



9 ЛБЭ

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

6-80-101

ВЫЛОВ

Цветан Димитров

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ
МЕТОДОВ ПРЕЦИЗИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ
ДИСКРЕТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ
С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ**

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1980

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор А.Г.Зеленков
(ИАЭ им.И.В.Курчатова)

доктор физико-математических наук, профессор Ю.А.Шербаков
(ОИЯИ)

доктор физико-математических наук, профессор А.И.Феоктистов
(ИЯИ АН УССР, Киев)

Ведущее научно-исследовательское учреждение — Московский инженерно-физический институт.

Защита диссертации состоится "___" _____ в _____ час. на заседании специализированного совета Д047.01.03 при ЛЯП ОИЯИ г.Дубна, Московской области.

Автореферат разослан "___" _____ 1980 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь специализированного совета
кандидат физико-математических наук

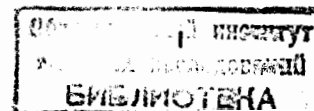
Ю.А.Батусов

Актуальность проблемы. Создание и совершенствование полупроводниковых детекторов (ППД) имело принципиальное значение в задачах спектрометрии излучений радионуклидов. Хорошее энергетическое разрешение и высокая эффективность, относительная простота при постановке эксперимента и возможность применения ЭВМ при обработке данных обеспечили массовый поток новой и более точной информации. Сегодня ППД стали главным инструментом в физике низких энергий.

Методика измерения энергий и интенсивностей излучений основана на сравнении аппаратурных спектров исследуемого и эталонного нуклидов. К сожалению, в настоящее время не существует полного и согласованного набора нормалей энергий и интенсивностей дискретных излучений, набора, который являлся бы обязательным международным стандартом при проведении сравнительных измерений. Таким образом, несмотря на то, что измерения могут проводиться с прецизионной точностью (в том смысле, что погрешности измеряемых величин сравнимы с погрешностями нормалей), результаты этих измерений в каждом случае зависят от выбора эталонов.

Возникает вопрос — каким же образом можно использовать возможности, которые предоставляет нам техника спектрометрии на сегодняшний день, чтобы не оказаться в аналогичной ситуации в будущем. По нашему мнению, единственным путем является разработка последовательной методики измерения с четкой моделью расчета погрешностей и применение согласованного набора нормалей дискретных излучений. Тогда изменения, которые могут в дальнейшем произойти, достаточно просто можно связать с имеющимися данными.

Цель работы. Успех решения проблемы прецизионной спектроскопии в значительной мере зависит от качества спектрометрической аппаратуры и организации эксперимента с широким применением вычислительной техники. Поэтому первый этап реализации программы был связан с решением этой задачи. Затем была разработана методика прецизионной спектрометрии и, наконец, с её помощью построен



согласованный набор нормалей энергий и интенсивностей γ -лучей и электронов внутренней конверсии (ЭК), а также коэффициентов внутренней конверсии (КВК).

Второй этап был связан с применением разработанной методики для решения нескольких актуальных задач ядерной спектроскопии. Это, во-первых, создание атласа аппаратурных спектров α -, β -, γ - и X-излучений. Во-вторых, - получение высококачественных экспериментальных данных об энергиях и интенсивностях дискретных излучений радионуклидов, удовлетворяющих сформулированным выше требованиям. Успешное решение этой задачи лежит в основе современных кибернетических систем осмысливания данных. В-третьих, это - исследование свойств нечетных ядер самария и европия переходной области $A \sim 145-151$, удовлетворительного теоретического описания которых нет, и потому требующее более полного, точного и надежного экспериментального материала. И, наконец, новое измерение энергии связи дейтрона. Это, в какой-то мере, пример применения ПЩД в новой и исключительно перспективной области - прецизионные измерения энергий γ -лучей в различных физических процессах (захват нейтрона и определение энергий связи последнего нейтрона; мезорентгеновские спектры и определение массы мезонов и зарядового распределения ядер и т.д.).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основе всестороннего анализа роли всех элементов спектрометра с ПЩД создан современный комплекс аппаратуры для исследования дискретных излучений, параметры которого находятся на уровне лучших достижений.

2. Разработана оригинальная методика прецизионных измерений энергий и интенсивностей дискретных излучений, а также соответствующее программное обеспечение.

3. С помощью этой методики построен согласованный набор нормалей энергий и интенсивностей γ -лучей и ЭК, а также КВК.

4. Создан атлас из 500 аппаратурных спектров альфа-, бета-, гамма- и рентгеновского излучений для 200 радионуклидов.

5. С применением разработанной методики с различной степенью полноты исследован радиоактивный распад 180 нуклидов (включенных в атлас), в ряде случаев - впервые. Открыто более 1000 новых переходов. В той или иной степени полученные данные использованы при разработке или уточнении 100 схем распада.

6. Детально, с применением практически всех методов классической спектроскопии, исследован радиоактивный распад нечетных нуклидов европия ($A = 145, 147, 149$) и гадолиния ($A = 147, 149, 151$).

Обнаружено более 110 новых переходов и впервые измерены интенсивности более 40 конверсионных линий. Впервые с высокой точностью (2-3%) измерены КВК наиболее интенсивных переходов при распаде ^{149}Eu , ^{149}Gd и ^{151}Gd . В схемах распада введено 20 новых состояний, подтверждено 23 и исключено более 10 уровней, предположительно введенных ранее разными авторами. Впервые определены квантовые характеристики 14 состояний.

7. Впервые по пику полного поглощения при регистрации в $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторах γ -лучей от захвата тепловых нейтронов водородом выполнено измерение энергии связи дейтрона.

Практическую ценность работы можно сформулировать следующим образом:

1. Выбранные в процедуре оптимизации параметры системы ПЩД-ПУ позже были применены при изготовлении спектрометров для целого ряда других экспериментов, в том числе и вне ОИЯИ.

2. Опыт эксплуатации комплекса спектрометрической аппаратуры лежит в основе организации в нашей Лаборатории иерархической системы сбора, обработки и анализа спектрометрической информации.

3. Набор нормалей энергий и интенсивностей γ -лучей и ЭК, а также КВК до настоящего времени является практически единственным (за исключением γ -лучей), который позволяет проводить эксперименты по прецизионной спектроскопии.

4. Роль атласа аппаратурных спектров и систематизированных данных об α -, β -, γ - и X-излучениях радионуклидов трудно переоценить как в задачах планирования новых экспериментов и исследования свойств возбужденных состояний ядер, так и при решении ряда практических задач.

5. Анализ данных о возбужденных состояниях нечетных ядер самария и европия позволяет проследить плавный переход от сферических к деформированным состояниям с ростом N .

6. Новое значение энергии связи дейтрона повлечет за собой изменение величины $m_n - m_p$.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 287 страницах, включая 137 рисунков и 57 таблиц (на 104 страницах) и 268 библиографических ссылок, разделенных по главам (на 17 страницах).

Апробация работы и публикации по теме диссертации. Результаты исследований докладывались на XI + XV международных совещаниях по ядерной спектроскопии и теории ядра в Дубне (1969, 1971, 1973, 1975, 1978 гг.), на всесоюзных ежегодных XIX – XXIX совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (1969–1979 гг.), а также обсуждались на семинарах научно-экспериментального отдела ядерной спектроскопии и радиохимии ЛЯП ОИЯИ. Основные результаты опубликованы в 24 работах (в виде препринтов и сообщений ОИЯИ; в сборнике "Прикладная ядерная спектроскопия" – Атомиздат; в препринте Центрального института ядерных исследований – Россендорф, ГДР; в книге изд. ФАН; в журналах ЭЧАЯ, Известия АН СССР, "Ядерная физика") и 2 сборниках тезисов докладов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко рассматривается актуальность проблемы разработки методики прецизионной спектрометрии излучений радионуклидов и её применение в практике физического эксперимента, а также дается обзор диссертации по главам.

В первой главе изложены результаты разработок и исследований характеристик спектрометров с ПЩ, а также аппаратная организация ядерно-спектроскопических экспериментов по измерению спектров дискретных излучений γ , β .

Проведен систематический анализ структурной схемы /5,10/ и сформулированы требования, предъявляемые к элементам спектрометра с ПЩ. На этой основе реализованы оптимальные условия для каждой конкретной системы детектор-предусилитель.

Хотя к настоящему времени и имеются некоторые достижения в технологии изготовления детекторов из GaAs и CdTe, требованиям эксперимента пока удовлетворяют только детекторы из Si и Ge. Нами применялись детекторы, изготовленные в группе Б.П.Осипенко и в ряде случаев – с непосредственным участием автора. Для обеспечения оптимального температурного режима значительное внимание уделялось вопросам упаковки детекторов и конструкции первого кас-

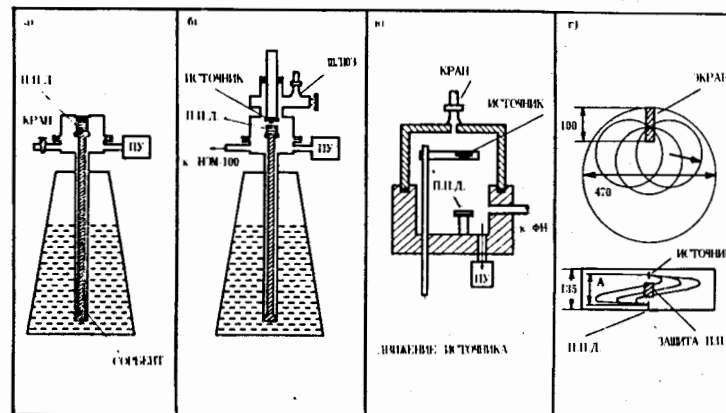


Рис. 1. Конструкции спектрометров с ПЩ для исследования характеристик излучения радиоактивных нуклидов.

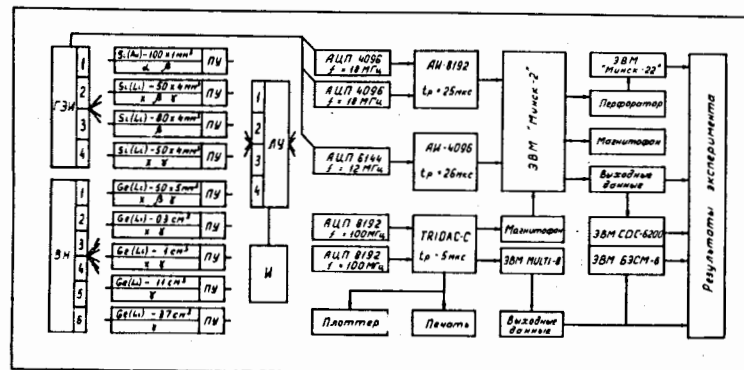


Рис. 2. Спектрометрическая аппаратура для исследования характеристик излучений радионуклидов (1974 г): f – частота генераторной серии аналого-цифрового преобразователя (АЩ); t_p – время обращения к заломиняющему устройству (ЗУ); И – интенсивметр; ЛУ – линейный усилитель; ГЭИ – генератор эталонных импульсов для стабилизации усиления спектрометрического тракта; ВН – источник высокого напряжения для питания ПЩ; ПУ – предусилитель

№ ДЕТЕКТОРА	МАТЕРИАЛ ПЭВ	ПЛОЩАДЬ ПЭВ (см ²)	ТОЛЩИНА ПЭВ (мм)	ПАРАМЕТРЫ ПЭВ	РАДИУС КРИВИЗНЫ ПЭВ (мм)	НАПРЯЖЕНИЕ ПЭВ (МПа)	ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ /КэВ/				ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ /КэВ/	ИСТОЧНИК РАДИОАКТИВНОСТИ
							E _г - 5 МэВ	E _г - 100 КэВ	E _г - 5 МэВ	E _г - 100 КэВ		
1	Si(Au)	α	300	100 мм ² X 0,5 мм	0,5 мм	250 В	15	-	-	1000 - 10000	ЯП - ОКН	ЯП - ОКН
2	Si(Au)	β	300	80 мм ² X 2 мм	2 мм	1000 В	9	-	-	200 - 1000	ЯП - ОКН	ЯП - ОКН
3	Si(Li)	β	77	80 мм ² X 4 мм	4 мм	1500 В	0,880	0,300	0,600	50 - 3000	ЯП - ОКН	ЯП - ОКН
4	Ge(Li/Au)	β	77	80 мм ² X 4 мм	4 мм	1200 В	1,3	0,400	0,600	100 - 4000	ЯП - ОКН	ЯП - ОКН
5	Si(Li)	γ	77	80 мм ² X 4 мм	4 мм	1500 В	-	0,290	0,550	5 - 160	ЯП - ОКН	ЯП - ОКН
6	Ge	γ	77	25 мм ² X 5 мм	5 мм	1200 В	-	0,150	0,500	14 - 279	PGT	PGT
7	Ge(Li)	γ	77	1,3 см ²	8 мм	1500 В	-	0,240	0,600	14 - 600	ЯП - ОКН	ЯП - ОКН
8	Ge(Li)	γ	77	200 мм ² X 5 мм	5 мм	1000 В	-	0,250	0,550	14 - 600	URTEC	URTEC
9	Ge	γ	77	300 мм ² X 7 мм	7 мм	1500 В	-	-	0,250	14 - 600	PGT	PGT
10	Ge(Li)	γ	77	11 см ²	12 мм	2500 В	-	-	1,3	59 - 2750	ЯП - ОКН	ЯП - ОКН
11	Ge(Li)	γ	77	37 см ²	15 мм	3000 В	-	-	1,5	72 - 2750	ЯП - ОКН	ЯП - ОКН
12	Ge(Li)	γ	77	38 см ²	16 мм	3000 В	-	-	1,9	59 - 4000	ЯП - ОКН	ЯП - ОКН
13	Ge(Li)	γ	77	50 см ²	18 мм	3000 В	-	-	2,1	120 - 4000	URTEC	URTEC
14	Ge(Li)	γ	77	18 см ²	8 мм	900 В	-	-	3	50 - 1500	ЯП - ОКН	ЯП - ОКН

Таблица 1а. Полупроводниковые детекторы для прецизионной спектрометрии дискретных излучений радионуклидов (1975 - 1976 гг.). Конфигурации различных ПЭВ показаны в табл. 1б.

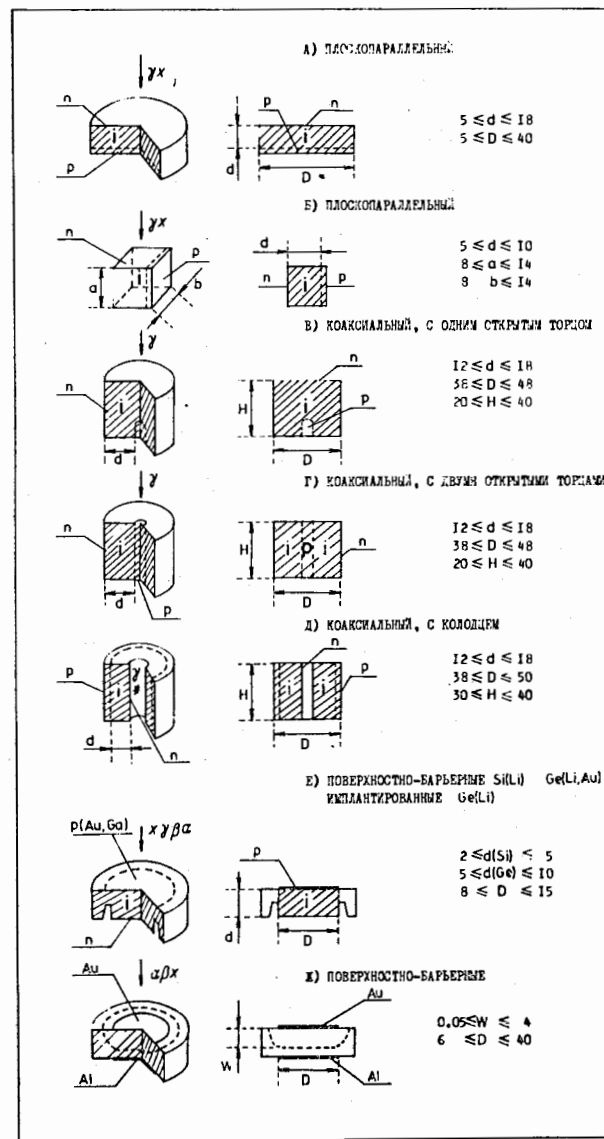


Таблица 1б. Конфигурация различных ПЭВ (см. табл. 1а).

када предусилителя, который, как правило, располагался внутри криостата.

Конструкции спектрометров разрабатывались с учетом особенностей регистрации альфа-, бета-, гамма- и X-излучений - рис.1. Спектрометры с входными окнами сделаны на основе криостата с хладопроводом и сорбентом, который погружается в стандартный сосуд Дьюара с жидким азотом. Вакуум же в камерах спектрометров заряженных частиц создается с помощью системы на базе магнитного электроразрядного насоса НОРД-100. Предусмотрена возможность замены источника без нарушения вакуума, причем процедура замены составляет 3-5 минут.

Исходя из условий физической задачи, мы применяли различные комбинации детекторов, спектрометрических каналов и регистрирующей аппаратуры. Выбор электронных блоков осуществлялся на основании следующих требований: получение оптимального отношения сигнал/шум, хорошие нагрузочные характеристики (до $5 \cdot 10^4$ имп./с), температурная стабильность и линейность.

В зависимости от уровня применяемой техники можно указать три этапа в создании комплекса спектрометрической аппаратуры:

а) первый (1969-1974 гг.) - разработка, изготовление и исследование различных типов ПЩ, а также блоков аналоговой электроники для задач прецизионной спектрометрии излучений радионуклидов;

б) второй (1974-1979 гг.) - доведение всех параметров спектрометрического комплекса до лучшего уровня;

в) третий (начало реализации 1978 г.) - организация иерархической системы сбора, обработки и анализа спектрометрической информации на базе современной вычислительно-измерительной техники (ЭВМ ЕС-1040, ЕС-1010 и ИЗОТ-310).

Основная работа по созданию современного комплекса спектрометрической аппаратуры была выполнена на первом этапе (рис.2). Систематизированные характеристики ПЩ и ПУ, а также некоторые характерные аппаратурные спектры приведены в табл.1 и на рис.3-8, соответственно. На втором этапе в работе были использованы коммерческие детекторы (из сверхчистого Ge и Ge(Li)-детекторы с высокой эффективностью) с высоким энергетическим разрешением, параметры которых недостижимы в наших условиях, а также блоки аналоговой электроники некоторых фирм (ORTEC, PGT, Polon) и анализаторы DIDAC-4000 (Intertechnique). Третий этап является ло-

гическим продолжением начатой работы, однако детальное его описание выходит за рамки настоящей диссертации.

В конце главы описана методика проверки качества системы в целом и систематизированы эффекты, влияющие на энергетическое разрешение спектрометра с ПЩ.

Во второй главе изложена методика прецизионной спектроскопии дискретных излучений радионуклидов с помощью ПЩ /12,13,17/.

Точность измерения энергий и интенсивностей дискретных излучений в значительной степени связана с применением ЭВМ для обработки спектральных линий. Существуют различные способы моделирования пиков, однако вследствие математической простоты, очевидности физической интерпретации параметров и минимальных требований к объему памяти и быстродействию ЭВМ наиболее широкое применение получила аппроксимация пика симметричным гауссианом. В наших экспериментах этот подход реализован с помощью программы "Каток" *. Для правильного выбора условий измерения исследованы точность и достоверность результатов обработки от различных параметров модели /11/.

Важным элементом методики прецизионной спектрометрии является учет эффектов, искажающих форму аппаратурного спектра /11/ (табл.2). В качестве иллюстрации на рис.9 показан спектр γ -лучей ^{139}Ce , измеренный с помощью $200 \text{ мм}^2 \times 5 \text{ мм}$ Ge(Li)-детектора (источник нанесен на медной подложке толщиной 500 мкм). При распаде ^{139}Ce имеется всего один γ -переход (165,9 кэВ), в аппаратурном же спектре наблюдаем более 20 пиков, преобладающая часть которых связана с искажающими форму спектра эффектами. В диссертации проведен полный анализ этих эффектов и сформулированы рекомендации для их устранения.

Методика измерения энергий и интенсивностей дискретных излучений предполагает предварительное исследование нелинейности и эффективности спектрометра в заранее выбранных условиях (коэффициенты усиления, фильтры поглощения и т.д.). Энергетическая калибровка осуществляется с помощью прямой, параметры которой находят методом наименьших квадратов (программа "FUMIL" **) для

* В.Гаджиков. ПТЭ, № 5 (1970) 82.

** И.Н.Силин. ОИЯИ, II-3362, Дубна, 1967.

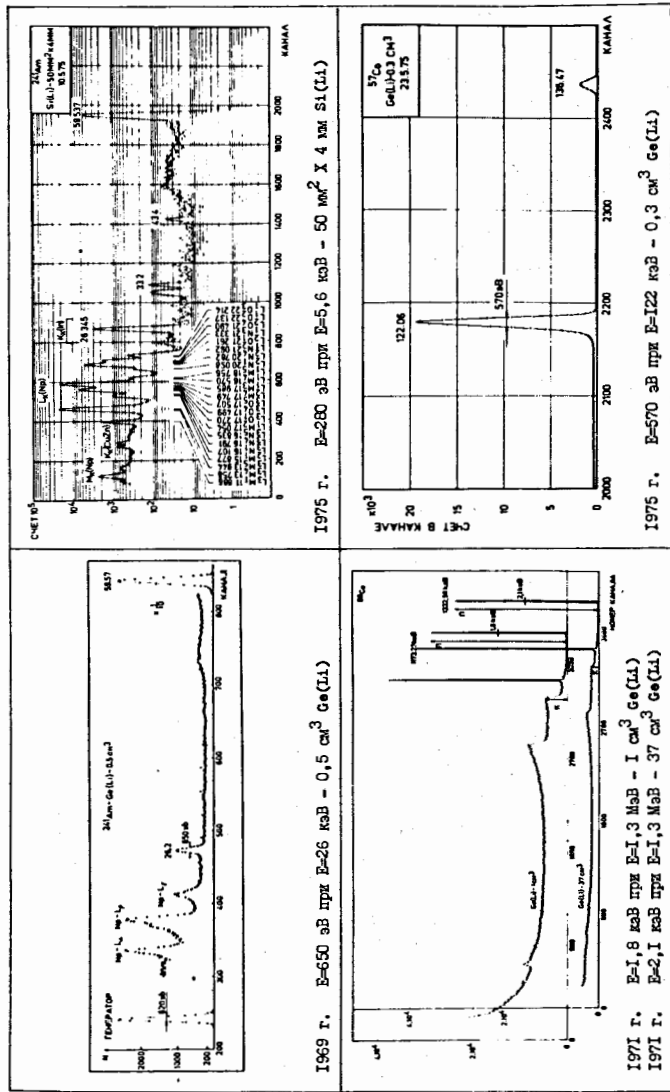


Рис. 3. Характерные аппаратные спектры гамма-лучей, измеренные с помощью ПСД.

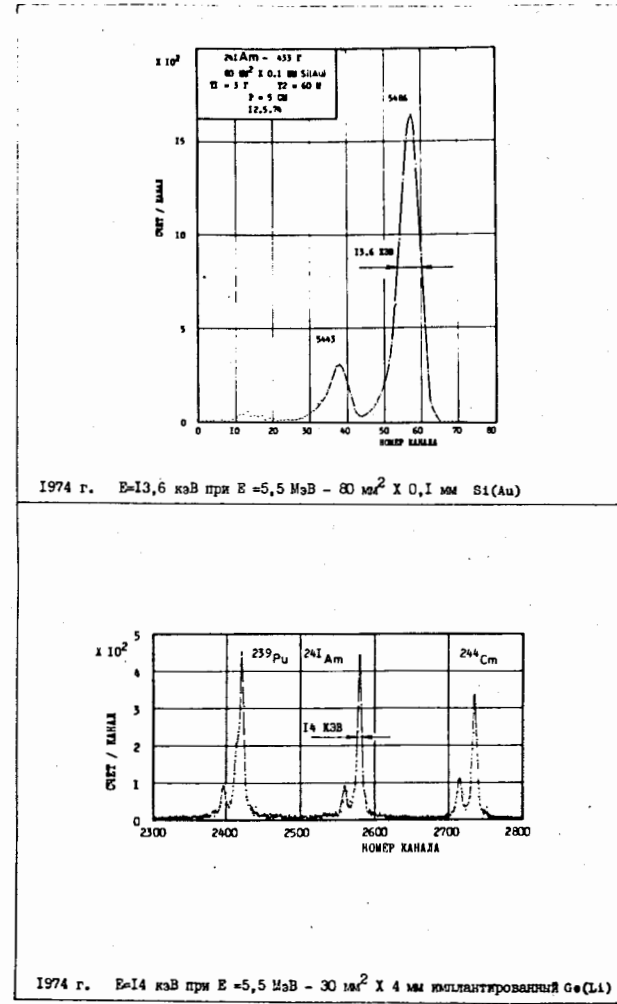


Рис. 4. Характерные аппаратные спектры альфа-частиц, измеренные с помощью ПСД.

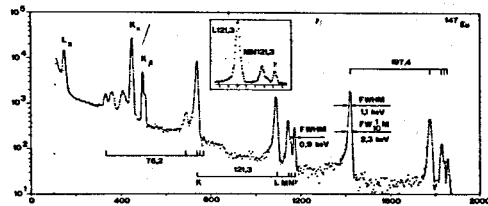


Рис. 5. Фрагмент аппаратного спектра излучений ^{147}Bi , измеренный с помощью $50 \text{ мм}^2 \times 4 \text{ мм}$ Si(Li) -детектора (1973 г. - $\Delta E = 1,1 \text{ кэВ}$ при $E_e \sim 100 \text{ кэВ}$).

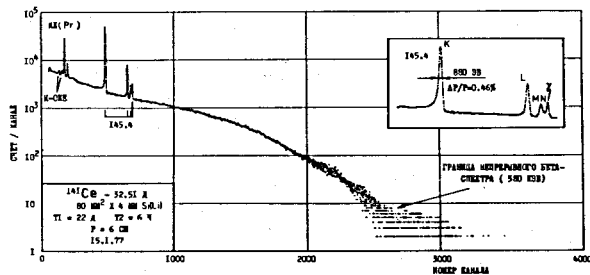


Рис. 6. Аппаратный спектр излучений ^{141}Ce , измеренный с помощью $80 \text{ мм}^2 \times 4 \text{ мм}$ Si(Li) -детектора (1977 г. - $\Delta E = 880 \text{ эВ}$ при $E_e \sim 100 \text{ кэВ}$).

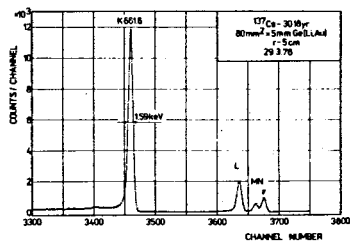


Рис. 7. Фрагмент аппаратного спектра излучений ^{137}Cs , измеренный с помощью $80 \text{ мм}^2 \times 5 \text{ мм}$ Ge(Li,Au) -детектора (1976 г. - $\Delta E = 1,59 \text{ кэВ}$ при $E_e \sim 600 \text{ кэВ}$).

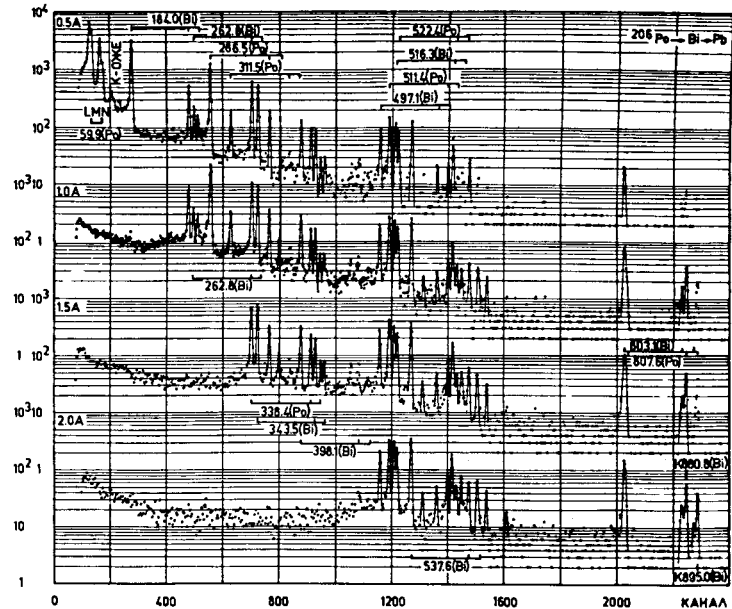


Рис. 8. Спектр ЭВК $^{206}\text{Po} + ^{206}\text{Bi}$, измеренный с помощью Si(Li) -детектора. Для фильтрации сопровождающих излучений применено магнитное бездисперсионное устройство.

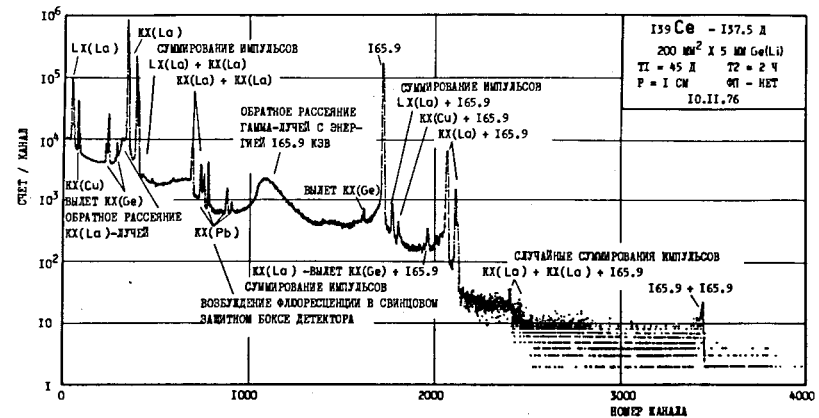


Рис. 9. Спектр гамма-лучей ^{139}Ce , измеренный с помощью $200 \text{ мм}^2 \times 5 \text{ мм}$ Ge(Li) -детектора.

ЭФФЕКТЫ, СВЯЗАННЫЕ С РАДИО-АКТИВНЫМ ИСТОЧНИКОМ	ЭФФЕКТЫ, СВЯЗАННЫЕ С ХАРАК-ТЕРИСТИКАМИ ПИД	ВНЕШНИЕ ЭФФЕКТЫ
ТАММА 1.1. Рассеяние от подложки источника. 1.2. Сопроизведение излучения. 1.3. Рассеяние в источнике. 1.4. Возбуждение характеристического излучения в подложке и в самом источнике.	1.5. Зависимость сечения взаимодействия γ -лучей от Z ПИД и энергии. 1.6. Свободные пики, связанные с вылетом ПИД при образовании ПИД. 1.7. Свободные пики, связанные с вылетом характеристического излучения из ПИД. 1.8. Рассеяние во входном окне ПИД. 1.9. Эффективность сбора заряда в ПИД.	1.10. Рассеяние во входном окне спектрометра, в окружающих ПИД материалах и в фильтрах поглощения. 1.11. Возбуждение характеристического излучения в окружающих ПИД и источнике материалов. 1.12. Рассеяние ПИД на окружающих при образовании пик в ПИД. 1.13. Рассеяние γ -лучей в окружающих ПИД материалах. 1.14. Внешнее тормозное излучение. 1.15. Зависимость положения максимума спектральной линии от геометрии измерения. 1.16. Естественный радиоактивный фон. 1.17. Искание γ при исследовании ценочек альфа-активных изотопов. 1.18. Суммирование импульсов.
БЕТА 2.1. Рассеяние от подложки источника. 2.2. Сопроизведение излучения. 2.3. Рассеяние в источнике. 2.4. Возбуждение характеристического радиоактивного излучения в подложке и в самом источнике.	2.5. Зависимость пробега от Z материала ПИД и энергии. 2.6. Рассеяние во входном окне ПИД. 2.7. Борновое рассеяние от ПИД. 2.8. Борновое излучение в ПИД. 2.9. Свободные пики, связанные с вылетом заряда, характеристического излучения из ПИД. 2.10. Эффективность сбора заряда в ПИД. 2.11. Зависимость положения максимума спектральной линии от напряжения свечения.	2.12. Рассеяние в материале входного окна вакуумной камеры. 2.13. Возбуждение характеристического излучения в окружающих ПИД и источнике материалов. 2.14. Рассеяние компонентов электронов. 2.15. Радиоактивный фон. 2.16. Суммирование импульсов.
АЛЬФА 3.1. Рассеяние от подложки источника. 3.2. Рассеяние в веществе источника. 3.3. Рассеяние в веществе источника.	3.3. Зависимость пробега от Z материала ПИД и энергии. 3.4. Рассеяние во входном окне ПИД. 3.5. Эффективность сбора зарядов в ПИД.	3.6. Разброс углов падения на поверхности ПИД. 3.7. Возбуждение α -частиц с молекулами остаточного газа. 3.8. Суммирование импульсов. 3.9. Радиоактивный фон.

Таблица 2. Эффекты, искажающие форму аппаратурного спектра от ПИД.

шести нормалей по формуле:

$$E_i = V_1 + V_2 P_1'$$

Здесь P_1' - скорректированные с учетом нелинейности спектрометра положения максимумов пиков; E_i - соответствующие энергии нормалей. В качестве весов используют величины $\{(\Delta E_1)^2 + (V_2 \cdot \Delta P_1)^2\}^{-1}$, причем ΔE_1 не включает систематической части погрешности энергии. Погрешность измерения рассчитывают по формуле:

$$E_i = \{(\Delta V_1)^2 + (\Delta V_2)^2 P_1^2 + r P_1 + (V_2 \Delta P_1)^2\}^{1/2}$$

Здесь первые три члена определяют коридор ошибок градуировочной прямой; $r P_1$ - корреляционный член; четвертый член учитывает погрешность определения положения максимума пика.

Выбор 6 нормалей (программа предусматривает от 2 до 6) связан с тем, что методика предполагает разбиение кривой нелинейности на участки и, таким образом, каждая область будет представлена по меньшей мере одной нормалью. Кроме того, в ряде случаев возможны искажения величин P_1 за счет различных аппаратурных эффектов (неизвестные переходы, примеси, суммирование импульсов, вылет характеристического излучения из ПИД и т.д.). Выбранное число нормалей позволяет обнаружить вклад таких эффектов.

Относительные эффективности и их погрешности вычисляют по формулам:

$$I_i = \frac{S_i}{\epsilon_i} \frac{I_H}{S_H / \epsilon_H} \quad \Delta I_i = I_i \{(\Delta S_i / S_i)^2 + (\Delta S_H / S_H)^2\}^{1/2}$$

Здесь ϵ_i - эффективность спектрометра для частиц с энергией E_i ; I_H и S_H - интенсивность и площадь пика, выбранного в качестве нормировочного; S_i - площадь калибруемого пика.

Результаты измерений на различных ПИД, спектрометрических трактах и при различных коэффициентах усиления обрабатывают по следующим формулам:

$$E = \frac{\prod_{i=1}^n E_i (1/\Delta E_i)^2}{\prod_{i=1}^n (1/\Delta E_i)^2}$$

$$I = \frac{\prod_{i=1}^n I_i (1/\Delta I_i)^2}{\prod_{i=1}^n (1/\Delta I_i)^2}$$

$$\Delta E_1 = (\alpha_1^2 + \sum_{i=3}^n \alpha_i^2)^{1/2}$$

$$\Delta E_2 = (\alpha_2^2 + \sum_{i=3}^n \alpha_i^2)^{1/2}$$

$$\Delta I_1 = (\beta_1^2 + \sum_{i=3}^n \beta_i^2)^{1/2}$$

$$\Delta I_2 = (\beta_2^2 + \sum_{i=3}^n \beta_i^2)^{1/2}$$

рах, спектрометрических трактах и при разных коэффициентах усиления приведены в табл.3. Следуя *, мы приводим порядки нормалей. Нормали каждого следующего порядка получены в непосредственном сравнении с нормальными предыдущих. Знак + указывает на то, что значение энергии получено путем суммирования энергий конкурирующих каскадных переходов.

Значительное внимание в диссертации уделено вопросу согласованности предлагаемого набора нормалей энергий.

Для исследования эффективности спектрометров использовались пять различных наборов образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСГИ): один, изготовленный специально, имел препараты с активностью 10^6 расп./с; четыре, полученные из В/О "Изотоп", содержали препараты с активностью 10^5 расп./с. Три набора были аттестованы по активности с более высокой точностью во ВНИИМ им. Д.И.Менделеева. Измерения проводились на различных ПЦД при фиксированных значениях телесного угла и с учетом эффектов, искажающих форму аппаратурного спектра. Далее, в этих условиях измерены относительные интенсивности γ -лучей радионуклидов, применяемых для калибровки спектрометров (табл.4).

В диссертации подробно рассмотрены вопросы согласования полученных нами данных с известными (и рекомендуемыми) результатами.

б) ЭК-спектроскопия

Основная задача спектрометрии ЭК сводится к определению мультипольностей переходов и, следовательно, возможных квантовых характеристик (I^π) возбужденных состояний. Исходя из этого, рассмотрены методы измерения КЭК отдельных переходов и, далее, с помощью этих данных – методы измерения КЭК группы переходов с последующим определением мультипольностей электромагнитных переходов.

Особое место в этом параграфе занимает вопрос построения набора нормалей КЭК. При этом в качестве нормали первого порядка мы принимаем

$$\alpha_K(66I, 65 \text{ кэВ} - {}^{137}\text{Cs}) = 0,0905 \pm 0,0010.$$

В этом предположении измерены КЭК 33 наиболее интенсивных перехо-

* Б.С.Джелепов. Методы разработки сложных схем распада. Л., "Наука", 1974.

дов для 15 нуклидов, которые мы считаем нормальными КЭК второго порядка (табл.5). Измерены также относительные интенсивности ЭК набора радионуклидов, применяемых для калибровки спектрометров (табл.6).

В заключение проведен анализ полученных данных.

в) Альфа-спектроскопия

В отличие от гамма- и ЭК-спектроскопии, в альфа-спектроскопии уже предложен последовательный набор нормалей альфа-частиц *. Поэтому главное внимание здесь уделено применению методики прецизионной спектрометрии дискретных излучений для случая альфа-частиц. При этом рассмотрены конкретные примеры применения методики "внешней" и "внутренней" калибровки для распада ${}^{238}\text{Pu}$ и ${}^{226}\text{Ra}$.

В третьей главе изложены принципы организации атласа (500) аппаратурных спектров альфа-, бета-, гамма- и X-излучений, измеренных с помощью ПЦД, а также проведен анализ полученных результатов /18/.

Идея создания атласа аппаратурных спектров возникла в связи с тем, что к середине 70-х гг. появилось стремление к стандартизации геометрических размеров кристалла, связанное с некоторым насыщением в технологии изготовления ПЦД, что, со своей стороны, создает условия для стандартизации измерений. В таких условиях роль атласа при планировании и проведении новых экспериментов, а также при анализе данных трудно переоценить.

Атлас аппаратурных спектров опубликован в работе /18/, в диссертации же рассмотрены лишь принципы его организации. Объектом наших экспериментов являлись радионуклиды:

- а) применяемые для калибровки α -, β - и γ -спектрометров;
- б) получаемые в реакциях глубокого расщепления X (p, xp, yn) Y с помощью быстрых протонов ($E_p = 660 \text{ МэВ}$) и представляющие интерес с точки зрения исследования структуры атомных ядер;
- в) получаемые в реакции ($n\gamma$) и представляющие интерес с точки зрения нейтронно-активационного анализа;
- г) получаемые в реакциях (γp) и (γn) с помощью тормозного излучения микротронов и представляющие интерес с точки зрения активационного анализа;
- д) поставляемые В/О "Изотоп";

* A.Rytz. Atomic Data and Nucl. Data Sheets. 12 (1973) 479.

е) прочие источники, представляющие интерес при исследовании особенностей радиоактивного распада.

В атласе изложены методы получения исследуемых радионуклидов, способы изготовления источников, систематизированная таблица аппаратных спектров с цитированием оригинальных публикаций с нашими экспериментальными данными. Все аппаратные спектры приведены в порядке возрастания A , в каждой серии изобар – в порядке возрастания Z . Спектры каждого нуклида разделены по типу излучения, причем приняты следующие индексы: 1 – альфа-спектры; 2 – бета-спектры; 3 – X- и γ -спектры. В тех случаях, когда регистрировалось несколько излучений одновременно, индекс показывает, для исследования какого излучения планировался эксперимент. И, наконец, для каждого излучения приводится порядковый номер спектра. Следует заметить, что в ряде случаев мы проводили иллюстративные измерения в условиях, когда искажающие аппаратный спектр эффекты играют существенную роль. Это позволяет учесть целый ряд факторов при планировании и проведении новых экспериментов.

На каждом рисунке аппаратного спектра указаны условия измерения (см., например, рис.4, 6, 9):

T1 – время, прошедшее с момента изготовления источника;

T2 – время измерения;

R – расстояние источник – ПЩ;

ФП – фильтр поглощения между источником и ПЩ;

B – индукция однородного магнитного поля спектрометра с Si (Li)-детектором.

Указаны также параметры ПЩ и дата измерения.

В заключение проведен анализ наиболее характерных аппаратных спектров альфа-, бета-, гамма- и X-излучений.

В четвертой главе изложена организация экспериментов по измерению спектров дискретных излучений радионуклидов с применением созданного нами набора нормалей энергий и интенсивностей γ -лучей и ЭВК (гл. II).

Организацию поточных измерений энергий и интенсивностей дискретных излучений удобно рассмотреть на примере гамма-спектроскопии (рис. 10) – как наиболее сложного способа исследований, включающего в себя особенности альфа- и бета-спектроскопии. Главными элементами методики являются:

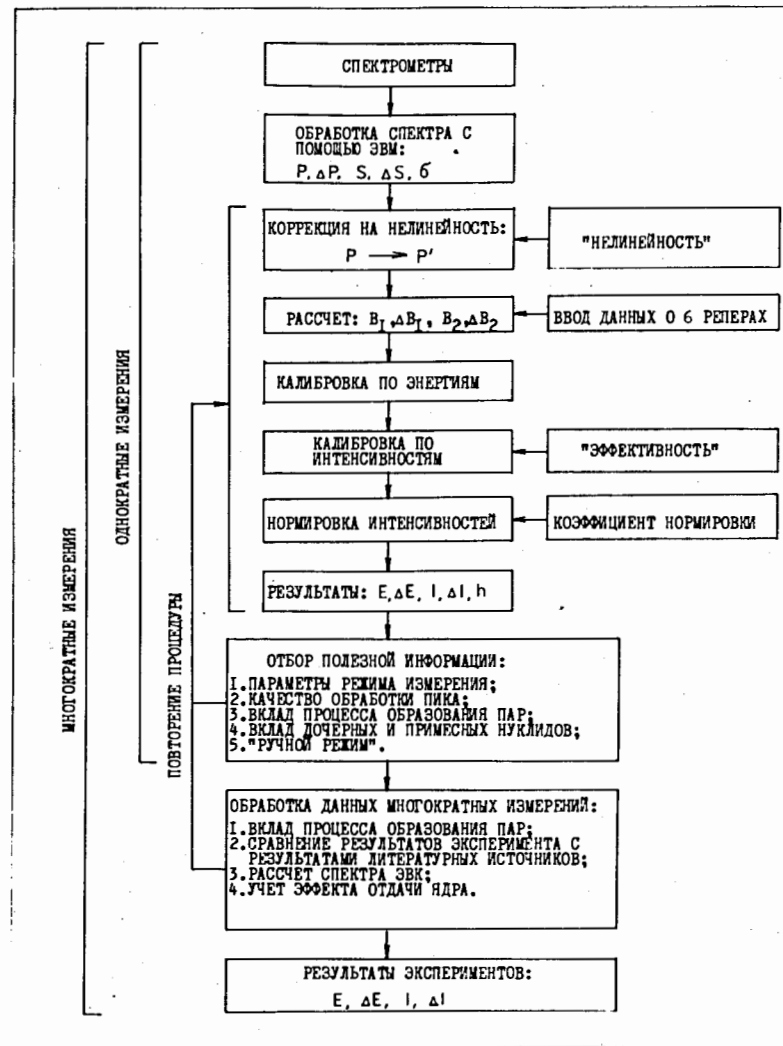


Рис. 10. Структурная схема эксперимента по измерению энергий и интенсивностей гамма-лучей радионуклидов с помощью полупроводниковых детекторов.

а) логика выбора спектрометра и оптимальных условий измерения (тип и параметры ПЩ, энергетический диапазон, время измерений, поглощающие фильтры);

б) предварительное исследование нелинейности и эффективности спектрометров;

в) отбор полезной информации в однократных и многократных измерениях и повторение, в случае необходимости, полной процедуры однократного измерения.

В диссертации рассмотрены конкретные примеры: γ -лучи ^{82}Br , ЭВК ^{131}Ba и α -частицы ^{242}Am .

С помощью разработанной методики исследован распад 180 радионуклидов. Систематизированные результаты приведены в работе /19/. В соответствии с методами получения выделены следующие группы экспериментальных данных:

а) данные об основных характеристиках радионуклида: $T_{1/2}$ (с), энергия α -, β -, β^+ -, ϵ -распада или изомерного состояния и соответствующие доли (в %) распада;

б) данные об электромагнитных переходах: E_γ , I_γ , I_K ;

в) данные об интенсивностях ЭВК на различных подоболочках;

г) данные об энергиях и интенсивностях α -частиц.

Последовательность представления табличного материала точно такая же, как и в атласе аппаратурных спектров. Если возможно, приводится также множитель q , переводящий относительные интенсивности в % на распад. При нормировке I_γ и I_α за 100 единиц принят наиболее интенсивный переход, а в случае ЭВК это условие соблюдено лишь для $E_\alpha > 100$ кэВ. Последнее замечание связано с погрешностью измерения относительных интенсивностей ЭВК.

Отметим наиболее важные выводы из работы /18/.

1. Анализ данных гамма-спектроскопии показывает, что точность измерений E_γ по сравнению с уровнем 1970-1974 гг. улучшена более чем на порядок, а точность измерения I_γ - в 2-4 раза. Тенденция, по-видимому, сохранится и в ближайшее время, поскольку идут интенсивные работы по созданию новых нормалей энергий и интенсивностей гамма-лучей.

2. Благодаря высокой надежности созданных спектрометров получены данные об интенсивностях ЭВК для 95 радионуклидов. Отметим, что в ряде случаев эти результаты уникальны и получить их другими методами на сегодняшний день практически невозможно.

3. Сравнительно мало экспериментальных данных о спектрах альфа-частиц. Однако, по мере продвижения в сторону исследования короткоживущих нуклидов, роль ПЩ будет возрастать.

4. Если измерения некоторых констант не проводились, результаты заимствованы, как правило, из компилятивных работ или более поздних оригинальных работ. В таблицах эти данные набраны другим шрифтом.

5. В результате анализа всей совокупности экспериментальных данных с различной степенью полноты построены схемы распада более чем для 100 радионуклидов.

6. Важным условием, которому удовлетворяют приведенные данные, является возможность их пересчета в случае введения новых нормалей энергий и интенсивностей дискретных излучений.

Проведенный анализ сделан с целью создания иерархической системы сбора, обработки и анализа спектрометрической информации. Как уже отмечалось, реализация такой системы в нашей Лаборатории начата (логика организации в диссертации коротко рассмотрена), однако, детальное ее описание выходит за рамки настоящей диссертации.

В пятой главе приведены результаты исследования возбужденных состояний нечетных ядер самария (^{145}Sm , ^{147}Sm , ^{149}Sm) и европия (^{147}Eu , ^{149}Eu , ^{151}Eu). Характерной особенностью данного цикла исследований является применение на высоком экспериментальном уровне практически всех методов классической спектроскопии (табл.7), что, кроме полноты анализа, позволяет прогнозировать перспективы подобных исследований в более широкой области ядер и необходимость разработки новых экспериментальных методов и установок.

Результаты исследований можно систематизировать следующим образом:

1. При анализе спектров γ -лучей и ЭВК при распаде ^{145}Eu /20/ наблюдаются 94 перехода, из них 35 гамма-переходов впервые. Впервые для 12 переходов установлены мультипольности. По результатам $\gamma\gamma$ -совпадений подтверждено существование 13 уровней. Впервые введены уровни с характеристиками 1962,35 кэВ ($1/2^+$, $3/2^+$) и 2385,35 кэВ ($3/2^+$ + $7/2^+$). Из анализа экспериментов $\gamma\gamma(\theta)$ установлены спины следующих уровней: 1436,30 ($1/2$), 1627,55 ($1/2$, $3/2$) и 1658,50 кэВ ($3/2$). Установлены квантовые характеристики

ЛУЧЛИД	$T_{1/2}$	Q / кэВ/	K_{Σ}	λ	α_K	β^+	$e\beta$	$M(\theta)$	$t_{1/2}$	α
$^{145}_{63}\text{Eu} \rightarrow ^{145}_{62}\text{Sm}$ $^{147}_{63}\text{Eu} \rightarrow ^{147}_{62}\text{Sm}$	5,94(3) Д	2717(11)	+	+	-	-	-	+	-	?
$^{149}_{63}\text{Eu} \rightarrow ^{149}_{62}\text{Sm}$ $^{147}_{64}\text{Gd} \rightarrow ^{147}_{63}\text{Eu}$	24,1(6) Д	1767(10)	+	+	-	-	+	-	+	-
$^{149}_{63}\text{Eu} \rightarrow ^{149}_{62}\text{Sm}$ $^{147}_{64}\text{Gd} \rightarrow ^{147}_{63}\text{Eu}$	93,1(4) Д	760	+	+	+	?	-	-	+	-
$^{149}_{64}\text{Gd} \rightarrow ^{149}_{63}\text{Eu}$ $^{151}_{64}\text{Gd} \rightarrow ^{151}_{63}\text{Eu}$	37,8(4) Ч	2185(5)	+	+	-	+	+	-	-	?
$^{149}_{64}\text{Gd} \rightarrow ^{149}_{63}\text{Eu}$ $^{151}_{64}\text{Gd} \rightarrow ^{151}_{63}\text{Eu}$	9,4(3) Д	1290	+	+	+	?	+	-	+	+
$^{151}_{64}\text{Gd} \rightarrow ^{151}_{63}\text{Eu}$	120(20) Д	482(7)	+	+	+	?	+	-	+	-

Табл. 7. Радиоуклиды, основные характеристики и примененные экспериментальные методы при исследовании радиоактивного распада (+ - метод применен; -- метод не применен; ? - метод нельзя применить). Обозначения:

- K_{Σ} - измерение спектра характеристического рентгеновского излучения;
- λ - измерение спектра дискретного гамма-излучения;
- α_K - измерение КВК;
- β^+ - измерение спектра позитронов;
- $\lambda\lambda$ - измерение спектров гамма-гамма совпадений;
- $e\beta$ - измерение спектров электрон-гамма совпадений;
- $M(\theta)$ - измерение угловых гамма-гамма угловых корреляций;
- $t_{1/2}$ - измерение времен жизни возбужденных состояний;
- α - измерение спектра альфа-частиц.

уровней: 1843,38 ($1/2^-$, $3/2^-$), 1972,73 ($3/2^-$), 2192,96 ($5/2^-$ + $9/2^-$), 2276,60 ($5/2^-$ + $9/2^-$), 2293,03 ($5/2^-$, $7/2^-$), 2340,60 ($5/2^-$ + $9/2^-$), 2481,98 ($3/2^+$ + $7/2^+$), 2508,22 ($3/2^+$ + $7/2^+$), 2513,33 ($5/2^-$, $7/2^-$) и 2558,89 кэВ ($3/2^+$ + $7/2^+$). На основании баланса энергий переходов доказано существование уровней: 1843,38; 1950,76; 2340,60 и 2558,89 кэВ.

2. В спектрах γ -лучей и ЭВК при распаде ^{147}Eu /21/ наблюдаются 68 переходов, из них 25 - впервые. Впервые установлены мультипольности II переходов, что позволило установить квантовые характеристики следующих уровней: 1006,67 ($5/2^-$), 1043,50 ($3/2^-$), 1054,24 ($3/2^+$), 1077,04 ($5/2^-$), 1303,73 ($3/2^+$, $5/2^+$), 1449,11 ($3/2^+$ + $7/2^+$), 1453,21 ($3/2^+$, $5/2^+$) и 1548,53 кэВ ($3/2^-$, $5/2^-$). На основании результатов $e\gamma$ -совпадений и баланса энергий введены новые уровни: 872,97; 1228,08; 1317,66 ($3/2^-$); 1317,82 ($3/2^+$ + $7/2^+$); 1318,06 ($3/2^-$, $5/2^-$); 1471,44 ($3/2^-$, $5/2^-$); 1471,90 ($3/2^-$, $5/2^-$) и 1629,98 кэВ, а также подтверждено существование состояний: 121,22; 197,28; 798,72; 1006,67; 1043,50; 1054,24; 1077,04; 1180,23; 1449,11; 1453,21 и 1548,53 кэВ. Для 15 каскадов измерены $\lambda\lambda$ -угловые корреляции, для 8 из них впервые. Измерены времена жизни возбужденных состояний в ^{147}Sm : 121,2 кэВ ($T_{1/2} = 0,83(3)$ нс) и 197,3 кэВ ($T_{1/2} = 1,30(5)$ нс).

3. Все наблюдаемые переходы в спектрах γ -лучей и ЭВК при распаде ^{149}Eu /22/ размещены в схеме распада. Впервые с высокой точностью измерены значения КВК для переходов: α_K (277,1 кэВ) = 0,0808(23) и α_K (327,5 кэВ) = 0,0514(15). Измерено время жизни уровня в ^{149}Sm 22,5 кэВ: $T_{1/2} = 7,31(5)$ нс.

4. В спектрах γ -лучей и ЭВК при распаде ^{147}Gd /23/ наблюдаются 142 гамма-перехода. Впервые определены интенсивности 8 конверсионных K-линий. В спектре позитронов обнаружено два компонента с граничными энергиями E_{β^+} (1160±13) кэВ и E_{β^+} (933±5) кэВ. Получены значения $I_{\beta^+}/I_{K229} = (4,36 \pm 0,44) \cdot 10^{-3}$ и $I_{\beta^+}/I_{K229} = (2,19 \pm 0,15) \cdot 10^{-2}$. Определена разность масс $^{147}\text{Gd} \rightarrow ^{147}\text{Eu}$: $Q_{\beta^+} = (2185 \pm 5)$ кэВ. Из анализа спектров $e\gamma$ -совпадений и энергетического баланса введены новые состояния: 1007,40 ($3/2^+$ + $7/2^+$); 1337,70 ($5/2^+$ + $9/2^+$); 1771,93 ($5/2^-$ + $9/2^-$); 1816,06 ($5/2^+$, $7/2^+$); 1838,82; 1874,69 ($5/2^+$, $7/2^+$) и 1905,64 кэВ ($7/2^+$). Впервые определены характеристики уровня 1474,57 кэВ ($5/2^-$, $7/2^-$).

5. При анализе спектров γ -лучей и ЭК при распаде ^{149}Gd /24/ обнаружено 94 гамма-перехода, из них 53 - впервые. Для большинства переходов установлены мультипольности. Впервые измерены значения КВК для переходов: α_K (149,7 кэВ) = 0,459(15), α_K (298,6 кэВ) = 0,0723(20) и α_K (346,7 кэВ) = 0,187(6). Из анализа спектров $e\gamma$ - и $\gamma\gamma$ -совпадений, а также на основе баланса энергий и интенсивностей электромагнитных переходов введены два новых уровня (869,01 и 1050,86 кэВ), а также подтверждено существование следующих состояний: 534,30; 666,29; 748,61; 794,98; 875,91; 933,13; 938,61; 1012,67 и 1097,59 кэВ. Измерено время жизни уровня 149,7 кэВ в ^{149}Eu - $T_{1/2} = 0,31(2)$ нс. Определена доля альфа-распада - I_α (3018 кэВ - ^{149}Gd) = $(6,3 \pm 1,2) \cdot 10^{-4}\%$.

6. В спектрах γ -лучей и ЭК при распаде ^{151}Gd /25/ обнаружено три новых перехода. С высокой точностью ($\sim 2\%$) измерена интенсивность K_α -лучей. Впервые измерены с высокой точностью КВК следующих переходов: α_K (153,6 кэВ) = 0,426(13), α_K (174,7 кэВ) = 1,731(43), α_K (243,3 кэВ) = 0,0202(6) и α_K (307,5 кэВ) = 0,0605(20). Из анализа спектров $e\gamma$ -совпадений введен новый уровень - 216,18 кэВ, а также подтверждено существование состояний 260,46; 307,52; 349,89 и 353,64 кэВ.

7. Проведена систематика нечетно-нейтронных ядер самария ($A = 145, 147, 149$) и нечетно-протонных ядер европия ($A = 147, 149, 151$). В ядрах самария наблюдаются уровни с одинаковыми характеристиками $I^\pi = 7/2^-, 3/2^-, 5/2^-$. В ядрах европия можно проследить поведение аналогичных уровней с $I^\pi = 5/2^+, 7/2^+, 11/2^-, 7/2^+$ и $7/2^-$ в зависимости от увеличения числа нейтронов. На основании совокупности экспериментальных данных показано, что в рассматриваемых ядрах существуют состояния многообразной природы:

- а) сферические состояния (нижние в ^{145}Sm);
- б) состояния, обусловленные связью коллективных движений чётно-чётного остова с одночастичными и квазичастичными движениями нечётной частицы (121,23 кэВ ($3/2^-$) и 197,28 кэВ ($5/2^-$) в ^{147}Sm);
- в) состояния с многочастичной конфигурацией (995,12 кэВ ($9/2^-$) и 1554,17 кэВ ($9/2^-$) в ^{147}Eu);
- г) деформированные состояния (в ^{151}Eu).

В шестой главе приведен результат нового измерения энергий связи дейтрона.

Энергия связи дейтрона (E_D) является одной из фундаментальных констант, связывающей массы нейтрона, протона и дейтрона и, таким образом, непосредственно влияющей на шкалу атомных масс. Однако проведенный анализ экспериментов по измерению E_D показал, что, по-видимому, могла быть допущена систематическая погрешность, связанная с применением пика двойного вылета аннигиляционных квантов из ПЦД. Этот факт стимулировал постановку нового эксперимента по измерению E_D с помощью разработанного набора нормалей энергий γ -лучей.

Геометрия экспериментов изображена на рис.11. Po-Be источник ($9,1 \cdot 10^6$ нейтронов/с) помещался в парафиновый параллелепипед размерами $34 \times 34 \times 40 \text{ см}^3$, который одновременно выполнял функции замедлителя нейтронов и водородной мишени. Типичный аппаратный спектр с применением различных калибровочных источников показан на рис.12. Результаты обработки 10 серий измерений с помощью $38 \text{ см}^3 \text{ Ge(Li)}$ -детектора и с использованием различных усилителей и аналого-цифровых преобразователей приведены в табл.8. Как видно, использование энергии пиков вылета аннигиляционных квантов может приводить к систематическим ошибкам при определении E_D . Таким образом, энергия связи дейтрона равна:

$$E_D = E_D + E_{\text{H}_0} = 2224,572 \pm 0,040 \text{ кэВ}.$$

Отметим, что основная погрешность связана с погрешностью нормалей $\gamma_{411,8}$ (см. табл.8). С помощью этой величины и разности масс спектроскопического дублета ($\text{H}_2 - ^2\text{D}$) = 1442,232(4) кэВ ²² можно получить:

$$n - ^1\text{H} = \text{D} - (\text{H}_2 - ^2\text{D}) = 782,340 \pm 0,040 \text{ кэВ}.$$

Учитывая энергию связи K-электрона в водороде (0,014 кэВ) и массу покоя электрона (511,0034(14) кэВ ^{22*}), получаем:

$$n - p = 1293,329 \pm 0,040 \text{ кэВ}.$$

Согласно (22),

$$n - p = 1293,43 \pm 0,04 \text{ кэВ}.$$

* L.C.Smitt and A.H.Wapstra. Phys.Rev. C., 11 (1975) 1892.

²² Фундаментальные физические константы. ГСССД-76. Изд. стандартов, М., 1976.

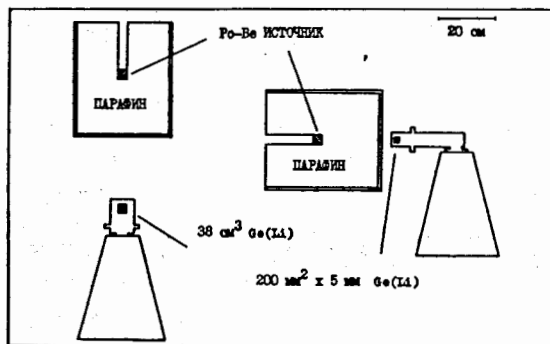


Рис. 11. Геометрия экспериментов по измерению энергии связи дейтрона из реакции ${}^1\text{H}(n,\gamma){}^2\text{D}$.

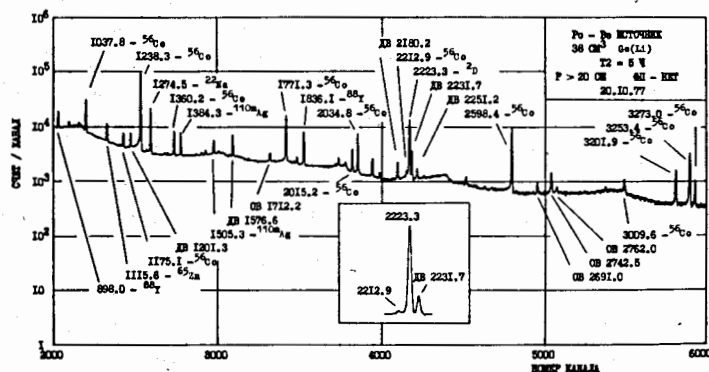


Рис. 12. Пример эксперимента по измерению энергии связи дейтрона.

ПЦД	ПИК	E	ΔE	ΔE'	α ₁	α ₂	α ₃	α ₄
38см ³ Ge(Li)	ДВ	2223.371	0.025	0.014	0.009	0.013	0.006	0.020
	ОБ	2223.188	0.038	0.025	0.019	0.023	0.009	0.029
	ФП	2223.255	0.040	0.014	0.008	0.005	0.011	0.038
200мм ² x 5мм Ge(Li)	ДВ	2223.235	0.028	0.022	0.008	0.019	0.006	0.020

Таблица 8. Результаты экспериментов по измерению энергии γ -лучей в реакции ${}^1\text{H}(n,\gamma){}^2\text{D}$ с помощью Ge(Li)-детекторов. ФП, ОБ и ДВ - пики полного поглощения, одиночного и двойного вылетов, соответственно.

Как видно, расходимость составляет (100 ± 20) эВ.

В диссертации приведен анализ полученных экспериментальных данных.

Основные результаты настоящей работы можно сформулировать более кратко в виде следующих выводов:

1. Создан современный комплекс спектрометрической аппаратуры с ПЦД, параметры которого находятся на уровне лучших достижений /10/. Параметры же спектрометров ЭВК и на сегодняшний день являются рекордными /17/. На основе всестороннего анализа роли элементов спектрометра с ПЦД /5/ реализованы оптимальные условия для каждой конкретной системы ПЦД-предусилитель. Под руководством и при непосредственном участии автора изготовлена электронная аппаратура, которая обеспечивала физические эксперименты в период 1969-1979 гг. /5/. Детально исследованы характеристики всего комплекса спектрометрической аппаратуры и разработан набор тестов для контроля качества системы в целом /11/.

Опыт эксплуатации комплекса спектрометрической аппаратуры с ПЦД лежит в основе организации современной системы сбора, обработки и анализа спектрометрической информации на базе ЭВМ ЕС-1040.

2. Детально исследованы и систематизированы эффекты, искажающие форму аппаратурного спектра альфа-, бета-, гамма- и X-излучений /11,17/.

3. Рассмотрены вопросы обработки спектральных линий с помощью ЭВМ и вытекающие из этого анализа следствия при планировании эксперимента /11,17/.

4. Изложена методика прецизионных измерений энергий и относительных интенсивностей дискретных излучений, а также соответствующее программное обеспечение для обработки экспериментальных данных /12-14,17/.

5. Создан согласованный набор нормалей энергий и относительных интенсивностей гамма-лучей и ЭВК, применяемых для калибровки спектрометров с ПЦД /6,13,16,17/, состоящий из следующих нуклидов:

а) гамма-излучение - ${}^{56}\text{Co}$, ${}^{75}\text{Se}$, ${}^{110\text{m}}\text{Ag}$, ${}^{133}\text{Ba}$, ${}^{134}\text{Cs}$, ${}^{144}\text{Ce}$, ${}^{152}\text{Eu}$, ${}^{153}\text{Gd}$, ${}^{160}\text{Tb}$, ${}^{169}\text{Tb}$, ${}^{171}\text{Lu}$, ${}^{173}\text{Lu}$, ${}^{182}\text{Ta}$, ${}^{192}\text{Ir}$, ${}^{207}\text{Bi}$ и ${}^{226}\text{Ra}$;

б) ЭНК - ^{149}Gd , ^{151}Gd , ^{152}Eu , ^{169}Yb , ^{173}Lu и ^{207}Bi .
 Экспериментальные погрешности измеренных значений энергий составляют (1 ± 10) эВ, интенсивностей - 0,5-1,5%.

6. Измерены КВК 33 наиболее интенсивных переходов для следующих нуклидов: ^{139}Ce , ^{141}Ce , ^{149}Eu , ^{149}Gd , ^{151}Gd , ^{152}Eu , ^{152}Tb , ^{156}Tb , ^{167}Tm , ^{169}Yb , ^{172}Lu , ^{173}Lu , ^{176}Lu , ^{203}Pb и ^{207}Bi . Экспериментальные результаты получены в предположении, что $k(661,7 \text{ кэВ} - ^{137}\text{Cs}) = 0,0905 \pm 0,0010$. Рекомендуемые значения можно считать нормальными второго порядка при калибровке спектрометров КВК /16,17/.

7. Систематизированы, проанализированы и опубликованы /18/ 500 аппаратурных спектров альфа-, бета-, гамма- и X-излучений для 200 радионуклидов. Накопленный опыт в наборе материала для подобного атласа позволил сформулировать принципы создания машинного банка аппаратурных спектров.

8. С помощью разработанной спектрометрической аппаратуры и методики измерений с различной степенью полноты исследован радиоактивный распад 180 нуклидов /19/. По сравнению с более ранними экспериментами точность измерения энергий гамма-лучей улучшена более чем на порядок, а точность измерения относительных интенсивностей - в 2-4 раза. Данные же о спектрах ЭНК для 95 радионуклидов практически единственные на сегодняшний день. Улучшенные параметры спектрометрической аппаратуры повысили результативность и качество измерений, что, в итоге, привело к открытию более 1000 новых переходов. Полученные данные в той или иной степени использованы при разработке или уточнении 100 схем распада.

9. Детально, с применением практически всех методов классической спектроскопии, исследован радиоактивный распад нечетных нуклидов европия ($A = 145, 147, 149$) и гадолиния ($A = 147, 149, 151$) /20-25/.

Проведено более 200 серий измерений спектров γ -лучей и ЭНК, обнаружено 110 новых переходов и впервые измерены интенсивности более 40 конверсионных линий. Впервые с высокой точностью измерены КВК наиболее интенсивных переходов при распаде ^{149}Eu , ^{149}Gd и ^{151}Gd . С помощью современной аппаратуры исследованы спектры $\gamma\gamma$ - (^{145}Eu , ^{149}Gd) и $e\gamma$ - (^{147}Eu , ^{147}Gd , ^{149}Gd , ^{151}Gd) совпадений. Измерены и проанализированы результаты $\gamma\gamma$ -угловых корреляций при распаде ^{145}Eu и ^{147}Eu . Измерены времена жизни пяти возбужденных состояний ^{147}Sm (два), ^{149}Sm , ^{149}Eu

и ^{151}Eu . Определена энергия распада $^{147}\text{Gd} \rightarrow ^{147}\text{Eu}$, а также доля альфа-распада ^{149}Gd .

На основе совокупности экспериментальных данных построены схемы распада исследуемых нуклидов. Введено 20 новых состояний, подтверждено 23 и исключено более 10 уровней, предположительно введенных ранее разными авторами. Впервые определены квантовые характеристики 14 состояний.

На основании полученных результатов проведен анализ свойств возбужденных состояний исследуемых ядер. В ядрах самария прослеживается поведение аналогичных уровней с $I^\pi = 7/2^-, 3/2^-, 5/2^-$ в зависимости от увеличения числа нейтронов, в ядрах европия - уровней с $I^\pi = 5/2^+, 7/2^+, 11/2^-, 7/2^+$ и $7/2^-$. Более детальный анализ с привлечением данных ядерных реакций показывает, что существуют состояния многообразной природы: сферические (нижние в ^{145}Sm); состояния, обусловленные связью коллективных движений четно-четного остова с одночастичными и квазичастичными движениями нечетной частицы (первые два в ^{147}Sm); состояния с многочастичной конфигурацией (995,12 (9/2⁻) и 1554,17 кэВ (9/2⁻) в ^{147}Eu); деформированные состояния (в ^{151}Eu).

10. Впервые по пику полного поглощения при регистрации в $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторах гамма-лучей от захвата тепловых нейтронов водородом выполнено измерение энергии связи дейтрона - $\epsilon_D = 2224,572 \pm 0,040$ кэВ. Сравнение этих данных с предыдущими, наиболее точными, результатами указывает на разность, равную $0,095 \pm 0,020$ кэВ. Мы предполагаем, что завышение ϵ_D в предыдущих работах вызвано использованием для измерения энергии пика двойного вылета. Из наших данных вытекает, что разность масс $n - ^1\text{H} = 782,340 \pm 0,040$ кэВ /26/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ц.Вылов, В.В.Кузнецов, Б.П.Осипенко, Д.Срнка, Я.Юрковски. 4π - $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектор. а) ОИЯИ, 13-6389, Дубна, 1972 (7 стр.); б) ПТЭ, № 1 (1973) 75-78 (4 стр.).
2. Ц.Вылов, И.Н.Егошин, С.Орманджиев, Б.П.Осипенко, Д.Срнка, Я.Юрковски. Спектрометр с $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектором для изучения низкоэнергетических гамма-квантов. а) ОИЯИ, 13-6440, Дубна, 1972 (6 стр.); б) ПТЭ, № 3 (1973) 45-46 (2 стр.).

3. Ц.Вывлов, И.Н.Егошин, М.Г.Маринов, Т.М.Муминов, Б.П.Осипенко, В.Г.Сандуковский, Д.Срнка, Я.Юрковски. Изготовление и исследование $Ge(Li)$ -детекторов. ОИЯИ, Р13-6759, Дубна, 1972 (16 стр.).
4. Е.Береги, Ц.Вывлов, Й.Крацикова, Ли Чен Сон, Б.П.Осипенко, Л.А.Пермякова, В.Г.Тишин. Применение кремниевых детекторов для измерения спектров бета-частиц. ОИЯИ, Р13-6830, Дубна, 1972 (13 стр.).
5. В.С.Александров, Ц.Вывлов, Т.М.Муминов, Б.П.Осипенко, С.И.Орманджиев. Оптимизация спектрометрической системы на базе ППД для измерения энергетического распределения ядерных излучений. ОИЯИ, I3-7306, Дубна, 1973 (15 стр.).
6. В.С.Александров, Ц.Вывлов, Т.М.Муминов, Б.П.Осипенко. Прецизионные измерения энергий и интенсивностей гамма-лучей $Ge(Li)$ -детекторов. ОИЯИ, Р6-7308, Дубна, 1973 (18 стр.).
7. Ц.Вывлов, И.Н.Егошин, Т.М.Муминов, Б.П.Осипенко, В.Г.Сандуковский, Я.Юрковски. Поверхностно-барьерные $Ge(Li)$ -детекторы для спектрометрии излучений радионуклидов. ОИЯИ, I3-10056, Дубна, 1976 (II стр.).
8. С.К.Васильев, Ц.Вывлов, Б.П.Осипенко, Я.Юрковски. Полупроводниковый бета-спектрометр с высоким энергетическим разрешением. ОИЯИ, Р13-8026, Дубна, 1974 (12 стр.).
9. Ц.Вывлов, И.Н.Егошин, А.Лятушински, Б.П.Осипенко, Я.Юрковски. Германий-литиевые имплантированные детекторы для спектрометрии бета-частиц. ОИЯИ, Р6-8378, Дубна, 1974 (9 стр.).
10. Ц.Вывлов, И.Н.Егошин, Е.Т.Кондрат, Б.П.Осипенко, Я.Юрковски, В.В.Авдейчиков, В.С.Александров, С.К.Васильев, В.М.Горожанкин, Ш.Оманов. Спектрометрия излучений радиоактивных нуклидов с помощью ППД. I. Спектрометрическая аппаратура.
а) ОИЯИ, Р6-9071, Дубна, 1975 (39 стр.);
б) В сб. "Прикладная ядерная спектроскопия", М., Атомиздат, вып.6 (1976) 3-25.
11. Ц.Вывлов, Л.А.Вывлова, И.Н.Егошин, А.Ф.Новгородов, С.Орманджиев, Б.П.Осипенко, Я.Юрковски, М.И.Фоминных, В.С.Александров, В.М.Горожанкин, А.И.Иванов, Ш.Оманов. Спектрометрия излучений радиоактивных нуклидов с помощью ППД. 2. Эффекты, искажающие форму аппаратного спектра.
а) ОИЯИ, Р6-9072, Дубна, 1975 (58 стр.);
б) В сб. "Прикладная ядерная спектроскопия", М., Атомиздат, вып.6 (1976) 26-58.
12. Ц.Вывлов, Л.А.Вывлова, Н.А.Головков, Б.П.Осипенко, М.И.Фоминных, В.Г.Чумин, В.С.Александров, В.М.Горожанкин, Ш.Оманов. Спектрометрия излучений радиоактивных нуклидов с помощью ППД. 3. Спектрометрия гамма-лучей.
а) ОИЯИ, Р6-9073, Дубна, 1975 (32 стр.);
б) В сб. "Прикладная ядерная спектроскопия", М., Атомиздат, вып.6 (1976) 59-78.
13. Ц.Вывлов, В.С.Александров, Л.А.Вывлова, В.М.Горожанкин, А.Ф.Новгородов, Ш.Оманов, Б.П.Осипенко, М.И.Фоминных, В.Г.Чумин, Я.Юрковски. Спектрометрия излучений радиоактивных нуклидов с помощью ППД. 4. Нормали энергий и относительных интенсивностей излучений.
а) ОИЯИ, Р6-10414, Дубна, 1976 (26 стр.);
б) В сб. "Прикладная ядерная спектроскопия", М., Атомиздат, вып.8 (1978) 3-42.
14. Ц.Вывлов, В.С.Александров, Л.А.Вывлова, В.М.Горожанкин, М.Еникова, Ж.Желев, Ш.Оманов, Б.П.Осипенко, В.Г.Чумин. Спектрометрия излучений радиоактивных нуклидов с помощью ППД. 5. Организация экспериментов по измерению спектров гамма-лучей.
а) ОИЯИ, Р6-10415, Дубна, 1976 (23 стр.);
б) В сб. "Прикладная ядерная спектроскопия", М., Атомиздат, вып.8 (1978) 43-58.
15. Ц.Вывлов, В.С.Александров, Ю.А.Андреев, В.М.Горожанкин, А.И.Иванов, Ш.Оманов, Б.П.Осипенко, Э.К.Степанов. Спектрометрия излучений радиоактивных нуклидов с помощью ППД. 6. Гамма-лучи радиоактивных нуклидов, применяемых для калибровки спектрометров. ОИЯИ, Р6-10416, Дубна, 1976 (26 стр.).
16. Ц.Вывлов, С.Бацев, В.М.Горожанкин, И.И.Громова, Н.А.Лебедев, А.Ф.Новгородов, Ш.Оманов, Б.П.Осипенко, В.Г.Чумин, А.Ф.Щусь, Я.Юрковски. Спектрометрия излучений радиоактивных нуклидов с помощью ППД. 7. Спектрометрия электронов внутренней конверсии. ОИЯИ, Р6-11085, Дубна, 1977 (28 стр.).
17. Ц.Вывлов, Б.П.Осипенко, В.Г.Чумин. Прецизионная спектрометрия излучений радиоактивных нуклидов с помощью ППД. ЭЧАЯ, 1978, т.9, вып.6, I350-I459.
18. Ц.Вывлов, Г.-Ю.Байер, В.М.Горожанкин, Ж.Желев, А.И.Иванов, Р.Б.Иванов, В.Г.Калинников, М.Я.Кузнецова, Н.А.Лебедев, М.А.Михайлова, А.И.Муминов, А.Ф.Новгородов, Ю.В.Норсеев,

- Ш.Оманов, Б.П.Осипенко, Э.К.Степанов, К.Тиме, В.Г.Чумин, А.Ф.Щусь, Ю.В.Юшкевич. Спектры излучений радиоактивных нуклидов $ZfK-399$ (1979) (500 стр.).
19. Ц.Вывлов, В.М.Горожанкин, Ж.Желев, А.И.Иванов, Р.Б.Иванов, В.Г.Калинников, М.Я.Кузнецова, Н.А.Лебедев, М.А.Михайлова, А.И.Муминов, А.Ф.Новгородов, Ю.В.Норсеев, Ш.Оманов, Б.П.Осипенко, Э.К.Степанов, В.Г.Чумин, А.Ф.Щусь, Ю.В.Юшкевич. Спектры излучений радиоактивных нуклидов. Изд. ФАН, Ташкент, 1979 (600 стр.).
20. Ц.Вывлов, Ш.Оманов, Я.Саржински, В.С.Александров, Н.Б.Бадалов, А.И.Муминов, М.Суботович, Хан Хен Мо, Ю.В.Юшкевич. Исследование распада $^{145}\text{Eu} \rightarrow ^{145}\text{Sm}$. ОИЯИ, Р6-11847, Дубна, 1978 (21 стр.).
21. Ц.Вывлов, Ш.Оманов, Я.Саржински, В.В.Кузнецов, О.И.Кочетов, Н.Б.Бадалов, Р.Р.Усманов, Н.А.Лебедев, У.С.Салихбаев, Ю.В.Юшкевич. Изучение распада $^{147}\text{Eu} \rightarrow ^{147}\text{Sm}$. ОИЯИ, Р6-11848, Дубна, 1978 (29 стр.).
22. Ц.Вывлов, Ш.Оманов, В.С.Александров, Н.Б.Бадалов, Н.А.Лебедев, У.С.Салихбаев, Ли Су Чен. Изучение распада $^{149}\text{Eu} \rightarrow ^{149}\text{Sm}$. Тезисы докладов XXIX совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Л., "Наука", 1979, с.92.
23. Ц.Вывлов, Ш.Оманов, В.С.Александров, Н.Б.Бадалов, А.Будзяк, В.В.Кузнецов, А.И.Муминов. Исследование распада $^{147}\text{Gd} \rightarrow ^{147}\text{Eu}$. а) ОИЯИ, Р6-12224, Дубна, 1979 (21 стр.); б) Изв. АН СССР, сер. физ., 44, 67-79, (1980).
24. Ц.Вывлов, Ш.Оманов, В.С.Александров, Н.Б.Бадалов, В.В.Кузнецов, Р.Р.Усманов, Хан Хен Мо. Изучение радиоактивного распада $^{149}\text{Gd} \rightarrow ^{149}\text{Eu}$. ОИЯИ, Р6-12144, Дубна, 1978 (21 стр.); а) ОИЯИ, Р6-12144, Дубна, 1978 (21 стр.);
25. Ц.Вывлов, Ш.Оманов, Н.Б.Бадалов, С.Бацев, А.Будзяк, В.В.Кузнецов, У.С.Салихбаев, Хан Хен Мо. Исследование распада $^{151}\text{Gd} \rightarrow ^{151}\text{Eu}$. Тезисы докладов XXIX совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Л., "Наука", 1979, с.94.
26. Ц.Вывлов, К.Я.Громов, А.И.Иванов, Б.П.Осипенко, Е.А.Фролов, В.Г.Чумин, А.Ф.Щусь, М.Ф.Юдин. Новое измерение энергии связи дейтрона.
а) ОИЯИ, Р6-11675, Дубна, 1978;
б) Ядерная физика, т.28, вып.5 (1978) 1137-1143.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 февраля 1980 года.