.

Энергия	Эффективность регистрации, %	
	перпендикулярно	параллельно
662	$3,3 \pm 0,2$	$10,8 \pm 0,4$
1173	$1,5 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$
1332	$1,2 \pm 0,2$	$3,3 \pm 0,2$

Зависимость положения пика полного поглощения от энергии гамма-квантов носит линейный характер. Отклонение от прямой не превышает 1 % в диапазоне энергий до 1,5 МэВ.

## 1.6 Полупроводниковые детекторы

Полупроводниковые детекторы (ППД) в настоящее время занимают ведущее положение в гамма и рентгеновской спектрометрии. Это связано, прежде всего, с их высокой разрешающей способностью, обеспечивающей проведение прецизионных спектрометрических измерений.

Существуют перспективы создания на их основе кристаллов с достаточно большим чувствительным объемом для увеличения их эффективности регистрации.

Используются преимущественно детекторы на основе германия и кремния. По сравнению с другими полупроводниковыми материалами такими, как, например,  $HgI_2$ ,  $CdTe$ ,  $GaAs$ , они обладают значительно лучшими характеристиками, позволяющими изготавливать на их основе полупроводниковые детекторы с рекордным энергетическим разрешением, но и самой высокой стоимостью.

В таблице 1.6 приведены основные характеристики наиболее часто применяемых полупроводниковых материалов.

### 1.6.1 Германиевые ППД

В настоящее время ППД на основе германия и кремния производятся двух видов: планарные и коаксиальные. Наибольшее распространение получили так называемые дрейф-литиевые детекторы, в которых акцепторные атомы примеси компенсируются ионами лития. Такие детекторы обозначаются как  $Si(Li)$  или  $Ge(Li)$ . Планарные  $Si(Li)$  и  $Ge(Li)$  детекторы используются для регистрации рентгеновского и мягкого гамма-излучения, начиная с энергии 10 кэВ. Коаксиальные  $Ge(Li)$  детекторы применяются для регистрации гамма-излучения с энергией до 10 МэВ.

Таблица 1.6 - Основные характеристики некоторых полупроводниковых материалов [72, 73]

Материал	Ширина запрещ. зоны, эВ.	Эффективный заряд.	Плотность, г/см	Энергия на пару электрон-дырка, эВ.	Рабочая температура, К	Подвижность, $см^2/(В \cdot с)$		Время жизни носителей, с	Разрешение, %
						электрон.	дырок		
<i>Ge</i>	0,67	32	5,33	77	2,96	3600	4200	$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,46
<i>Si</i>	1,1	14	2,33	77 300	3,76 3,61	2100	1100	$2,0 \cdot 10^{-5}$	-
<i>GaAs</i>	1,35	31,33	5,36	130 300	4,51 4,2	8600	400	$10^{-8}$	2,60
<i>GaSe</i>	2,03	31,34	4,55	300	6,3	60	215	$10^{-9}$	-
<i>GaP</i>	2,2	23	4,13	-	-	300	150	$10^{-8}$	-
<i>CdTe</i>	1,5	48,52	5,86	300	4,43	1050	80	$10^{-6}$	3,80
<i>CdSe</i>	1,7	41	5,74	-	-	650	-	-	-
<i>HgI<sub>2</sub></i>	2,26	80,53	6,40	300	4,2	100	4	$10^{-6}$	3,50

В начале восьмидесятых годов были разработаны новые методы очистки  $Ge$  [73], которые позволяют выращивать большие кристаллы сверхчистого германия HPGe, с концентрацией электрически активных атомов примесей менее  $2 \cdot 10^{-10}$  1/атом. В зависимости от степени очистки,

HPGe может обладать собственной проводимостью n- или p-типа. В соответствии с этим детекторы из особо чистого германия обозначаются как HPGe(p) или HPGe(n).

Основным преимуществом детекторов на основе HPGe является то, что они могут храниться при комнатной температуре, в отличие от *Ge(Li)* детекторов, которые должны храниться при температуре жидкого азота. Кроме того, детекторы на основе HPGe могут иметь большие размеры по сравнению с *Ge(Li)* детекторами. Это позволяет создавать детекторы гамма-излучения не только с высоким энергетическим разрешением, но и с хорошей эффективностью в области регистрации гамма-излучения. Параметры некоторых ППД из высокочистых материалов приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 - Параметры ППД из высокочистых материалов [74]

Тип детектора	Геометрия	Рабочий энергетический диапазон	Материал	Размер *	Энергетическое разрешение кэВ при 1,33 МэВ
GEM	коаксиальный	40 кэВ-10МэВ	P - тип PHGe	10%-100%	1,75-2,30
GMX	коаксиальный	3 кэВ-10кэВ	N –тип PHGe	10%-80%	1,80-2,40
GLP	колодец	10кэВ-10МэВ	P - тип PHGe	70%-120%	2,10-2,30

\*- дан в % эффективности относительно *Nal* размером 3х3 дюйма.

Следует отметить некоторые особенности HPGe(n) и HPGe(p) детекторов [74, 75].

Детекторы на основе германия n-типа более чувствительны к низкоэнергичным гамма-квантам по сравнению с Si детекторами. Детекторы имеют лучшее энергетическое разрешение 118 эВ при 5,89 кэВ, и эффективность – 20 % до 200 кэВ.

Другим преимуществом HPGe(n) детекторов является то, что они обладают более высокой радиационной стойкостью [76] и могут работать при наличии значительных потоков нейтронов.

Новые возможности использования HPGe детекторов связаны с развитием методики сегментирования кристаллов. Методика сегментирования HPGe детекторов была разработана в конце 80-х годов [77] и основана на разбиении детектора на два сегмента - верхний и боковой. Верхний слой (сегмент) используется для регистрации мягких гамма-квантов с энергиями до 150 кэВ. В этой области энергий основной процесс взаимодействия гамма-квантов - фотоэффект. Комптоновские фотоны и фоновые события режектируются с помощью нижнего сегмента, включенного в схему антисовпадения. Гамма-кванты больших энергий регистрируются нижним сегментом, который защищается от мягких гамма-квантов верхним сегментом.

Сегментирование позволяет в несколько раз повысить чувствительность спектрометра на основе HPGe.

В настоящее время максимальный объем кристаллов HPGe(n) составляет порядка 200 см<sup>3</sup>, а кристаллов HPGe(p) - 350 см<sup>3</sup> [78]. Для достижения высокой чувствительности применяют сборки детекторов из HPGe(n).

Радиационная стойкость полупроводниковых спектрометрических гамма-детекторов значительно меньше сцинтилляционных и существенно зависит от вида облучения, типа кристалла и его размеров. Заметные изменения свойств этих детекторов могут происходить в процессе их работы, так как в этих кристаллах под действием ионизирующего излучения происходит накопление необратимых радиационных повреждений. Различные виды взаимодействия ионизирующего излучения с веществом детектора приводят к возникновению дефектов в структуре его кристаллической решетки, и в большинстве случаев эти повреждения возрастают пропорционально дозе облучения. Чем больше размеры полупроводникового детектора, тем раньше начинается деградация его энергетического разрешения при облучении ионизирующими излучениями.

При нейтронном облучении пороговое значение общего количества прошедших через полупроводниковый гамма-детектор нейтронов через единицу площади, начиная с которого наблюдается ухудшения их энергетического разрешения, составляет, в зависимости от размеров кристалла -  $10^7$ - $10^8$  см<sup>-2</sup> [79].

Значительное влияние сильноионизирующих частиц на основные характеристики полупроводниковых детекторов существенно затрудняют их длительное использование в условиях, где присутствуют потоки протонов или нейтронов.

Таким образом, несмотря на то, что технология создания полупроводниковых детекторов на основе германия развиваются достаточно быстро, основными моментами, сдерживающими широкое использование этих детекторов, являются их чрезвычайно сложное производство, высокая стоимость, сравнительно низкая радиационная стойкость и необходимость охлаждения до криогенных температур.

### 1.6.2 Арсенид галлия *GaAs*

Из параметров, приведенных в табл. 1.6 видно, что арсенид галлия (*GaAs*) представляется одним из перспективных материалов для изготовления неохлаждаемых детекторов ионизирующих излучений. При соответствующей технологии изготовления детекторов имеется возможность применять их в неохлажденном виде. Очень важным достоинством *GaAs* является самая высокая из всех приведенных материалов подвижность электронов при комнатной температуре. Хорошей подвижностью обладают также и дырки. Атомный номер компонентов, входящих в состав этого соединения, высок ( $Z_{Ga} = 31$ ,  $Z_{As} = 33$ ), что позволяет достичь примерно такой же эффективности регистрации рентгеновского и гамма-излучений, как в германиевых детекторах того же самого объема.

К сожалению, в настоящий момент детекторы на основе полуизолирующего и высокоомного *GaAs* оказались пригодными только лишь для регистрации частиц [80], но не для спектрометрии. Детекторы со спектрометрическими свойствами впервые были получены на эпитаксиальных слоях *GaAs*, выращенных методом жидкофазной эпитаксии.

Из-за небольшой (50—100 мкм) толщины эпитаксиальных слоев *GaAs*-детекторы на его основе пригодны для спектрометрии лишь рентгеновского и гамма-излучения низких энергий. Такие детекторы имеют достаточно высокое энергетическое разрешение. Например, при комнатной температуре получено разрешение 2,5 кэВ на гамма-линии 59,54 кэВ  $^{241}\text{Am}$  и 2,6 кэВ на линии 122 кэВ  $^{57}\text{Co}$  [81]. При этом разрешение определялось в основном шумами системы детектор-предусилитель.

Исследована возможность изготовления спектрометрических детекторов на легированных кристаллах *GaAs* высокой чистоты. Детекторы, изготовленные на легированных железом эпитаксиальных слоях, имели достаточно хорошие спектрометрические характеристики: разрешение при  $T=300$  К на  $\alpha$ -частицах  $^{241}\text{Am}$  ( $E_a=5,49$  МэВ) составило 17,2 кэВ, а на гамма-линии  $^{57}\text{Co}$  ( $E_\gamma = 122$  кэВ) 3,8 кэВ для детектора с толщиной эпитаксиального слоя 100 мкм [81]. Причем результат для фотонов гамма-излучения полностью определялся шумами электроники.

Для увеличения эффективности регистрации гамма-излучения была предпринята попытка изготовить детекторы с двумя поверхностными барьерами на противоположных сторонах пластины. Структура с двумя барьерами позволила увеличить эффективность регистрации гамма-излучения  $^{235}\text{U}$  с энергией 185 кэВ на 20 %.

Следует также отметить результаты, полученные на эпитаксиальных слоях, выращенных методом газотранспортной эпитаксии [82]. Детектор площадью  $2 \text{ мм}^2$  и толщиной эпитаксиального слоя 300 мкм при напряжении смещения 250 В имел обратный ток  $1,2 \cdot 10^{-9}$  А. При этом напряжении энергетическое разрешение при комнатной температуре на 122 кэВ гамма-линии ( $^{57}\text{Co}$ ) составило 1,9 кэВ, на 59,54 кэВ линии ( $^{241}\text{Am}$ ) 1,7 кэВ, а на линии 22,4 кэВ (рентгеновское излучение  $^{237}\text{Np}$ ) 1,5 кэВ.

Небольшая толщина эпитаксиальных слоев и малая рабочая поверхность детекторов на основе *GaAs* препятствуют широкому их применению в качестве неохлаждаемых спектрометров. Однако в тех случаях, когда размеры не являются критическими, детекторы из арсенида галлия имеют из-за малых токов преимущество перед кремниевыми детекторами.

### 1.6.3 Теллурид кадмия *CdTe*

Полупроводниковые детекторы на основе кристаллов *CdTe* (*CdZnTe*) в последнее время находят все более широкое применение при регистрации гамма-излучения. Благодаря совершенствованию технологии производства создаются кристаллы с необходимыми, а в некоторых случаях уникальными физическими свойствами, что позволяет получать на их основе блоки детектирования ионизирующего излучения с хорошими спектрометрическими и эксплуатационными характеристиками.

Они отличаются высокой эффективностью регистрации излучения, относительно хорошим соотношением сигнал/шум и хорошим энергетическим разрешением при комнатной температуре. Линейность в счетном и токовом режимах работы в широком диапазоне измеряемой мощности дозы и высокая радиационная стойкость этого материала [83] позволяет использовать его при производстве дозиметрических блоков с большим радиационным ресурсом.

Это определяет все более перспективное использование детекторов на основе  $CdTe$  и  $CdZnTe$  как в системах дозиметрического контроля на предприятиях по производству, использованию и переработке ядерного топлива, так и в спектрометрических системах, используемых для анализа радионуклидов.

В работе [84] была показана возможность проведения спектрометрии рентгеновского, гамма и альфа излучений таким кристаллом. Все работы проводились с кристаллами толщиной 0,8 и 2 мм.

На рис. 1.6.1 представлены спектры  $^{241}Am$  и  $^{152}Eu$ , полученные на  $CdZnTe$  детекторе с толщиной кристалла 0,8 мм. На кристалл детектора подавалось напряжение смещения 70 В, постоянная времени формирования составляла 2 мкс. Рабочая поверхность детектора при измерениях не коллимировалась. Для линии 40,11 кэВ ( $K_{\alpha 1}$  - линия  $Sm$ , образующегося в результате  $\beta^+$  распада атомов изотопа  $^{152}Eu$ ) полная ширина на половине высоты составляет около 5 кэВ, что соответствует относительному разрешению 12 %.

Представленные результаты показывают возможность использования детекторов на основе  $CdTe$  ( $CdZnTe$ ) для регистрации характеристического рентгеновского излучения К-серии тяжелых элементов при рентгенофлуоресцентном анализе и спектрометрии.

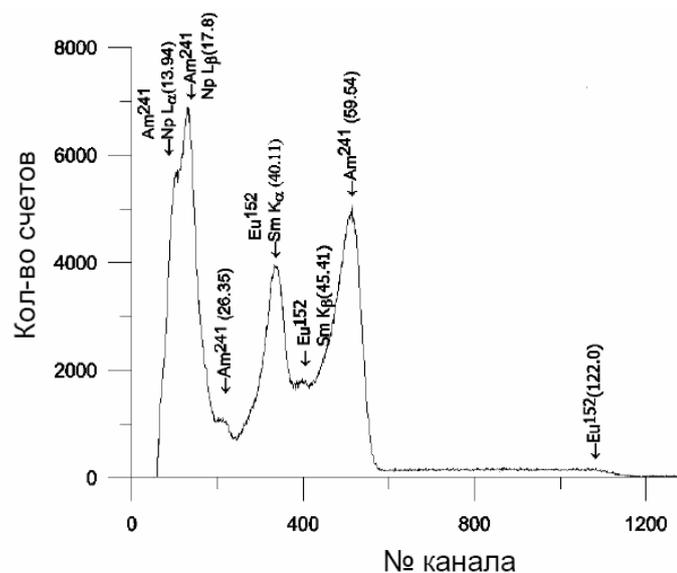


Рис. 1.6.1 - Спектр гамма-излучения  $^{241}Am$  и  $^{152}Eu$

Кроме гамма-излучения в работе [84] были проведены, исследования спектрометрические характеристики  $CdZnTe$  как детектора заряженных частиц. Кристалл детектора размером 5x5x1мм был помещен в экранированную камеру. Напряжение смещения на детекторе было выбрано

равным 100 В, время формирования 2 мкс. С помощью коллиматора диаметром 3 мм выбиралась рабочая область в центре кристалла. Для изучения характеристик детектора и выбора оптимальных условий его работы использовались следующие источники альфа-частиц:  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ . Источники поочередно размещались на расстоянии 1,5 мм от поверхности кристалла. Измерения проводились в воздухе. На рис. 1.6.2 приведен спектр альфа-частиц, полученный от источника  $^{226}\text{Ra}$ .

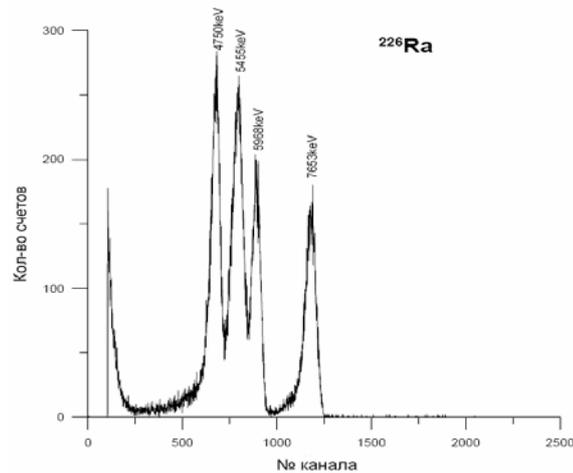


Рис. 1.6.2 - Спектр альфа-частиц от источника  $^{226}\text{Ra}$ .

Проведенные исследования показали возможность использования детекторов на основе  $\text{CdTe}$  ( $\text{CdZnTe}$ ) для регистрации характеристического рентгеновского излучения К-серии тяжелых элементов при рентгенофлуоресцентном анализе и спектрометрии гамма-излучения.

Блоки детектирования с детекторами из  $\text{CdZnTe}$ , при комнатных температурах, обладают удовлетворительным энергетическим разрешением для решения некоторых практических задач. Разработан и создан спектрометр ионизирующего излучения, который может применяться как анализатор спектра радионуклидов в диапазоне энергий от 20 кэВ до 3 МэВ с энергетическим разделением до 10 % (59,6 кэВ,  $^{241}\text{Am}$ ).

В целом теллуридкадмиевые детекторы существенно уступают германиевым по эффективности и энергетическому разрешению, поэтому они находят специализированное применение в измерительной практике, особенно при изготовлении компактных детекторов.

Расширение области применения таких детекторов возможно посредством дальнейшего улучшения их спектрометрических характеристик. Это может быть достигнуто как за счет повышения качества изготовления самого кристалла, так и улучшением параметров других узлов блока детектирования. Например, снижением шумов путем охлаждения кристалла посредством использования термоэлектрических охладителей, а также использованием процессора для предварительной обработки импульсов по форме. Энергетическое разрешение в случае дискриминации импульсов по их форме улучшается с 40 до 9 кэВ [84].

#### 1.6.4 Диодид ртути $HgI_2$

Первое сообщение об использовании тетрагонального диодида ртути в качестве неохлаждаемого детектора ионизирующих излучений появилось в 1971 г. [85]. Эта работа показала большую перспективность диодида ртути для спектрометрии рентгеновского и гамма-излучения.

Для изготовления спектрометрических детекторов на основе  $HgI_2$  обычно используют пластины толщиной около 0,5—1 мм. Высокое удельное сопротивление  $HgI_2$  ( $10^{13}$ — $10^{14}$  Ом/см) обеспечивает при современном уровне технологии изготовления детекторов малые значения токов утечки ( $10^{-10}$ — $10^{-12}$  А) вплоть до напряжений 2000—2500 В. Резкое возрастание темнового тока и соответственно шумов детектора наблюдается с температур выше 55 °С. Изменение счетной эффективности детекторов в диапазоне (-40)—(+50) °С не превышает 10 % [86].

Исследования эффективности счета в пике полного поглощения  $HgI_2$ -детекторов показали, что после подачи смещения на детектор с толщиной чувствительной области более 1 мм со временем происходит изменение формы энергетического спектра, которое связывают с эффектом поляризации детектора. Эффект поляризации наблюдается и в более тонких кристаллах, причем он проявляется тем сильнее, чем больше интенсивность падающего излучения и меньше напряжение смещения, приложенное к детектору. Еще одной причиной деградации спектрометрических характеристик  $HgI_2$ -детекторов является накопление радиационных дефектов в чувствительной области детектора [87].

Усовершенствование методов выращивания  $HgI_2$  позволило существенно увеличить чувствительный объем детекторов и достичь более высоких спектрометрических результатов. Так, например, на детекторе размером 10x8x0,5 мм было получено разрешение 1,2; 2,0 и 4,5 кэВ при энергии 60; 122 и 662 кэВ соответственно [85].

Наибольший прогресс достигнут в изготовлении детекторов малого объема, предназначенных для спектрометрии рентгеновского излучения при комнатной температуре. Хорошие результаты получены в области спектрометрии низкоэнергетического рентгеновского излучения [87].

Согласно данным [88], разрешение  $HgI_2$ -спектрометра рентгеновского излучения можно улучшить путем умеренного охлаждения детектора. Оптимальной оказалась температура около 0° С. Результаты, показывают, что в области низких энергий по своим спектрометрическим свойствам детекторы на основе  $HgI_2$  приближаются к кремниевым детекторам. Однако при более высоких энергиях разрешение и эффективность  $HgI_2$ -детекторов существенно уступают германиевым детекторам. Лучшее разрешение на  $HgI_2$ -детекторах толщиной 1 мм составляет 5 кэВ при энергии 662 кэВ ( $^{137}Cs$ ) [89], но эффективность счета таких детекторов много меньше эффективности больших германиевых детекторов.

Большинство детекторов на основе  $HgI_2$  с чувствительными слоями выше 1 мм имеют плохие спектрометрические качества из-за малой дрейфовой длины носителей,

препятствующей полному сбору заряда. Однако в ряде задач, где спектрометрия не требуется, толстые  $HgI_2$ -детекторы могут иметь ряд преимуществ перед другими типами счетчиков, например по сравнению со сцинтилляционными детекторами, которые имеют большие габариты и для работы фотоумножителей требуют высоковольтных источников питания. Эти преимущества заключаются в малой массе и небольшом объеме толстых  $HgI_2$ -детекторов, а также в малой потребляющей мощности. Используя толстые кристаллы  $HgI_2$ , можно создать портативные счетчики для контроля полей гамма-излучения.

На основе больших кристаллов, выращенных методом температурных осцилляций, были изготовлены портативные гамма-счётчики с толщиной чувствительной области до 1,5 см и активной поверхностью до  $17 \text{ см}^2$  [88]. При напряжении смещения 1000 В/см ток утечки не превышал 100 пА, что позволило для подачи смещения в портативном варианте счетчика использовать высоковольтный конденсатор, который требует периодической зарядки через каждые 8—20 ч. Эффективность регистрации гамма-излучения такими детекторами оказалась эквивалентной сцинтиллятору из  $NaI$  размером  $\text{Ø}3,8 \times 3,8 \text{ см}$ .

На рис. 1.6.3 приведены спектры  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ , иллюстрирующие спектрометрические свойства  $HgI_2$ -детекторов толщиной 1 см. Из рис. 1.6.3 видно, что удаётся получить полностью разделенные пики даже при энергии гамма-излучения более 1 МэВ. Спектры близки к тем, которые получают с помощью эквивалентных по эффективности  $NaI$  сцинтилляторов.

Неожиданный результат был получен в работе [90] при исследовании радиационной стойкости  $HgI_2$ -детекторов при их облучении быстрыми нейтронами ( $E_n = 8 \text{ МэВ}$ ). Амплитуда сигнала  $HgI_2$ -детектора вплоть до флюенса  $10^{15} \text{ см}^{-2}$  меняется очень мало, в то время как у  $CdTe$ -детекторов резкий спад наблюдается уже при  $10^{11} \text{ см}^{-2}$ , а у кремниевых детекторов при  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Энергетическое разрешение  $HgI_2$ -детекторов для  $\alpha$ -частиц с энергией 5,5 МэВ практически не меняется в интервале потоков  $10^9$ — $10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Таким образом, детекторы на основе  $HgI_2$  способны работать в качестве спектрометров заряженных частиц с умеренным разрешением в нейтронных полях высокой интенсивности.

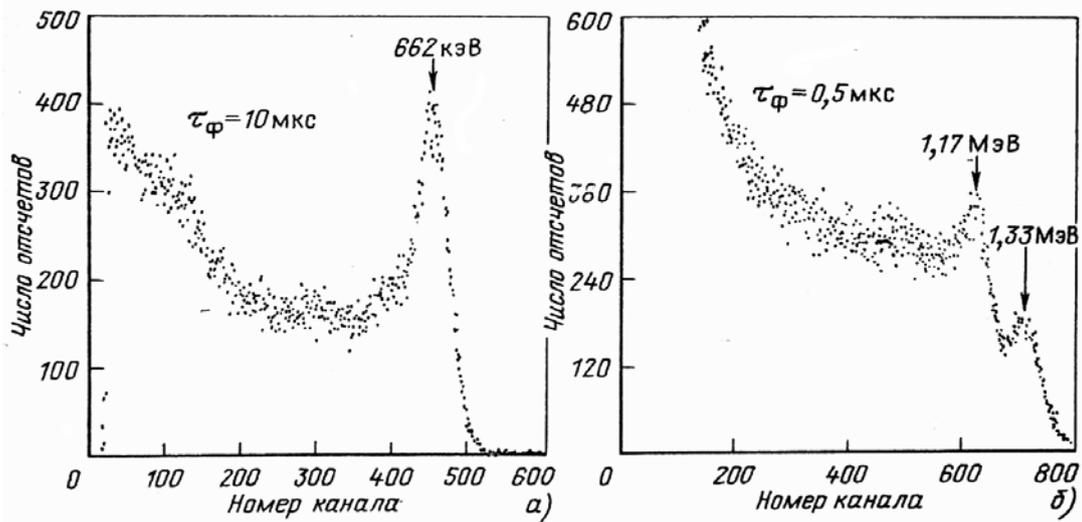


Рис. 1.6.3 - Спектры  $^{137}\text{Cs}$  (а) и  $^{60}\text{Co}$  (б), полученные с помощью  $\text{HgI}_2$ -детектора толщиной 1 см

В работе [91] сделан вывод о принципиальной возможности получения такого же энергетического разрешения на неохлаждаемых  $\text{HgI}_2$ , как на охлаждаемых  $\text{Si}(\text{Li})$  и  $\text{Ge}$  ППД. Реальные значения энергетического разрешения неохлаждаемых  $\text{HgI}_2$  значительно уступают расчётным данным. Основные причины заключаются в шумах электроники до энергии квантов 30 кэВ и флуктуации сбора заряда из-за неоднородности свойств чувствительного объёма детектора.

## 2 Детекторы нейтронного излучения

Для регистрации нейтронного излучения чаще всего используют вторичное излучения (альфа или гамма), которое затем производит ионизацию в рабочем объёме детектора. Поэтому для регистрации нейтронов также используют газовые наполнители или скинтилляционные материалы, содержащие нуклиды с высоким сечением взаимодействия с нейтронами, чаще всего уже термализованными. Такими нуклидами являются –  $^1\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $\text{Cd}$  и  $\text{Gd}$  в естественной смеси,  $^{235}\text{U}$ . Поэтому все детекторы тепловых нейтронов в том или ином виде содержат ядра этих нуклидов либо непосредственно в своём составе либо в качестве внешнего радиатора. Например,  $\text{CdWO}_4$  ( $\text{CWO}$ ),  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5(\text{Ce})$  ( $\text{GSO}$ ).

Большое место в ряду нейтронных детекторов занимают скинтилляторы. Так же как для гамма-излучения скинтилляционные детекторы нейтронов делятся на три основных класса – твёрдые, жидкие и газообразные. Твёрдые представлены неорганическими и органическими поли- и монокристаллами. Среди жидких – в основном органические соединения. Основа газонаполненных детекторов –  $^3\text{He}$  и газообразные соединения  $\text{Li}$  и  $\text{B}$ .

Детекторы быстрых нейтронов и камеры деления не будут рассматриваться в данном обзоре по причине существенно меньшей (на два порядка и более) эффективности регистрации.

Очень удобными для регистрации нейтронов являются детекторы на основе ПМ. Водородсодержащее тело пластмассового детектора, в которое довольно просто вводить любые

добавки, само является замедлителем нейтронов. Практически неограниченный объём и конфигурация пластикового детектора позволяют обеспечить высокую эффективность регистрации нейтронов. Последние достижения позволяют использовать и другое преимущество ПМ – быстроедействие (см. ниже).

Важным технологическим достижением является также возможность изготовления **ПМ фибер-сцинтилляторов** – ПМ трубок [92]. Эти трубки, обладая преимуществами ПМ сцинтилляторов, являются гибкими и могут быть использованы также в качестве световодов.

Сцинтиллятор  $LiI$  обладает высоким сечением реакции  ${}^6LiI(n, \alpha)T$  на тепловых нейтронах. Эффективность регистрации тепловых нейтронов достигает 80 %. Однако при этом регистрируются и гамма-кванты. Для выделения нейтронного пика используют второй сцинтиллятор с низкой эффективностью регистрации нейтронов. Из суммарного спектра вычитают  $\gamma$ -спектр, получая в результате только гамма-линии, обусловленные взаимодействием нейтронов.

В работе [93] в качестве второго сцинтиллятора используется  $NaI(Tl)$ . Результат и принцип работы такого детектора ясен из рисунка 2.1.

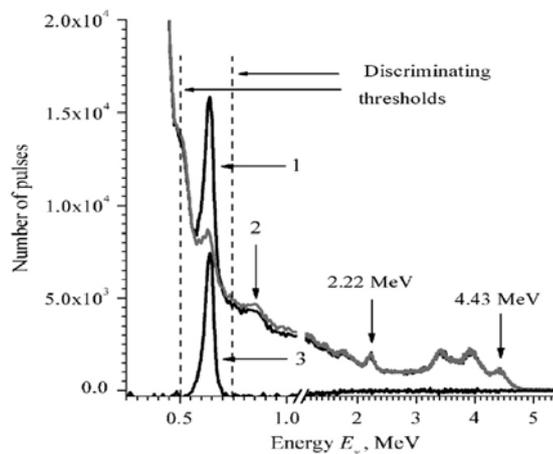


Рисунок 2.1 – Спектры гамма-излучения  $Pu-Be$  нейтронного источника, полученные с помощью  $LiI+NaI(Tl)$  детектора (кривая 1),  $NaI(Tl)$  детектора (кривая 2) и разностный результирующий спектр (кривая 3)

В работе [94] для регистрации нейтронов используется монокристалл вольфрамата кадмия  $CWO$  и два фильтра: порошок  $LiI$  толщиной 10 мм – для нейтронов, и  $Pb$  толщиной 50 мм – для гамма-квантов.

Регистрируется гамма-излучение характерное для взаимодействия нейтронов с телом сцинтиллятора и замедлителем: 145,8 кэВ и 273,4 кэВ – пики радиационного захвата на ядрах  ${}^{186}W$  и 558 кэВ на ядре  ${}^{113}Cd$ , 2,22 МэВ – линия захвата теплового нейтрона ядром водорода. На рисунках 2.2, 2.3 представлены две энергетические области гамма-спектра  $Pu-Be$  нейтронного источника, полученные с помощью  $CWO$  кристалла  $\varnothing 40 \times 40$  мм [95]. Спектры получены с использованием гамма и нейтронного фильтра (50 мм  $Pb$  и 10 мм  $LiF$ ).

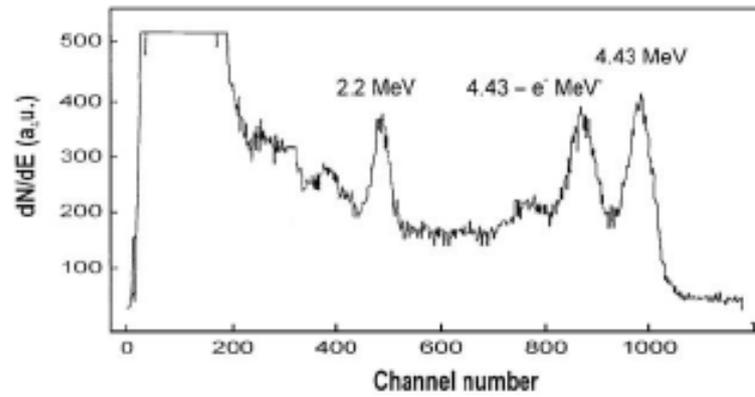


Рисунок 2.2 - Амплитудный спектр *Pu-Be* источника полученный с помощью *CWO* кристалла (большие энергии)

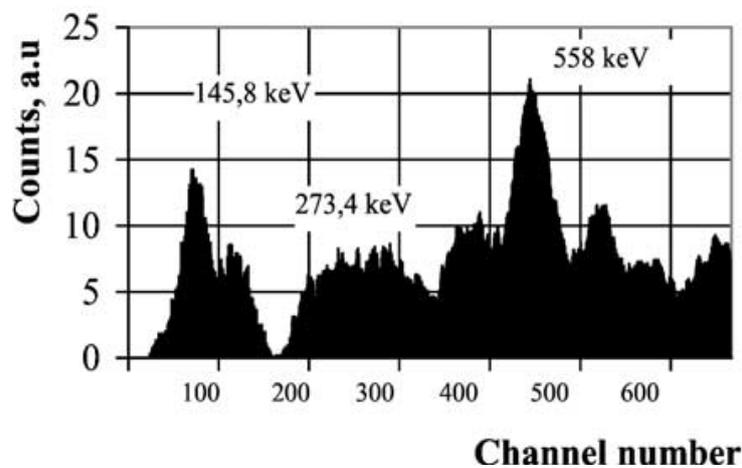


Рисунок 2.3 - Амплитудный спектр *Pu-Be* источника полученный с помощью *CWO* кристалла (малые энергии)

Сравнение эффективностей регистрации нейтронов сцинтилляторами  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ , *GSO*, *CWO* представлены в таблице 2.1.

Использование сцинтиллятора *BGO* при регистрации нейтронов показано в гл. 1.1.3.

На рисунке 2.4 представлен нейтронный спектр полученный на основе пластмассового и *BGO* сцинтилляторов и возможности стандартов по получению энергетической градуировки [21].

Таблица 2.1 - Эффективности регистрации тепловых нейтронов [95]

Сцинтиллятор	Детектор	Размер детектора, мм	Энергия вторичных частиц или $\gamma$ -квантов, кэВ	Эффективность регистрации, %
${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$	Монокристалл	25x2	${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$	87
<i>GSO</i>	Кристалл	63x3	30-1000	67
<i>CWO</i>	Кристалл	80x2	20-100 30-1000	3,4 11,8
<i>CWO</i>	Монокристалл	40x40	30-1000	14,3

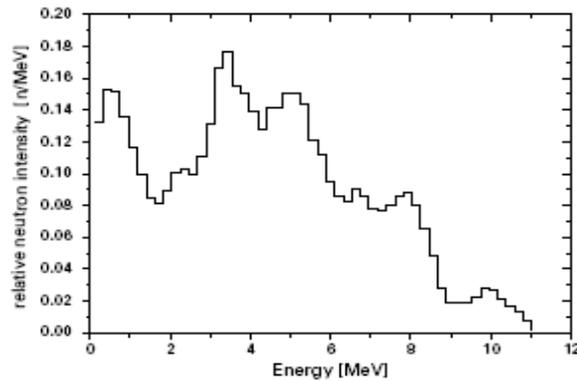


Рисунок 2.4 – Энергетическое распределение нейтронов *Am-Be* источника, зарегистрированных с помощью комбинированного *BGO*-пластик детектора

### 3 Газовые счётчики

#### 3.1 Газонаполненные счётчики

Классические газонаполненные счётчики рентгеновского, гамма и нейтронного излучения очень хорошо известны и к настоящему времени не претерпели сколь-нибудь заметных изменений [96,97].

Спектрометрические газонаполненные детекторы рентгеновского и гамма излучения используются в основном в аппаратуре для анализа состава вещества и занимают промежуточное положение между ППД и *NaI(Tl)*. Они не требуют низких температур, имеют высокий коэффициент газового усиления, устойчивы к воздействию температуры и вибрации и сравнительно недороги. Недостатками является низкая эффективность регистрации, ограничение по загрузкам (из-за разрушения и осаждения гасящей добавки на электродах и стенках счётчика), искажения спектра при больших загрузках.

Максимальная эффективность регистрации тепловых нейтронов у  $^3\text{He}$ -счётчиков высокая - достигает 80 %. Эффективность регистрации борных счётчиков с наполнителем  $\text{BF}_3$  в несколько раз меньше.

Газовые счётчики нейтронов и гамма-излучения часто используют в полевых и производственных условиях особенно в режиме Гейгера-Мюллера, благодаря простоте регистрирующей электроники и надёжности детекторов [98].

Представляет интерес новый тип газонаполненного детектора на основе газового электронного умножителя (Gas Electron Multiplier, GEM или г.э.у.). Это детектор предложен Ф. Саули в 1996 г. в ЦЕРНе [99] и является наиболее успешным изобретением последних десятилетий в области регистрации ионизирующих излучений особенно в применении к фундаментальным исследованиям в области ядерной физики и физики элементарных частиц [100].

### 3.2 Детекторы излучений на основе газовых электронных умножителей

Газовый электронный умножитель принципиально представляет собой тонкую диэлектрическую полиимидную (Kapton) плёнку толщиной 5 мкм, покрытую с обеих сторон медной фольгой толщиной 5 мкм, в которой проделано множество отверстий, см. рис. 3.1.

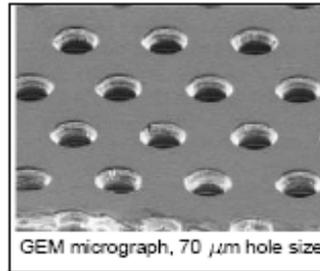


Рисунок 3.1 – Структура г.э.у.

Отверстия имеют форму двойного конуса и расположены в виде гексагональной матрицы с шагом 140 мкм и диаметром 60-80 мкм по металлу и 40-60 мкм в центре плёнки. Г.э.у. изготавливается с помощью фотолитографии и химического травления металла и диэлектрика с обеих сторон плёнки.

При подаче разности потенциалов между металлическими электродами 400-500 В в отверстиях формируется сильное электрическое поле напряжённостью  $\sim 50$  кВ/см. При уменьшении диаметра отверстия электрическое поле в отверстии приближается к полю плоскопараллельного промежутка.

Первичные электроны, рождённые излучением в газовом промежутке перед г.э.у. дрейфуют вдоль силовых линий и фокусируются в отверстия, где под действием электрического поля развиваются лавины. Таким образом, каждое отверстие представляет собой независимый пропорциональный счётчик. Заметная часть электронов лавины может выйти из отверстия в газовый промежуток, что можно использовать для усиления в последующих каскадах или для регистрации на анодном считывающем электроде. Именно способность г.э.у. работать в каскадной конфигурации является одним из его главных преимуществ перед другими газовыми детекторами.

Уникальным свойством детекторов на основе г.э.у. является возможность пространственного разделения процессов усиления и визуализация событий с хорошим разрешением.

В работе [101] предложена конструкция нейтронного детектора на основе г.э.у. структуры, рисунок 3.2. Толщина слоёв *Gd* и *CsI* составляет 5 мкм. При этом эффективность регистрации – 5%.

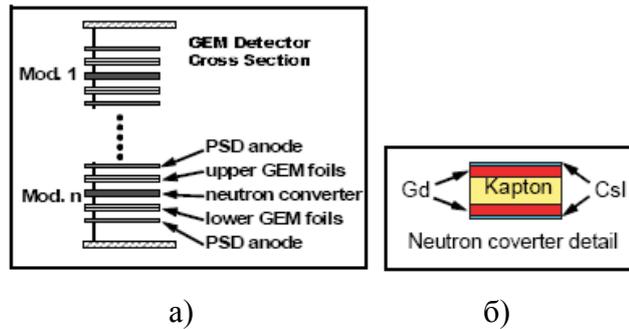


Рисунок 3.2 - Нейтронный детектор на основе г.э.у.: а) принципиальная конструкция; б) схема нейтронного конвертера.

#### 4 Твердотельные ФЭУ (фотодиоды)

Традиционная и широко используемая система сцинтиллятор-фотодиод позволяет регистрировать радиационные излучения в широком диапазоне энергий и интенсивностей с временами 10-100 нс и энергетическим разрешением порядка 10 %. ФЭУ присущи недостатки – нестабильность характеристик во времени, высоковольтное питание, недостаточная механическая прочность и вес.

Альтернативой традиционным вакуумным ФЭУ являются твердотельные фотоприемники, представленные фотодиодами (ФД) которые до последнего времени имели недостатки - отсутствие внутреннего усиления и большой темновой ток, который препятствовал регистрации слабых световых сигналов. Сегодня, с развитием электроники, данные фотоприемники становятся все более актуальными и выгодно отличается от вакуумного ФЭУ значительно более низким напряжением питания, меньшей потребляемой мощностью, небольшими габаритами и весом, более высокими надёжностью и стабильностью характеристик, нечувствительностью к магнитным полям, высокой линейностью световой характеристики в широком (до восьми порядков) диапазоне интенсивности светового потока [102].

В настоящий момент можно выделить 3 типа фотоприемников:

- лавинный фотодиод;
- кремниевый фотоэлектронный умножитель
- PIN фотодиод;
- металл-диэлектрик полупроводниковый фотодиод

##### 4.1 Лавинный фотодиод

Лавинные полупроводниковые приборы появились почти одновременно с первыми диодами и транзисторами. Сам по себе лавинный процесс - довольно типичное явление для всех полупроводниковых приборов. Именно лавинный пробой является частой причиной выхода из строя транзисторов и диодов и пр. полупроводниковых устройств.

С самого начала предпринимались многочисленные попытки не только защититься от лавинных процессов в полупроводнике, но и использовать лавинное умножение в детекторах для регистрации очень слабых сигналов от внешних воздействий. Эта задача оказалась очень сложной, и разработанные приборы были дорогими и недолговечными. Однако, в связи с новыми технологическими достижениями, в последнее время лавинные детекторы начали использоваться в ядерной физике и физике элементарных частиц.

Благодаря ряду особых качеств, лавинные детекторы конкурируют с обычными детекторами. Использование кремниевых приборов с лавинным усилением наиболее эффективно для регистрации слабых потоков света, именно в этой области особенно четко выявляются преимущества лавинных детекторов. А именно:

- обладают высоким отношением сигнала к шуму за счет внутреннего усиления и поэтому могут быть использованы для регистрации малых интенсивностей света; обычный кремниевый фотодиод способен регистрировать потоки света, начиная с нескольких тысяч фотонов, в то время как даже обычные лавинные детекторы регистрируют поток света на уровне нескольких сотен фотонов.
- имеют высокую квантовую эффективность регистрации света. Если у лучших образцов ФЭУ квантовая эффективность - порядка 25 % (обычно - 10-15 %), то у APD (Avalanche PhotoDiode) эффективность, как правило, более 50 %, и достигает 90 %. У MAPD эффективность регистрации фотона может составлять порядка 30 %;
- обладают высоким временным разрешением (лучше 1 наносекунды) вследствие малой глубины зоны обеднения.

Лавинные фотодиоды сохраняют все полезные свойства обычных кремниевых детекторов. Однако работа детектора в лавинном режиме предъявляет особые требования к стабильности рабочей точки, так как коэффициент лавинного умножения имеет сильную зависимость от напряжения и от температуры. Например, для APD производства фирмы EG&G типа C30626E при  $M=100$  коэффициент усиления уменьшается на 6.7 % при увеличении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, при увеличении температуры на  $15^{\circ}\text{C}$  коэффициент усиления  $M$  изменяется от 100 до 1. Для APD производства фирмы Hamamatsu типа S5345 с  $M=100$  температурный коэффициент составляет - 3.3 %/ $^{\circ}\text{C}$ .

Эти требования ограничивают применение лавинных детекторов [103].

#### **4.2 Кремниевый фотоэлектронный умножитель**

Лавинные фотодиоды со структурой микроячеек (пикселов), каждая из которых представляет счетчик единичных фотонов способны регистрировать малые интенсивности света (на уровне нескольких десятков и даже единичных фотонов), при этом обладая высоким коэффициентом внутреннего усиления  $M \approx 10^6$  подобно некоторым ФЭУ [103].

Появление лавинных фотодиодов с отрицательной обратной связью, которая гасит лавинный процесс, позволило создать лавинный фотодиод, работающий в так называемой «гейгеровской» моде (APDg). Такой APDg обладает высоким коэффициентом усиления ( $10^5 \div 10^7$ ). Однако при этом мертвое время прибора становится большим (порядка микросекунд).

Как и газоразрядный счетчик Гейгера-Мюллера, который способен регистрировать только факт прохождения ионизирующей частицы, так и APDg способен регистрировать лишь факт рождения фотоэлектронов под действием внешнего света, но не их количество. Поэтому данный фотоприемник не может быть использован в качестве детектора регистрирующего интенсивность падающего излучения.

С целью решения проблемы с регистрацией интенсивности излучения разработан новый тип фотодетектора — кремниевый микропиксельный лавинный фотодиод MAPD (Micropixels Avalanche PhotoDiode). MAPD – это не повсеместно признанная аббревиатура данного типа фотодиодов, он также называется

- SiPM (Silicon PhotoMultiplier);
- MPGM APD (Multipixel Geiger-mode Avalanche PhotoDiode);
- SSPM (Solid State PhotoMultiplier);
- G-APD (Geiger-mode Avalanche PhotoDiode);
- GMPD (Geiger-Mode PhotoDiode);
- DPPD (Digital Pixel PhotoDiode);
- MCPC (MicroCell Photon Counter);
- MAD (Multicell Avalanche Diode).

Данный вид детекторов представляет собой фотоприемник на основе упорядоченного набора (матрицы) пикселей (примерно  $10^3 \text{ мм}^2$ ), выполненных на общей подложке. Каждый пиксель представляет из себя APDg работающий в «гейгеровском» режиме с коэффициентом умножения порядка  $10^6$ , но весь MAPD представляет собой аналоговый детектор, так как выходной сигнал MAPD есть сумма сигналов со всех пикселей, сработавших при поглощении ими фотонов.

Отметим, что когда интенсивность падающего излучения велика, т. е. вероятность рождения нескольких фотоэлектронов в одном пикселе значительна при этом, как правило, происходит срабатывание всех ячеек, наступает насыщение выходного сигнала с MAPD. Таким образом, существует ограничение сверху на спектрометрическую регистрацию интенсивности света.

MAPD представляет из себя прибор нового типа для детектирования вспышек света слабой интенсивности (на уровне одиночных фотонов) и длительностью порядка единиц - сотен наносекунд. Аналогично вакуумным ФЭУ, MAPD может стать прибором широкого применения благодаря следующим качествам:

- высокое внутреннее усиление порядка  $10^6$ , что значительно снижает требования к электронике;
- малый разброс коэффициента усиления (около 10 %) и, как следствие, низкий шум-фактор;
- невысокая чувствительность коэффициента усиления к изменению температуры и напряжения питания;
- эффективность регистрации видимого света на уровне вакуумных ФЭУ;
- возможность регистрации наносекундных вспышек света без искажения формы детектируемого импульса;
- возможность работы, как в режиме счета импульсов, так и в спектрометрическом режиме;
- хорошее временное разрешение (десятки пикосекунд);
- невысокое напряжение питания (25—60 В);
- нечувствительность к магнитному полю;
- компактность (размеры кристалла порядка от  $1 \times 1 \text{ мм}^2$  до  $5 \times 5 \text{ мм}^2$ ), рис. 4.1.



Рис 4.1 - Фотография вакуумного ФЭУ и SiPM.

Основным недостатком SiPM являются его малые размеры. На сегодняшний день максимальные размеры отдельных экспериментальных диодов не превышает  $5 \times 5 \text{ мм}$ , что весьма ограничивает их применение.

### 4.3 PIN фотодиод

Структура pin-фотодиода спроектирована так, чтобы избежать недостатков фотодиода pn-типа, рисунок 4.2. Все основные принципы регистрации сохраняются.

Введение слоя собственного полупроводника между p и n слоями примесного полупроводника позволяет существенно увеличить размер области пространственного заряда. В i-слое свободные носители практически отсутствуют и силовые линии электрического поля

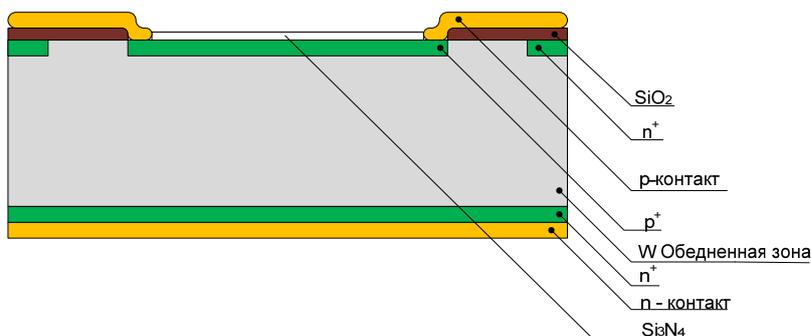


Рисунок 4.2 - Конструкция pin-фотодиода

начинающие с доноров в n-области без экранировки проходят через i-слой и заканчиваются на акцепторах p-области.

Ширина i-слоя составляет обычно 500-700 мкм. В отличие же от i-зоны, легированные слои сделаны очень тонкими. Все вместе это сделано для того, чтобы все оптическое излучение поглощалось в i-слое и сокращалось время переноса зарядов из i – зоны в легированные области. Итак, основное преимущество pin-фотодиода заключается в высоких скоростях переключения, так как поглощение излучения происходит в i-слое, где за счет дрейфового переноса высокие скорости для носителей заряда.

Другим преимуществом является высокая квантовая эффективность, поскольку толщина i-слоя обычно больше обратного коэффициента поглощения и все фотоны поглощаются в i-слое.

#### 4.4 Металл-диэлектрик полупроводниковый фотодиод

Использование структуры типа металл-диэлектрик полупроводник (МДП) на основе кремния в качестве лавинного фотодиода было предложено в работе 1975 года [104]. Данный вид фотодиодов характеризуется недостижимыми для обычных фотодиодов коэффициентами усиления и кардинальным улучшением шумовых характеристик. Главный недостаток данных структур – это слабая воспроизводимость процесса «легирования» широкозонного слоя.

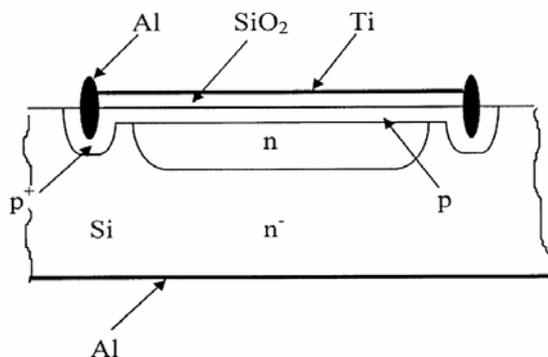


Рисунок 4.3 - Конструкция МД-р-n-фотодиода

Данный вид диодов занимает промежуточное положение между традиционными лавинными фотодиодами и фоточувствительными МДП структурами, предназначенными для работы в лавинном режиме. По конструкции, это планарный фотодиод с тонким слабо

легированным коллектором, приемная площадка которого закрыта слоем диэлектрика и полупрозрачным металлическим покрытием, соединенным с коллекторным электродом, рис. 4.3.

По принципу действия – это МДП устройство, в котором диодная структура обеспечивает сток носителей с границы раздела полупроводник-диэлектрик на внешний электрод, соединенный с металлическим покрытием диэлектрика. Это дает возможность работы МДП структуры в лавинном режиме при непрерывном режиме смещения. Тонкий коллекторный слой в рабочем режиме полностью обеднен и служит для понижения энергии носителей, поступающих на границу раздела диэлектрик-полупроводник.

#### 4.5 Сравнение детекторов вторичного излучения

В таблице 4.1 приведены сравнительные характеристики твердотельных ФЭУ и других фотоприемников, применяемых для регистрации фотонов.

Таблица 4.1 - Сравнение характеристик детекторов вторичного излучения

Параметр	Лавинный фотодиод	PIN-диод	Вакуумный ФЭУ	МДП структура	SiPM
Эффективность регистрации света, %					
470 nm	50	50	20		15
590 nm	60-70	60-70	7-15		25
670 nm	80	80	< 1		15
Усиление	100-200	1	$10^6-10^7$	$10^3$	$10^6$
Шум - фактор, F	$\geq 2$	1	1.3 - 4.0	5	1.1 - 1.3
Пороговая чувствительность (S/N=1), фотон	$\sim 10$	$\sim 200$	1	10	1
Напряжение смещения, В	100-1000	20-200	1000-2000	100-1000	50
Работа в магнитном поле	Да	Да	Нет	Да	Да

#### 4.6 Сцинтилляторы, используемые в комбинации с фотодиодом

Важным в реализации любого прибора является правильный выбор сцинтиллятора и фотоумножителя. Сцинтиллятор выбирается в соответствии со следующими требованиями: хорошая прозрачность к собственному излучению, высокий световыход, высокая эффективность регистрации гамма излучения, негигроскопичность сцинтилляционного материала и малое время высвечивания.

Классический сцинтиллятор *NaI(Tl)* имеет спектр излучения, значительно смещённый относительно области чувствительности ФД. Поэтому параметры системы сцинтиллятор-ФД на основе этого сцинтиллятора уступают характеристикам системы на основе вакуумного ФЭУ. По этой же причине не достигнут результат с пластмассовыми сцинтилляторами.

Хорошее согласование с ФД получается для  $CsI(Tl)$ , максимум спектра высвечивания которого приходится на 560-590 нм.

В системах с использованием фотодиода могут применяться также  $BGO$  сцинтилляторы с максимумом излучения при 480 нм,  $LiI(Sn)$  – 530,  $CWO$  – 540 нм,  $CsI(Sm)$  – 700-900 нм,  $ZnS(Ag)$  – 450-470 нм.

Сцинтилляторы  $CdS(Te)$  имеют спектр высвечивания с максимумом на 730 нм, высокий энергетический выход, хорошее быстродействие. Условия спектрального согласования с кремниевым ФД близки к оптимальным.

Высоким энергетическим выходом обладают и сцинтилляторы на основе селенида цинка. Однако их быстродействие хуже, чем у  $CdS(Te)$ . На основе сульфида кадмия получены также сцинтилляторы с максимумом спектра при 1020 нм, которые спектрально хорошо согласуются с кремниевыми ФД.

Сцинтилляторы  $LSO$  и  $LYSO$  также имеют эмиссию излучения хорошо согласующуюся с фоточувствительностью SiPM ФЭУ.

## 5 Спектрсмещающие световоды

В практике радиационного мониторинга могут использоваться сцинтилляционные детекторы большого размера. Проблемой при этом является сбор и регистрация сцинтилляционного излучения. Возможности наибольшей концентрации света и уменьшения габаритов фоторегистратора появились с применением спектрсмещающих световодов [105]. Они позволяют увеличить площадь фоточувствительной поверхности без усложнения электронного обеспечения.

Принцип действия спектрсмещающего световода основан на преобразовании в нём света сцинтилляций детектора. Для этого в световод вводят специальные люминесцентные композиции, которые смещают сцинтилляционный спектр в область максимальной чувствительности ФЭУ и усиливают интенсивность света.

Оценки показывают, что для детекторов очень большой площади, используемых, например, в физике элементарных частиц, световод из полиметилметакрилата в воде площадью  $1 \text{ м}^2$  способен 17-кратно усилить световой сигнал. Использование полистирола увеличит эффект примерно в 1,5 раза.

## 6 Заключение по детекторам

Сводные характеристики твёрдых неорганических сцинтилляторов представлены в таблице 6.1.

Анализ возможностей современных детекторов показал, что для целей учёта и контроля нельзя рекомендовать заведомо наилучший - слишком многопараметрической является задача. Однако, в отсутствии явного прорыва в этом направлении, прогресс, тем не менее, ощутим.

Таблица 6.1 - Характеристики некоторых твёрдых неорганических сцинтилляторов

Материал	Плотность (г/см <sup>3</sup> )	Гигроскопичность	Кэфф. преломления	Радиационная длина	Время высвечивания, медленная компонента, (нс)	Время высвечивания, быстрая компонента, (нс)	Относительный световыход, % (фот./кэВ)	dE/dx МэВ/см	Энерг. разрешение, %	Длина волны макс. испускания, нм
NaI(Tl)	3.67	да	1.85	2.59	230	5	100 (8,8)	-	6-8	415
CsI(Tl)	4.51	слабая	1,79	2.45	700	20	30 (4,8)	-	10	550
BGO	7.13	нет	2.19	1.11	300-600	нет	12-13 (0,8)	9.2	10.1	480
BaF <sub>2</sub>	4.88	слабая	1.56	2.06	600	<0.9	3-5 (0,14)	6.5	18	195-220
CaF <sub>2</sub> -Eu	3.19	нет	1,44	-	-	-	8.4 (29)	-	9-10.5	430
YAlO <sub>3</sub> :Ce	5.35	нет	1.94	2.36	250	17-35	30-40 (2)	-	-	350-390
Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Ce	4.56	-	-	3.56	-	-	30 (1,4)	-	-	550
BeO	-	-	-	-	320	10	4,1-6,7	-	-	-
LaBr <sub>3</sub> (Ce)	5.3	нет	-	-	-	30	45-60	-	3-5	390
LaCl <sub>3</sub> (Ce)	-	-	-	2.8	-	30	50	-	-	-
ZnO					3.8	0.4	(10)			295
LSO:Ce	7.4	-	-	1.14	-	40	75 (2,5)	-	10	420
CdWO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	(19.5)	-	7.5	500-600
GSO:Ce	6.71	нет	1.9	1.39	600	30-60	40	-	9.5	435-450
CdI <sub>2</sub>	5.76	-	-	1.50	-	3	10	-	-	540

Достигнуто существенное улучшение временных характеристик нейтронных счётчиков совпадений с использованием вместо <sup>3</sup>He-счётчиков сэндвича из полистирола и BGO.

Перспективным является бромид лантана с точки зрения использования его в радиационных мониторах с режимом спектрометрии для отбора случаев передвижения санкционированных радиоактивных материалов. При условии, что его стоимость со временем будет уменьшаться, а возможные размеры кристалла увеличиваться.

Несомненно, перспективным являются детекторы на основе микро и нанотехнологий - газовые электронные умножители, тонковолоконные пластмассовые сцинтилляторы, наносцинтилляторы. Последние являются продуктом самого молодого и малоизученного направления научно-технической деятельности, на которое возлагаются большие надежды.

По нашему мнению совсем не используются в прикладных целях возможности спектросмещающих световодов, которые могут дать положительный эффект при регистрации слабых потоков нейтронного и гамма-излучения.

Остаётся надежда на успехи в развитии технологий изготовления фотодиодов для их использования вместо вакуумных ФЭУ. В этом направлении надежды связаны с увеличением коэффициента усиления и уменьшением стоимости фотодиодов.

## 7 Российские гамма-спектрометры

В России на данный момент существует ряд фирм, занимающихся производством гамма – спектрометров и программного обеспечения к ним. Все фирмы можно легко распределить географически по месту первоначальной работы сотрудников или руководителей фирм:

- из ОИЯИ г. Дубна, Московской обл.: ЗАО НТЦ «Аспект», ООО «Парсек».
- из ФГУП НИЦ «СНИИП» г. Москва: Группа предприятий «Грин Стар».
- из ФГУП «ВНИИФТРИ» п. Менделеево, Московской обл.: НПП «Доза», НТЦ «Амплитуда», ООО «ЛСРМ».
- из ФГУП «ВНИИМ» г. Санкт - Петербург: НТЦ «Радэк».
- из ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН г. Санкт – Петербург: ЗАО «Техноэксан».

Попытаемся непредвзято провести анализ состояния наиболее применяемых и известных спектрометрических систем, которые могут использоваться для неразрушающего изотопного анализа ЯМ с германиевыми и сцинтилляционными детекторами. Информация получена из рекламных листовок и с сайтов представленных производителей [http://: www.aspect.dubna.ru](http://www.aspect.dubna.ru), [www.greenstar.ru](http://www.greenstar.ru), [www.amplituda.ru](http://www.amplituda.ru), [www.rtc.ru/industry/industry.shtml](http://www.rtc.ru/industry/industry.shtml), [www.technoexan.ru](http://www.technoexan.ru), [www.parsek.ru](http://www.parsek.ru), [www.doza.ru](http://www.doza.ru).

Приносим извинения у тех производителей отечественной аппаратуры, чьи изделия не рассмотрены в настоящей работе, поскольку к моменту подготовки данной работы мы, к сожалению, не располагали необходимой информацией.

### 7.1 НПП «Доза» г. Зеленоград

#### 7.1.1 Гамма-спектрометр сцинтилляционный “Прогресс-гамма”

Базовый комплект:

- сцинтилляционный блок детектирования (БД) на основе  $NaI(Tl)$  с кристаллом  $\varnothing 63 \times 63$  мм и встроенными блоками питания, усиления и АЦП;
- защита свинцовая 50 мм;
- программное обеспечение «Прогресс-гамма» версии 2000;
- ПЭВМ с принтером.

Технические характеристики:

Относительное энергетическое разрешение на линии 661 КэВ, не более 8,5 %

- диапазон регистрируемых энергий 0.2-3 МэВ;
- минимально измеряемая активность по
  - Cs-137 3 Бк;
  - Th-232 7 Бк;
  - Ra-226 8 Бк;
  - K-40 40 Бк;
- основная погрешность измерения, не более 30 %;

- масса (с защитой, без ПЭВМ) 170 кг;
- потребляемая мощность, не более 400 Вт;
- температурный диапазон  $+10 \div +40$  °С.

Внешний вид гамма - спектрометра сцинтилляционный “Прогресс-гамма” представлен на рис. 7.1.1.



Рисунок 7.1.1 - Сцинтилляционный спектрометр “Прогресс-гамма”

### 7.1.2 Гамма-спектрометр полупроводниковый “Прогресс-ППД”

Базовый комплект поставки:

- блок детектирования на основе детектора из особо чистого германия с эффективностью от 10% до 60% и более (производства фирм EG&G «ORTEC» или «Canberra») с предусилителем и сосудом Дьюара;
- блоки питания и усиления импульсов (различные варианты);
- защита свинцовая (толщиной 5 или низкофоновая композиционная толщиной 8 см);
- плата АЦП (8К или 16К) или отдельный блок анализатора;
- программное обеспечение «Прогресс-ППД» версии 2000;
- ПЭВМ с принтером.

Технические характеристики:

- относительное энергетическое разрешение на линии 1332 КэВ, %, не более 1,8 - 2,0 %;
- диапазон регистрируемых энергий 0,05 – 3 МэВ;
- интегральная нелинейность, не более 0,1 %;
- минимально измеряемая активность определяется чувствительностью детектора;
- основная погрешность измерения, не более 10 %;
- масса (с защитой, без ПЭВМ) 300-700 кг;
- потребляемая мощность, не более 400 Вт;
- температурный диапазон  $+10 \div +40$  °С.

### 7.1.3 Программный комплекс "Прогресс-2000"

«Прогресс-2000» – это комплекс программных средств, предназначенных для решения широкого спектра задач радиационного контроля – от измерений в области сертификации соответствия пищевой продукции, питьевой воды, строительных материалов, продукции лесного хозяйства и др. до мониторинга и задач радиационного контроля на предприятиях ядерного топливного цикла, а также для решения целого ряда исследовательских задач, связанных с измерениями радиоактивности.

Структурно программный комплекс «Прогресс-2000» состоит из программных объектов, позволяющих решать те или иные задачи радиационного контроля. Все они интегрированы в операционную систему Windows, что позволяет легко использовать их в других программах, объединять со стандартными текстовыми процессорами и системами управления баз данных.

Особенности:

- возможность решать все основные спектрометрические задачи радиационного контроля в соответствии с требованиями существующих нормативных документов;
- возможность измерения характеристик различных типов излучений в рамках одного комплекса;
- возможность комплексного изучения одного и того же объекта в рамках одного и того же программного обеспечения;
- использование операционной системы Windows (версии Win-98, Millenium, XP);
- простота в обращении и отсутствие высоких требований к подготовке персонала при решении большинства задач;
- полная методическая и метрологическая обеспеченность;
- автоматический учет погрешности измерений;
- возможность работы в сети;
- встроенная база данных;
- многофакторный контроль за работоспособностью измерительного тракта и стабильностью его метрологических характеристик;
- большой набор стандартных протоколов и возможность быстрого их редактирования.

### 7.1.4 Спектрометрический комплекс "МУЛЬТИРАД" с программным обеспечением "ПРОГРЕСС". НТЦ «Амплитуда» г. Зеленоград

Комплектация (см. рис. 7.1.2):

- набор цифровых спектрометрических и радиометрических измерительных трактов;
- персональный компьютер с установленными программами "Прогресс" и "Таблицы ядерных данных".



Рис. 7.1.2 - Спектрометрический комплекс "МУЛЬТИРАД"

Блоки детектирования, входящие в состав измерительных трактов, подключаются к компьютеру через порт USB. Количество подключенных к одному компьютеру блоков детектирования неограниченно. Состав каждого комплекса (количество и тип измерительных трактов) определяется набором измерительных задач, для решения которых он предназначен.

Перечень гамма - измерительных трактов, используемых в составе установки "МУЛЬТИРАД":

- сцинтилляционный гамма-спектрометрический;
- полупроводниковый гамма-спектрометрический.

Технические характеристики сцинтилляционного гамма-спектрометра:

- тип детектора  $NaI(Tl)$ <sup>1</sup>;
- параметр детектора размер детектора 63х63 мм;
- энергетическое разрешение (ПШПВ) по линии  $^{137}Cs$  (662 кэВ), не более 8,5 %;
- энергетический диапазон 0,05 ÷ 3 МэВ;
- минимальная измеряемая активность (на счётный образец) по:
  - $^{137}Cs$  - 3 Бк;
  - $^{232}Th$  - 7 Бк;
  - $^{226}Ra$  - 8 Бк;
  - $^{40}K$  - 40 Бк;
- основная погрешность измерения, не более 10 %;
- масса со свинцовой защитой (без ПК) 120 кг;
- потребляемая мощность, не более 200 Вт;
- диапазон рабочих температур +10 ÷ +40 °С.

<sup>1</sup> В зависимости от измерительных задач в составе гамма-спектрометрического тракта могут применяться сцинтилляционные детекторы других типов ( $CsI(Tl)$ ,  $CsF_2(Eu)$  и другие) различных размеров. Возможно также применение газонаполненных спектрометрических ионизационных камер.

Технические характеристики полупроводникового гамма - спектрометра:

- тип детектора сверхчистый *Ge*;
- энергетическое разрешение на линии 1332 кэВ, не более 2 кэВ;
- энергетическое разрешение на линии 122 кэВ, не более 1 кэВ;
- диапазон регистрируемых энергий 0,05 ÷ 3 МэВ;
- интегральная нелинейность, не более 0,1 %;
- минимальная измеряемая активность определяется чувствительностью детектора и геометрией измерений;
- основная погрешность измерения, не более 10 %;
- масса (с защитой, без ПК) 300-700 кг;
- потребляемая мощность, не более 400 Вт;
- температурный диапазон +10 ÷ +40 °С.

Комплектация:

- блок детектирования на основе детектора из особо чистого германия с эффективностью от 10 % до 50 % и более производства фирм EG&G «ORTEC» или «Canberra» (различные варианты и модификации);
- сосуд Дьюара;
- комплект соединительных кабелей;
- защита свинцовая (толщиной 5 см или 8 см - низкофоновая композиционная);
- блоки питания и усиления импульсов (различные варианты);
- плата АЦП (8К или 16К) или отдельный блок анализатора;
- программное обеспечение "Прогресс-ППД";
- ПК с принтером.

## **7.2 ЗАО НТЦ «Аспект» г. Дубна**

### **7.2.1 Спектрометр энергии гамма-излучения сцинтилляционный ГАММА-1С**

Прибор зарегистрирован в государственном реестре средств измерений под № 15294 – 96.

Состав:

- блок детектирования сцинтилляционный БДС-Г на основе монокристалла NaI(Tl) 63х63 мм со встроенным усилителем, высоковольтным преобразователем напряжения, системой стабилизации по реперному пику светодиода и термокомпенсацией характеристики преобразования (возможна замена комплекта из АЦП - 1К - В1 и БДС - Г на блок УДС - Г63х63 - USB со встроенным АЦП и интерфейсом USB);

- спектрометрический амплитудно-цифровой преобразователь АЦП - 1К - В1 с буферной памятью и таймером "живого"/реального времени, в конструктиве IBM PC с интерфейсной шиной PCI;
- свинцовый экран - защита Экран - 1СГ (напольная);
- персональный компьютер типа с принтером;
- прикладное программное обеспечение "LSRM" в среде Windows, реализующая методику выполнения измерений, и разработанная ГП "ВНИИФТРИ", свидетельство №746/04.

#### ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

- Диапазон регистрируемых энергий - 0,05 – 3 МэВ.
- Число каналов - 1024.
- Относительное энергетическое разрешение по линии 661 кэВ  $^{137}\text{Cs}$  - не более 8 %.
- Интегральная нелинейность, %, не более  $\pm 1$ .
- Диапазон рабочих температур -  $10 \div 35$  °С.
- Потребляемая мощность от сети, (220 В, 50 Гц), ВА 250.
- Временная нестабильность, %, не более 1.
- Максимальная входная статистическая загрузка –  $50000 \text{ с}^{-1}$ .
- Минимально измеряемая активность согласно МВИ.

Внешний вид сцинтилляционного спектрометра ГАММА-1С см. рис. 7.2.1.



Рис. 7.2.1 - Сцинтилляционный спектрометр ГАММА-1С

#### 7.2.2 Спектрометр энергии гамма-излучения полупроводниковый ГАММА-1П

Технические данные и характеристики ППД спектрометра ГАММА-1П приведены в таблице 7.2.1.

Таблица 7.2.1 Основные технические характеристики спектрометра ГАММА-1П

Диапазон регистрируемых энергий, МэВ	0,05 - 10
Число каналов	8192
Интегральная нелинейность, %, не более	0,05
Максимальная входная статистическая нагрузка, с <sup>-1</sup>	5 10 <sup>4</sup>
Энергетическое разрешение спектрометра (в зависимости от разрешения используемого детектора) по линии гамма-излучения с энергией 1332 кэВ ( <sup>60</sup> Co), кэВ	1,8 - 3,5
Диапазон рабочих температур, °С	от 10 до 35

Состав спектрометра ГАММА-1П:

- германиевый полупроводниковый детектор, ОЧГ или Ge(Li);
- внешний предусилитель спектрометрический зарядочувствительный ПУГ-01;
- спектрометрическое устройство, включающее спектрометрический усилитель, высоковольтный и низковольтный источники питания, выбираемые из предлагаемых в таблице 7.2.2;
- персональный компьютер типа ИВ РС с принтером;
- низкофоновый комбинированный свинцовый экран-защита;
- прикладное программное обеспечение в среде Windows - "LSRM".
- спектрометрический амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП) выбирается по типу интерфейса и требуемым характеристикам (таблица 7.2.3);

Таблица 7.2.2 - Спектрометрические устройства

Спектрометр. устройство, конструктив	Состав	Выходной номинал питания детектора	Выходные номиналы питания предусилителя	Параметры входного сигнала	Параметры выходного сигнала
СУ-03П, моноблок		Полярность (+/-) 50 – 4000 В, 100 мкА Автоматический подъем и спад не более 15 В/с	± 24 В ± 12 В	Полярность: (+/-) Время нарастания <200 нс Постоянная времени спада >50 мкс	Полярность: (+) Максимальная амплитуда 10 В Постоянные времени формирования 0,5; 1; 2; 4; 6; 10 мкс
СУ-04П, конструктив NIM	Блоки: БНН-01 УИС-02 БНВ-05 (или БНВ-08)	Полярность (+/-) 50 – 4000 В, 100 мкА; {или 25 – 1000, 100 мкА} Автоматический подъем и спад не более 15 В/с	± 24 В ± 12 В	Полярность: (+/-) Время нарастания <200 нс Постоянная времени спада >50 мкс	Полярность: (+) Максимальная амплитуда 10 В Постоянные времени формирования 0,5; 1; 2; 4; 6; 10 мкс
СУ-05П,	БНН-03	Полярность (+/-)	± 24 В	Полярность: (+/-)	Полярность: (+)

конструктив	УИС-04	50 – 4000 В, 100 мкА	± 12 В	Время нарастания <200 нс Постоянная времени спада >50 мкс	Максимальная амплитуда 8,2 В; Постоянные времени формирования 2; 6 мкс
Евромеханика	БНВ-07 (или БНВ-09)	{или 5 – 100 В, 100 мкА, или 50 – 1000 В, 100 мкА} Автоматический подъем и спад не более 15 В/с			

Таблица 7.2.3 - Спектрометрические АЦП

Тип АЦП	Исполнение	Интерфейс	Метод преобразования	Частота преобразования, МГц (время, мкс)	Кол-во входов	Кол-во преобразований
АЦП-8К-2М	Плата в ПК	ISA (16 бит)	Вилкинсона	100	2	1
АЦП-8К-В1	Плата в ПК	PCI	Вилкинсона	100	1	1
АЦП-8К-В2					2	2
АЦП-8К-П1	Плата в ПК	PCI	Последоват. приближений	(3,5)	1	1
АЦП-8К-П2					2	2
БПА-02	Евромеханика	RS-232	Вилкинсона	100	1	1
БПА-02N	NIM					
АЦП-USB-8К-В	Приборное	USB	Вилкинсона	100	1	1
АЦП-USB-8К-П	Приборное	USB	Последоват. приближений	(3,5)	1	1
АЦП-RS-8К-В	Приборное	RS232/485	Вилкинсона	100	1	1
АЦП-RS-8К-П						

### 7.2.3 Анализаторы серии АИ на базе ПК

Состав базового комплекта:

- спектрометрический амплитудно-цифровой преобразователь (рис. 7.2.2) выбирается по типу интерфейса и требуемым характеристикам (таблица 7.2.4);

Таблица 7.2.4 - Спектрометрические АЦП

Тип АЦП	Исполнение	Интерфейс	Метод преобр-я	Частота преобр-я, МГц (время, мкс)	Кол-во входов	Кол-во преобр-й	Разрешение	Макс. амплитуда вх. сигнала, В
АЦП-1К-2М	Плата в ПК	ISA (16 бит)	Вилкинсона	100	2	1	1К	10
АЦП-8К-2М							1К – 8К	
АЦП-4К-ЛТ	Плата в ПК	ISA (8 бит)	Вилкинсона	50	1	1	1К – 4К	10
АЦП-4К-тРС	Пром. компьютер							
АЦП-1К-В1	Плата в ПК	PCI	Вилкинсона	100	1	1	1К – 4К	10
АЦП-1К-В2					2	2	1К – 4К	
АЦП-8К-В1					1	1	2К – 8К	
АЦП-8К-В2					2	2	2К – 8К	
АЦП-1К-В8	Плата в ПК	PCI	Вилкинсона	(3,5)	8	1	1К	5
АЦП-8К-П1					1	1	1К, 2К, 4К, 8К	
АЦП-8К-П2	2	2	2К – 8К					
БПА-03-8К-В	Евромеханика	CompactPCI	Вилкинсона	100	1	1	2К – 8К	10
БПА-03-8К-П							Последоват. приближений	
АЦП-USB-8К-В	Приборное	USB	Вилкинсона	100	1	1	2К – 8К	10
АЦП-USB-8К-П	Приборное	USB	Последоват. приближений	(3,5)	1	1	1К, 2К, 4К, 8К	5
АЦП-RS-8К-В	Приборное	RS232/485	Вилкинсона	100	1	1	1К – 8К	10
АЦП-RS-8К-П							Последоват. приближений	

- персональный компьютер с принтером;

- программное обеспечение анализатора в среде Windows - Lsrmlite, SpectraLine;
- программное обеспечение анализатора в среде MSDOS - AnGamma, An.

Обобщённые технические параметры одноплатного АЦП представлены в таблице 7.2.5.



Рисунок 7.2.2 - Спектрометрический одноплатный АЦП

Таблица 7.2.5 – Обобщённые технические данные и характеристики

Диапазон рабочих амплитуд, В	0,05 – 10
Количество каналов	1024, 2048, 4096, 8192
Количество входов	1; 2; 8
Дифференциальная нелинейность, %	0,3 – 1
Интегральная нелинейность, %, не более	0,03
Частота генератора кодовой серии (время преобразования)	100 МГц (3,5 мкс)

#### 7.2.4 Программное обеспечение

Программное обеспечение спектрометрических систем, разработанное совместно с ООО “ЛСРМ”, поддерживает работу со всеми анализаторами производства НПЦ “Аспект”.

Базовое ПО:

- альфа-бета-гамма-спектрометрический анализ Lsrmlite2000;
- управление анализатором Lsrmlite;
- управление анализатором и обработка спектров LsrmliteAnalyser.

ПО решает общие вопросы спектрометрического спектрометрического анализа для любых типов спектрометров (сцинтилляционных и полупроводниковых) и любых типов излучения (альфа, бета, гамма).

Ряд программных продуктов решает конкретные актуальные задачи с использованием специализированных спектрометрических систем:

- контроль за перемещением радиоактивных материалов LsrnCustoms;
- паспортизация радиоактивных отходов Diogen;
- мониторинг жидких сред LsrnWater;
- гамма-мониторинг с географической привязкой LsrnCar;
- измерения активности радона методом сорбации в активированном угле LsrnRadon.

### 7.3 ООО «Парсек» г. Дубна

#### 7.3.1 Спектрометрические аналого-цифровые преобразователи

##### 7.3.1.1 4К-USB сцинтилляционный амплитудный анализатор 4К-САА

Амплитудный анализатор 4К-USB (рис. 7.3.1) предназначен для регистрации и накопления спектров  $\gamma$  - квантов с энергией от 20 кэВ до 6 МэВ с интенсивностью до  $10^6 \text{ с}^{-1}$ . Анализатор выполнен в форме совмещенной с сцинтилляционным блоком конструкции, подключаемый к USB порту, без дополнительных внешних источников питания. Технические характеристики приведены в таблице 7.3.1.

Комплектация анализатора:

1. Блока детектирования типа – БДЭГ4-43-04А.
2. Регулируемого с клавиатуры компьютера источника питания ФЭУ.
3. Усилителя импульсов ФЭУ.
4. Высокоскоростного накапливающего спектрометрического АЦП.

Таблица 7.3.1 - Технические характеристики

Диапазон энергий регистрируемых $\gamma$ – квантов	20 КэВ – 6,0 МэВ
Разрешение на энергии $^{60}\text{Co}$	7,0 %
Постоянное мертвое время	1 мксек
Емкость ЗУ	$2^{32} \times 4096$
Интегральная нелинейность	0,04 %
Дифференциальная нелинейность	$\pm 1,0$ %
Устанавливаемое с клавиатуры компьютера окно регистрации	по всему диапазону
Потребляемая мощность	1,8 ватт

##### 7.3.1.2 В4К-САЦП-USB Высокоскоростной 4к-USB спектрометрический АЦП

Высокоскоростной 4k-USB спектрометрический АЦП последовательного приближения с разравниванием, накапливающий спектрометрическую информацию интенсивностью до  $10^6 \text{ с}^{-1}$ . Технические характеристики приведены в таблице 7.3.2.

Таблица 7.3.2 - Технические характеристики

Тип преобразования	Последовательное приближение с разравниванием
Число измерительных входов	1
Длительность входного импульса	
не менее	0,5 мкс
не более	5,0 мкс
Емкость канала ЗУ	$2^{32} \cdot 4096$
Число разрядов преобразования	12 (4096)
Постоянное мертвое время	1 мкс
Интегральная нелинейность	0,04%
Дифференциальная нелинейность	$\pm 1,0 \%$
Временная нестабильность, не хуже	0,04 % за 8 часов работы
Время выборки (время запоминания)	1,5 Мкс (или по заказу)
Потребление по питанию +5 В	370 мА (1,8 Ватт)
Конструктив:	Пластмассовый корпус 150x80x30 мм
Тип шины	USB

### 7.3.1.3 4К-САЦП-USB Спектрометрический АЦП на 4К с интерфейсом USB и питанием от шины USB

Спектрометрический аналого-цифровой преобразователь типа Вилкинсон с инкрементным запоминающим устройством большой емкости, выполненный в виде внешнего устройства, подключаемого к USB порту, предназначен для преобразования в цифровой код импульсов микросекундного диапазона и накоплении спектрометрической информации с использованием только питания USB порта. Технические характеристики приведены в таблице 7.3.3.

Таблица 7.3.3 - Технические характеристики

Тип преобразования	Вилкинсон
Число измерительных входов	1
Амплитуда измеряемых импульсов	от 40 mV до 4,0 V
Длительность входного импульса	
не менее	0,5 мкс
не более	20,0 мкс
Емкость ЗУ	$2^{32} \cdot 4096$
Число разрядов преобразования	12 (4096)
Частота преобразования	100 МГц
Интегральная нелинейность	0,04%
Дифференциальная нелинейность	$\pm 1,0 \%$ на уровне $5 \cdot 10^4$ в канале
Временная нестабильность, не хуже	0,1% за 8 часов работы
Время выборки (время запоминания)	5,0 мкс (или по заказу)
Потребление по питанию +5 В	470 мА (2,35 Ватт)
Тип шины	USB

Конструктив	пластмассовый корпус, 150*80*30 мм
-------------	------------------------------------

#### 7.3.1.4 4К-САЦППП - 3-х-входовой АЦП последовательного приближения с разравниванием на 4К

Трех-входовой спектрометрический АЦП, использующийся для измерения высокоинтенсивных потоков (до  $4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ ). Есть возможность набора спектра в одну область памяти платы и одновременного чтения из другой области памяти. Программным способом можно выбирать число разрядов преобразования- 12 или 10. Технические характеристики приведены в таблице 7.3.4.

Таблица 7.3.4 - Технические характеристики

Тип преобразования	Последовательное приближение с разравниванием
Число одновременно подключаемых датчиков	3
Амплитуда измеряемых импульсов положительной полярности	от 40 mV до 4,0 V
Длительность переднего фронта входного импульса не менее не более	0,4 мкс 10,0 мкс
Емкость канала ЗУ по каждому входу	232
Число разрядов преобразования по каждому входу	12 (4096) или 10 (1024)
Интегральная нелинейность	0,1 %
Дифференциальная нелинейность	1,5 %
Максимальная интегральная загрузка по трем входам (одному из них)	$400000 \text{ с}^{-1}$
Временная нестабильность (за 8 часов работы)	1,0 канал
Тип шины	PCI

#### 7.3.1.5 САЦП-НМВ-16К - накапливающий спектрометрический АЦП "нулевого мертвого времени" на 16К (вариант РСМСIA)

Технические характеристики приведены в таблице 7.3.5.

Таблица 7.3.5 - Технические характеристики САЦП-НМВ-16К

Полярность анализируемых импульсов	Положительная
Амплитуда	от уровня шумов до 4 V
Форма входных импульсов	"Гауссиан"
Длительность	от 1,0 до 40 мкс
Точность преобразования "амплитуда - код"	214 (16 к)
Интегральная нелинейность	0,03 %
Дифференциальная нелинейность	+0,5 %
Мертвое время	отсутствует
Программное обеспечение	Полнофункциональный режим многоканального амплитудного анализатора
Тип шины	PCMCIA / ISA

### 7.3.1.6 Автономный многоканальный АЦП

Технические характеристики приведены в таблице 7.3.6.

Таблица 7.3.6 - Технические характеристики

Тип преобразования	ВИЛКИНСОН
Число одновременно подключаемых датчиков	3
Амплитуда измеряемых импульсов	от 50 mV до 5 V
Длительность переднего фронта входного импульса, не менее не более	0,4 мкс 10,0 мкс
Емкость канала ЗУ по каждому входу	2 <sup>32</sup>
Число разрядов преобразования по каждому входу	10 (1024)
Время выработки (апертурное время)	5,0 мкс
Частота преобразования	50 МГц
Интегральная нелинейность	0,1 %
Дифференциальная нелинейность	1,5 %
Максимальная интегральная загрузка по трем входам (одному из них)	48000 с <sup>-1</sup>
Временная нестабильность (за 8 часов работы)	1,0 канал
Тип шины	PCI/ISA

### 7.3.1.7 Накапливающий АЦП "нулевого мертвого времени" на 16К

Технические характеристики приведены в таблице 7.3.7.

Таблица 7.3.7 - Технические характеристики

Полярность анализируемых импульсов	Положительная
Амплитуда	от уровня шумов до 4 V
Форма входных импульсов	"Гауссиан"
Длительность	от 1,0 до 40 мксек
Точность преобразования "амплитуда - код"	214 (16 к)
Интегральная нелинейность	0,03 %
Дифференциальная нелинейность	+0,5 %
Мертвое время	отсутствует
Программное обеспечение	Полнофункциональный режим многоканального амплитудного анализатора
Тип шины	PCMCIA / ISA

## 7.4 ЗАО "Техноэксан" г. Санкт-Петербург

### 7.4.1 Многоканальный анализатор амплитуд импульсов MCA 2048.

#### Назначение и основные параметры

MCA2048 предназначен для многоканального анализа амплитудного распределения сигналов, поступающих с различных детекторов. Конструктивно MCA2048 выполнен в виде платы, вставляемой в разъем ISA магистрали персонального компьютера. Поставляется с пакетом программного обеспечения для регистрации и анализа амплитудных спектров.

Основное назначение МСА2048 (рис. 7.4.1) - работа в качестве многоканального анализатора амплитуд при регистрации сигналов, поступающих с различных детекторов: сцинтилляционных, полупроводниковых, ионизационных камер и пропорциональных счетчиков. Технические характеристики приведены в таблице 7.4.1.

Ширина генераторного пика на половине его высоты не более одного канала. Логические сигналы – ТТЛ, активное состояние – высокий уровень. Внешние сигналы – аналоговые и (при необходимости) логические подключаются через разъемы LEMO, установленные на задней стенке платы.

Имеется вариант исполнения в виде малогабаритного внешнего модуля, подключаемого к последовательному порту компьютера.

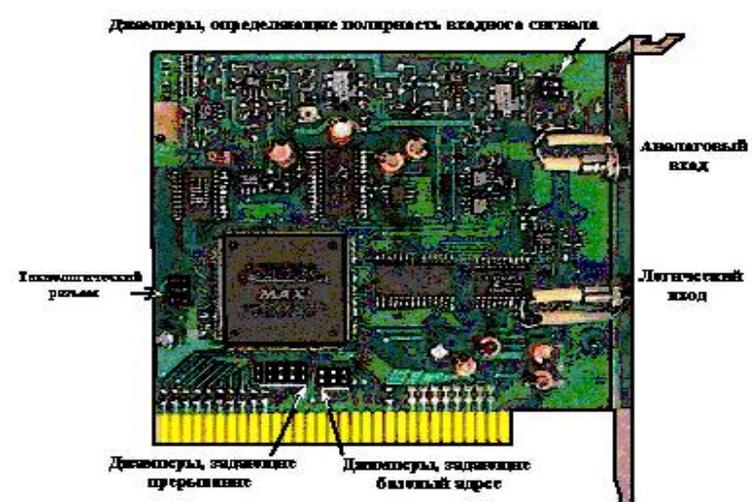


Рис. 7.4.1 - Конструктив МСА2048

Таблица 7.4.1 - Технические характеристики

Максимальная амплитуда аналогового сигнала –	5В
Длительность фронта аналогового сигнала при работе в режиме внутреннего стробирования	не менее 0,5 мксек
Установка порога регистрации сигналов в режиме внутреннего стробирования – программная максимальное значение порога – точность установки порога –	1,25 В 8 бит
Входной импеданс аналогового входа –	10 кОм
Число разрядов (каналов) преобразования –	11 (2048)
Время преобразования (включая цикл записи в память) –	1,2 мкс
Емкость канала буферной памяти –	$2^{32} - 1$
Интегральная нелинейность (по всей шкале преобразования) в режиме внешнего стробирования не более – в режиме внутреннего стробирования не более –	0,01 % 0,1 %
Дифференциальная нелинейность не более –	1 %
Время установления рабочего режима не более –	10 мин

## 7.4.2 Программное обеспечение

Программное обеспечение позволяет осуществлять установку параметров модуля, визуализацию накопления временного спектра в режиме "online", запись и хранение данных на жестком диске.

## 7.5 НТЦ «Радэк» г. Санкт-Петербург

### 7.5.1 Спектрометр гамма-излучений РКГ-1К

Спектрометр выполнен на основе детектора из высокочистого германия.

Технические характеристики приведены в таблице 7.5.1.

Таблица 7.5.1 - Технические характеристики

Диапазон энергии регистрируемых гамма-квантов, МэВ	0,05 - 2,8
Энергетическое разрешение, кэВ	
- для энергии 0.122 МэВ	0,85
- для энергии 1.332 МэВ	1,9
Относительная эффективность регистрации детектора из ОЧГ по сравнению с детектором NaI(Tl) размером 76x76 мм по пику полного поглощения с энергией 1,33 МэВ, %	не менее 30

Состав:

- блок детектирования на основе ОЧГ с сосудом Дьюара;
- предусилитель блока детектирования;
- спектрометрическое устройство Multispektrum (BSI);
- блок защиты от внешнего радиационного фона;
- комплект соединительных кабелей;
- программное обеспечение.

### 7.5.2 Спектрометр-радиометр МКГБ-01

Прибор имеет сертификат об утверждении типа средств измерений RU.C.38.001.A N 10702.

Состав:

- блоки детектирования БДЕГ-80, БДЕГ-60, БДЕГ-К;
- аналого-цифровой преобразователь MD-198;
- персональный компьютер IBM-PC любой конфигурации ;
- управляемый блок питания высоковольтного напряжения HV, блок питания низковольтного напряжения LV;
- блоки питания и усиления для БДЕГ-К;
- программы регистрации и обработки спектров радионуклидов на ЭВМ;

- малофоновые защитные камеры для блоков БДЕГ, БДЕГ-К.

### 7.5.3 Программа AScinti-W

Обработку спектров со сцинтилляционных детекторов выполняет программа AScinti-W по алгоритму, основанному на матричном методе (окон). Погрешности рассчитываются в соответствии с ГОСТом и включают учет систематической и случайной составляющей. Измерение ведется в соответствии с утвержденной методикой выполнения измерений, все положения которой реализованы в программе.

Результаты анализа рассчитываются программой AScinti-W с использованием калибровок по эффективности, рассчитанных по спектрам образцовых мер активности радионуклидов.

Для расчета по методу окон необходимы матрицы чувствительностей, которые содержатся в калибровочном файле.

В стандартном варианте программа AScinti-W' рассчитана на определение удельных активностей гамма-излучающих радионуклидов  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ;  $^{222}\text{Rn}$  в пробах окружающей среды и в угольных сорбентах.

В настоящее время в НТЦ «Радэк» разработано аналогичное программное обеспечение с идентичным (похожим) интерфейсом для спектрометров с полупроводниковыми детекторами.

## 7.6 ЦНИИ робототехники и технической кибернетики г. Санкт-Петербург

### 7.6.1 Полевой гамма-спектрометр

Полевой гамма-спектрометр ПГС (рис.7.6.1) предназначен для экспрессной оценки радионуклидного состава проб с целью идентификации радионуклидов, измерения их активности,



Рис.7.6.1 - Полевой гамма-спектрометр ПГС

а также определения возраста продуктов ядерного взрыва и мощности экспозиционной дозы гамма-излучения. Технические характеристики представлены в таблице 7.6.1.

#### Комплект аппаратуры гамма-спектрометра ПГС:

- 1 - спектрометрический блок детектирования гамма-излучения (СБДГ);
- 2 - блок обработки информации (БОИ);
- 3 - устройство зарядно-питающее унифицированное (УЗПУ);
- 4 – Notebook.

Таблица 7.6.1 - Технические характеристики спектрометра ПГС

<b>Основные технические характеристики:</b>	
Энергетический диапазон регистрируемого гамма-излучения, МэВ	0,03...3,0
Энергетическое разрешение для энергий 661 КэВ гамма-излучения ( $^{137}\text{Cs}$ ), не более, %	8,5
Число каналов спектрометра	1024
Максимальная статистическая загрузка не менее, $\text{с}^{-1}$	$5 \cdot 10^4$
Основная погрешность измерения удельной активности радионуклидов в пробах при однокомпонентном их проявлении, не более, %	$\pm 30$
Нестабильность градуировочной характеристики за 8 часов непрерывной работы, не более %	2
Основная погрешность измерения мощности экспозиционной дозы излучения, не более, %	15
Время установления рабочего режима не более, мин	30

#### 7.6.1 Гамма-спектрометр поисковый ГСП-01

Предназначен для ручного поиска источников радиоактивной аномалии по сопутствующему гамма-излучению в условиях переменного фона, регистрации энергетических спектров гамма-излучения в диапазоне энергий от 20 до 3000 кэВ. Выполнен на основе детектора  $\text{NaI(Tl)}$  диаметром 50x50мм. По обнаружительным характеристикам спектрометр соответствует категории 1Н ГОСТ Р516 35- 2000. Технические характеристики представлены в таблице 7.6.2.

Таблица 7.6.2 - Технические характеристики

<b>Основные технические характеристики:</b>	
диапазон энергий регистрируемого излучения, кэВ	20-3000
энергетическое разрешение по линии 662 кэВ, %	не более 9
число каналов преобразования	1024
эффективная площадь регистрации ( $E = 662$ кэВ), $\text{см}^2$	не менее 14
питание от 3-х аккумуляторов (1,2В, емкостью 1Ач) время непрерывной работы, час	не менее 10

## 7.7 Группа предприятий «Грин Стар» г. Москва

Спектрометрические комплексы СКС, производимые группой предприятий «Грин Стар», применяются на всех стадиях ядерного топливного цикла: разведка, добыча, обогащение, изготовление топливных элементов и сборок, технологический контроль на химических комбинатах и АЭС, переработка отработанного топлива, радиационный контроль промышленных предприятий и окружающей среды, хранение и утилизация ядерных отходов

Основой спектрометрических комплексов СКС являются процессоры импульсных сигналов серии SBS.

Комплекс спектрометрический СКС-07П\_(Г\*) (Г – гамма – регистрирующий детектор, \*-номер блока детектирования по ТУ. Например, Г35 по ТУ соответствует полупроводниковому блоку детектирования GEM 15P4, Г39 – соответствует сцинтилляционному блоку детектирования БДЭГ-50(50)Н, Р27 - блоку детектирования рентгеновского излучения AXR100CRF.

### 7.7.1 Комплексы спектрометрические СКС-07П\_Г1...36

Комплексы спектрометрические с СКС-07П\_Г1 по СКС-07П\_Г36 (рис. 7.7.1) предназначены для измерения активности счетных образцов по гамма - излучению, определения степени обогащения урана и изотопного состава плутония, автоматизированной обработки результатов измерения, вывода и хранения информации в удобном для пользователя виде.

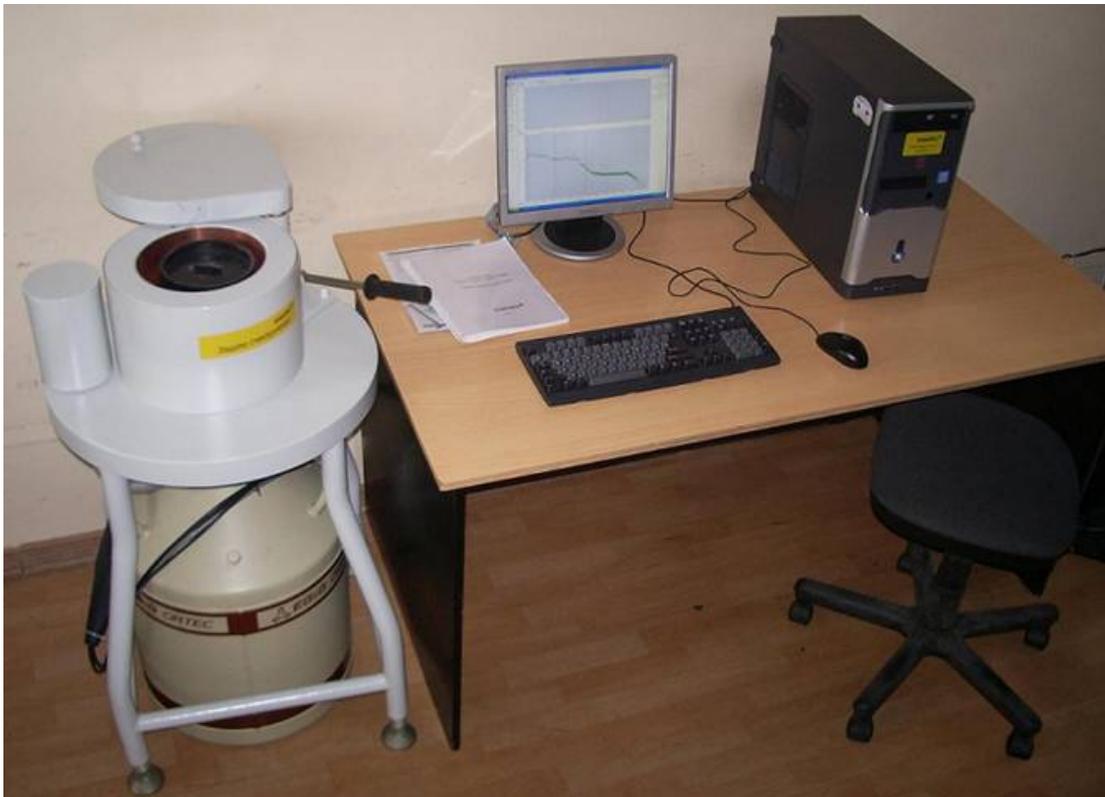


Рис. 7.7.1 - Комплекс спектрометрический с СКС-07П\_Г1 по СКС-07П\_Г36

Комплекс спектрометрический представляет собой измерительное устройство, в состав которого входят:

- измерительный тракт с блоком детектирования на основе особо чистого германия;
- процессор импульсных сигналов SBS-75, установленный в персональный компьютер (для работы при высоких нагрузках используется формирователь импульсов DL-1 или DL-2);
- специализированное программное обеспечение: «Gamma Basic», «Gamma Pro», «FusMat»;
- эксплуатационная документация;
- комплекс оснащается азотной или электромеханической системой охлаждения детектора;
- в комплект поставки может быть включена свинцовая защита толщиной 50 мм или 100 мм, устройство для заливки жидкого азота и т.д.

#### **Основные технические характеристики:**

- диапазон энергий регистрируемого излучения от 50 кэВ до 3000 кэВ;
- энергетическое разрешение по энергии 1332,5 кэВ от 1,7 до 2,4 кэВ;
- интегральная нелинейность характеристики преобразования не более  $\pm 0,05\%$ ;
- максимальная входная статистическая нагрузка не более  $10^5 \text{ с}^{-1}$  ( до  $2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  при использовании формирователя импульсов DL-1);
- нестабильность характеристики преобразования комплекса за 24 часа непрерывной работы не более  $\pm 0,02\%$ ;
- комплекс поддерживает до 16384 каналов емкостью  $2^{24}-1$  имп/канал;
- предел допускаемой основной погрешности характеристики преобразования в геометрии измерений счетного образца не более  $\pm 25\%$ .

#### **7.7.2 Комплекс спектрометрический СКС-07П\_Г37...48**

Комплексы спектрометрические с СКС-07П\_Г37 по СКС-07П\_Г48 (рис. 7.7.2) представляют собой измерительное устройство, в состав которого входят:

- измерительный тракт со сцинтилляционным блоком детектирования гамма-излучения;
- процессор импульсных сигналов SBS-79, установленный в персональный компьютер (для работы при высоких нагрузках процессор может быть оснащен DL-формирователем импульсов);
- специализированное программное обеспечение «Scint Basic»;
- свинцовая защита;
- эксплуатационная документация.



Рис. 7.7.2 - Комплекс спектрометрический с СКС-07П\_Г37 по СКС-07П\_Г48

#### Основные технические характеристики

- диапазон энергий регистрируемого излучения от 50 кэВ до 3000 кэВ;
- энергетическое разрешение по энергии 661,5 кэВ – от 6 до 10,5 %;
- максимальная входная статистическая нагрузка не более  $2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  (до  $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  при использовании DL-формирователя импульсов);
- нестабильность характеристики преобразования комплекса за 24 часа непрерывной работы не более  $\pm 2\%$ ;
- комплекс поддерживает 2048 каналов емкостью  $2^{24}-1$  имп/канал;
- интегральная нелинейность характеристики преобразования не более  $\pm 1 \%$ ;
- предел допустимой основной относительной погрешности измерения активности в геометрии счетного образца не более  $\pm 25 \%$ .

#### 7.7.3 Специализированные комплексы спектрометрические СКС-07П-Г

Использование мобильных и стационарных спектрометрических комплексов СКС-07П-Г реализовано при решении задачи контроля радиоактивных отходов на предприятиях Росатома.

Мобильный спектрометрический паспортизатор протяженных источников гамма-излучения (рис. 7.7.3) позволяет проводить измерения активности и нуклидного состава гамма-излучающих источников любых геометрий и размеров (куб, цилиндр, сфера, плоскость) с учетом поправки на неомогенное распределение радионуклидов, а также позволяет определять

распределение активности непосредственно по измеряемой геометрии образца, используя математическое моделирование методом Монте-Карло.

«Паспортизатор РАО» - комплекс спектрометрический (рис. 7.7.4), предназначенный для измерения активности счетных образцов по гамма-излучению в геометрии 200 литровой бочки или контейнера с жидкими или твердыми радиоактивными отходами.

«Паспортизатор РАО» представляет собой измерительное устройство в состав которого входят:

- измерительный тракт с соответствующим блоком детектирования (сцинтилляционным детектором или детектором на основе кристалла из ОЧГ);



Рис. 7.7.3 - Мобильный спектрометрический паспортизатор



Рис. 7.7.4 - «Паспортизатор РАО»

- процессор импульсных сигналов SBS-75, установленный в персональный компьютер;
- программное обеспечение «Гамма Про»;
- электромеханическое поворотное устройство;
- свинцовая защита;
- эксплуатационная документация.

Для контроля донных отложений предприятий Росатома выпускается серия спектрометрических комплексов «Нырок».

Спектрометрический комплекс «Нырок-2» разработан на основе полупроводникового детектора с портативным сосудом Дьюара, помещённым в корпус из нержавеющей стали, имеющий герметичный шланг с внутренним диаметром, достаточным для расположения внутри шланга комплекта кабелей, предназначенных для съема сигнала с детектора и подачи на него питающего напряжения. В комплект мобильного спектрометрического комплекса «Нырок-2» вошел процессор импульсных сигналов SBS-75, который установлен в слот расширения PCI переносного, защищённого от воздействия окружающей среды в соответствии с IP54 исполнения ноутбука с питанием от автономных источников (аккумуляторов) (рис. 7.7.5). Наличие в комплексе специализированного программного обеспечения «Гамма Про» позволило реализовать функцию определения активности счетных образцов в геометрии протяженного источника.



Рис. 7.7.5 - Мобильный спектрометрический комплекс «Нырок-2»

Результаты применения спектрометрического комплекса «Нырок-2» в полевых условиях показали эффективность и перспективность использования данной разработки при радиационном обследовании донных отложений.

Спектрометрический комплекс «Нырок-1» разработан на основе двух сменных блоков детектирования с кристаллом  $CdZnTe$  или сцинтилляционным кристаллом  $NaI(Tl)$ . Спектрометрический комплекс «Нырок-1» (рис. 7.7.6) включает в себя:

- процессор импульсных сигналов «Колибри» (модель КС-003 «Т») с внутренней программой;
- блок детектирования на основе кристалла  $CdZnTe$  объемом  $0.5 \text{ см}^3$  с сигнальным кабелем длиной 1.5 м;
- блок детектирования БДЭГ-50(50)Н с сигнальным кабелем длиной 1.5 м;
- выносную штангу длиной 3 м;
- герметичный водонепроницаемый корпус для установки любого из блоков детектирования и процессора импульсных сигналов «Колибри» с выходом связи на Notebook;
- ЭВМ «Notebook»;
- комплект специализированного программного обеспечения получения спектров - эмулятор анализатора «Esbs» и обработки спектров - «ScintBasic».



Рис. 7.7.6 - Спектрометрический комплекс «Нырок-1»

#### 7.7.4 Процессор импульсных сигналов SBS-75

Процессор SBS-75 (рис. 7.7.7) обеспечивает работу с любыми типами блоков детектирования: сцинтилляционными детекторами, фосвич-детекторами, пропорциональными счетчиками, ионизационными камерами, детекторами на основе кристаллов особо чистого германия, кремния, теллурида кадмия и т.д. Технические характеристики представлены в таблице 7.7.1.



Рис. 7.7.7 - Процессор SBS-75

Таблица 7.7.1 - Технические характеристики SBS-75

Тип интерфейса:	PCI
Время преобразования	1,8 мкс, двойное буферирование
Интегральная нелинейность	0,025% (0,01)
Дифференциальная нелинейность	1% (0,5)
Дополнительная температурная погрешность характеристики преобразования	0,005 %/°C (0,002)
Дополнительная температурная погрешность источника высокого напряжения	0,01 %/°C (0,005)
Полярность входного сигнала	«+» и «-»
Постоянная времени белящего фильтра	2 мкс (возможны другие по заказу)
Коэффициент усиления	10-2500
Число каналов преобразования	8192, 4096, 2048, 1024, 512, 256
Максимальная входная статическая нагрузка	до $10^5 \text{ с}^{-1}$
Временное разрешение режектора наложений	400 нс
Полярность высокого напряжения	«+» и «-»
Диапазоны высокого напряжения:	1,25 кВ / 1 мкА, $R_{\text{вых}}=30 \text{ кОм}$ ; 5 кВ / 100 мкА, $R_{\text{вых}}=6 \text{ МОм}$
Максимальная мощность, потребляемая от источника питания ПУ	4 Вт
Длина платы	188 мм
Вес платы	200 г
Напряжение питания предусилителя	+24В/50 мА и +12В /100 мА

### 7.7.5 Процессор импульсных сигналов SBS-70

Процессор импульсных сигналов SBS-70 (рис. 7.7.8) специально разработан для измерений спектров ядерных излучений при высоких нагрузках. От процессора импульсных сигналов SBS-75 процессор SBS-70 отличается существенно более высокой пропускной способностью. После установки процессора импульсных сигналов SBS-70 в IBM-совместимую ПЭВМ типа Desktop или Notebook потребитель получает в свое распоряжение современный спектрометр ядерных излучений с наивысшими метрологическими характеристиками.

SBS-70 может быть использован для измерения излучения от образцов и объектов, на всех стадиях ядерного топливного цикла, включая идентификацию, контроль и учет радиоактивных и ядерных материалов, для обеспечения гарантий МАГАТЭ, для технологического и радиационного контроля, для контроля окружающей среды. В зависимости от особенностей измерительной задачи процессор импульсных сигналов SBS-70 обеспечивает совместную работу с сцинтилляционными ( $\text{NaI(Tl)}$ ,  $\text{CsI(Tl)}$ , фосвич-детекторами), газонаполненными (пропорциональными счетчиками, ионизационными камерами) и полупроводниковыми (германиевыми, кремниевыми, теллуридакadmиевыми) детекторами.

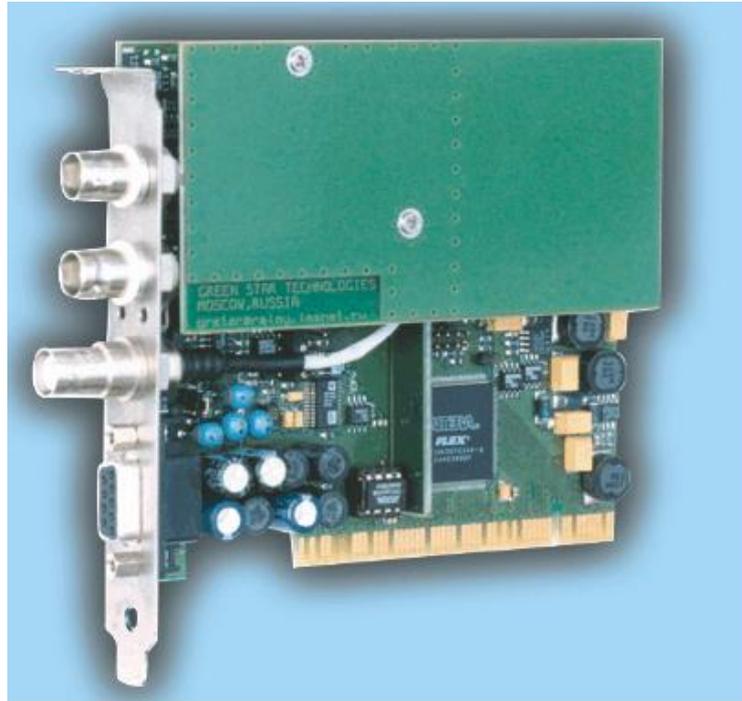


Рис. 7.7.8 - Процессор импульсных сигналов SBS-70

Устройство SBS-70 представляет собой стандартную PCI-плату половинного размера, которая содержит все необходимые схемотехнические решения для выполнения прецизионных спектрометрических измерений:

- цепи компенсации полюса нулем;
- спектрометрический усилитель с цепями формирования сигнала, зависящими от времени;
- ключевой восстановитель базовой линии, режектор наложений;
- АЦП с фиксированным временем преобразования;
- буферную память;
- двухдиапазонный высоковольтный источник питания детектора;
- источник питания предусилителя;
- схемы интерфейса для управления параметрами;
- устройства доступа к магистрали ЭВМ.

Процессор имеет широкое применение в многоканальных системах. Возможно объединение в одной системе до 32-х спектрометров.

#### 7.7.6 Процессоры импульсных сигналов SBS-77, SBS-78 и SBS-79

Процессоры (рис. 7.7.9) предназначены для работы с детекторами невысокого разрешения: сцинтилляционными, газонаполненными и полупроводниковыми  $Si(Li)$ ,  $Si\ p-i-n$ ,  $CdTe$ ,  $CdZnTe$ ,  $HgI_2$  и т.д.

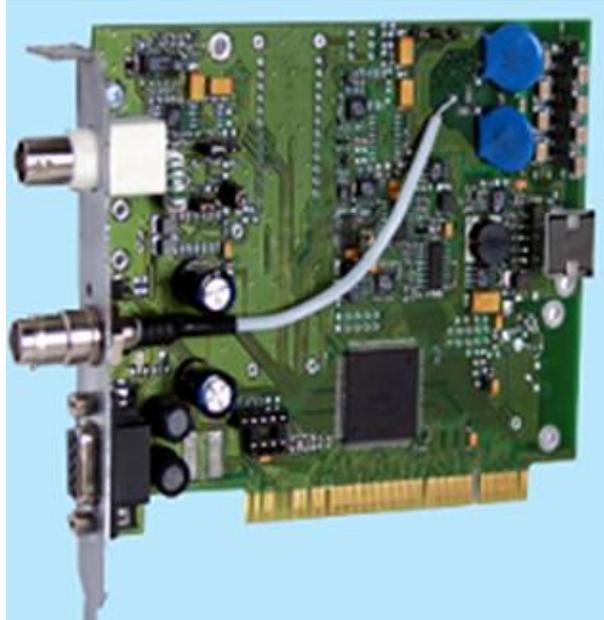


Рис. 7.7.9 - Процессоры импульсных сигналов SBS-77, -78, -79

Упрощенный процессор SBS-79 спроектирован для недорогих технологических применений и не содержит в своем составе быстрого счетного тракта с режектором наложений, полярность входного сигнала и высокого напряжения определяются при заказе и не меняются пользователем.

Процессор SBS-78 разработан для применения в условиях высоких и сверхвысоких нагрузок. Так при работе с сцинтилляторами на основе  $NaI(Tl)$  спектрометрический тракт сохраняет работоспособность при нагрузках до  $2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  при пропускной способности  $2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ , а при использовании дополнительного DL формирователя система работает до  $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  с пропускной способностью  $5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ . Кроме того в процессорах SBS-78 может устанавливаться узел питания охладителей на эффекте Пельтье для работы с  $Si\ p-i-n$  и  $CdTe$  детекторами рентгеновского диапазона. Полярность входного сигнала и высокого напряжения также определяется при заказе.

Процессор SBS-77 является универсальным, полярность входного сигнала и высокого напряжения, а также постоянные времена интегрирования (адаптирующие тракт к разным типам сцинтилляторов) могут изменяться пользователем.

Процессоры имеют широкое применение в многоканальных системах, а также имеют широкие возможности по системной программной и аппаратной интеграции в сложных спектрометрических системах.

#### Технические характеристики (типовые):

Время преобразования.....	0,8 мкс, двойное аналоговое буферирование
Интегральная нелинейность .....	0,025(0,01) %
Дифференциальная нелинейность.....	1 (0,3) %
Дополнительная температурная погрешность характеристики преобразования.....	0,005(0,002) %/C

Дополнительная температурная погрешность источника высокого напряжения .....	0,01(0,005) %/C
Диапазон изменения коэффициента усиления.....	2-512 или 20-5120 по заказу
Число каналов преобразования .....	4096, 2048, 1024, 512, 256
Максимальная входная статистическая нагрузка (при работе с детекторами NaJ(Tl))	$2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ при применении DL-формирователя
Временное разрешение режектора наложений (для SBS-77 и SBS-78) .....	150 нс
Источник высокого напряжения .....	0-1,5 кВ/1 мА, $R_{\text{вых}} = 30 \text{ кОм}$
Напряжение питания предусилителя .....	$\pm 12\text{В}/100 \text{ мА}$
Интерфейс шины .....	PCI

### 7.7.8 Процессор импульсных сигналов «Колибри»

Процессор импульсных сигналов «Колибри» (рис. 7.7.10) - небольшое полное спектрометрическое устройство, включающее в себя: спектрометрический тракт (усилитель, аналого-цифровой преобразователь), вычислитель, графическое устройство отображения информации, клавиатуру, источник питания предварительного усилителя, источник высокого напряжения. Спектрометр предназначен для проблемно- ориентированных измерений, таких как определение обогащения урана, определение загрязнения территорий, отложений в оборудовании, определения дозовых нагрузок и т.д. При необходимости набранные спектры могут обрабатываться на обычном IBM-совместимом компьютере после передачи их по стандартному последовательному интерфейсу RS-232.



Рис. 7.7.10 - Процессор импульсных сигналов «Колибри»

Устройство обеспечивает работу сцинтилляционных, газонаполненных блоков детектирования, а также полупроводниковых детекторов (например, *CdTe*, *CdZnTe*, *HgI2*, *Si*, *HPGe* и т.д.). Спектрометр выпускается в двух основных модификациях:

- N (упрощенный) - для работы со сцинтилляционными детекторами, подключаемыми по одно или двухпроводной схеме;
- T (универсальный) - для работы с любыми типами детекторов.

Спектрометр может комплектоваться пакетом программного обеспечения, состоящим из библиотеки прикладных программ для решения различных проблемноориентированных задач. Таким образом, у пользователей “Колибри” имеется возможность определять и заказывать для себя структуру и функции внутреннего программного обеспечения, а также конфигурацию аппаратной части. В зависимости от вида стоящих перед ним задач оператор может загружать в спектрометр необходимую программу и заменять ее на другую по мере необходимости.

Технические характеристики гамма-спектрометра “Колибри” представлены в таблице 7.7.2.

### 7.7.9 Специализированное программное обеспечение

Специализированное программное обеспечение спектрометрического анализа группы предприятий «Грин Стар» (рис. 7.7.11) предназначено для создания комплексного математического и программного обеспечения автоматизированного рабочего места

Таблица 7.7.2 - Технические характеристики гамма-спектрометра “Колибри”

Характеристика	Значение
Коэффициент усиления усилителя	Программируемый от 2 до 512, Грубо - 8 шагов по 6 Дб, Плавно – 1024 значений в пределах 6 Дб
Постоянная времени формирования	1 мкс (для модификации Т) или другая по заказу
Полярность входного импульсного сигнала	Отрицательная для модификации N . Положительная или отрицательная (устанавливается программно) для модификации Т
Постоянная времени цепи компенсации полюса/нулем (для модификации Т)	> 40 мкс
Восстановитель базовой линии	активный, управляемый
Число каналов	2048, 1024, 512, 256, 4096 и 8192 указывается при заказе дополнительно
Интегральная нелинейность	< 0,05 %
Дифференциальная нелинейность	< 0,5 %
Дополнительная температурная погрешность характеристики преобразования	< 0,1 %/С для модификации N < 0,01 %/С для модификации Т
Выходное напряжение источника высокого напряжения	1536 В/500 мкА (программируемый – 1024 значений) или другое по заказу
Выходной импеданс источника высокого напряжения	30 кОм
Источник питания предусилителя	$\pm 12$ В, 100 мА и $\pm 24$ В, 50 мА указывается при заказе дополнительно

Характеристика	Значение
Память процессора	128 кБ, 512 кБ по дополнительному заказу
Интерфейс связи с компьютером	RS232
Диапазон рабочих температур	от -20 °С до 40 °С

спектрометрического анализа на базе процессора импульсных сигналов SBS как в одноплатном, так и многоплатном варианте исполнения.

Пакет программ включает в себя:

- программу эмулятор анализатора «Esbs», обеспечивающую полную настройку комплекса и получение от него спектрометрических данных;
- программы обработки гамма и рентгеновского – излучения «GammaBasic», «ScintBasic», «Гамма Про», «FusMat», позволяющие подготавливать все калибровки спектрометра, данные о нуклидах и элементах, их линиях и производить обработку спектров, включая качественный и количественный анализ.

Все программы обработки спектров зарегистрированы в Отраслевом фонде алгоритмов и программ Государственного координационного центра информационных технологий РФ и сертифицированы в системе Ростехнадзора РФ.

Основным итогом применения программного обеспечения является определение значений активности радионуклидов в исследуемом объекте и оценка неопределённости каждого измерения ( $P=0.95$  или  $P=0.99$ ).

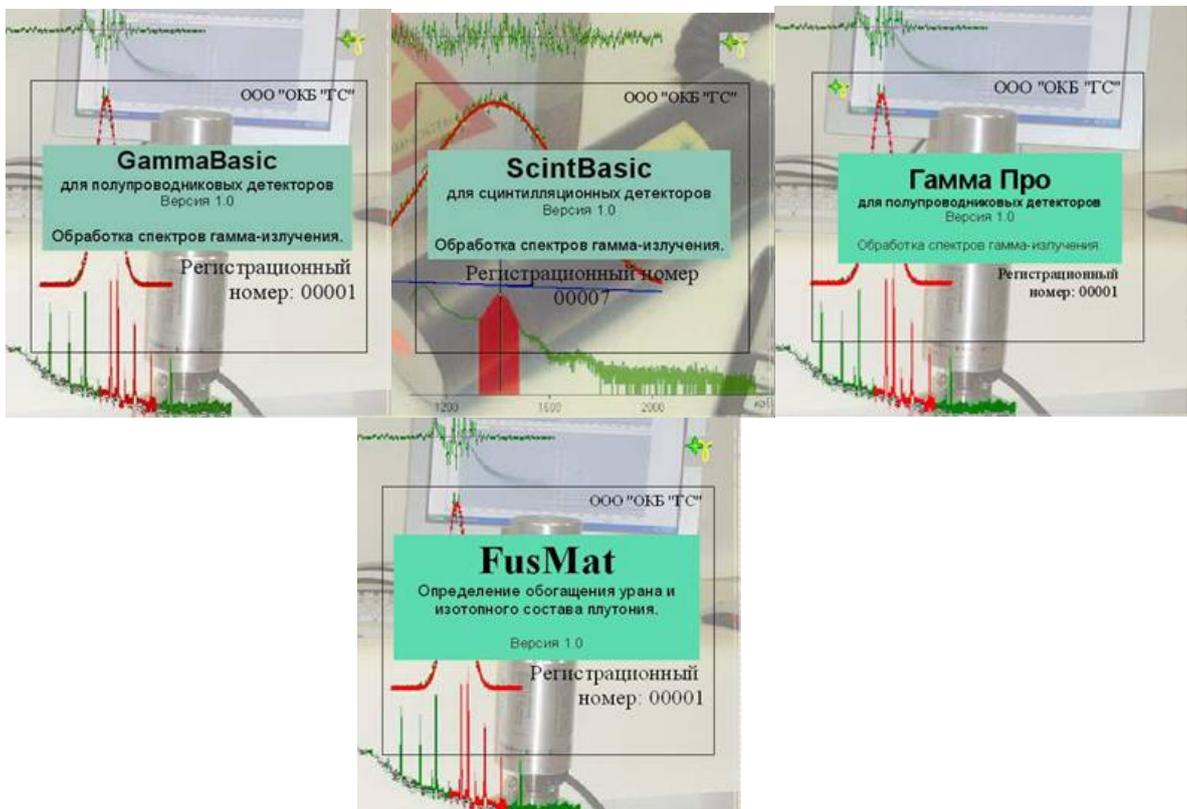


Рис. 7.7.11 - Программное обеспечение спектрометрического анализа

В качестве метода анализа в программах используется метод разложения экспериментального спектра по линиям радионуклидов, включенных в рабочую библиотеку идентификации.

Программы производят анализ спектров гамма-излучения, записанных в файлах определенного формата.

В программах реализована поддержка спектров до 16384 каналов включительно.

Требования к персональному компьютеру для работы с программами необходимо наличие:

- IBM PC - совместимого персонального компьютера;
- процессора не хуже Intel Pentium II 300 MHz;
- оперативной памяти не менее 32 МБ;
- свободного дискового пространства не менее 10 МБ;
- ручного манипулятора типа «мышь».

Программы работают под управлением операционной системы Microsoft Windows 95/98/Me/NT/2000/XP.

## **7.8 Сравнительный анализ гамма–спектрометров**

Весь материал для сравнительного анализа гамма – спектрометров российских производителей взят из открытой печати (информация с официальных сайтов производителей, рекламные листы, плакаты, статьи и доклады).

Сравнительный анализ гамма- спектрометров российских производителей предлагаем провести по следующим критериям:

- по техническим характеристикам (энергетическое разрешение, интегральная нелинейность, долговременная нестабильность характеристики преобразования за 24 ч. непрерывной работы, максимальная статистическая загрузка);
- по использованию в составе спектрометра своих комплектующих (блоков детектирования, анализаторов, программного обеспечения).

### **7.8.1 Сравнительный анализ гамма–спектрометров российских производителей по техническим характеристикам**

Основные технические данные и характеристики **сцинтилляционных** гамма–спектрометров приведены в табл. 7.8.1.

Основные технические данные и характеристики **полупроводниковых** гамма–спектрометров приведены в табл. 7.8.2.

Таблица 7.8.1 - Характеристики сцинтилляционных гамма–спектрометров

Наименование спектрометра (фирма-производитель)	Энергетическое разрешение по пику $^{137}\text{Cs}$ , %	Интегральная нелинейность, не более %	Долговременная нестабильность, %	Максимальная статистическая нагрузка, $\text{с}^{-1}$
Гамма-спектрометр сцинтилляционный "Прогресс-гамма" НПП «Доза»	< 8,5	-	-	-
Спектрометрический комплекс "МУЛЬТИРАД" НТЦ «Амплитуда»	< 8,5	-	-	-
Спектрометр энергии гамма-излучения сцинтилляционный ГАММА-1С ЗАО НТЦ «Аспект»	< 8,0	$\pm 1$	не более 1	$5 \cdot 10^4$
Полевой гамма-спектрометр ЦИИ робототехники и технической кибернетики	< 8,5	-	$\pm 2,0$ за 8 ч непрерывной работы	$5 \cdot 10^4$
Комплекс спектрометрический СКС-07П_Г37...48 ГП «Грин Стар»	от 6 до 10,5 для блоков детектирования разного размера	$\pm 1$	$\pm 2,0$ за 24 ч непрерывной работы	$2 \cdot 10^6$ ( $5 \cdot 10^6$ при использовании DL преобразователя)

Таблица 7.8.2 - Характеристики полупроводниковых гамма-спектрометров

Наименование спектрометра (фирма-производитель)	Энергетическое разрешение по пику 1332 кэВ $^{60}\text{Co}$ , кэВ	Интегральная нелинейность, не более %	Долговременная нестабильность, %	Максимальная статистическая нагрузка, $\text{с}^{-1}$
Гамма-спектрометр полупроводниковый "Прогресс-СПД" НПП «Доза»	1,8-2	0,1	-	-
Спектрометрический комплекс "МУЛЬТИРАД" НТЦ «Амплитуда»	< 2	0,1	-	-
Спектрометр энергии гамма-излучения полупроводниковый ГАММА-1П ЗАО НТЦ «Аспект»	1,8-3,5	$\pm 0,05$	-	$5 \cdot 10^4$
Спектрометр гамма-излучений РКГ-1К НТЦ «Радэк»	1,9	-	-	-
Комплекс спектрометрический СКС-07П_Г1...36 ГП «Грин Стар»	1,7-2,4 (Ge – детектор)	$\pm 0,05$	$\pm 0,02$ за 24 ч непрерывной работы	$10^5$ ( $2 \cdot 10^5$ при использовании DL преобразователя)

### 7.8.2 Сравнительный анализ гамма – спектрометров российских производителей

Основные технические данные и характеристики **сцинтилляционных** гамма – спектрометров приведены в табл. 7.8.3.

Таблица 7.8.3 - технические данные и характеристики **сцинтилляционных** гамма – спектрометров

Наименование спектрометра (фирма-производитель)	Блоки детектирования	Анализатор	Программное обеспечение
Гамма-спектрометр сцинтилляционный "Прогресс-гамма" НПП «Доза»	сцинтилляционный БД на основе <i>Nal(Tl)</i> с кристаллом Ø 63×63 и встроенными блоками питания, усиления и АЦП		«Прогресс-гамма»
Спектрометрический комплекс "МУЛЬТИРАД" НТЦ «Амплитуда»	<i>Nal(Tl)</i> 63х63 мм могут применяться сцинтилляционные де-текторы других типов ( <i>CsI(Tl)</i> , <i>CsF<sub>2</sub>(Eu)</i> и другие) различных размеров		«Прогресс-гамма»
Спектрометр энергии гамма-излучения сцинтилляционный ГАММА-1С ЗАО НТЦ «Аспект»	БДС-Г на основе монокристалла <i>Nal(Tl)</i> 63х63 мм со встроенным усилителем, высоковольтным преобразователем напряжения, стабилизацией по реперному пику светодиода и термокомпенсацией характеристики преобразования	Спектрометрический амплитудно-цифровой преобразователь АЦП - 1К - В1	Прикладное программное обеспечение "LSRM" ООО «LSRM»
Многоканальный анализатор амплитуд импульсов МСА 2048 ЗАО «Техноэкскан»	БДЭГ		
Спектрометр–радиометр МКГБ-01 НТЦ «Радэк»	БДЕГ-80, БДЕГ-60, БДЕГ-К	Аналого-цифровой преобразователь MD-198 BSI г.Рига	программа AScinti-W
Полевой гамма-спектрометр ЦИИ робототехники и технической кибернетики	СБДГ	БОИ	
Комплекс спектрометрический СКС-07П_Г1...36 ГП «Грин Стар»	БДЭГ <i>Nal(Tl)</i> , <i>CsI(Tl)</i> , <i>CsI(Na)</i> , <i>CsI</i> , <i>CdWO<sub>4</sub></i> , <i>YAlO<sub>3</sub>(Ce)</i> , <i>BGO</i> , <i>LYSO</i> , <i>BaF<sub>2</sub></i> и т.д. различных размеров	Процессоры импульсных сигналов SBS-77, SBS-78, SBS-79 или «Колибри»	СПО «ScintBasic»

Основные технические данные и характеристики **полупроводниковых** гамма – спектрометров приведены в табл. 7.8.4.

Таблица 7.8.4 - Характеристики полупроводниковых гамма – спектрометров

Наименование спектрометра (фирма-производитель)	Блоки детектирования	Анализатор	Программное обеспечение
Гамма-спектрометр сцинтилляционный "Прогресс-ППД" НПП «Доза»	блок детектирования на основе детектора из особо чистого германия с эффективностью от 10% до 60% и более (производства фирм EG&G «ORTEC» или «Canberra»)	плата АЦП (8К или 16К) или отдельный блок анализатора	«Прогресс-ППД»
Спектрометрический комплекс "МУЛЬТИРАД" НТЦ «Амплитуда»	блок детектирования на основе детектора из особо чистого германия с эффективностью от 10% до 50% и более производства фирм EG&G «ORTEC» или «Canberra» (различные варианты и модификации)	плата АЦП (8К или 16К) или отдельный блок анализатора	«Прогресс-ППД»
Спектрометр энергии гамма-излучения сцинтилляционный ГАММА-1С ЗАО НТЦ «Аспект»	Германиевый полупроводниковый детектор (ОЧГ производства фирм EG&G «ORTEC» или «Canberra», или Ge(Li))	Спектрометрическое устройство в составе: спектрометрический усилитель, высоковольтный источник питания, низковольтный источник питания типа: СУ-03П, СУ-04П, СУ-05П и АЦП-8к, usb-8к, Rs-8к	Прикладное программное обеспечение "LSRM" ООО «ЛСРМ»
Многоканальный анализатор амплитуд импульсов МСА 2048 ЗАО «Техноэкскан»	ППД производства фирм EG&G «ORTEC» или «Canberra»		
Спектрометрическое устройство РКГ-1к НТЦ «Радэк»	ППД производства фирм EG&G «ORTEC» или «Canberra»	Спектрометрическое устройство Multispektrum (BSI г. Рига)	Программа обработки
Комплекс спектрометрический СКС-07П_Г37...48 ГП «Грин Стар»	Германиевые и кремниевые детекторы: Canberra, ORTEC, BSI, ИФТП. Детекторы из теллурида кадмия, диоксида ртути. Ксеноновые детекторы (МИФИ). Различные варианты и модификации.	Процессор импульсных сигналов SBS-75	СПО «GammaBasic», СПО «Гамма Про», СПО «FusMat»

Проанализировав содержание таблиц 7.8.1-7.8.4, можно сделать выводы:

1. По техническим характеристикам (энергетическому разрешению, интегральной нелинейности, долговременной нестабильности характеристики преобразования) как сцинтилляционные, так и полупроводниковые гамма - спектрометры российских фирм производителей примерно аналогичны.

2. По максимальной статистической нагрузке большое преимущество перед остальными имеют гамма-спектрометры ГП «Грин Стар».
3. Сцинтилляционные блоки детектирования собирают практически все российские производители гамма-спектрометров.
4. Анализаторы (процессоры) изготавливают только часть производителей (ЗАО НТЦ «Аспект», ГП «Грин Стар», ООО «Парсек») и еще некоторые фирмы).
5. НПП «Доза» и НТЦ «Амплитуда» имеют общее специализированное программное обеспечение «Прогресс».
6. ЗАО НТЦ «Аспект» использует прикладное программное обеспечение "LSRM".
7. В ГП «Грин Стар» разработано и сертифицировано собственное специализированное программное обеспечение, предназначенное для определения изотопного состава ЯМ.

## 8 Современные российские радиационные мониторы

В настоящее время количество российских производителей радиационных мониторов значительно уменьшилось по сравнению с периодом 5-10-летней давности. Некоторые из предприятий прекратили производство этих приборов, а некоторые прекратили своё существование, например НИИИТ (г. Москва). В настоящее время можно выделить два основных доступных, в том числе в сети Интернет, производителя – это НПЦ «Аспект» и ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова. Информация получена из рекламных листовок и с сайтов представленных производителей.

### 8.1 Научно производственный центр "Аспект", г. Дубна

Одними из первых, освоивших выпуск радиационных мониторов в РФ, был НПЦ «Аспект», г. Дубна. В настоящее время радиационные мониторы "Янтарь" производства НПЦ «Аспект» занимают нишу контроля в основном на таможенных пунктах РФ.

#### Состав

Имеются мониторы трёх модификаций: пешеходные, автомобильные и железнодорожные.

Базовый комплект системы состоит из:

- стоек с детекторами и блоками электроники;
- пульта управления; вместо пульта управления также может использоваться ПК.

Дополнительно системы могут комплектоваться системой видеорегистрации, модемом, устройствами дополнительной сигнализации, светофорами и шлагбаумами.

#### Характеристики

- Режим работы - непрерывный, автоматический
- Бесперебойная работа при отключении сети 220 В - не менее 10 часов
- Срок службы - 12 лет

- Магистральный канал с интерфейсом RS-485
- Протокол – MODBUS

<b>Пешеходный вариант - Янтарь-2П</b>	<b>Автомобильный вариант - ЯНТАРЬ-1А</b>	<b>Железнодорожный вариант - ЯНТАРЬ-1Ж</b>
Порог обнаружения при ширине зоны контроля 0,7 м, не более:	Порог обнаружения, не более:	Порог обнаружения, не более:
Cs - 137            11 кБк	Cs - 137            300 кБк	Cs - 137            900 кБк
Co - 60             7 кБк	Co - 60             150 кБк	Co - 60             450 кБк
Ba - 133            11 кБк	Ba - 133            340 кБк	Ba - 133            900 кБк
при ширине зоны контроля 1,5 м:	Pu                    3,5 г	Pu                    11 г
Pu                    0,3 г	U                     374 г	U                     1747 г
U                     5,7 г	Pu в защите       80 г	Pu в защите       348 г
Pu в защите       22 г	•	•

Пороги обнаружения радиоактивных и ядерных материалов приведены при вероятности обнаружения 0,5 при доверительной вероятности 95 %, интенсивности фона не более 20 мкР/ч, частоте ложных срабатываний не более  $10^{-3}$ . Уран и плутоний - оружейного изотопного состава.

### **Особенности**

- Световая и звуковая сигнализация тревоги.
- Автоматическая адаптация к изменению естественного фона.
- Запись в архив информации о событии: дата, время, скорость счета детекторов, тип канала (гамма- или нейтронный). При комплектовании системой видеорегистрации дополнительно записывается видеоролик объекта тревоги.
- Гамма-детектор – на основе органических пластических сцинтилляторов.
- Нейтронный детектор – на основе  $^3\text{He}$ -пропорциональных счетчиков.
- Диапазон рабочих температур – От  $-50\text{ }^\circ\text{C}$  до  $+50\text{ }^\circ\text{C}$ .
- Грозозащита силовых и сигнальных линий.
- Программный доступ к параметрам детекторов.
- Возможность удаленного доступа.
- Система самодиагностики.

## **8.2 ОСРК, РНЦ «Курчатовский институт», г. Москва**

Радиационный мониторинг людских потоков осуществляется при помощи пешеходных радиационных мониторов ППМ-01, ППМ-02 и ППМ-02-01, а также установок радиационного мониторинга УРК-02, применяющихся как автономно, так и в составе автоматизированных систем радиационного контроля рис. 8.2.1.



Рисунок 8.2.1 – Радиационные мониторы производства ОСРК

#### ППМ-01

Конструктивно выпускаются в виде арки состоящей из двух стоек высотой 2100 мм и верхней стяжки, в которой расположены инфракрасный датчик присутствия и тревожный звуковой и оптический сигнализатор. В каждой стойке установлены два блока детектирования, выполненных на основе органического пластмассового сцинтиллятора, и два блока усилителя дискриминатора. В одной из стоек расположено микропроцессорное устройство обработки информации и блок питания.

Порог обнаружения 0,3 г  $Pu$  и 10 г  $^{235}U$

#### ППМ-02 ППМ-02-01

Выполнены в виде моноблоков, состоят из устройств детектирования УДГ-02 и устройства управления УПХ-05. Устройства детектирования включают в себя блок детектирования и блок усилителя-дискриминатора. В устройстве управления расположены микропроцессорное устройство обработки информации, блок аварийной сигнализации и блок питания. Моноблоки устанавливаются на конструктивные элементы зданий. Монитор ППМ-02 состоит из 4-х, а ППМ-02-01 из 2х устройств детектирования.

#### УРК-02

Состоят из устройств детектирования гамма-излучения УДГ-02И, инфракрасного датчика и сигнализатора тревожных сигналов БСР-03И.

### **8.3 ЗАО «СНИИП-КОНВЕЛ», г. Москва**

Установки радиационного контроля РИГ-08М (рис. 8.3.1) предназначены для непрерывного контроля уровня радиационного фона фотонного ионизирующего излучения и сигнализации о

повышении относительного значения радиационного фона сверх определенного порога. Уровень радиационного фона фотонного ионизирующего излучения контролируется по значению измеряемой мощности эффективной дозы.



Рис. 8.3.1 - Установка радиационного контроля РИГ-08М

Установки имеют две модификации: РИГ-08М-1 - с одним пилоном, РИГ-08М-2 - с двумя пилонами.

Варианты использования установок:

- РИГ-08М-1 с рабочим расстоянием 1,5 м и максимальной скоростью перемещения контролируемых материалов пешеходами (4,0±0,4) км/ч;
- РИГ-08М-2 с расстоянием между пилонами 0,8 м и максимальной скоростью перемещения контролируемых материалов пешеходами (4,0±0,4) км/ч;
- РИГ-08М-2 с расстоянием между пилонами 4 м и максимальной скоростью перемещения контролируемых материалов.

Таблица 8.3.1 – Характеристики РИГ-08М

Диапазон измерений мощности эффективной дозы фотонного излучения, мкЗв/ч	
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения мощности эффективной дозы, %	±30
Диапазон энергий регистрируемого фотонного излучения, МэВ	0,01 - 1,25
Чувствительность к излучению $^{137}\text{Cs}$ , (с <sup>-1</sup> )/(мкЗв/ч), не менее:	
для РИГ-08М-1	5000
для РИГ-08М-2	10000
Уровень собственного фона, не более, мкЗв/ч	0,04

#### 8.4 ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская область.

##### Пешеходный радиационный монитор КПРМ-П1

Монитор представляет собой цельнометаллическую конструкцию, состоящую из базовой и детекторной стоек, в которых размещены основные составные части монитора.

Режимы работы:

- самодиагностика монитора;
- контроль фона;
- контроль "проноса" радиоактивных материалов;
- контроль "проброса" радиоактивного объекта через контролируемую монитором зону;
- контроль несанкционированного доступа к оборудованию монитора.

Производится индикация режимов работы монитора и результатов диагностики оборудования.

В состав монитора входят (рис. 8.4.1):

- стойки для прохода;
- блоки детектирования - 4 шт. (по 2 в каждой стойке), суммарная площадь детектирующих элементов - 5500 см<sup>2</sup>;
- устройства звуковой и световой сигнализации;
- инфракрасный датчик занятости контролируемой зоны;
- интерфейс RS-232 или RS-485.



Рисунок 8.4.1 - радиационный монитор КПРМ-П1

#### **Технические характеристики**

Порог обнаружения монитора при фоне гамма-излучения 25 мкР/ч и перемещении контрольного источника со скоростью от 1,0 до 1,2 м/с через зону прохода составляет:

- 0,3 г плутония в минимально излучающей конфигурации (сфера);
- 10 г высокообогащенного урана (содержание <sup>235</sup>U – не менее 89 %) в минимально излучающей конфигурации.

#### **Носимый радиационный монитор БИРК-3**

Порог обнаружения монитора при фоне 25 мкР/ч и перемещении контрольного источника относительно рабочей поверхности монитора на расстоянии (10,0±0,5) см со скоростью (0,50±0,05) м/с составляет:

- 0,1 г плутония в минимально излучающей конфигурации;

– 3,0 г высокообогащенного урана (содержание  $^{235}\text{U}$  – не менее 89 %) в минимально излучающей конфигурации.

Частота ложных срабатываний монитора - не более одного ложного срабатывания за 1 мин непрерывной работы монитора.

Масса монитора - не более 1 кг.



Рисунок 8.4.2 - радиационный монитор БИРК-3

## 8.5 ФГУП ВНИИА им. Н. Л. Духова, г. Москва

### Радиационные мониторы серии ТСРМ61, ТСРМ82, ТСРМ85 (рис. 8.5.1)

В состав мониторов входят блок питания и управления, от 1 до 8 блоков детектирования (БД) и комплект соединительных проводов. В зависимости от количества блоков детектирования реализуются пешеходный и транспортный варианты радиационных мониторов.

Мониторы ТСРМ61, ТСРМ82 регистрируют гамма-излучение. Монитор серии ТСРМ85 – нейтронное излучение.

В качестве детекторов в мониторах ТСРМ61, ТСРМ82 используется сцинтиллятор  $\text{CsI(Tl)}$ . В ТСРМ85 –  $^3\text{He}$ -счётчик нейтронов.



Рис. 8.5.1 - Радиационные мониторы серии ТСРМ61, ТСРМ82

Характеристики представлены в таблице 8.5.1.

Таблица 8.5.1 – Технические характеристики ТСРМ-61

Порог обнаружения одним БД при времени контроля 3 с:			
	ТСРМ61	ТСРМ82	ТСРМ85
ядерных материалов на расстоянии 50 см, г	10 ( $^{235}\text{U}$ ); 0,3 ( $^{239}\text{Pu}$ )	1,8 ( $^{235}\text{U}$ ); 0,15 ( $^{239}\text{Pu}$ )	100 ( $^{239}\text{Pu}$ )
радиоактивных веществ на расстоянии 50 см, кБк	-	87 ( $^{60}\text{Co}$ ); 102 ( $^{137}\text{Cs}$ ); 70 ( $^{241}\text{Am}$ ); 107 ( $^{226}\text{Ra}$ )	-
превышения мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения над фоном, мкР/ч	-	12 ( $^{60}\text{Co}$ ); 3,4 ( $^{137}\text{Cs}$ ); 0,47 ( $^{241}\text{Am}$ ); 10,8 ( $^{226}\text{Ra}$ )	-

### Ручной радиационный монитор ГНОМ

В состав монитора входит малогабаритный выносной блок детектирования, блок управления и соединительная штанга до 3 м длиной, рисунок 8.5.2.

Масса монитора без штанги - 0,43 кг.

Порог обнаружения при скорости сканирования не более 0,5 м/с, на расстоянии 10 см - 2 г  $^{235}\text{U}$ ; 0,15 г  $^{239}\text{Pu}$ .



Рис. 8.5.2 - Радиационные мониторы серии ГНОМ

## 9 Алгоритмы обработки данных радиационных мониторов

Условия работы мониторов имеют широкий диапазон основных параметров:

- абсолютное значение фона может отличаться на несколько порядков;
- временная нестабильность фона – от неизменно низкого и стабильного фона на КПП, удалённых от мест расположения ЯРМ, до проходных основного производства с большим нестабильным фоном;
- времена измерения могут меняться от долей секунды – для ручных РМ, до 5-7 секунд – для транспортных РМ;
- требуемые вероятности ложных тревог – от  $10^{-2}$  и менее - для ручных РМ и от  $10^{-3}$  до  $10^{-6}$  - для пешеходных и транспортных РМ.

Возможны две схемы работы монитора - с остановкой контролируемых объектов и без таковой. При этом используются различные методы и алгоритмы обработки, отвечающие конкретным требованиям и условиям работы РМ.

В данной работе представлены алгоритмы нескольких основных критериев и методов статистической обработки, используемые в практике непрерывного радиационного мониторинга:

- 1) критерия Неймана-Пирсона;
- 2) метода скользящего среднего;
- 3) критерия отношения правдоподобий;
- 4) метода цифрового рекурсивного фильтра;
- 5) метода априорной вероятности;
- 6) метода полусумм;
- 7) метода относительной дисперсии.

Первые четыре метода являются наиболее известными и давно используемыми в технологии РМ. Метод априорной вероятности также был предложен и подробно описан более 15 лет назад. Последние два метода из рассмотренных являются более новыми предложениями, оформленными в виде патентов.

В критерии Неймана-Пирсона и в методе относительной дисперсии осуществляется анализ результатов последовательных измерений. Остальные методы подразумевают разбиение интервала времени измерения на подынтервалы (метод отношения правдоподобий), анализ наложенных измерений, сделанных с некоторой временной задержкой (метод скользящего среднего), или учитывают результаты соседних измерений (методы цифрового рекурсивного фильтра, априорной вероятности и полусумм).

### 9.1 Критерий Неймана-Пирсона

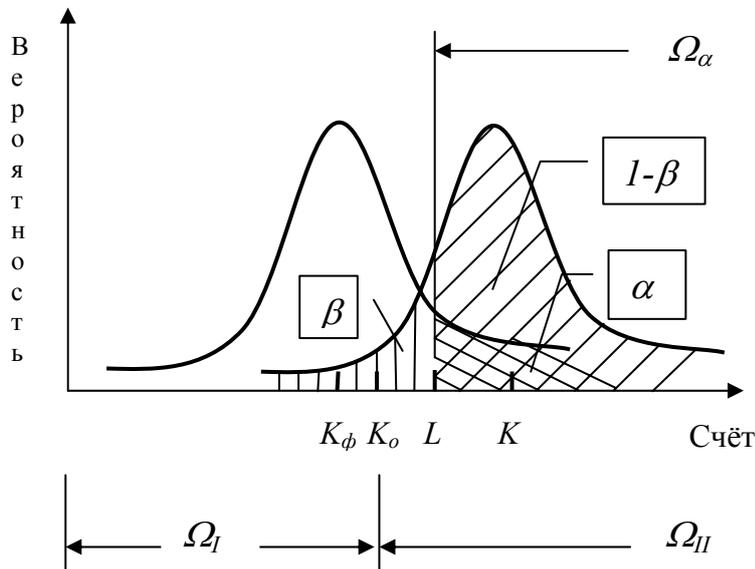
В том случае, когда надо сделать вывод из двух гипотез, наиболее мощным и простым является критерий Неймана-Пирсона [106, 107]. Критерий Неймана-Пирсона наиболее часто использовался как метод статистической обработки непрерывной экспрессной информации с детекторов ионизирующих излучений радиационных мониторов в начале развития технологии РМ [108-111]. Можно утверждать, что в разных своих реализациях, он используется и в настоящее время во всех представленных в данной работе алгоритмах.

При полностью определенной нулевой гипотезе и неопределенной альтернативной гипотезе критерий Неймана-Пирсона заключается в следующем.

По выбранной значимости критерия  $\alpha$  (вероятности ложного обнаружения) находят критическую область  $\Omega_\alpha$  из выражения:

$$\int_{\Omega_\alpha} p_k(K_\phi, \sigma_{K_\phi}^2) dk = \int_L^\infty p_k(K_\phi, \sigma_{K_\phi}^2) dk = \alpha, \quad (9.1)$$

где  $k$  - случайная величина, распределенная с функцией плотности вероятностей  $p_k(K_\phi, \sigma_{K_\phi}^2)$ ,  $K_\phi$  - среднее значение фона,  $\sigma_{K_\phi}^2$  - соответствующая дисперсия;  $L$  - пороговое значение, определяющее критическую область, другими словами – *порог* или *уровень регистрации*, рис. 9.1.



$K_\phi$  – среднее значение фона;  $K_0$  – априорный порог;  $L$  – порог регистрации;  
 $K$  – среднее значение фона и дополнительного излучения;  $\beta$  – вероятность не зарегистрировать излучение.

Рис. 9.1 – Параметры распределения вероятностей нулевой и альтернативной гипотез

Если  $p_k$  - распределение Пуассона, то интегрирование заменяется суммированием:

$$\sum_{i=L}^{\infty} \frac{K_\phi^i \cdot e^{-K_\phi}}{i!} = \alpha \quad (9.2)$$

Далее, если  $k$  попадает в область  $k \geq L$ , то принимается гипотеза о наличии источника без указания вероятности его обнаружения. В противном случае принимается гипотеза о присутствии только фона.

Для нормального распределения порог  $L$  фактически определяется просто как сумма среднего фона  $K_\phi$  и некоторой добавки, состоящей из его среднеквадратического отклонения  $\sigma_{K_\phi} = \sqrt{K_\phi}$ , умноженной на квантиль  $z$  соответствующего распределения счёта  $k$

$$L = K_\phi + z\sqrt{K_\phi}. \quad (9.3)$$

Значение квантиля  $z$  определяется параметром значимости критерия  $\alpha$  и не зависит от среднего значения распределения.

Для распределения Пуассона такой простоты в определении порога нет, и приходится использовать выражение (9.2) в явном виде, в котором  $\alpha$  зависит от среднего значения распределения фона.

## 9.2 Метод скользящего среднего

Наиболее часто используемым методом обработки результатов измерения детекторов радиационных мониторов является метод скользящего интервала времени экспозиции или скользящего среднего [112,113]. Сущность этого метода заключается в том, что сигнал с детектора измеряется за время экспозиции  $T$  сравнимое с длительностью превышения над фоном не последовательно, а параллельно, с наложением с некоторой задержкой  $\tau$ , как представлено на рисунке 9.2. Полученный счёт затем обрабатывается по критерию Неймана-Пирсона.

Интервал времени экспозиции как бы дискретно скользит с некоторым сдвигом  $\tau$ . Имеется оптимальное отношение  $n$  интервала времени  $T$  к подынтервалу  $\tau$ ,  $T = n\tau$ . Значение  $n$  зависит от скорости передвижения объекта. По данным работы [114] для пешеходного монитора наилучший результат получается при  $n=4$ .

Если ни в одном из  $n$  измерений не произошло значимого превышения над фоном, то принимается решение об отсутствии источника излучения. В случае хотя бы одного из  $n$  измерений превышения над фоном делается вывод о наличии источника излучения.

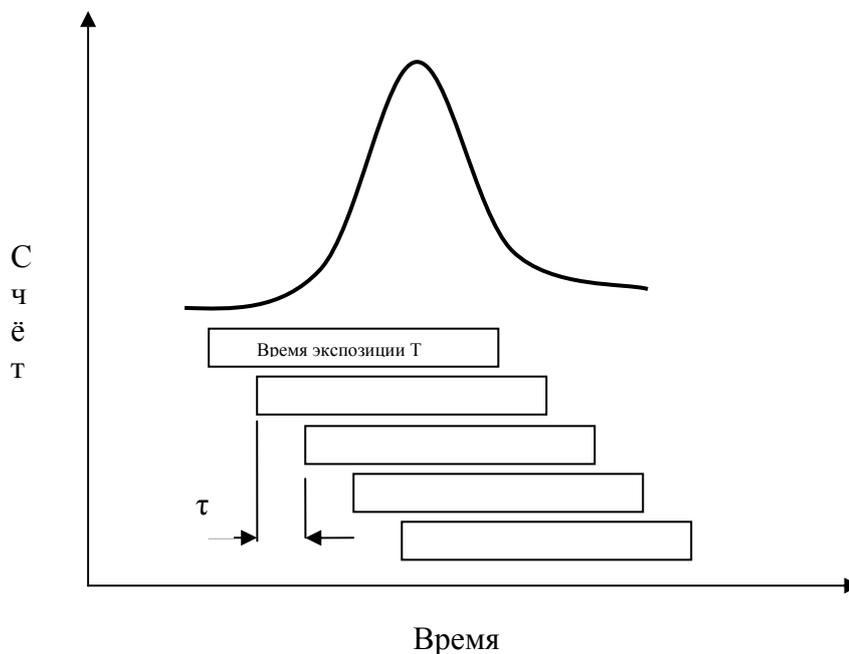


Рис. 9.2 - Принцип скользящего интервала

Иногда результаты измерений, могут затем суммироваться [114]. Суммируются  $n$  измеренных значений счёта, и обрабатывается суммарный счёт  $\Sigma K$ . При этом также используется критерий Неймана-Пирсона с порогом  $\Sigma L$ , который определяется как

$${}^{\Sigma}L = {}^{\Sigma}K_{\phi} + z\sqrt{{}^{\Sigma}K_{\phi}}. \quad (9.4)$$

Большое распространение метод скользящего интервала получил не только на ранних этапах разработки и создания радиационных мониторов, но и в настоящее время [115] по причине его простой реализации в рамках аналоговой электроники. В частности, в радиационных мониторах, созданных и выпускаемых ВНИИА, используется именно этот критерий обработки.

### 9.3 Критерий отношения правдоподобий

Альтернативным к критерию Неймана-Пирсона в алгоритме скользящего интервала является критерий отношения правдоподобий [113,116,117]. Этот критерий основан на методе *максимального правдоподобия* [106]. Суть метода заключается в том, что для  $n$  независимых наблюдений с функцией вероятности  $p(x_i, \theta)$ , зависящей от параметра  $\theta$ , определяется *правдоподобие*  $\Pi(X, \theta)$ , как

$$\Pi(X, \theta) = \prod_{i=1}^n p(x_i, \theta). \quad (9.5)$$

Параметром распределения в данном случае является его *математическое ожидание*, т. е. среднее значение  $x_i$ .

Выражение

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \ln \Pi(X, \theta) = 0 \quad (9.6)$$

называется *уравнением правдоподобия*. Оно отражает условие существования максимума  $\Pi(X, \theta)$ .

Полагая для гипотезы  $H_0$  среднее  $K_{\phi}$ , а для гипотезы  $H_1$  среднее равное порогу регистрации  $L$ , будем иметь отношения двух правдоподобий  $\Pi(X, K_{\phi})$  и  $\Pi(X, L)$ . Учитывая экспоненциальный вид функции плотности вероятности распределения Гаусса, логарифм этого отношения упростит конкретный вид выражения

$$Z = \ln(\Pi(X, K_{\phi})/\Pi(X, L)). \quad (9.7)$$

На практике метод заключается в том, что интервал времени экспозиции делится на последовательные  $n$  подынтервалов или берётся сумма  $n$  соседних значений счёта. При известном фоне  $K_{\phi}$  и выбранном пороге регистрации  $L$  (как в критерии Неймана-Пирсона) для каждого значения счёта  $x_i$  вычисляют значение  $z_i$  [118]. Значение  $z_i$  равно логарифму отношения вероятности того, что наблюдаемый счёт  $x_i$  есть случайная величина, распределённая со средним  $x_{cp} = L$ , к вероятности того, что  $x_{cp} = K_{\phi}$ .

Для нормального распределения Гаусса  $z_i$  определяется, как, например, в работе [113] из выражения<sup>2</sup>

$$z_i = \ln(K_\phi / L) + (x_i - K_\phi)^2 / 2\sigma_{K_\phi}^2 - (x_i - L)^2 / 2\sigma_L^2 \quad (9.8)$$

Для распределения Пуассона  $z_i$  определяется как, например, в работе [116] из выражения

$$z_i = x_i \cdot \ln(L / K_\phi) - (L - K_\phi) \quad (9.9)$$

Находят значение параметра  $Z$ , суммируя счёт по числу подынтервалов измерений  $n$ ,

$$Z = \sum_{i=1}^n z_i \quad (9.10)$$

производят сравнение величины  $Z$  с параметрами  $A$  и  $B$ .

Параметры  $A$  и  $B$ , определяются как

$$A = \ln [(1-\beta)/\alpha], \quad (9.11)$$

$$B = \ln [\beta/(1-\alpha)], \quad (9.12)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – вероятности погрешностей I и II рода.

Если  $Z \leq B$ , то делается вывод об отсутствии источника; если  $Z \geq A$ , то полагается его наличие. Иногда практическим критерием отсутствия источника является  $Z \leq 0$ , в противном случае принимают решение об его наличии [118].

По данным работы [116] наилучшие результаты получаются при  $n$ , лежащем в диапазоне от 6 до 12.

Метод отношения правдоподобий часто используется при регистрации нейтронного излучения [119,120], отличающегося малыми нагрузками.

По данным работы [121] критерий отношения правдоподобий имеет преимущества там, где возможны лишь незначительные превышения над фоном. При явном наличии большого дополнительного к фону сигнала использовать относительно сложный критерий, требующий вычислений, нецелесообразно, так как он не даёт преимуществ в мощности, но может давать задержку во времени принятия решения. Особенно это существенно в случае ручных и пешеходных мониторов, работающих без остановки контролируемых объектов.

#### 9.4 Цифровой рекурсивный фильтр

Метод цифрового рекурсивного фильтра в применении к портальным технологиям предложен в работе [122].

Суть метода заключается в том, что для каждой пары событий  $N_{i-1}$ ,  $N_i$  определяется значение параметра  $N'_i$  из выражения

<sup>2</sup> В статье дано приближённое выражение параметра  $z_i$ , точное его значение требует наличие первого члена.

$$N_i' = 0,75 N_{i-1}' + 0,25 N_i.$$

(9.13)

Вычисляется порог регистрации  $N'_{пор}$  так же как в критерии Неймана-Пирсона

$$N'_{пор} = \mu_0 + z \cdot \sqrt{\mu_0} \quad (9.14)$$

Параметр  $N_i'$  сравнивается с  $N'_{пор}$ . Если  $N_i' \geq N'_{пор}$ , то принимается гипотеза, что присутствует дополнительное излучение, в противном случае принимается гипотеза, что присутствует только фон.

### 9.5 Метод априорной вероятности

Использование понятия априорной вероятности в критерии Неймана-Пирсона при обнаружении случайного кратковременного превышения излучения над фоном предложено в работе [123].

Параметры  $K$  и  $\sigma_K^2$  статистики, соответствующей гипотезе  $H_1$  неопределены. Определенности можно достичь, если воспользоваться понятием априорной вероятности [124].

Пусть заранее известно среднее значение фона  $K_\phi$ . Если по каким-либо соображениям априори знать о наличии источника или предположить его наличие, и при этом за время экспозиции сосчиталось  $k$  импульсов, то оценки среднего  $K$  и дисперсии  $\sigma_K^2$  определяются как:

$$K = \frac{1 + K_\phi + \frac{K_\phi^2}{2!} \dots + \frac{K_\phi^k}{k!} \dots + \frac{K_\phi^{k+1}}{(k+1)!}}{1 + K_0 + \frac{K_\phi^2}{2!} \dots + \frac{K_\phi^k}{k!}} (k+1) \quad , \quad (9.15)$$

$$\sigma_K^2 = \frac{1 + K_\phi + \frac{K_\phi^2}{2!} \dots + \frac{K_\phi^k}{k!} \dots + \frac{K_\phi^{k+2}}{(k+2)!}}{1 + K_0 + \frac{K_\phi^2}{2!} \dots + \frac{K_\phi^k}{k!}} (k+1)(k+2) - K^2 \quad . \quad (9.16)$$

Выражения  $K$  и  $\sigma_K^2$  полностью определяют альтернативную гипотезу. Можно считать, что известны два распределения - фоновое  $p_k(K_\phi, \sigma_K^2)$  со средним  $K_\phi$  и распределение  $p_k(K, \sigma_K^2)$ , соответствующее наличию источника со средним  $K$ .

Значение  $K_0$ , начиная с которого выполняется условие

$$p_k(K_\phi, \sigma_K^2) \geq p_k(K, \sigma_K^2) \quad (9.17)$$

поделит область  $\Omega$  на две части  $\Omega_I$  и  $\Omega_{II}$ , представленные рисунке 9.1. В области  $\Omega_I$  более вероятно, что событие  $k$  произошло за счет флуктуации фона, в области  $\Omega_{II}$  - за счет наличия

источника. Таким образом, условие  $k \geq K_0$  определяет критическую область причем более полную, чем ранее ее определял уровень регистрации  $L$ . Расширение критической области увеличивает мощность критерия, т.е. вероятность регистрации источника. Однако, при этом должно выполняться условие значимости критерия  $\alpha$ .

Таким образом, альтернативная гипотеза о наличии источника будет принята, если превышен выбранный уровень регистрации или для рассматриваемой группы событий выполняются одновременно два условия: все члены группы не меньше  $K_0$  и суммарная вероятность принятия ложной гипотезы не больше, чем выбранный уровень значимости критерия.

Необходимыми и достаточными для принятия альтернативной гипотезы являются условия:

$$k_i \geq L' \quad (9.19)$$

или

$$K_0 \leq k_i \leq L', \quad (9.20)$$

$$\alpha_{cp} \leq \alpha. \quad (9.21)$$

Имеется оптимальное значение уровня  $L'$ , обеспечивающее максимальную мощность критерия при том же значении ложных тревог.

В применении к радиационным мониторам число случайных событий в рассматриваемой группе определяется числом измерений за время пребывания сотрудника в чувствительной области монитора. Как правило, это число равно двум-трем и не превышает пяти измерений.

## 9.6 Метод полусумм

Одна из адаптаций критерия Неймана-Пирсона к задаче радиационного мониторинга предложена в работе [125].

Алгоритм обработки, по сути, почти повторяет алгоритм метода априорной вероятности. Предлагается разбить область определения счёта на три части двумя порогами регистрации верхним  $L$  и нижним  $L'$ . Верхний порог регистрации является порогом критерия Неймана-Пирсона. Нижний порог  $L'$  регистрации определён как

$$L' = K_\phi + (z - 1)\sqrt{K_\phi}, \quad (9.22)$$

где  $z$  – квантиль, соответствующий принятому уровню значимости критерия Неймана-Пирсона.

Решение о наличии только фона принимается, когда результат измерения  $k_i$  меньше  $L'$

$$H_0: k_i < L'. \quad (9.23)$$

Решение о наличии источника принимается, когда  $k_i$  не меньше  $L$

$$H_1: k_i \geq L. \quad (9.24)$$

Если  $k_i$  попадает в промежуток между двумя порогами регистрации  $L'$  и  $L$ , то проводится следующее измерение  $k_{i+1}$ , для которого производится процедура сравнения с  $L'$  и если  $k_i < L'$ , то вычисляется среднее значение  $k_i^{cp}$  двух соседних измерений  $k_i$  и  $k_{i+1}$

$$k_i^{cp} = (k_i + k_{i+1})/2.$$

Значение  $k_i^{cp}$  сравнивается с  $L'$

$$H_0: k_i^{cp} < L', \quad (9.25)$$

$$H_1: k_i^{cp} \geq L'. \quad (9.26)$$

### 9.7 Метод относительной дисперсии

Метод, предложенный в работе [126], основан на анализе параметра  $\eta$ , равного обратному значению относительного среднеквадратического отклонения чистой скорости счёта регистрируемого излучения за вычетом фона  $b$ :

$$\eta = \frac{n - b}{\sqrt{n/t_n + b/t_b}}, \quad (9.27)$$

здесь  $n$  – суммарная скорость счёта фона и дополнительного излучения;  $t_n$  – время измерения суммарной скорости счёта;  $t_b$  – время измерения фона.

Параметр  $\eta$  сравнивается с его пороговым значением  $\eta_{nop}$ , определяемым как

$$\eta_{nop} = \frac{n_{nop} - b}{\sqrt{n_{nop}/t_n + b/t_b}}, \quad (9.28)$$

где  $n_{nop}$  – порог регистрации критерия Неймана-Пирсона.

Если  $\eta \geq \eta_{nop}$ , то принимается гипотеза, что присутствует дополнительное излучение;

Если  $\eta < \eta_{nop}$ , то принимается гипотеза, что присутствует только фон.

Задачу о преимуществах и недостатках представленных методов и критериев обработки можно решить, лишь испытав эти алгоритмы в одинаковых реальных или смоделированных условиях.

### Использованные литературные источники

1. Birks J.B. The Theory and Practice of Scintillation Counting. London : Pergamon Press, 1964.
2. Медведев М.Н. Сцинтилляционные детекторы. М., Атомиздат, 1977.
3. Цирлин Ю.А., Дайч А.Р., Радыванюк А.М. Сцинтилляционные блоки детектирования. М., Атомиздат, 1978.
4. Цирлин Ю.А., Глобус М.Е., Сысоева Е.П. Оптимизация детектирования гамма-излучения сцинтилляционными кристаллами. Москва : Энергоатомиздат, 1991.
5. Persyk D.E., Moi T.E. IEEE Trans. Nucl. Sci., т. NS-29, 1978, стр. 615.
6. Grassman H., Lorenz E., Moser H.G. Nucl. Instr. Meth., 1985 г., Т. 228, стр. 323.
7. Шамовский Л.М. Кристаллофосфоры и сцинтилляторы в геологии. Москва : Недра, 1985.
8. Sakai E. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1987, Т. NS-34, p. 418.
9. Weber M.I., Monchamp R.R. J. Appl. Phys. 1983, Т. 44, стр. 5496.
10. Nestor O.H., Huang C.Y. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1975, Т. NS-22, стр. 68.
11. Murashita M.H., Saitoh H., Tobimatsu K. Nucl. Instr. Meth. 1986, vol.A243.
12. Collaboration, L3. Nucl. Instr. Meth. 1990, т. A289.
13. Jaaskelainen M., Sarantites D.G., Woodward R. et al. Nucl. Instr. Meth., 1983, т. 204, стр. 385.
14. Farukhi M.R. Nucl. Radiation Detector Materials. Massachusetts, 1982.
15. Melcher R.D., Manenta R.A., Schweitzer J.S. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1989, т. NS-36.
16. Ангерт Н.Б. и др. Сцинтилляционный детектор  $\gamma$ -квантов на основе монокристаллов BGO. ВАНТ: общая и ядерная физика, 1988, № 2 (42), с. 69.
17. Каманин В.В. и др. Сравнительный анализ характеристик кристаллов NaI(Tl) и  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  при регистрации нейтронов и гамма-квантов. Приборы и техника эксперимента, 1988, № 6, с. 61-64.
18. Shirakawa Y. Development of a direction finding gamma-ray detector. Nucl. Instr. Meth. 2007, т. B263, стр. 58.
19. Geist W.H. et al. Evaluation of a fast neutron coincidence counter for the measurements of uranium samples. Nucl. Instr. Meth. 2001, т. A470, стр. 590.
20. Hausser O., et al., Nucl. Instr. and Meth. 1983, т. A213, стр. 301.
21. Vincke H. et al. Response of BGO detector to photon and neutron sources: simulations and measurements. Nucl. Instr. Meth. 2002, т. A484, стр. 102.
22. Laval L., Moszynski M., Allemand R. Nucl. Instr. Meth. 1983, т. 206.
23. Farukhi M.R., Swinehart C.F. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1971, т. NS18.
24. Crahan G., Yamamoto H. Nucl. Instr. Meth. 1991, т. A307.
25. Murashita M.H., Saitoh., Tobimatsu K. Nucl. Instr. Meth. 1986 г., vol. A243.
26. Hoffman E.J., Dahebom M., Ricci A.R. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1986 г., vol.NS-33.
27. D.F.Anderson. Nucl. Instr. Meth. 1986 г., vol.A287.
28. Laval L., Moszynski M., Allemand R. Nucl. Instr. Meth. 1983, т. 206.

29. Sper. P. Nucl. Instr. Meth. 1987 г., vol.A254.
30. Афанасиади Л.Ш. и др. Временное и энергетическое разрешения сцинтиллятора  $BaF_2$  с конверторами излучений. Приборы и техника эксперимента, 1989, № 5, с. 85-86.
31. Шульгин Б.В. и др. Сцинтилляционные детекторы на основе монокристаллов  $CaF_2$ -Eu. Атомная энергия, т. 75, вып. 1, июль 1993, стр. 28.
32. Pastor C. The phostron: a phoswich counter for neutron and charged particle detection. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res., 1984, т. А 227, стр. 87.
33. Pelletier-Allard N., Pelletier R. High-resolution spectroscopic study of Er:YAlO<sub>3</sub>. Nucl. Instr. Meth. 1998, т. 275-277, стр. 374.
34. Autrata R., Schaner P. Scanning. 1983 г., vol.5.
35. Барышевский В.Г. и др. YAlO<sub>3</sub>:Ce – быстродействующие сцинтилляторы для детекторов ионизирующих излучений. Приборы и техника эксперимента. 1992, № 3, стр. 86.
36. Левенец В.В., Омельник А.П., Щур А.А., Кутний В.Е., Рыбка А.В. Применение детекторов из CdTe и CdZnTe производства ННЦ ХФТИ для измерения гамма и альфа излучений. <http://www.lsrn.ru/PPSR/2005/tz20.htm>.
37. Зоренко Ю.В. и др. Журнал прикладной спектроскопии. 1988, т. 49, № 3, стр. 514.
38. Барышевский В.Г., Коржик М.В., Морозов В.И. ПТЭ. 1993, №3, стр. 51.
39. Беляев Р.А. Окись бериллия. М., 1980.
40. Шульгин Б.В. и др. Сцинтилляционные свойства монокристаллов BeO. Журнал прикладной спектроскопии, 1988, т. 47, № 2, стр. 286-291.
41. Milbrath B. Will lanthanum halide scintillators make NaI(Tl) obsolete? NWS06 Meeting of American Physical Society. Tacoma, Washington, 18 Apr. 2006.
42. Autrata R., Schaner P. Scanning. 1983, т. 5.
43. R. Pania, R. Pellegrinia, M.N. Cintia, P. Bennatia, M. Betti. LaBr<sub>3</sub>:Ce crystal: The latest advance for scintillation cameras. б.м. : Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2007.
44. Van Loef E.V.D., Dorenbos P., van Eijk C.W.E., Kramer K.W., Gudel H.U. Scintillation properties of LaBr<sub>3</sub>:Ce<sup>3+</sup> crystals: fast, efficient and high-energy-resolution scintillators. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res., 2002, т. А 486, стр. 254.
45. Van Loef E.V.D., Dorenbos P. et. al. : Appl. Phes. Lett., 2000, т. 77.
46. Каталог продукции фирмы Canberra. Сцинтилляционные детекторы. 2007.
47. Nicolini R. at al. Investigation of properties of a 1x1 LaBr<sub>3</sub>:Ce scintillator. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res., 2007, т. А 582, стр. 554.
48. Barzilov A. at al. Experimental Study of LaBr<sub>3</sub>(Ce) Gamma-Ray Detector Performance in Mixed Radiation Field. 2006 Division of Nuclear Physics Annual Meeting. Nashvill, Tennessee.
49. Shah K. S., Glodo J., Klugerman M., Moses W. W., Derenzo S. E., and Weber M. J. LaBr<sub>3</sub>:Ce Scintillators for Gamma Ray Spectroscopy. 2002, University of California.
50. Shah K.S., Glodo J., Kligerman M., et al. s.l. : Nucl. Instr. Meth. A., 2003, Vol. 505, p. 76.

51. Balcerzyr M., Moszynski M., Kapusta M. s.l. : Nucl.Inst. Meth. A., 2005, Vol. 537, p.
52. D., Luckey. Nucl. Instr.Meth. 1968 г., Т. 62, стр.
53. Simpson P.J. et al. Superfast timing performance from ZnO scintillators. Nucl. Instr. Meth. 2003, т. A505, с. 82.
54. Wilkinson J., Ucer K.B., Williams R.T. Nucl. Instr. Meth. 2005 г., Т. 537, стр. 66.
55. Demidenko V.A. et al. Scintillation properties of ceramics based on zinc oxide. Radiation Measurement, 2007, т. 42, стр. 549.
56. Katagiri, M. et al. 2004. Scintillation materials for neutron imaging detectors. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2004, т. A 529, с. 274.
57. Зо Тхет, В. Н. Беляев. Детекторы рентгеновского и аннигиляционного излучения на кристаллах LSO. Москва : МИФИ, 2007.
58. Башарули Н.В и др. Научная конференция "Сцинтилляторы 2000". В кн.: "Тезисы докладов Международная конференция по неорганическим сцинтилляторам и их применению". Москва, 2000.
59. Higher M. Resolution PET by means of a new scintillator LSO. Aachen : RWTH, 1999.
60. Rogers J.G., Batty C.J. Afterglow in LSO and its possible effect on energy resolution. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2000, 43(6):438-445.
61. Burahas S. et al. Neorg. Mater., 1996, т. 32, стр. 1525.
62. Nagornaya L. et al. ProNucl. Instr. Meth. 2005, т. A537, стр. 163.
63. Ryzhikov V.D. et al. Nucl. Instr. Meth. 2005, т. A537, стр. 424.,
64. Sung-Woo Kwak et al. Nucl. Instr. Meth. 2005, A537, стр. 449.
65. Ген Н.С. и др. Эксплуатационные характеристики пластмассовых сцинтилляторов, полученных из расплава. Приборы и техника эксперимента, 1988, № 4, стр. 35.
66. Померанцев В.В. и др. Гамма-спектрометрия и собственный радиационный фон пластических сцинтилляторов. Атомная энергия, т. 63, вып. 2, август 1987, стр. 118.
67. Афанасиади Л.Ш. и др. Жидкие сцинтилляторы с высокой  $n$ - $\gamma$  разделяющей способностью. Приборы и техника эксперимента, 1988, № 6, с. 58-60.
68. Классен Н.В., Осипьян Ю.А.. Особенности свойств и перспективы применений нанокристаллических сцинтилляторов. Институт физики твердого тела Российской академии наук. Отчёт.
69. Улин С.Е., Дмитренко В.В., Грачев В.М. и др. Цилиндрическая ионизационная камера с экранирующей сеткой, заполненная ксеноном до давления 50 атм. Приборы и техника эксперимента, 1995, № 4, стр. 46.
70. Dmitrenko V.V., Chernysheva I.V., Gratchev V.M. The progress in developing of large volume high pressure xenone gamma ray spectrometers. Nara : ICDL 99, 1999. 99CH36213.
71. Улин С.Е. Гамма-спектрометры на сжатом ксеноне (разработка, исследование характеристик и применение). М. : МИФИ, 1999.

72. Hall R.N. Hp Ge: purification, crystal grown, and annealing properties. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* 1984 г., NS-31, n-1, стр. 320.
73. Detectors and instruments for Nuclear Spektroskopy. ORTEC 91/92, стр. 2-32.
74. Акимов Ю.К. и др. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М. : Энергоатомиздат, 1989.
75. Raudorf T.W., Trammel R.C., Darken L.S. N-tipe high purity germanium coaxial detectors . *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 1979, Ns-26.
76. Pehl R.H., Madden N.W., Elliott J.H. Radiation damage resestence of revers electrode Ge coaxial detectors . *IEEE Tans. on Nucl. Sci.*, 1979. NS-26.
77. Luke, P.N. Gold - mask technique for fabricating segmented electrode germanium detectors. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 1984 г. Ns-31.
78. Bellia G., Zoppo A.D. Peformances of large volume p-type HPGe detectors. *Nucl. instr. and meth.*, 1989, A284, стр. 122.
79. Raudorf, R.C. Trammel T.W. Performance of reverse electrode HPGe coaxial detector after light damage by fast neutrons. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 1984, NS-31.
80. Азимов С.А., Букки С.М., Муминов Р.А. и др. Атомная энергия. 1976, т. 40, 4, стр. 346-347.
81. Е., Sakai E. *Nucl. Instr. and Meth.* 1982, т. 196, 1, стр. 121-130.
82. Залетин В.М., Протасов И.И., Голенецкий С.П. и др. Атомная энергия. 1978, т. 44, 4, стр. 360-363.
83. Rybka A.V., Davydov L. N., Shlyakhov I. N. et al. Gamma-radiation dosimetry with semiconductor CdTe and CdZnTe detectors. No.1-2, 1994 г., *Nucl. Instr. and Meth.*, Т. 53, стр. 147 - 156.
84. Левенец В. В., Омельник А. П., Щур А. А. и др. Спектрометрия гамма- и альфа-излучений полупроводниковыми детекторами на основе CdTe (CdZnTe), изготовленными в ННЦ ХФТИ. [В Интернете] Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина. [http://www.kinr.kiev.ua/NPAE\\_Kyiv2006/proc/Levenets.pdf](http://www.kinr.kiev.ua/NPAE_Kyiv2006/proc/Levenets.pdf).
85. Ю.К. Акимов, О.В. Игнатъев, А.И. Калинин, В.Ф. Кушнирук. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М. : Энергоатомиздат, 1989.
86. В.А. Гайслер, В.М. Залетин, И.Н. Ножкина и др. Диодит ртути: получение, свойства, применение. Новосибирск : Наука, 1984.
87. Залетин В.М., Кочеванов В.А., Ножкина И.Н. и др. Атомная энергия. 1982 г., Т. 52, 3, стр. 193-195.
88. Warren J.L. *Nucl. Instrum. and Methods.* 1983 г., Т. 213, 1, стр. 103.
89. Van den Berg L., Whiter R.C. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* 1978 г., Т. NS-25, 1, стр. 395-397.
90. Sakai E. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1987, Т. NS-34, с. 418.
91. Залётин В.М. и др. Энергетическое разрешение HgI<sub>2</sub>-детекторов рентгеновских и гамма-квантов. Атомная энергия, т. 63, вып. 2, август 1987, с. 140-142.

92. Yoshiyuki K. et al. Application of a fiber optic grating sensor for the measurement of strain under irradiation environment. Nucl. Eng. and Design, 2002, v. 217, p. 283-288.
93. Baker J.H. et al. A combined NaI(Tl)+LiI(Eu) detector for environmental, geological and security applications. Radiation Measurement. 2007, 42, стр. 937.
94. Reder P.L. et al. Nucl. Instr. Meth. 1994, A340, стр. 371
95. Ryzhikov V. et al. Thermal neutron detectors based on complex oxid crystals. Nucl. Instr. Meth. 2002, стр. 156-159
96. Reilly D, Ensslin N., and Hastigs S. Jr. Passive Non destructive Assay of Nuclear Materials. LA-UR-90-732 1991, стр. 386.
97. Бовин В.П., Викулов И.В., Панов М.А. и др. Состояние и перспективы разработки газовых пропорциональных детекторов рентгеновского излучения для радиометрического анализа вещества. Вопросы атомной науки и техники. Серия: радиационная техника. 1992, вып. 1, стр. 39.
98. Голева В.И., Шумаков А.В. Вопросы атомной науки и техники. Серия: радиационная техника. 1987, вып. 2 (35), стр. 55.
99. Sauli F. GEM: a new concept for electron amplification in gas detectors. Nucl. Inst. and Meth. A386, 1997, стр. 531-534.
100. Бузулуцков А.Ф. Детекторы излучений на основе газовых электронных умножителей. Приборы и техника эксперимента. 2007, № 3, с. 5-30.
101. Gebauer V., et al. Novel large-area thermal neutron imagine detectors comprising <sup>157</sup>Gd/CsI-converter. Nucl. Inst. and Meth. A392, 1997, стр. 68-72.
102. Рыжиков В.Д., Стадник П.Е., Яковлев Ю.А. Перспективы развития системы сцинтиллятор-фотодиод. Приборы и техника эксперимента, 1984, № 2, с. 6-16.
103. Исследование основных характеристик микропиксельных лавинных фотодиодов. <http://hep.msu.dubna.ru/main/mod/resource/view.php?id=464>.
104. Гольбрайх Н.И., Плотников А.Ф., Губин В.Э.. Квантовая электроника. Наука, 1975.
105. Береснев В.И. и др. Спектрсмещающие световоды для сцинтилляционных и черенковских детекторов большого размера. Атомная энергия, т. 64, вып. 3, март 1988, с. 215-219.
106. Статистические методы в экспериментальной физике. Перевод с английского под ред. Тяпкина А.А. М., Атомиздат, 1978, с. 208-210, с. 112.
107. Питмен Э. Основы теории статистических выводов. Перевод с английского под ред. Ширяева А.Н. М., Мир, 1986, с. 9.
108. Chambers W. e. a. Portal Monitor for Diversion Safeguards. Rept. LA-5681, Jul. 1974.
109. Arnal T. e. a. Application des controles neutroniques dans les instalation de fabrication et de retraitment des combustibles. Bulletin d'Information Scintifiques et Techniques, N223, May/Juin 1977.
110. Kruse L., Dominguez B. Development of an improved monitor for portal detection of the unauthorized removal of special nuclear material. – Nucl. Mater. Manag., 1982, v. 11, N 4, p. 42-47.
111. Fehlau P. An Application Guide to Pedestrian SNM Monitors. Rept. LA-10633-MS, Feb. 1986.
112. Tomas E. Sampson e. a. Portal Monitor for Diversion Safeguards. Nucl. Techn. Vol. 23, Aug. 1974.
113. Fehlau P., Coop K., Markin J. Application of Wald's Sequential Probability Ratio Test to Nuclear Material Control. Rept. LA-UR-84-2782, 1984.
114. Косицын В.Ф., Шумаков А.В. Атомная техника за рубежом, № 10, 1988.
115. Fehlau P., Close D.A., Coop K.L., York R. Estimated and observed performance of a neutron SNM portal monitor for vehicles. LA-UR--96-3409, 1996.
116. Coop K. Monte Carlo Simulation of the sequential Probability Retio Test for Radiation Monitoring. - IEEE Transactions on Nuclear Science, v. NS-32, Feb. 1985.
117. Fehlau P., Coop K., Nixon K.V. Sequential Probability Ratio Controllers for Safeguards Radiation Monitors. Proc. 6 Annaul ESARDA Symp. on Safeguards and NMM, Venice, Italy, May, 1984.

118. Shipley J. Sequential likelihood-ratio test applied to series of materials balances.- In: Mathematical and statistical methods in Nuclear Safeguards. New York: Harwood Academic Publishers, 1982.
119. Markin J.T., Stewart J.E., and Goldman A.S. Data Analysis for Neutron Monitoring in an Enrichment Facility. Proc. 4 Annual ESARDA Symp. Specialist Meeting on Harmonization and Standardization for Nuclear Safeguards, Petten, Netherlands, April, 1982.
120. Leitner E., Nagib M., Podewils P., Avenhaus R. Evaluation of the Sensitivity of a Neutron Detection System in a Portal Monitor. Proc. 16 Annual ESARDA Symp., France, Versailles, 1983.
121. Dumesnil P., Greco J.L. Optimization of the processing of the counts from a doorway monitor for radioactive substances. Proc. 7 Ann. ESARDA Symp. on Safeguards and NMM, Liege, Belgium, May, 1985.
122. Fehlau P. Comparing a recursive digital filter with the moving-average and sequential probability-ratio detection methods for SNM portal monitor. IEEE Trans. on Nucl. Science, vol. 40, No. 2, April 1993.
123. Косицын В.Ф., Шумаков А.В. Использование априорной вероятности при обнаружении случайных кратковременных событий. ПТЭ, №4, 1991, стр. 99-102.
124. Гольданский В.И., Куценко А.В., Подгорецкий М.И.. Статистика отсчётов при регистрации ядерных частиц. М.: ГИ физико-математической литературы, 1959. 81 с.
125. Веселова Г.П., Грачёв А.В., Кулабухов Ю.С. и др. Способ радиационного мониторинга, радиационный монитор. Патент № 2105323, ГНЦ РФ ФЭИ. 1998.
126. Викторов Л.В., Кружалов А.В., Шеин А.С. и др. Способ обнаружения слабых потоков ионизирующих излучений. Патент № 2140660, Уральский политехнический институт. 1998.