

ОБЗОР РАЗРАБОТОК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОНИКИ РЕНТГЕНОВСКИХ ПРИБОРОВ

О. В. Игнатьев

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

В работе приводится сравнительный статус разработок детекторной электроники – спектрометров ионизирующих излучений – в мире и СССР к началу 1970-х гг., когда эта научная тематика возникла в Уральском политехническом институте. В хронологическом порядке кратко описываются разработанные в научно-исследовательской лаборатории новые принципы обработки детекторных импульсов; устройства, реализующие эти принципы; прецизионные полупроводниковые и сцинтилляционные рентгеновские и γ -спектрометры и созданные на их основе ядерно-физические приборы и установки. Приводится список публикаций, отражающих наиболее интересные научные и практические результаты деятельности лаборатории.

Ключевые слова: полупроводниковые детекторы; CUSP-фактор; сцинтилляторы; энергетическое разрешение; формирование детекторных импульсов; быстродействие; инспектор наложений; стабилизатор базовой линии; корректор «живого» времени; рентгенофлуоресцентный анализатор; нейтронно-активационный анализ.

1. Введение

Первые несколько лет с момента образования на кафедре экспериментальной физики в 1968–1969 гг. нового научного направления – ядерного приборостроения – тематика работ сводилась к разработке критически важных элементов и простейших сцинтилляционных спектрометров X-, γ - и n^0 - излучений. Данные табл.1 показывают тот базис, с которого начала развиваться лаборатория.

Таблица 1. Сравнительный статус разработок электроники спектрометров ионизирующих излучений к началу 1970-х гг.

Период	Характерные черты, достижения		в УПИ
	в мире	в СССР	
До 1960-х гг.	<p>Вся аппаратура на лампах, спектр. усилители с простейшими $[(CR)_{dir}+(RC)_{int}]$ фильтрами; усилительные секции типа «двойка» и «тройка»; дифференциальные дискриминаторы; первые ADC типа <i>Wilkinson</i> [1,2] с $f_d \leq 10\text{MHz}$, $N=6 \div 8 \text{ bit}$</p>		Тематика отсутствовала
	<p>Первые монографии по ядерной электронике</p> <ul style="list-style-type: none"> • W. C. Elmore, M. Sands, 1949 [3]; A. B. Gillespie, 1953 [4]; R. L. Chase, 1961 [5] и др. • Теория оптимальной фильтрации сигналов на фоне шума применительно к ядерной электронике (H. Hartog, F. A. Miller, 1947 [6]; E. Baldinger, W. Franzen, 1956 [7]; E. Gatti et al., 1960, [8]) – т.н. cusp-формирование • Теория баллистического дефицита в формирующих усилителях (E. Baldinger, W. Franzen, 1956) 		
1960-е гг.	<p>Появление транзисторов; возрастание кратности интегрирования в спектрометрических усилителях (снижение, CF); рост скорости и точности АЦП ($f_d = 25 \div 50 \text{ MHz}$, $N=8 \div 10 \text{ bit}$)</p>		Тематика отсутствовала до 1968 – 1969 гг.
	<ul style="list-style-type: none"> • Первый общепризнанный стабилизатор базовой линии спектрометра (<i>L. B. Robinson</i>, 1961 [12]) • <i>BLR</i> Чейза-Паоло, 1967 [13]. • Первый процессор спектрометрических импульсов (<i>K. Kandiah</i>, 1967 [14]) • Инженерный способ расчета шумовых свойств спектрометра (<i>M. Konrad</i>, 1968 [15]) • Появление идеи адаптации времени формирования в усилителе к интервалам между спектрометрическими импульсами (<i>M. Bertolaccini et al</i>, 1968 [16]) • Первый предусилитель с непрерывной оптосвязью, достижение $\eta_{5,9} \leq 200 \text{ eV}$ (<i>F. S. Goulding et al.</i>, 1969 [17]) • Начало производства модулей ядерной электроники <i>NIM</i>, 1964 (Nuclear Instrumentation Modules) 	<ul style="list-style-type: none"> • Монография Ю. К. Акимова и др. по полупроводниковым детекторам [18] • Монографии по детекторам элементарных частиц [19] и ядерной электронике [20,21] • Монография Н. А. Вартанова и П. С. Самойлова по сцинтилляционной спектрометрии [22] • С 1960-х гг. каждые 2 года Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна Моск. обл.) проводит Международный симпозиум по ядерной электронике с выпуском объемного сборника докладов. • Транзисторные анализаторы АИ-128 и АИ-256 • Конструктивы ядерной электроники «Вишня», «Рябина», «Черешня» • Начало промышленного выпуска специализированных модулей ядерной электроники (счетчики импульсов, дискриминаторы, усилители и т. п.) 	

Начало – середина 1970-х гг.	Появление согласованных пар интегральных транзисторов (середина 1970-х гг.), Усилительные секции получили структуры операционных усилителей. Первые интегральные операционные усилители (середина 1970-х). Активные фильтры в спектрометрических усилителях. Появление в составе спектрометра режектора наложений. Применение микросхем эмиттерно-связанной логики и появление первых счетно-импульсных ADC с $N = 12 \text{ bit}$ при тактовой частоте $50\div 100 \text{ MHz}$, в т. ч. серийно выпускаемых промышленностью.		
	<ul style="list-style-type: none"> • Предусилитель с импульсной оптосвяью $\eta_{5,9} \leq 170 \text{ eV}$ (F. S. Goulding, 1971 [23]) • Первый «безрезистивный» предусилитель с непрерывной стоковой связью, достижение $\eta_{5,9} \leq 200 \text{ eV}$ (E. Elad, 1972 [24]) • Предложен наглядный способ расчета во временной области фильтрующих свойств время-инвариантных и время-вариантных формирователей спектрометрических импульсов (F. S. Goulding, 1972 [25]) • Появление в спектрометрических усилителях усилительных секций на гибридных (конец 1960-х гг.) и интегральных (начало 1970-х гг.) м/с 	<ul style="list-style-type: none"> • Первая в СССР разработка спектрометра со стабилизатором нуля, режектором наложений и время-вариантным формирователем импульсов (В. Б. Иванов, 1970 [26]) • Монография Ю. К. Акимова и др. по быстродействующей ядерной электронике [27] • Быстродействующие ADC с кусочно-линейной шкалой (работы В. Г. Тишина в ОИЯИ, 1972 [28]) • Первые спектрометрические усилители, конкурирующие с усилителями ORTEC, Canberra и т. п. (работы В. Г. Субботина, 1969 [29] и А. И. Калинина, 1973 [30] в ОИЯИ) 	<ul style="list-style-type: none"> • Быстродействующие сцинтилляционные γ-радиометры с время-вариантным формированием сигналов • Начало работ по прецизионным спектрометрическим усилителям с формирователями импульсов на основе дифференциатора на линиях задержки (с 1972 г.) • Появление первого конкурентно способного спектрометра с Si(Li)-детектором и усилителем с время-вариантным формирователем на линиях задержки ($FWHM_{5,9 \text{ keV}} \approx 330 \text{ eV}$)

Использованные аббревиатуры

ADC (Analogue-to-Digital Converter) – аналого-цифровой преобразователь

CF (Cusp Factor) – показывает во сколько раз теоретически возможное отношение сигнала к шуму выше, чем с данным формирователем; для реальных спектрометров $CF = 1,03\div 1,5$

BLR (Base-Line Restorer) – восстановитель базовой линии

ОИЯИ – Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Моск. обл.

$FWHM_{5,9 \text{ keV}}$ (Full Width on Half Maximum) – полная ширина пика $5,9 \text{ keV}$ на половине высоты, т. е. энергетическое разрешение

В 1972 г. в лаборатории возникла тематика полупроводниковых X-спектрометров, а чуть позже и газоразрядных. Основным трендом в разработке этих приборов, как и сцинтилляционных, с кристаллом NaI:TI, было достижение предельного быстродействия. В сцинтилляционных спектрометрах это обеспечивалось применением электронных ключей в качестве анодной нагрузки фотоэлектронного умножителя (*Photo Multiplier Tube – PMT*) и различных компенсаторов длительности анодных импульсов. Чем короче импульсы, тем меньше вероятность искажения их амплитуд взаимными наложениями. Единственное ограничение состоит в том, что в формировании максимума детекторного импульса должно участвовать максимально возможное число фотонов сцинтилляционной вспышки и, соответственно, фотоэлектронов *PMT*. В противном случае начинается деградация относительного энергетического разрешения $\eta = FWHM/E_\gamma$ из-за роста статистических флуктуаций числа носителей заряда N ($\eta \sim 1/\sqrt{N}$).

В полупроводниковых X-спектрометрах с криогенными *Si(Li)*-детекторами, для которых характерно относительно низкое отношение сигнала к шуму (*Signal to Noise Ratio – SNR*), такие вольности чреваты катастрофическими потерями в разрешающей способности, а это главное достоинство полупроводниковых детекторов! Типовая структура спектрометра тех лет приведена на рис. 1.

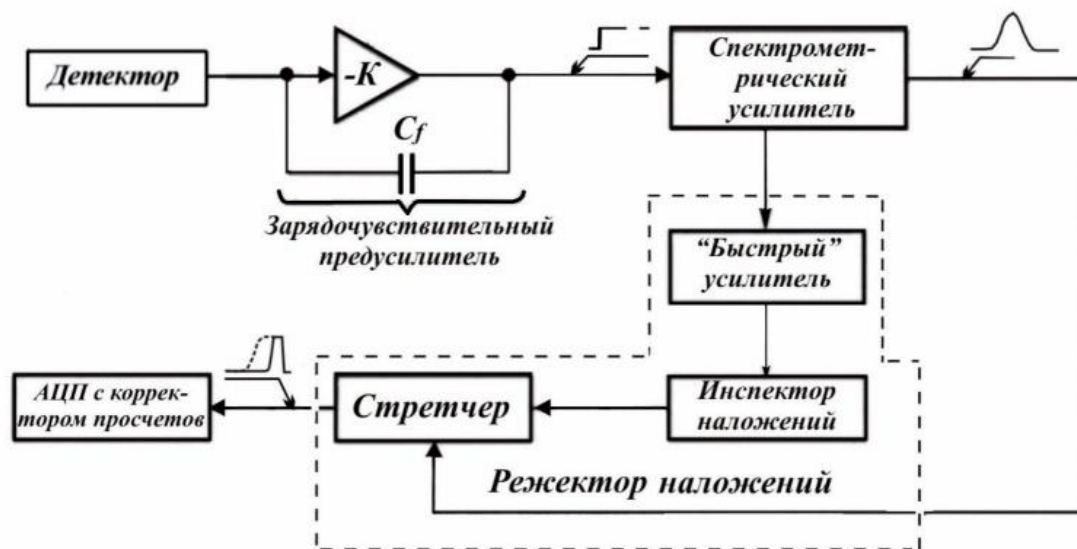


Рис. 1. Структура «классического» полупроводникового спектрометра

Влияние шума на энергетическое разрешение иллюстрируется рис. 2. При этом чем более качественный детектор (ток утечки), тем больше должно быть время формирования импульсов для подавления т. н. последовательного шума (дробовой шум тока стока полевого транзистора зарядо-чувствительного предусилителя).

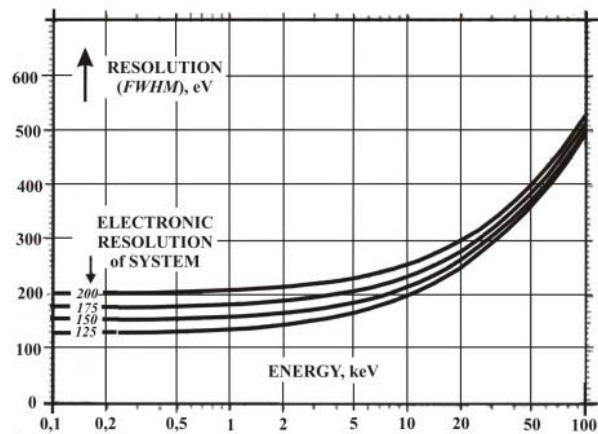


Рис. 2. Влияние шума электроники на разрешение спектрометра с Si(Li)-детектором [17]

Рис. 3 показывает взаимосвязь между статистической загрузкой по входу R_i и по выходу R_o спектрометра с «классическим» инспектором наложенных событий при разных способах подавления шума. При треугольной форме сформированных импульсов быстродействие по входу (R_{i_max}) вдвое выше, более того, почти на 7 % лучше подавляются электронные шумы.

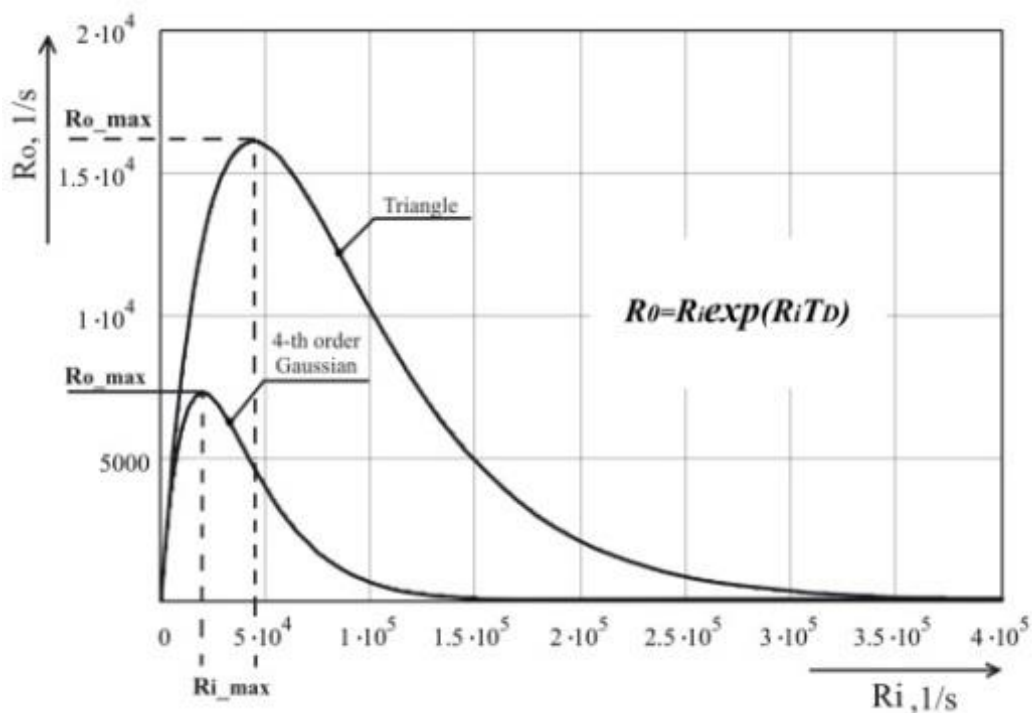


Рис. 3. Зависимости $R_o = f(R_i)$ для спектрометров с быстрым ADC и формирователями квазигaussianых и «треугольных» импульсов, настроенными на оптимум по разрешению. T_D -микроскопическое мертвое время спектрометра. Для гауссиана $T_D=50 \mu s$, для «треугольных» импульсов $T_D=25 \mu s$

Факторов влияния на быстродействие и энергетическое разрешение в полупроводниковых спектрометрах значительно больше, чем в сцинтилляционных, а эффекты намного тоньше. Быстродействие и разрешающая (по энергии) способность спектрометра, даже если это сцинтилляционный спектрометр, объективно всегда находятся в противоречии. Все без исключения узлы и модули полупроводникового спектрометра влияют либо на разрешающую способность, либо

на быстроедействие, либо на обе характеристики одновременно. Данные табл. 2 [31] являются обобщением многолетнего опыта разработок прецизионных спектрометров.

В период с середины 1970-х по 1990-й г. параллельно с разработкой и производством прецизионных полупроводниковых спектрометров X- и γ -излучений пришлось очень интенсивно изучать и развивать теорию подавления шума время-вариантными формирователями; создавать новые принципы обработки детекторных импульсов и их потоков; разрабатывать структуры и схемы перечисленных в табл. 2 устройств.

Таблица 2. Влияние устройств и узлов полупроводникового спектрометра на основные характеристики

Устройства (узлы)	Влияние на характеристики при малых статистических нагрузках	Влияние на характеристики при высоких статистических нагрузках
Блок детектирования (собственно детектор и зарядочувствительный предусилитель)	Задаёт предел разрешающей способности спектрометра («статистика» преобразования энергии поглощенного кванта излучения; ток утечки детектора и затвора <i>JFET</i> ; тип и механизм реализации восстановления; крутизна характеристики <i>JFET</i> ; качество материала детектора и <i>JFET</i> – <i>trapping</i> -эффект и $1/f$ -шум)	Зарядочувствительные предусилители (<i>ChA</i>) с «непрерывными» о. с. дают возрастающий с ростом загрузки «параллельный» шум и уменьшающуюся постоянную спада импульсов на выходе, следствие – образование биполярных сигналов в <i>PSI</i> (возрастание на входе <i>JFET</i> тока, компенсирующего средний ионизационный ток). <i>ChA</i> с «импульсными» о. с. могут давать значительное дополнительное мертвое время (циклы восстановления заряда на емкости C_f)
Формирователь спектрометрических импульсов (<i>PSh</i>)	Тип формирователя определяет степень приближения энергетического разрешения к пределу, задаваемому блоком детектирования ($CF=1,01 \div 1,50$; $CF_{1/f}=1,01 \div 1,61$)	Задаёт интервал наложений, т. е. теоретический ход проходной характеристики по нагрузке – зависимость $R_o = f(R_i)$. Время-вариантные формирователи могут генерировать «нестационарный», т. е. зависящий от интервалов времени между импульсами шум
Стабилизатор базовой линии (<i>BLS</i>)	Практически не влияет, если исходная постоянная времени $\tau_{BLS} \geq 20TW$ (TW – длительность по основанию сформированных детекторных импульсов на входе <i>BLS</i>)	Отвечает за сдвиг и уширение пиков в аппаратном спектре с ростом загрузки (несовершенная блокировка емкости памяти на время действия спектрометрического импульса; «паралич»; нестационарный шум)
Инспектор наложений со схемой таймирования импульсов	В спектрометрах с время-вариантным формированием импульсов может ограничивать нижний предел измеряемых амплитуд (размытие момента переключения параметров)	Влияет на асимметрию пиков в аппаратном спектре. Отвечает за относительную интенсивность ложных пиков с кратными энергиями. Ответственен (вместе с <i>PSh</i>) за степень приближения микроскопического мертвого времени к величине интервала наложений

Окончание табл. 2

Аналого-цифровой преобразователь (ADC)	Не влияет при условии, что дифференциальная нелинейность $\varepsilon_{diff} \leq 1\%$, коэффициент конверсии в X-диапазоне $K_{A \rightarrow D} \geq 11 \text{ bit/scale}$, а в γ -диапазоне $K_{A \rightarrow D} \geq 12 \text{ bit/scale}$	Вносит дополнительное мертвое время непродлевающегося типа, если используется счетно-импульсный метод конверсии и частота кварца $f_d \leq 100 \text{ MHz}$ для X-спектрометров и $f_d \leq 200 \text{ MHz}$ для γ -спектрометров
Интерфейс $PSI \leftrightarrow PC$	Не влияет!	Может вносить дополнительное мертвое время при отсутствии буферной памяти
Корректор просчетов	Не влияет!	Может давать существенные ошибки в определении интенсивности излучения по входу спектрометра

2. Материалы и методы

1) Комплексно изучены общие свойства спектрометров с время-инвариантными и время-вариантными формирователями детекторных импульсов:

- определена минимально необходимая система показателей [32], позволяющая однозначно сравнивать *предельные* метрологические характеристики спектрометров с любыми способами обработки импульсов детекторов (весовая функция спектрометра $W(t)$ ¹, весовая функция время-вариантной части спектрометра $W_{var}(t)$), импульсная характеристика спектрометра $h(t)$ ² и импульсная характеристика время-инвариантной части спектрометра $h_{inv}(t)$);
- сформулировано правило [32], позволяющее без проведения экспериментов определять наличие или отсутствие в спектрометре дополнительного, зависящего от статистической загрузки шума (*Count-Rate Depended Noise – CRDN*);
- проведен сравнительный анализ наиболее перспективных время-инвариантных и время-вариантных алгоритмов формирования детекторных импульсов [31, 32];
- предложена методика измерения вклада *CRD*-шума спектрометра [33].

2) Изобретен, разработан и запатентован способ увеличения быстродействия (*Noise Free Additional Pulse Shaping – NFAPS*) спектрометров [34], позволяющий менять форму и длительность спектрометрических импульсов, сохраняя форму исходной функции памяти спектрометра $W(t)$, что позволяет избежать возникновения зависящего от статистической загрузки шума:

- показано, что *NFAPS*-способ применим к целому ряду известных в мире спектрометров с время-вариантным формированием сигналов и качественно улучшает их свойства;

¹ $W(t)$ – характеризует то, с каким «весом» шумовой δ -импульс, возникший в момент времени t , предшествующий фиксированному моменту T_{peak} измерения амплитуды, вкладывается в амплитудное значение сформированного детекторного импульса. Время в пределах $t = -\infty \div T_{peak}$. Фактически $W(t)$ является функцией памяти спектрометра на события, предшествующие измерению амплитуды данного импульса.

² $h(t)$ – характеризует реакцию спектрометра в переменные моменты времени $t = 0 \div \infty$ на δ -импульс, поданный на вход в момент времени $t = 0$. По сути $h(t)$, представляет собой форму аналогового импульса на выходе спектрометрического усилителя (на входе *ADC*). Для время-инвариантных систем весовая функция и импульсная характеристика спектрометра совпадают, если в $W(t)$ произвести замену переменной t на $\Theta = T_{peak} - t$.

- запатентован технически реализуемый сверхбыстродействующий спектрометр с автоматической адаптацией времени обработки сигналов к индивидуальным интервалам между ними по *NFAPS*-способу [35].

3) Предложена единая классификация стабилизаторов базовой линии спектрометра и изучено влияние свойств разных классов стабилизаторов на фундаментальные свойства спектрометра; указаны наиболее перспективные типы стабилизаторов для использования в прецизионных спектрометрах X- и γ -излучений [31–33]:

- теоретически и экспериментально показано, что любой из классических (нелинейных и линейных время-вариантных) стабилизаторов является источником нестационарного шума;
- исследованы конкретные структуры стабилизаторов и предложены усовершенствования для получения предельных параметров, свойственных соответствующему классу.

4) Создан новый класс стабилизаторов – «цифровые» (по реакции на входное воздействие) стабилизаторы (*Digital Base-Line Stabilizer – DBLS*), принципиально способные не вносить нестационарный шум и максимально устойчивые к статистической загрузке (частное приложение *NFAPS*-способа) [31]:

- разработана теория *DBLS*;
- показано, что «цифровые» стабилизаторы в настоящее время превосходят по своим характеристикам *истинно цифровые*.

5) Предложена методика сравнительного инженерного анализа разных способов временной привязки к спектрометрическим импульсам, и определены способы таймирования, пригодные для применения в спектрометрах рентгеновского и мягкого γ -излучения.

6) Дан анализ известных способов инспекции наложенных событий с точки зрения применимости в спектрометрах с низким отношением сигнала к шуму.

7) Разработана методика математического анализа точностных свойств корректоров просчетов при стационарной статистической загрузке, и впервые проведен сравнительный математический анализ трех наиболее известных в мире способов коррекции просчетов [31]:

- показано, что математически строго коррекция осуществима лишь по методу «виртуального генератора» *G.P. Westphal* [36];
- предложены технические меры для реализации на практике потенциальных возможностей корректоров; предложена методика быстрой настройки и проверки характеристик корректора;
- предложены новые подходы к коррекции просчетов при переменной статистической загрузке для существенного снижения дисперсии числа отсчетов.

8) Проведен сравнительный анализ спектрометров с аналоговой и цифровой обработкой сигналов детекторов излучений. Показано, что при нынешнем уровне развития цифровой техники и математических алгоритмов большее быстродействие как «по входу», так «по выходу» достижимо в спектрометрах с аналоговой обработкой детекторных импульсов [37].

Благодаря постоянно проводимым исследовательским работам разрабатываемая и выпускаемая лабораторией аппаратура соответствует мировому уровню и оказывается востребованной на рынке аппаратуры для измерения ионизирующих излучений.

3. Результаты

За все годы своего существования НИЛ ЭРП только в течение нескольких лет имела символическое, на уровне нескольких процентов от требуемого бюджетное финансирование. Поэтому все без исключения разработки выполнялись и выполняются по контрактам с конкретными организациями и внедрены либо на производстве, либо в практике научных исследований. Среди Заказчиков наиболее крупными были, а многие ими и остаются: АО ИЦ «Буревестник» (Санкт-Петербург), Институт ядерной физики СО РАН (г. Новосибирск; полтора десятка спектрометрических систем в системе CAMAC), ОАО «Чепецкий механический завод» (г. Глазов; около двух десятков портативных рентгенофлуоресцентных анализаторов «МАРФ»), ЗАО «Южполиметалл-холдинг» (Москва; свыше 350 портативных спектрометров для носимых рентгенофлуоресцентных анализаторов ПРИМ-1 и его модификаций – для нужд ГТК РФ). В течение почти 15 лет выполняются разработки спектрометров и установок на их основе для ФГУП «ПО «Маяк».

Первым крупным успехом стала разработка и освоение в собственном производстве т. н. *аналоговых процессоров (AP)* – спектрометрических устройств, содержащих усилитель сигналов предусилителя: время-вариантный формирователь (на линиях задержки и стробируемом «идеальном» интеграторе); стабилизатор базовой линии (время-вариантный, *wrap-around*, т. е. «охватывающего» типа); устройство автоматической установки порога дискриминатора обнаружения импульсов на фоне шумов; режектор наложенных сигналов; режектор перегружающих по амплитуде импульсов; нормализатор формы выходных импульсов (стретчер); экспандер (в ранних версиях, для работы с анализаторами АИ-128 и АИ-256); устройство управления (контроллер). В течение 15 лет, наряду с выпуском аналоговых процессоров, непрерывно шло их совершенствование [38–42]. Заложенная в AP «идеология» обеспечивала существенное их превосходство над аналогами, выпускавшимися компаниями *Ortec* и *Canberra*, как по быстродействию, так и по подавлению шумов. Это было показано при сравнительных испытаниях. И все это несмотря на существенное отставание советской элементной базы от мировой. Спектрометры с разработанным в лаборатории криогенным предусилителем с импульсным восстановлением заряда [43] и AP не имели себе равных в рентгеновском диапазоне энергий.

Существует иной малоизученный метод оппозитного гамма-сканирования (*Opposed Gamma Scanning - OGS*) [60], гораздо менее чувствительный к неоднородностям матрицы и объемных источников. Ошибки определения активности в несколько раз ниже, чем с SGS-паспортизаторами. Предварительные исследования свидетельствуют о возможности с помощью соответствующей спектрометрической аппаратуры реализовать преимущества метода OGS и нивелировать его недостатки.

Следующим значительным шагом стала разработка и производство по контрактам с ИЯФ СО АН (г. Новосибирск) более 10 систем программно-управляемых спектрометрических модулей в стандарте CAMAC [44, 45]. Впервые в состав этих комплексов вошли прецизионные счетно-импульсные ADC собственной разработки с $f_d = 210 \text{ MHz}$ и переключаемым числом уровней квантования от 512 до 16 384 [46, 47]. В рентгенофлуоресцентном анализе с синхротронным источником первичного излучения и криогенным *Si(Li)*-детектором, обеспечивающим энергетическое разрешение на уровне $FWHM_{5,9\text{keV}} = 180 \text{ eV}$ при «треугольном» формировании с $T_{peak} = 12 \div 24 \text{ }\mu\text{s}$, вполне достаточно 2 048 уровней квантования в ADC. Максимальное время преобразования в этом случае не превышает $10 \text{ }\mu\text{s}$, и ADC не ограничивает быстродействие спектрометра. Применявшийся CAMAC-

модуль инкрементной памяти производства ИЯФ позволял использовать в качестве устройства накопления и обработки информации ЭВМ «Электроника-60».

С 1992 г. резко изменился характер заказов на услуги лаборатории. Вместо прецизионных спектрометров для исследовательских работ стали востребованы приборы для анализа элементного состава веществ на основе прецизионных X- и γ -спектрометров с различными детекторами. С 1992 по 1999 г. всего две разработки были выполнены для научных исследований. В 1992 г. поступил заказ на CAMAC-модуль сдвоенного спектрометрического усилителя с одноканальным дискриминатором [48] для установки VASILISA лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Модуль был выпущен небольшим тиражом. Вторая интересная задача возникла в 1999 г. Потребовалась разработка и поставка в ТРИНИТИ (г. Троицк, Моск. обл.) сверхбыстродействующего спектрометрического комплекта для диагностики плазмы с алмазным детектором на TFTR, Princeton, USA [49]. В состав комплекта вошли полнофункциональный спектрометрический усилитель в конструктиве NIM SA-002 ($T_{peak} \geq 220 \text{ ns}$; $T_w \geq 560 \text{ ns}$; $R_{i,max} \leq 2 \cdot 10^6 \text{ 1/s}$ и $R_{o,max} \leq 7 \cdot 10^5 \text{ 1/s}$) [50], а также самостоятельный CAMAC-модуль ADC с быстрым пиковым детектором на входе ($T_{peak,min} \geq 150 \text{ ns}$, $T_{conv} \leq 1,3 \text{ }\mu\text{s}$) [51].

С 1993 г. началась разработка, а с 1994 г. было запущено производство для Чепецкого механического завода (г. Глазов) носимых энергодисперсионных рентгенофлуоресцентных анализаторов (XPFA) типа MAPФ (рис. 4), предназначенных для разбраковки по типу сплава однотипных изделий из циркония. В первых приборах в качестве источника возбуждающего излучения использовался ^{241}Am , блок детектирования содержал полупроводниковый CdTe-кристалл с элементом Пельтье (разработка Петербургского института ядерной физики), $FWHM_{5,9\text{keV}} \geq 850 \text{ eV}$ и зарядочувствительный предусилитель с непрерывной обратной связью. Все перечисленное помещалось в конструкцию, напоминающую пистолет. В кейсе размещались полнофункциональный аналого-цифровой процессор детекторных импульсов с интегральным ADC, ноутбук, аккумуляторы и преобразователь питания «AC→DC». Появившиеся в РФ импортные аналоговые и аналого-цифровые микросхемы позволили создать весьма компактный спектрометрический тракт с характеристиками, достойными стационарных приборов. Впоследствии из-за нестабильного энергетического разрешения пришлось отказаться от CdTe-кристалла в пользу Si-PIN детектирующих модулей Amptek ($FWHM_{5,9\text{keV}} \leq 185 \div 250 \text{ eV}$). Сейчас применяются электроохлаждаемые кремниевые дрейфовые детекторы (SDD) с $FWHM_{5,9\text{keV}} \leq 135 \text{ eV}$, и это при том, что в процессоре детекторных импульсов достаточно «короткое» формирование ($T_{peak} = 2 \div 5 \text{ }\mu\text{s}$), обеспечивающее высокую скорость накопления спектров. Радиоактивные источники возбуждающего излучения (^{241}Am) заменены на управляемый потоку и напряжению портативный рентгеновский излучатель Moxtek ($V_a = 4 \div 40 \text{ kV}$, $I_a = 1 \div 100 \text{ }\mu\text{A}$). Всего создано 3 поколения портативных XPFA.

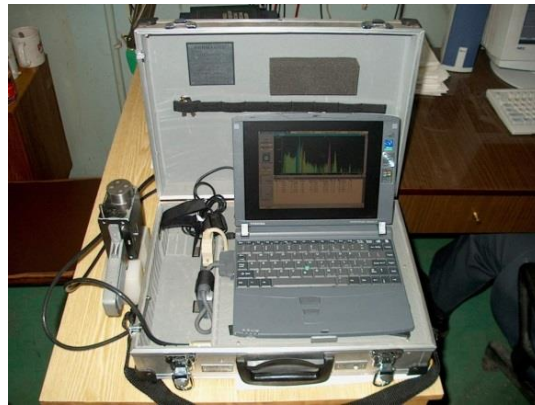


Рис. 4. XRFA MAPФ-02. Источник первичного излучения ^{241}Am



Рис. 5. Портативный EDXRF-анализатор MAPФ-03/вм. Кремниевый SDD Amptek, XPT Moxtek и промышленный карманный персональный компьютер

Для прецизионных измерений элементного состава веществ и материалов, особенно легких, содержащих Mg, Al, Si и др. создан портативный XRFA MAPФ (рис. 5) и настольный XPFA «Старт-01» (рис. 6), в котором предусмотрена форвакуумная откачка образца для снижения поглощения характеристического излучения ($1,25 \div 2,5 \text{ keV}$).



Рис. 6. Настольный EDXRF-анализатор «Старт-01» с вакуумированием исследуемого образца

В конце 1994 г. лаборатория включилась в уже действовавшую программу поставки для таможен РФ носимых рентгенофлуоресцентных анализаторов ПРИМ-1 (CdTe-детектор с предусилителем производства ПИЯФ, г. Гатчина; рентгенооптическое устройство с источниками ^{241}Am и ^{238}Pu , а также прикладной *Soft* от ВНИИТФА, Москва; полнофункциональный процессор детекторных импульсов и вспомогательные электронные устройства разработки и производства НИЛ ЭРП).

Общая компоновка ПРИМ-1 была принята аналогичной МАРФ-02; блок детектирования с кристаллом CdTe также был заменен на модуль с *Si-PIN*-кристаллом и предусилителем с импульсным восстановлением разработки НИЛ ЭРП. За несколько лет только для нужд ГТК выпущено свыше 350 экземпляров портативных X-спектрометров³ нескольких типов.

Различные компании-производители *XRFA* покупают X-спектрометры НИЛ ЭРП для укомплектования ими своих анализаторов.

С начала 2000-х гг. в лаборатории начался ренессанс сцинтилляционной техники. Тому способствовал ряд факторов общего характера. Во-первых, стало наблюдаться оживление экономики – и увеличилась потребность в γ -спектрометрах и установках на их основе. В середине десятилетия крупнейший потребитель оборудования для измерения ионизирующих излучений концерн «Росэнергоатом», которому подчиняются АЭС, был вынужден в соответствии с требованиями МАГАТЭ постепенно переходить от примитивного измерения мощности дозы в технологических цепочках к радионуклидному анализу. Второй фактор состоял в том, что в 1990-х гг. в России было утрачено производство большеобъемных полупроводниковых *Ge(Li)*-детекторов, а импортные из особо чистого (*HpGe*) слишком дороги. Появление коммерческих новых, быстрых, термостабильных, высокоэффективных сцинтилляторов высокого разрешения $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ ($\eta_{662\text{keV}} \leq 3,5 \%$), $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ ($\eta_{662\text{keV}} \leq 3,0 \%$), а позже и CeBr_3 ($\eta_{662\text{keV}} \leq 4,0 \%$) позволило применять эти сцинтилляторы в тех задачах, где традиционный NaI:Tl ($\eta_{662\text{keV}} = 7,0 \div 8,0 \%$) был неприемлем.

Среди выполненных работ многоканальный спектрометр для мобильного комплекса дистанционного обнаружения ядерных боеприпасов (в кооперации с лабораторией средств специального контроля кафедры); двухканальные NaI:Tl -сцинтилляционные спектрометры для установок γ -маммографии (выпущено около десятка установок); NaI:Tl -сцинтилляционные спектрометры для установки промышленного γ -активационного анализа содержания золота (Навоийский ГМК, Узбекистан); установка нейтронно-активационного анализа содержания кислорода в титановых сплавах («ВСМПО-Ависма», г. В. Салда). Эта работа заслуживает более подробного описания. Схема установки на рис.7 [52].

³ «За разработку, организацию производства и внедрение в практику ядерно-физических комплексов экспрессного многоэлементного анализа веществ и материалов» группа сотрудников организаций-участников программы была отмечена премией Правительства РФ в области науки и техники за 2003 г. В их числе представитель НИЛ ЭРП.

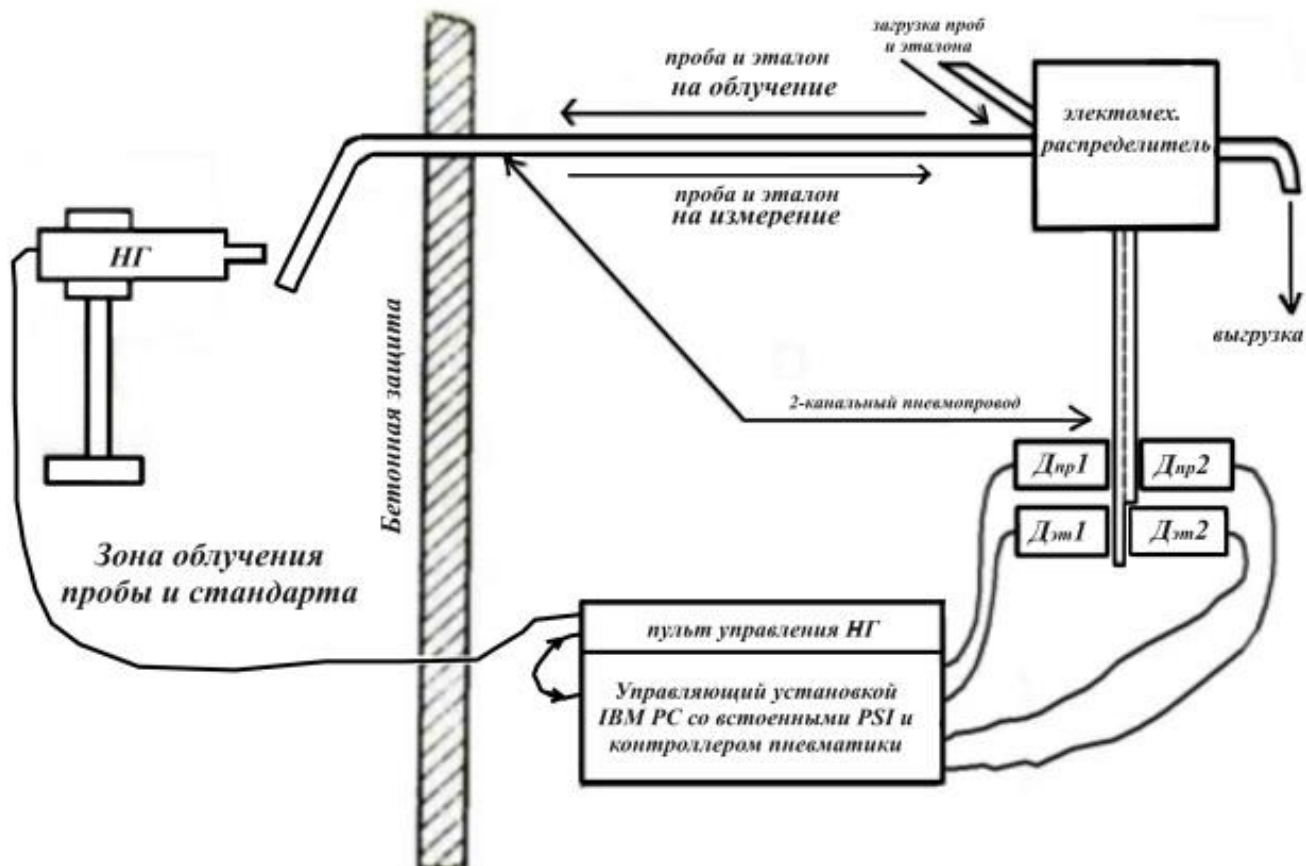


Рис. 7. Схема установки нейтронно-активационного анализа: НГ – нейтронный генератор; $D_{пр}$, $D_{эм}$ – детекторы, «осматривающие» капсулы с пробой и эталоном размером $\varnothing 25 \cdot 6 \text{ мм}$

Проблемы спектрометрии сводились к следующим:

1) из-за низких концентраций кислорода и короткого периода полураспада кислорода ($T_{1/2} = 7,13 \text{ с}$) статистика «бедная», поэтому необходима максимальная эффективность регистрации «жесткого» γ -излучения ^{16}N (6,128 и 7,117 MeV) [53];

2) «бедная» статистика (всего несколько сот событий за время экспозиции) чрезвычайно чувствительна к искажению фоновыми событиями, поэтому энергетическое «окно», в котором производится счет характеристических γ -квантов, должно быть как можно уже – требуется наилучшее энергетическое разрешение;

3) проба и эталон должны измеряться в «4 π -геометрии» (по 2 больших детектора на каждую капсулу $\varnothing 25 \cdot 6 \text{ мм}$ с суммированием отсчетов) – характеристики 4 детекторов должны быть идентичными.

Конфигурации типа [NaI + PMT], использовавшиеся ранее, требовали подстройки измерительных каналов каждые 30 ÷ 40 мин.

Проблемы были сняты благодаря разработке блоков детектирования в виде 4 полусфер радиусом $R = 50 \text{ мм}$ с приклеенными к каждой полусфере четырьмя фотодиодами Hamamatsu 10·10 мм и разработкой зарядочувствительных предусилителей, а также весьма специфичных IBM PC-встраиваемых процессоров детекторных импульсов и прикладного ПО.

Опыт оказался очень позитивным. Достигнутое разрешение (рис. 8) лучше, чем со 100-миллиметровыми детекторами [NaI + PMT], а установка эксплуатируется более 15 лет без отказов в спектрометрической части. В дальнейшем применение CsI:TI-кристаллов с кремниевыми фотоприемниками получило широкое развитие в серийно выпускаемых лабораторией, в основном для применения на АЭС,

интеллектуальных детекторах «Старк-02». Относительное энергетическое разрешение с ними $\eta_{662\text{keV}} \leq 6,5\%$ [54].

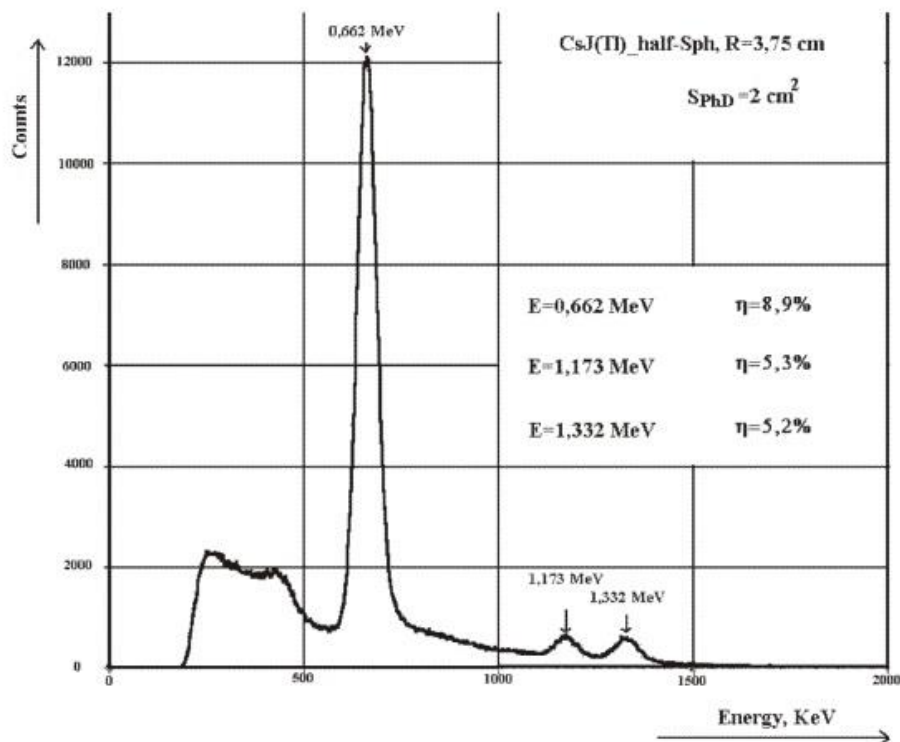


Рис. 8. Спектры, снятые с полусферическим детектором [CsI:Tl] + $PhD \times 4$. Квазигауссово формирование, $\tau_{sh} = 8 \mu s$

Две другие разработки выполнены на основе сцинтиллятора $LaBr_3:Ce$. Первая из них – интеллектуальный детектор «Старк-01» с кристаллом $\varnothing 38 \cdot 38$ мм [55]. Это полноценный универсальный γ -спектрометр высокого разрешения ($\eta_{662\text{keV}} \leq 3,0\%$), который можно применять для особо ответственных измерений в стационарных и полевых условиях (рис. 9). Накопление и обработка информации может производиться на любом компьютере, связь с которым осуществляется по протоколу RS485 либо по Bluetooth.



Рис. 9. Интеллектуальный детектор «Старк-01» с кристаллом $LaBr_3:Ce$, $\eta_{662\text{keV}} \leq 3,0\%$. Слева зарядное устройство с подключенным аккумулятором

Одним из самых масштабных по объему интеллектуальных разработок стал проект 2013–2017 гг. по созданию опытной установки γ -интроскопии массивных изделий и заготовок из тяжелых металлов. Были созданы новый способ

высокоразрешающей γ -интроскопии [56] и установка на его основе [57] (рис. 10). В объектах из свинца, вольфрама и других тяжелых металлов толщиной 100 мм удалось добиться визуализации дефектов (без дополнительной обработки изображений) с характерными размерами ≤ 400 μm . Классическая радиография на базе бетатрона или линейного ускорителя в таких объектах даже после обработки изображений разрешает дефекты размером более 700 μm . Улучшение пространственного разрешения достигается отсеканием рассеянных в исследуемом объекте γ -квантов. В основе принципа построения установки – модифицированная комптоновская γ -камера, реализованная на координатном детекторе-рассеивателе $[\text{LaBr}_3:\text{Ce} + 64 \times \text{SiPM}]$ и детекторе-поглотителе $[\text{LaBr}_3:\text{Ce} + \text{PMT}]$. Размеры рассеивателя $\varnothing 55 \cdot 5$ мм, поглотителя – $\varnothing 70 \cdot 38$ мм. В установке 65 полнофункциональных процессоров детекторных импульсов (64 цифровых и один аналого-цифровой).

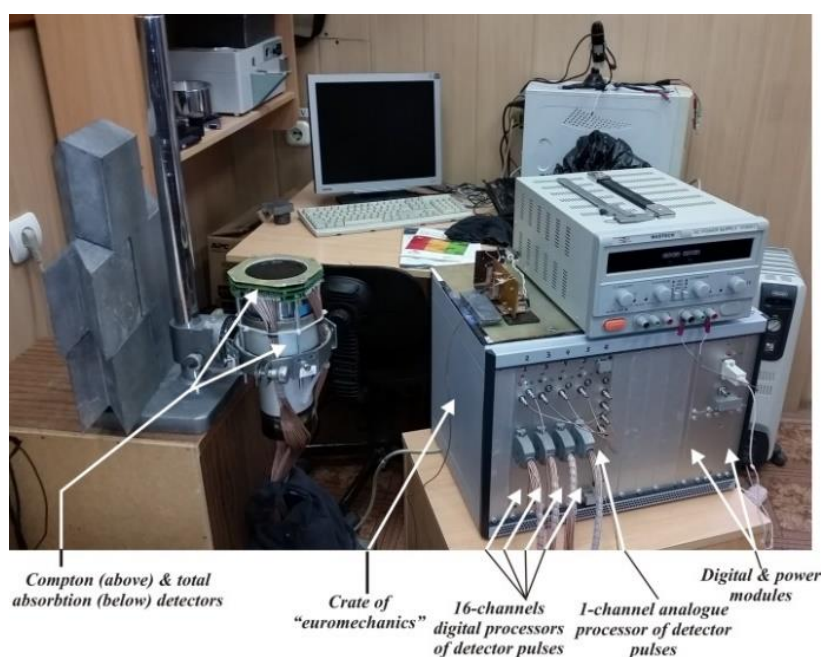


Рис. 10. Общий вид измерительного комплекса γ -интроскопа

Побочным продуктом разработки γ -интроскопа стала разработка высокоэффективного β -детектора [58] с координатной чувствительностью БДБ-107 (рис. 11) – набор 16 β -ячеек, состоящих из тонкого пластикового сцинтиллятора $50 \cdot 50 \cdot 1$ мм и SiPM с усилителем-формирователем. β -детекторы освоены в производстве и поставляются на АЭС в составе β -радиометров РЗС-21. Оптимальная конструкция β -ячейки была создана после моделирования в GEANT4.



Рис. 11. Отдельные детектирующие ячейки размером $50 \cdot 50 \cdot 10$ мм (слева) и радиометр РЗС-21 с БДБ-107 с 16 ячейками (справа)

4. Выводы

Спектр выполненных и планируемых лабораторией разработок не исчерпывается вышеизложенным. Имеющийся научно-технический потенциал и проведенные предварительные исследования позволяют взяться за решение двух крупных и перспективных задач.

Первая из них – создание сцинтилляционного измерительного комплекса паспортизатора низко- и среднеактивных отходов. Требуется бесконтактно определять радионуклидный состав содержимого 200-литровых бочек, при том что число радионуклидов может превышать 15, распределение их по объему неравномерное, а коэффициент линейного ослабления заранее не известен. Подобные установки производятся серийно. В них чаще всего применяется метод сегментного гамма-сканирования (*Segmented Gamma Scanning – SGS*) [59], сводящийся к «осмотру» вращающейся бочки сильно коллимированным HpGe-детектором вертикальных слоев (сегментов) с расстояния в $10 \div 25$ см. Недостатки метода состоят в длительности процедуры (более часа) и значительных (до 350 %) ошибках определения активности отдельных нуклидов при гетерогенном наполнении.

Существует иной, малоизученный метод оппозитного гамма-сканирования (*Opposed Gamma Scanning – OGS*) [60], гораздо менее чувствительный к неоднородностям матрицы и объемных источников. Ошибки определения активности в несколько раз ниже, чем с SGS-паспортизаторами. Предварительные исследования свидетельствуют о возможности с помощью соответствующей спектрометрической аппаратуры реализовать преимущества метода OGS и нивелировать его недостатки.

Другая актуальная задача – создание счетчика излучения человека (*WholeBodyCounter – WBC*) (рис.12).



Рис. 12. Наиболее распространенный в мире WBC типа FastScan-2250 (Canberra Ind., USA)

Конструктивные особенности:

1. Два термостабилизированных детектора на NaI:Tl размерами 406×127×76 мм
2. Диапазон энергий – 300 keV÷1,8 MeV
3. Энергетическое разрешение – $\approx 8\%$ по Cs-137
4. Время обследования пациента – 1 мин
5. Защита от фона – 100 мм специальной низкофоновой стали (исключены следы Co-60)
6. МИА – 150 Bc ($4nCi$) по Co-60
7. Общая масса – 4,800.0 кг

8. Стоимость в РФ – ≥ 50 млн руб.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали реальную возможность создать *WBC* на основе 48 кристаллов CsI:Ti 64-64-32 мм с энергетическим разрешением не 8, а 6,5 %, нижним пределом энергий не 300, а 60 keV, с возможностью определения координат радионуклида в теле исследуемого. Стоимость такой установки не превысит 25 млн руб.

Единственное, что не позволяет начать работы по перечисленным проектам, – отсутствие негосударственного Заказчика по этим работам. Надеемся, что это вопрос времени...

5. Список литературы

1. *Wilkinson, D.H.* / D. H. Wilkinson // Proc. Cambridge Phil. Soc. – 1950. – Vol. 46. – P. 508–511.
2. *Санин, А. А.* / А. А. Санин, Н. И. Суханова // Вестник МГУ. – 1953. – № 8. – С. 105.
3. *Elmore, W. C.* Electronics, Experimental Techniques / W. C. Elmore, M. Sands // National Nuclear Energy Series. – New York: McGraw-Hill, 1949.
4. *Gillespie, A. B.* Signal, noise and resolution in nuclear counter amplifiers / A. B. Gillespie. – New York : McGraw-Hill, 1953.
5. *Chase, R. L.* Nuclear Pulse Spectrometry / R. L. Chase. – New York : McGraw-Hill, 1961.
6. *Den Hartog, H.* / H. den Hartog, F. A. Miller // Physica. – 1947. – Vol. 13. – 571 p.
7. *Baldinger, E.* / E. Baldinger, W. Franzen // Adv. In electronics and electron physics. – 1956. – Vol. 8. – 255 p.
8. *F. T. Arecchi, G. Cavalleri, E. Gatti [et al.]* // Energia Nuclear. – 1960. – Vol. 7, № 10. – 691 p.
9. *Санин, А. А.* / А. А. Санин. – Москва : Радиотехнические методы исследования излучений, Гостехиздат, 1951.
10. *Санин, А.А.* / А. А. Санин. – Москва : Электронные приборы ядерной физики, Физматгиз, 1961.
11. *Бонч-Бруевич, А. М.* / А. М. Бонч-Бруевич. – Москва : Применение электронных ламп в экспериментальной физике, Гостехиздат, 1954.
12. *Robinson, L. B.* / L. B. Robinson // Rev. Sci. Instrum. – 1961. – Vol. 32, № 9. – 1057 p.
13. *Chase, R. L.* / R. L. Chase, L. R. Paulo // IEEE Trans. – 1967. – NS-14, № 1, – P. 83.
14. *Kandiah, K.* / K. Kandiah // Harwel. – 1967, Report AERE-R5019.
15. *Konrad, M.* / M. Konrad // IEEE Trans. NS-15. – 1968. – № 1. – P. 268–282.
16. *M. Bertolaccini, C. Bussolati, S. Cova [et al.]* // Nucl. Instrum. & Meth. – 1968. – Vol. 61. – P. 84–88.
17. *Goulding, F.S.* / F. S. Goulding [et al.] // Nucl. Instrum. & Meth. – 1969. – Vol. 71 – P. 273–290.
18. Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение / Ю. К. Акимов [и др.]; под ред. Ю. К. Акимова. – Москва : Атомиздат, 1967. – 255 с.
19. *Калашникова, В. И.* Детекторы элементарных частиц / В. И. Калашникова, М. С. Козодаев. – Москва : Наука, 1966. – 241 с.
20. *Цитович, А. П.* Ядерная радиоэлектроника / А. П. Цитович. – Москва : Наука, 1967. – 536 с.

21. *Матвеев, В. В.* Приборы для измерения ионизирующих излучений: [Учеб. пособие для вузов] / В. В. Матвеев, Б. И. Хазанов. – Москва : Атомиздат, 1967. – 707 с.
22. *Вартанов, Н. А.* Прикладная сцинтилляционная гамма-спектроскопия / Н. А. Вартанов, Самойлов П. С. – Москва : Атомиздат, 1969. – 462 с.
23. *Landis, D. A.* / D. A. Landis, F. S. Goulding, R. S. Pehl [et al.] // IEEE Trans. – NS-18. – 1971. – № 1. – P. 115–123.
24. *Elad, E.* / E. Elad // IEEE Trans. – 1972. – NS-19, № 1. – P. 403–422.
25. *Goulding, F. S.* / F. S. Goulding // Nucl. Instrum. & Meth. – 1972. – Vol. 100, № 2. – P. 493–504.
26. *Иванов, В. Б.* Амплитудный гамма-спектрометр для работы с полупроводниковыми детекторами в условиях высокой загрузки: дис. канд. техн. Наук / В. Б. Иванов. – Москва, 1970. – 150 с.
27. *Акимов, Ю. К.* Быстродействующая электроника для регистрации ядерных частиц / Ю. К. Акимов [и др.]; под ред. Ю. К. Акимова. – Москва : Атомиздат, 1970. – 415 с.
28. *Ишмухаметов, М. З.* / М. З. Ишмухаметов, В. Г. Тишин // Труды VI Межд. симп. по ядерн. электр./ОИЯИ. – 1972. – С.149–151.
29. *Зубарева, А. М.* / А. М. Зубарева, В. Г. Субботин // Препринт ОИЯИ. 13-4458. –1969. – 19 с.
30. *Андерт, К.* / К. Андерт, Ф. Габриэль, А. И. Калинин // Препринт ОИЯИ. 13-7125. – 1973. – 16 с.
31. *Игнатъев, О. В.* Быстродействующие спектрометры с полупроводниковыми детекторами рентгеновского и гамма-излучений: дис. 01.04.01. д-ра техн. наук / О. В. Игнатъев. – Санкт-Петербург, 2011. – 212 с.
32. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / Ю. К. Акимов [и др.]; под ред. Ю. К. Акимова. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 344 с.
33. *Игнатъев, О. В.* Исследование и разработка формирующих усилителей для спектрометров с ППД рентгеновского и мягкого гамма-излучений: автореф. дис. канд. техн. Наук / О. В. Игнатъев. – ОИЯИ, Дубна, 1980. – 20 с.
34. *Игнатъев, О. В.* Способ увеличения быстродействия спектрометров ионизирующих излучений с полупроводниковыми и другими детекторами без внутреннего усиления. Патент РФ № 2392642. Оpubл. 20.06.2010. Бюл. № 17.
35. *Игнатъев, О. В. Пулин А. Д., Дудин С. В.* Процессор спектрометрических импульсов. Патент РФ № 2092872. Оpubл. 10.10.1997 г. Бюл. № 28.
36. *Westphal, G. P.* Method of and system for determining a spectrum of radiation characteristics with full counting-loss compensation. US Patent № 4,476,384. Oct. 9. – 1984.
37. *Игнатъев, О. В.* Сравнение возможностей аналоговых и цифровых спектрометров рентгеновского излучения с полупроводниковыми детекторами (Обзор) / О. В. Игнатъев // Аналитика и контроль. – 2006. – Т. 10, № 3–4. С. 223–232.
38. *Игнатъев, О. В.* / О. В. Игнатъев, Н. Ф. Школа // Приб. и техн. эксп. –1977. – № 4. – С. 133–136.
39. Линейный спектрометрический усилитель / О. В. Игнатъев, Н. Ф. Школа, В. П. Гиманов, Б. С. Новисов // А.с. СССР № 752210. Оpubл. 30.07.1980 г. Бюл. № 28.
40. *Игнатъев, О. В.* / О. В. Игнатъев, А. И. Коссе, Н. Ф. Школа // Приб. и техн. эксп. – 1980. – № 6. – С. 68–70.

41. Разработка и исследование аналоговых процессоров: (Обзор) / О. В. Игнатъев, Н. Ф. Школа, А. И. Коссе [и др.] // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Вып. 25 JL.: Машиностроение. –1980. – С. 100–111.
42. *Игнатъев, О. В.* / О. В. Игнатъев, Н. Ф. Школа, Ю. А. Шевченко // Приб. и техн. эксп. – 1987. – № 5. – С. 74–79.
43. Импульсный усилитель / А. И. Коссе, В. П. Гиманов, О. В. Игнатъев [и др.] // А.с. СССР № 790191. Опубл. 23.12.1980 г. Бюл. № 47.
44. *Ignatyev, O. V.* [et al.] // Nucl. Instr. & Meth. In Phys. Research. A261. – 1987. – P. 103 – 106.
45. *Ignatyev, O. V.* [et al.] // Nucl. Instr. & Meth. In Phys. Research. A282. – 1989. – P. 734–738.
46. О. В. Игнатъев, А. В. Лысенко, А. Д. Пулин [и др.] // Приб. и техн. эксп. – 1989. – № 4. – С. 107–112.
47. *Игнатъев, О. В.* / О. В. Игнатъев, А. Д. Пулин // Приб. и техн. эксп. – 1989. – № 4. – С. 112–114.
48. *Ignatyev, O. V.* / O. V. Ignatiev, A. D. Pulin // Nucl. Instr. & Meth. In Phys. Research. A352. – 1995. – P. 614–616.
49. Rev. of Sc. Instrum / A. V. Krasilnikov [et al.] – 1999. – Vol. 70. – P. 1107–1110.
50. *Ignatyev, O. V.* / O. V. Ignatyev, A. D. Pulin // Nucl. Instrum. & Meth.in Phys. Research. A516. – 2004. – P. 160–166.
51. *Dudin. S. V.* / S. V. Dudin, O. V. Ignatyev, A. D. Pulin // Nucl. Instrum. & Meth.in Phys. Research. A516 (2004). – P. 167–171.
52. *Игнатъев, О. В.* / О. В. Игнатъев, С. Г. Морозов. Гамма-спектрометры для промышленных установок нейтронно-активационного анализа на быстрых нейтронах // Вестник УГТУ-УПИ. – 2006. – № 5 (76). – С. 89–108.
53. *Parry, S. J.* Handbook of Neutron Activation Analysis / S. J. Parry. – Viridian Publishing, UK (2003) 243 p.
54. Перспективы кристаллов CsI:Тl в γ -спектрометрах для АЭС / М. П. Белоусов [и др.] // АНРИ. – 2021. – № 2(105) – С. 24–40.
55. Портативный сцинтилляционный гамма-спектрометр Старк-01 / М. П. Белоусов [и др.] // Аналитика и контроль. – 2011. – Т. 15, № 4. – С. 429– 438.
56. Патент РФ 2680849 , G01T 1/36. Способ гамма-радиографической интроскопии / О. В. Игнатъев, М. А. Горбунов, С. Г. Морозов, Е. А. Купчинская, А. В. Купчинский, А. А. Пулин, С. В. Дудин, Д. А. Фофанов. Опубл. 28.02.2019. Бюл. № 7.
57. Дефектоскопия / М. А. Горбунов [и др.] – 2019. – № 10. – С. 50–60.
58. Детектор заряженных частиц с тонким сцинтиллятором / М. А. Горбунов, М. В. Громыко, С. В. Дудин [и др.]. Патент РФ 2594991, G01T 1/20. Опубл. 20.08.2016 Бюл. № 23.
59. Gamma-Ray Measurements with the Segmented Gamma Scan. LA-7059-M / E. R. Martin [et al.] – 1977. – 153 p.
60. *Dung, T. Q.* Modification to technique using two detectors for assay of radioactive waste drum / T. Q. Dung // Ann. Nucl. Energy. – 1997. – Vol. 24, No. 8. – P. 645–657.

Сведения об авторе:

Игнатъев Олег Валентинович, д. т. н., главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории рентгеновских приборов, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия Екатеринбург, Россия. Эл. почта: ignatyev47@gmail.com.

OVERVIEW OF DEVELOPMENTS CARRIED OUT BY THE RESEARCH LABORATORY OF ELECTRONICS FOR X-RAY INSTRUMENTS

O. V. Ignatiev

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

The paper provides a comparative status of developments in detector electronics for ionizing radiation spectrometers in the world and in the USSR by the beginning of the 70s, when this scientific topic arose at the Ural Polytechnic Institute. In chronological order, the new principles of processing detector pulses developed in the Laboratory are briefly described; devices that implement these principles; pre-cision semiconductor and scintillation X-ray and γ -spectrometers and nuclear physics devices and in-stallations created on their basis. There is a list of publications reflecting the most interesting scientific and practical results of the Laboratory's activities.

Key words: semiconductor detectors; CUSP-factor; scintillators; energy resolution; shaping of detector pulses; fast-action; pile-up inspector; base-line stabilizer; live time corrector; X-ray fluorescence analyzer; neutron activation analysis.

References

1. *Wilkinson, D.H.* / D. H. Wilkinson // Proc. Cambridge Phil. Soc. – 1950. – Vol. 46. – P. 508–511.
2. *Sanin, A. A.* / A. A. Sanin, N. I. Sukhanova // MSU Vestnik. – 1953. – № 8. – P. 105.
3. *Elmore, W. C.* Electronics, Experimental Techniques / W. C. Elmore, M. Sands // National Nuclear Energy Series. – New York: McGraw-Hill, 1949.
4. *Gillespie, A. B.* Signal, noise and resolution in nuclear counter amplifiers / A. B. Gillespie. – New York : McGraw-Hill, 1953.
5. *Chase, R. L.* Nuclear Pulse Spectrometry / R. L. Chase. – NewYork : McGraw-Hill, 1961.
6. Den Hartog, H. / H. den Hartog, F. A. Miller // Physica. – 1947. – Vol. 13. – 571 p.
7. *Baldinger, E.* / E. Baldinger, W. Franzen // Adv.In electronics and electron physics. – 1956. – Vol. 8. – 255 p.
8. F. T. Arecchi, G. Cavalleri, E. Gatti [et al.] // Energia Nuclear. – 1960. – Vol. 7, № 10. – 691 p.
9. *Sanin, A. A.* / A. A. Sanin. – Moscow : Radio engineering methods of radiation research, Gostekhizdat, 1951.
10. *Sanin, A. A.* / A. A. Sanin. – Moscow : Electronic devices of nuclear physics, Physmatgiz, 1961.
11. *Bonch-Bruevich, A. M.* / A. M. Bonch-Bruevich. – Moscow : Application of electronic lamps in experimental physics, Gostekhizdat, 1954.

12. *Robinson, L. B.* / L. B. Robinson // Rev. Sci. Instrum. – 1961. – Vol. 32, № 9. – 1057 p.
13. *Chase, R. L.* / R. L. Chase, L. R. Paulo // IEEE Trans. – 1967. – NS-14, № 1, – P. 83.
14. *Kandiah, K.* / K. Kandiah // Harwel. – 1967, Report AERE-R5019.
15. *Konrad, M.* / M. Konrad // IEEE Trans. NS-15. – 1968. – № 1. – P. 268–282.
16. M. Bertolaccini, C. Bussolati, S. Cova [et al.] // Nucl. Instrum. & Meth. – 1968. – Vol. 61. – P. 84–88.
17. *Goulding, F.S.* / F. S. Goulding [et al.] // Nucl. Instrum. & Meth. – 1969. – Vol. 71 – P. 273–290.
18. Poluprovodnikovye detektory yadernyh chastic i ih primeneniye / Yu. K. Akimov [et al.]; ed. by Yu. K. Akimov. – Moscow : Atomizdat, 1967. – 255 p. (in Russian)
19. *Kalashnikova, V. I.* Detektory elementarnyh chastic / V. I. Kalashnikova, M. S. Kozodaev. – Moscow : Nauka, 1966. – 241 p. (in Russian)
20. *Citovich, A. P.* Yadernaya radioelektronika / A. P. Citovich. – Moscow : Nauka, 1967. – 536 p. (in Russian)
21. *Matveev, V. V.* Pribory dlya izmereniya ioniziruyushchih izluchenij: [Учеб. пособие для вызов] / V. V. Matveev, B. I. Hazanov. – Moscow : Atomizdat, 1967. – 707 p. (in Russian)
22. *Vartanov, N. A.* Prikladnaya scintillyacionnaya gamma-spektroskopiya / N. A. Vartanov, Samoilov P. S. – Moscow : Atomizdat, 1969. – 462 p. (in Russian)
23. *Landis, D. A.* / D. A. Landis, F. S. Goulding, R. S. Pehl [et al.] // IEEE Trans. – NS–18. – 1971. – № 1. – P. 115–123.
24. *Elad, E.* / E. Elad // IEEE Trans. – 1972. – NS-19, № 1. – P. 403–422.
25. *Goulding, F. S.* / F. S. Goulding // Nucl. Instrum. & Meth. – 1972. – Vol. 100, № 2. – P. 493–504.
26. *Ivanov, V. B.* Amplitude gamma spectrometer for working with semiconductor detectors under high load conditions. Candidate's thesis / V. B. Ivanov. –Moscow, 1970. – 150 p. (in Russian)
27. *Akimov, Yu. K.* Bystrodejstvuyushchaya elektronika dlya registracii yadernyh chastic / Yu. K. Akimov [et al.]; ed. by Yu. K. Akimov. – Moscow : Atomizdat, 1970. – 415 p.
28. *Ishmuhametov, M. Z.* / M. Z. Ishmuhametov, V. G. Tishin // VI Int. Symp. on Nucl. El. / JINR. – 1972. – P.149–151.
29. *Zubareva, A. M.* / A. M. Zubareva, V. G. Subbotin // Preprint JINR. 13-4458. – 1969. – 19 p.
30. *Andert, K.* / K. Andert, F. Gabriel, A. I. Kalinin // Preprint JINR. 13-7125. – 1973. – 16 p.
31. *Ignatyev, O. V.* High-speed spectrometers with semiconductor detectors of X-ray and gamma radiation. Doctor's thesis / O. V. Ignatyev. – St. Petersburg, 2011. – 212 p. (in Russian)
32. Poluprovodnikovye detektory v eksperimental'noj fizike / Yu. K. Akimov [et al.]; ed. by Yu. K. Akimova. – Moscow : Energoatomizdat, 1989. – 344 p.
33. *Ignatyev, O. V.* Research and development of formative amplifiers for X-ray and soft gamma radiation spectrometers with PPD. Extended abstract of candidate's thesis / O. V. Ignatyev. – JINR, Dubna, 1980. – 20 p.
34. *Ignatyev, O. V.* Method for increase of operational speed of ionising radiation spectrometres with semiconductor and other detectors without inner amplification. Patent RU № 2392642. Publ. 20.06.2010. Bull. № 17.

35. *Ignatyev, O. V., Pulin A. D., Dudin S. V.* Spectroscopic pulse processor. Patent RU № 2092872. Publ. 10.10.1997 г. Bull. № 28.
36. *Westphal, G. P.* Method of and system for determining a spectrum of radiation characteristics with full counting-loss compensation. US Patent № 4,476,384. Oct. 9. – 1984.
37. *Ignatyev, O.V.* Comparison of a properties of «analogue» and «digital» X-ray spectrometers with the semiconductor detector / O. В. Игнатъев // *Analytics and control.* – 2006. – Vol. 10, № 3–4. P. 223–232.
38. *Ignatyev, O. V. / O. V. Ignatyev, N. F. Shkola // Prib. i tekhn. eksp. –1977. – № 4. – P. 133–136. (in Russian)*
39. Linear spectrometric amplifier / O. V. Ignatyev, N. F. Shkola, V. P. Gimанov, B. S. Novisov // A.S. USSR № 752210. Publ. 30.07.1980 г. Bull. № 28.
40. *Ignatyev, O. V. / O. V. Ignatyev, A. I. Kosse, N. F. Shkola // Prib. i tekhn. eksp. – 1980. – № 6. – P. 68–70. (in Russian)*
41. Development and research of analog processors / O. V. Ignatyev, N. F. Shkola, A. I. Kosse [et al.] // *Equipment and methods of X-ray analysis. Vol. 25 JI.: Mechanical engineering.* – 1980. – P. 100–111.
42. *Ignatyev, O. V. / O. V. Ignatyev, N. F. Shkola, Yu. A. Shevchenko // Prib. i tekhn. eksp. – 1987. – № 5. – P. 74–79. (in Russian)*
43. Pulse amplifier / A. I. Kosse, V. P. Gimанov, O. V. Ignatyev [et al.] // A.S. USSR № 790191. Publ. 23.12.1980 г. Bull. № 47.
44. *Ignatyev, O. V. [et al.] // Nucl. Instr. & Meth. In Phys. Research. A261. – 1987. – P. 103 – 106.*
45. *Ignatyev, O. V. [et al.] // Nucl. Instr. & Meth. In Phys. Research. A282. – 1989. – P. 734–738.*
46. O. V. Ignatyev, A. V. Lysenko, A. D. Pulin [et al.] // *Prib. i tekhn. eksp. – 1989. – № 4. – P. 107–112. (in Russian)*
47. *Ignatyev, O. V. / O. V. Ignatyev, A. D. Pulin // Prib. i tekhn. eksp. – 1989. – № 4. – P. 112–114. (in Russian)*
48. *Ignatyev, O. V. / O. V. Ignatiev, A. D. Pulin // Nucl. Instr. & Meth. In Phys. Research. A352. – 1995. – P. 614–616.*
49. *Rev. of Sc. Instrum / A. V. Krasilnikov [et al.] – 1999. – Vol. 70. – P. 1107–1110.*
50. *Ignatyev, O. V. / O. V. Ignatyev, A. D. Pulin // Nucl. Instrum. & Meth.in Phys. Research. A516. – 2004. – P. 160–166.*
51. *Dudin. S. V. / S. V. Dudin, O. V. Ignatyev, A. D. Pulin // Nucl. Instrum. & Meth.in Phys. Research. A516 (2004). – P. 167–171.*
52. *Ignatyev, O. V. / O. V. Ignatyev, S. G. Morozov. Gamma spectrometers for industrial installations of neutron activation analysis on fast neutrons // Vestnig USTU-UPI. – 2006. – № 5 (76). – P. 89–108.*
53. *Parry, S. J. Handbook of Neutron Activation Analysis / S. J. Parry. – Viridian Publishing, UK (2003) 243 p.*
54. PERSPECTIVES OF CSI:TL CRYSTALS IN G-SPECTROMETERS FOR THE NPPS / M. P. Belousov [et al.] // ANRI. – 2021. – № 2(105) – P. 24–40.
55. THE PORTABLE SCINTILLATION GAMMA-SPECTROMETER STARK-01 /

- M. P. Belousov [et al.] // Analytics and control. – 2011. – Vol. 15, № 4. – P. 429–438.
56. Patent RU 2680849 , G01T 1/36. Gamma-radiographic introscope method / O. V. Ignatyev, M. A. Gorbunov, S. G. Morozov, E. A. Kupchinskaya, A. V. Kupchinskij, A. A. Pulin, S. V. Dudin, D. A. Fofanov. Publ. 28.02.2019. Bull. № 7.
57. Defectoscopy / M. A. Gorbunov [et al.] – 2019. – № 10. – P. 50–60.
58. Detector of charged particles with thin scintillator / M. A. Gorbunov, M. V. Gromyko, S. V. Dudin [et al.]. Patent RU 2594991, G01T 1/20. Publ. 20.08.2016 Bull. № 23.
59. Gamma-Ray Measurements with the Segmented Gamma Scan. LA-7059-M / E. R. Martin [et al.] – 1977. – 153 p.
60. *Dung, T. Q.* Modification to technique using two detectors for assay of radioactive waste drum / T. Q. Dung // Ann. Nucl. Energy. – 1997. – Vol. 24, No. 8. – P. 645–657.