

К 647

УДК 539.1.073 : 539.1.078

6-87-705

КОНОНЕНКО
Геннадий Александрович

**РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ
И МЕТОДОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ
И АНАЛИЗА БЕТА-СПЕКТРОГРАММ**

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель
доктор технических наук В.М.Цупко-Ситников

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук А.И.Феоктистов

кандидат технических наук
старший научный сотрудник В.И.Приходько

Ведущая организация: Институт ядерной физики АН ЛатвССР,
г. Рига.

Защита диссертации состоится " " _____ 1987 г.
в _____ часов на заседании Специализированного совета
Д-047.01.03 при ДЯП ОИЯИ, г. Дубна, Московской области.

Автореферат разослан " " _____ 1987 г.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Специализированного
совета
доктор физико-математических наук Ю.А.Батусов

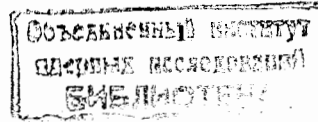
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Бета-спектрографы используются в ядерной спектроскопии уже свыше 70 лет. Однако у экспериментаторов, применяющих эти приборы, возникают серьезные затруднения при получении точных значений энергий и интенсивностей электронов внутренней конверсии (ЭВК), а также при определении соответствующих погрешностей, что связано со следующими причинами.

1. В бета-спектрографах в качестве детектора электронов используется ядерная фотоэмульсия, на которой получают спектрограмму ЭВК. Для получения точных количественных значений параметров спектра ЭВК необходимо произвести измерения в сотнях тысяч точек на каждой спектрограмме.

2. Спектрограммы ЭВК состоят, как правило, из спектров от нескольких нуклидов, что затрудняет их расшифровку и математическую обработку. Математическая обработка спектров ЭВК сама по себе является сложной задачей из-за несимметричности формы спектральной линии и зависимости ее параметров от свойств прибора и таких характеристик источника, как его толщина, высота и однородность, которые, как правило, точно не известны. Если спектры ЭВК исследуются с помощью бета-спектрографов, то количество факторов, влияющих на форму линии возрастает. К их числу относятся: рассеяние электронов фотослоем, влияние эффектов проявления, процесса фотометрирования и т.д.. Все эти причины делают задачу математической обработки спектров ЭВК, получаемых на магнитных бета-спектрографах, достаточно сложной, что и определяло приверженность некоторых исследователей к их ручной обработке.

Таким образом, большая информационная емкость бета-спектрограмм, обусловленная насыщенностью спектров линиями и широким диапазоном энергий, охватываемым в одном измерении, трудности в извлечении и расшифровке получаемых данных, а также высокая интенсивность исследований поставили актуальную задачу автоматизации обработки и анализа бета-спектрограмм. Эта задача может быть решена на основе автоматизации измерения параметров фотографического изображения при прямом использовании вычислительной техники в измерениях и обработке бета-



спектрограмм и применении строгого математического подхода при анализе спектров ЭВК.

Цель работы. Разработка и создание специализированного устройства для автоматического измерения параметров спектрограмм ЭВК, работающего как периферийное устройство ввода изображения в ЭВМ.

Разработка метода и создание устройства, позволяющего ускорить и повысить эффективность предварительного анализа бета-спектрограмм в идентификации линий спектра, т.е. определении принадлежности их к соответствующему нуклиду и энергиям конкретных переходов.

Анализ погрешностей определения относительных интенсивностей ЭВК при обработке бета-спектрограмм и разработка методики определения и снижения этих погрешностей.

Проведение исследований с целью совершенствования метода определения относительных интенсивностей ЭВК.

Разработка методики обработки бета-спектрограмм, полученных на протяжении ряда лет в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, с нелинейной формой характеристической кривой с целью определения надежных значений относительных интенсивностей L-, M- линий ЭВК.

Проведение исследований спектров ЭВК ряда ядер изотопов La, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb с целью получения точных данных о мультипольном составе определенных γ -переходов из анализа L-, M- групп ЭВК.

Научная новизна и основные положения, защищаемые в диссертации.

1. Сформулированы требования и выработан подход к построению устройства автоматического измерения параметров спектрограмм.
2. Разработано и создано устройство для автоматического измерения параметров бета-спектрограмм с шаговыми приводами каретки по двум осям, которое может использоваться в автономном режиме или как устройство ввода изображения на прозрачном носителе в ЭВМ.
3. Предложены способ и устройство для определения коэффициента пропускания оптического объекта (защищено авторским свидетельством на изобретение), позволяющие исключить влияние на точность измерений нестабильности светового потока осветителя и передаточной характеристики фотоприемника.
4. Разработано и создано устройство, реализующее с высокой точностью аппаратным способом в аналоговой форме два типа преобразования измеряемого сигнала в необходимые характеристики спектра ЭВК — оптическую и "электронную" плотности.
5. Подробно рассмотрены погрешности, возникающие при получении и обработке бета-спектрограмм, и разработана соответствующая методи-

ка фотометрирования, позволяющая снизить их величину и определить объективное значение дисперсии оптической плотности для каждой точки спектра.

6. Исследованы причины возникновения нелинейной формы характеристической кривой у бета-спектрограмм, связанные с характеристиками фотозуммисий и их проявлением. На основе полученных данных усовершенствована методика проявления фотопластинок, обеспечивающая для бета-спектрограмм характеристическую кривую с протяженностью линейной области, превышающей в 3 + 5 раз прежний результат. Это позволяет усовершенствовать методику определения относительных интенсивностей ЭВК.

7. Разработана методика определения значений относительных интенсивностей ЭВК на бета-спектрограммах с нелинейной формой характеристической кривой с точностью порядка 3 + 10 % в диапазоне оптических плотностей $D \leq 3$.

8. С помощью созданного устройства автоматического фотометрирования бета-спектрограмм, усовершенствованной методики извлечения информации из них и на основе алгоритмов и программ, разработанных для их математической обработки, проведены измерения параметров спектров ЭВК и получены данные о мультипольности γ -переходов в ядрах La, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb.

Практическое значение работы состоит в том, что с помощью созданного устройства автоматического фотометрирования бета-спектрограмм и разработанных методик их обработки и анализа в течение нескольких лет обработаны сотни бета-спектрограмм и получен большой объем новой информации о свойствах конкретных ядер.

Созданное устройство с успехом используется также для фотометрирования различных фотографических и других оптических объектов на прозрачном носителе. В частности, обрабатывались фотографии черенковского излучения, автордиограммы, спутниковые снимки и снимки художественной фотографии. На базе устройства автоматического фотометрирования, дополненного для этой цели специальными блоками, был собран прибор для проведения экспериментов по анализу спектров масс радиоактивных нуклидов при поиске сверхплотных ядер. По нашей разработке аналогичное устройство для автоматического фотометрирования было изготовлено в Институте ядерных исследований АН ЛатвССР (г. Салацпилс).

Апробация работы. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на XXVII, XXXII, XXXIII, XXXV, XXXVI и XXXVII совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Ташкент — 1977 г., Киев — 1982 г., Москва — 1983 г., Ленинград — 1985 г., Харь-

ков - 1986 г., Рига - 1987 г.); докладывались на семинарах по физике атомного ядра и методическом семинаре Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и опубликованы в научных сборниках, в виде препринтов и сообщений ОИЯИ.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано десять работ /2-11/ и получено авторское свидетельство СССР на изобретение (№559134) /1/.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Она содержит 189 страниц, включая 33 рисунка и 14 таблиц, и 163 библиографические ссылки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертации посвящена вопросам построения основных узлов устройств для автоматического измерения параметров фотографических изображений.

Кратко рассмотрены: приборы бета-спектрографы, с помощью которых исследуются спектры ЭВК; характер фотографического изображения спектров ЭВК, получаемых с помощью бета-спектрографов, - бета-спектрограмма, - ее информационные параметры и задачи обработки.

Излагаются принципы построения узла сканирования устройств, предназначенных для автоматических измерений параметров фотографических изображений, и методы измерений оптических характеристик фотографических изображений. Приведено описание предложенного нами (получено авторское свидетельство на изобретение /1/) относительного метода измерений оптической плотности или коэффициента пропускания фотографического изображения.

Формулируются основные требования, предъявляемые к конструкции и характеристикам узла сканирования и узла фотометрирования устройства для автоматического измерения параметров бета-спектрограмм.

В узле сканирования устройства предложено использовать 2^x - координатный привод разомкнутого типа (без обратных связей через датчики положений) на шаговых двигателях. Такой тип привода при высокой надежности и производительности имеет самую простую конструкцию и небольшую стоимость. Необходимая скорость и точность измерений координат на бета-спектрограммах достигается соответствующим выбором типа шагового двигателя, способом коммутации его фазных обмоток, а также изготовлением по высокому классу точности пары винт-гайка, с помощью которой вращение шагового двигателя преобразуется в поступательное перемещение каретки узла сканирования.

Узел фотометрирования предложено выполнять по однолучевой, прямоотсчетной схеме со стабилизацией режимов питания фотомножителя и осветителя. Относительность измерений оптической плотности на бета-спектрограммах, позволяющая проводить их фотометрирование отдельными фрагментами, а также высокое быстродействие прямоотсчетных систем, делают малым время измерений и тем самым заметно улучшают эксплуатационные характеристики таких систем.

Вторая глава содержит описание разработанного автором устройства автоматического фотометрирования (УАФ) бета-спектрограмм на линии с ЭВМ с приводами каретки от шаговых двигателей /2-5, 10/.

УАФ конструктивно включает:

1. Оптико-механическую часть, созданную на базе промышленного микрофотометра МФ-2;
2. Электронную часть, включающую устройство управления (УУ), узел аналоговой обработки (УАО) сигнала фотомножителя (в дальнейшем - видеосигнала), блоки управления приводами (БВП-Х и БВП-У) и источники питания;
3. Планшетный самописец;
4. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
5. Малую ЭВМ (ЕС-1010, СМ-4), которая используется для накопления и предварительной обработки информации с УАФ.

Функциональная блок-схема устройства приведена на рисунке 1.

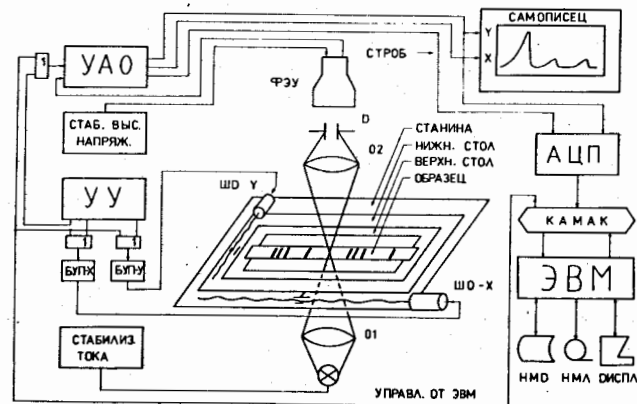


Рис.1. Блок-схема устройства автоматического фотометрирования.

Электроника управления и узел аналоговой обработки видеосигнала конструктивно выполнены в кювете системы "Вектор". Отдельно выполнен силовой блок с источниками питания и фазными усилителями шаговых двигателей.

Двухкоординатный привод устройства выполнен на шаговых двигателях и позволяет сканировать образцы прямоугольным растром размерами $80 \times 400 \text{ мм}^2$. Дискретность отсчетов координат для Y-привода составляет 25 мкм, для X-привода - $1000/240$ мкм. Погрешность измерения координат X-приводом не превышает 10 мкм на базе перемещения до 100 мм.

В качестве фотоприемника в устройстве использован фотоумножитель ФЭУ-92. Он включен с неполной диодной системой (шесть последних диодов соединены с анодом), установлено невисокое напряжение питания (800 В), фотокатод работает при больших засветках, ток диодного делителя превышает максимальный рабочий ток анода (200 мкА) в 200 раз. Такое включение ФЭУ обеспечило линейность световой характеристики не хуже 1% и высокое отношение сигнал/шум.

При разработке прибора оптимально решена трудоемкая задача по идентификации спектральных линий к соответствующему нуклиду и энергиям конкретных переходов на бета-спектрограммах. Для этой цели разработан экономичный и быстрый способ графического представления спектрограмм в электронных интенсивностях (q) с высокой точностью. Планшетный графопостроитель непосредственно (минуя ЭВМ) подключен к УАФ через аналоговое устройство (УАО, рис.1.), на выходе которого формируется сигнал, пропорциональный оптической (D) или "электронной" плотности (q). Последняя рассчитывается согласно выражениям

$$q = 10^{\frac{D}{C}} - 1 \quad (1)$$

или

$$q = \ln \frac{D_m}{D_m - D} \quad (2)$$

Здесь C , D_m - параметры, равные соответственно 6,2 и 4.

Блок-схема фотометрической системы с узлом аналоговой обработки видеосигнала приведена на рисунке 2.

Аппаратурная погрешность измерения оптической плотности, обусловленная нестабильностью источников питания ФЭУ и осветителя, шумами и темновым током ФЭУ, составляет 0,3% для $D=3$ и достигает 2% при измерении оптической плотности $D=0,1$. Погрешность в измерении D за счет временной нестабильности измерительного тракта не превышает 1% за 30 минут работы прибора. Погрешность аналогового расчета D в диапазоне

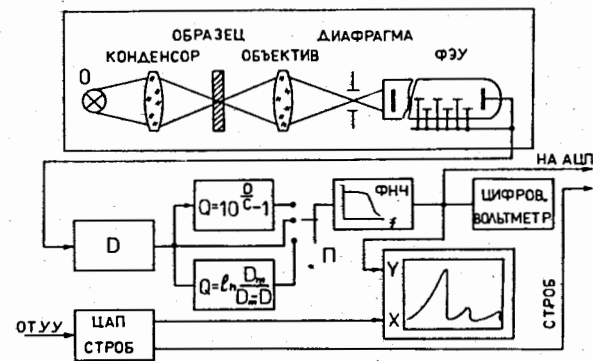


Рис.2. Блок-схема фотометрической системы с узлом аналоговой обработки видеосигнала.

$0,1 \leq D \leq 5$ и величины q в диапазоне $0,04 \leq q \leq 5,4$ не выше 3%. Данная погрешность и погрешность в определении D из-за нелинейности световой характеристики ФЭУ имеют систематический характер и учитываются при последующей математической обработке спектров на ЭВМ.

Рассмотрены также погрешности измерения оптической плотности, обусловленные зернистой структурой фотографического изображения спектра ЭВК. Показано, что эта составляющая погрешности D в несколько раз превышает аппаратную погрешность. Для ее объективного определения и одновременного снижения была разработана методика фотометрирования спектрограмм, использующая принцип накопления. Она заключается в многократном фотометрировании спектрограмм по разным неперекрывающимся дорожкам. Результаты каждого фотометрирования запоминаются в памяти ЭВМ и затем используются для расчета среднего значения \bar{D} и дисперсии $\sigma_{\bar{D}}^2$ в каждой точке спектра.

Управление УАФ осуществляется от автономного устройства управления (УУ, рис.1.) в ручном или автоматических режимах. Предусмотрено также и легко осуществимо управление УАФ со стороны ЭВМ. Автоматические режимы позволяют сканировать образцы по программам, задаваемым на блоке режимов УУ. Программа сканирования включает тип раstra и его параметры, а именно: базу перемещений по X-, Y-координатам, число строк сканирования, продолжительность остановки привода в конце отработки перемещения, шаг сканирования, порядок и последовательность регистрации сканируемой информации в ЭВМ. Связь УАФ с ЭВМ осуществляется че-

рез АЦП, установленный в кейте КАМАК, который имеет сопряжение с ЭВМ.

Приведены краткие описания алгоритмов и программ, разработанных автором (или адаптированных им из математического обеспечения ЭВМ), для приема, накопления и первичной обработки информации с бета-спектрограмм.

Третья глава диссертации посвящена вопросу совершенствования методики определения относительных интенсивностей ЭВК на бета-спектрограммах и расширения диапазона оптических плотностей, пригодного для анализа ⁶⁷.

В первой части главы дается анализ обычно применяемой методики определения относительных интенсивностей ЭВК по плотности почернения*. Исследуется диапазон оптических плотностей и форма характеристических кривых бета-спектрограмм в области $D > 3$. Исследования показали, что характеристические кривые (ХК) бета-спектрограмм в области $D > 3$ имеют резко нелинейную форму с тенденцией к насыщению оптической плотности в области $D \approx 4$.

Автором были исследованы причины возникновения нелинейности формы ХК бета-спектрограмм и насыщения оптической плотности. Рассмотрены следующие вопросы.

1. Предельные возможности фотоэмульсии типа Р(НИКФИ) в получении больших D в случае облучения их электронами малых энергий, обладающими глубинами проникновения в фотоэмульсию меньшими, чем ее толщина.

2. Влияние типа проявителя и режимов проявления (в неподвижном растворе и при активном перемешивании) на результаты проявления бета-спектрограмм.

Исследования показали:

1. Ядерные фотоэмульсии Р(НИКФИ) обеспечивают получение больших оптических плотностей ($D > 5$) практически для всего диапазона энергий электронов, регистрируемых с помощью бета-спектрографов. Исключение могут составлять лишь электроны очень низких энергий — $E_0 < 5$ кэВ. Поэтому причиной насыщения оптической плотности и нелинейного хода ХК бета-спектрограмм не может быть недостаточная концентрация микрокристаллов галогенного серебра в фотоэмульсии.

2. Нелинейная форма ХК бета-спектрограмм и эффект насыщения оптической плотности на них вызваны снижением скорости проявления с ростом экспозиции вплоть до его полного прекращения, из-за накопления

* Абдураваков А.А., Громов К.Я., Умаров Г.Я. Бета-спектрографы с постоянными магнитами. ФАН, Ташкент, 1970.

продуктов реакции проявления в фотослое. Отмеченные особенности в поведении ХК обусловлены типом используемого для бета-спектрограмм проявителя (амидоловый).

В этих исследованиях было установлено также, что при активной кинетике проявления амидоловый проявитель позволяет получать линейную область на ХК бета-спектрограмм вплоть до $D = 1,5$. Пассивное проявление в неподвижном растворе сокращает линейную область на них до уровня $D \approx 0,7$ (рис.3.). Поэтому использование указанного проявителя является оптимальным, если из бета-спектрограмм извлекается информация лишь в узком диапазоне оптических плотностей, не превышающих значения $D = 1,5$.

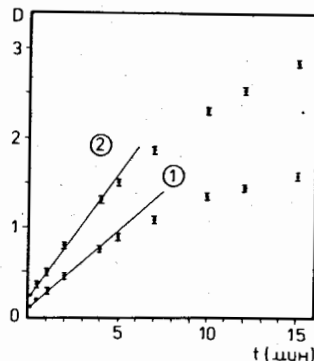


Рис.3. Характеристические кривые фотопластинок Р(НИКФИ), полученные при обработке их в неподвижном растворе амидолового проявителя (кривая 1) и при активном перемешивании (кривая 2).

Для расширения линейной области на ХК бета-спектрограмм их проявление необходимо вести в реактивах, обладающих меньшей подверженностью к снижению скорости проявления на участках с большой экспозицией, а кинетику проявления делать менее диффузионной за счет разрушения пограничного слоя на поверхности проявляемого фотоматериала. Автором исследовался для этих целей проявитель D-19. Экспериментально установлено, что при проявлении в нем фотопластинок типа Р(НИКФИ) в сочетании с механическим разрушением пограничного слоя получается ХК с протяженной линейной областью вплоть до $D = 3,5-4$.

Полученная обширная линейная область на ХК бета-спектрограмм позволяет предложить более упрощенную процедуру математической обработки спектров ЭВК с одновременным существенным повышением точности определения интенсивностей линий ЭВК. Информация с бета-спектрограмм в этом случае может быть получена прямо из спектра, представленного в единицах оптической плотности.

Было также показано, что за счет изменения времени проявления фотопластинок в пределах (3 + 15) минут можно в широких пределах регулировать наклон ХК при сохранении на них линейной области (рис.4).

Это имеет важное значение при исследовании источников излучения с сильно различающимися активностями.

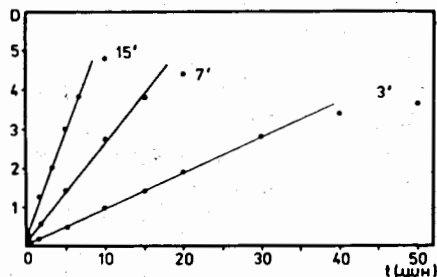


Рис. 4. Характеристические кривые фотопластинок Р(НИКФИ), полученные при разных временах проявления /15, 7 и 3 минуты/ в проявителе D -I9 при активном перемешивании раствора проявителя резиновой кистью.

В четвертой главе диссертации на примере обработки конкретных бета-спектрограмм с нелинейной формой ХК рассматриваются вопросы их анализа. Первая часть главы посвящена предварительному анализу бета-спектрограмм. Рассмотрены следующие вопросы¹⁷¹.

1. Влияние на форму спектральной линии ЭВК процесса взаимодействия электронов с фотоэмульсией, проявления и фотометрирования бета-спектрограмм.

2. Получение индивидуальных ХК для бета-спектрограмм.

3. Определение для каждой спектрограммы диапазона оптических плотностей, пригодного для точного анализа исходя из исследования полуширин линий ЭВК.

Показано, что к существенным искажениям формы линии на бета-спектрограммах приводят краевые эффекты проявления, обусловленные градиентом концентрации проявителя и продуктов реакции на границах участков с сильной и слабой экспозицией, а также неточное определение ХК на ее нелинейном участке. Краевые эффекты проявления искажают форму как сильных линий, максимумы интенсивностей которых приходится на нелинейный участок ХК, так и слабых, если они расположены рядом с сильными. Такие линии уже будут непригодны для точного анализа и они должны быть выявлены в спектре перед его обработкой.

Для повышения надежности и точности в определении интенсивностей линий ЭВК был разработан метод определения индивидуальных ХК для бета-спектрограмм. Сущность метода заключается в том, что в пределах исследуемых спектрограмм отбираются L-группы, мультипольности которых надежно установлены как чистые. Интенсивности отобранных L-групп пере считаются по выражению (1) или (2) с разными значениями параметров $c(D_m)$. Оптимальное значение параметра определяется из сравнения экспериментальных отношений интенсивностей ($L_1:L_2:L_3$) в отобранных L

группах и теоретических (табличных) отношений коэффициентов внутренней конверсии (КВК). Сравнение осуществляется по методу χ^2 или графическим методом.

Проведенный анализ полуширин спектральных линий ЭВК на бета-спектрограммах показал, что после пересчета спектров по индивидуальным ХК заметные искажения формы имеют линии с оптическими плотностями $D > 3,2$ в максимумах исходных спектров. Эта величина и определяет верхний предел D для надежного анализа на рассматриваемых спектрограммах.

Вторая часть главы посвящена вопросам математической обработки спектров ЭВК на бета-спектрограммах¹⁸⁷.

При обработке спектрограмм из-за сложности и многочисленности процессов, оказывающих влияние на формирование спектральной линии ЭВК, очень трудно подобрать одно аналитическое выражение, которое бы достаточно точно описывало форму линии в широком диапазоне энергий электронов: $E_0 = (3 + 3300) \text{кэВ}$. Поэтому нами было предложено использовать для обработки бета-спектрограмм программу UPEAK^{*} с табличным заданием модельной линии. В диссертации рассмотрены два подхода:

1. Использование в качестве модельных представлений гистограмм реальных распределений одиночных линий спектров;

2. Создание модельных линий на основе аналитических выражений.

Анализ большого количества бета-спектрограмм, полученных на приборах СП-1, СП-2 и СП-4^{**}, показал, что в области энергий электронов $E_0 < 150 \text{кэВ}$, благодаря высокой разрешающей способности бета-спектрографов, в качестве модельных могут быть использованы L_1, L_2, L_3 -линии в обрабатываемой L-группе ЭВК. Причем для γ -переходов типа $E1, E2, E3$ и $M2$ это, как правило, L_3 -линии. Для смешанных $M1+E2, E1+M2$ ими могут быть как L_3 -линии, так и L_1 -линии. В области больших энергий электронов необходимо использовать близлежащую к обрабатываемому участку одиночную K-линию.

Анализ результатов, получаемых при обработке бета-спектрограмм с использованием в качестве модельных одиночных линий спектра, проводится путем сравнения экспериментальных $L_1:L_K^0$ и теоретических $L_1:L_K^T$ значений отношений КВК для переходов с чистой мультипольностью типа $E2$. Такие данные приведены в таблице I. В восьмой колонке таблицы I указаны приведенные значения $\tilde{\chi}^2$. На рисунке 5 приведено разложение на компоненты одной из рассмотренных в таблице L-группы ЭВК.

*Злоказов В.Б. ОИЯИ, Р10-10350, Дубна, 1976.

**Абдуразаков А.А., Громов К.Я., Умаров Г.Я. Бета-спектрографы с постоянными магнитами. ФАН, Ташкент, 1970.

Таблица I. Экспериментальные значения отношений КВК и их сравнение с теоретическими значениями (мультипольность переходов чистая - E2)

Нуклид	Е _γ ,кэВ	L ₁ ³ :L ₂ ³	L ₁ ³ :L ₃ ³	L ₁ ^T :L ₂ ^T	L ₁ ^T :L ₃ ^T	Модель	$\tilde{\chi}^2$
¹⁵⁴ Gd	123,1	0,342(8)	0,363(8)	0,346	0,360	K174 ¹⁵³ Gd	0,8
¹⁵² Gd	271,1	1,34(6)	1,85(8)	1,29	1,79	K271 ¹⁵² Gd	1,4
¹⁵² Gd	344,3	1,90(20)	3,20(15)	1,84	2,81	K433 ¹⁵¹ Gd	1,4
¹⁶⁰ Dy	86,8	0,138(8)	0,129(7)	0,135	0,131	L ₃ 87 ¹⁶⁰ Dy	0,3
¹⁵⁸ Dy	98,9	0,18(1)	0,19(1)	0,183	0,184	L ₃ 99 ¹⁵⁸ Dy	0,5
¹⁵⁶ Dy	137,8	0,37(2)	0,40(2)	0,36	0,4	L ₃ 138 ¹⁵⁶ Dy	0,2
¹⁶¹ Dy	175,4	0,57(3)	0,70(3)	0,55	0,67	K175 ¹⁶¹ Dy	1,4
¹⁵⁸ Dy	218,2	0,80(4)	1,05(6)	0,8	1,06	K253 ¹⁵⁹ Dy	0,2
¹⁵⁶ Dy	266,6	1,11(5)	1,53(7)	1,09	1,56	K325 ¹⁵⁵ Dy	0,2
¹⁶¹ Ho	130,9	0,29(3)	0,33(4)	0,30	0,33	L ₃ 131 ¹⁶¹ Ho	0,9
¹⁶² Er	102,0	0,15(1)	0,16(1)	0,14	0,15	L ₃ 102 ¹⁶² Er	0,6
¹⁶⁴ Er	91,4	0,12(1)	0,12(1)	0,12	0,12	K140 ¹⁶¹ Er	0,7
¹⁶⁶ Er	80,6	0,090(5)	0,088(5)	0,086	0,084	L ₃ 80,6 ¹⁶⁶ Er	0,8
¹⁶⁷ Tm	116,6	0,19(2)	0,21(2)	0,19	0,20	L ₃ 116 ¹⁶⁷ Tm	0,3
¹⁶⁹ Tm	118,2	0,20(2)	0,23(2)	0,20	0,22	K197 ¹⁶⁴ Tm	1,2
¹⁶⁹ Tm	130,5	0,24(1)	0,27(1)	0,24	0,28	K197 ¹⁶⁴ Tm	0,4
¹⁶⁹ Yb	75,04	0,056(3)	0,054(3)	0,057	0,055	L ₃ 76 ¹⁷¹ Yb	0,6
¹⁷¹ Yb	75,9	0,067(6)	0,063(6)	0,058	0,057	L ₃ 76 ¹⁷¹ Yb	0,7

В тех случаях, когда число пригодных для моделей одиночных линий спектра мало и они расположены на значительном удалении (> 100 кэВ) от обрабатываемого участка, модельную линию необходимо задавать с помощью аналитического выражения.

Для описания модельных линий нами были выбраны две функции \mathcal{F} :

$$Y_1 = a_4 e^{-(x-a_5)^2/2 \cdot a_2} + a_4 e^{a_1 \cdot (x-a_3)} \cdot e^{-(a_3-a_5)^2/2 \cdot a_2}, \quad (3)$$

$$Y_2 = a_4 e^{-(x-a_5)^2/2 \cdot a_2} + [a_6 \cdot e^{a_1 \cdot (x-a_5)} + a_7 \cdot e^{a_8 \cdot (x-a_5)}] \cdot [1 - e^{-(x-a_5)^2/2 \cdot a_3}]. \quad (4)$$

³ Gunther G., et al. Nucl. Phys., 1969, A123, No.2, p.386.

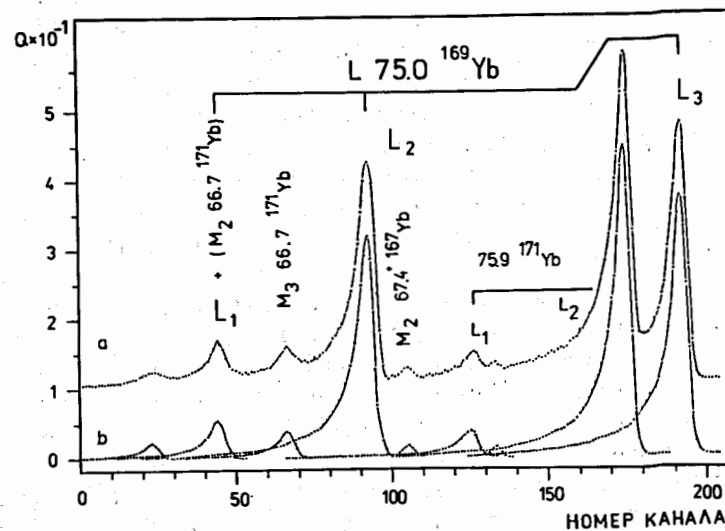


Рис. 5. Разложение на компоненты L-группы ЭК перехода 75 кэВ ¹⁶⁹Yb. а/ исходный спектр; б/ спектр после разложения на компоненты /постоянный фон вычтен/.

В формулах (3) и (4): x - расстояние от максимума линии, $a_1 \dots a_8$ - параметры, подлежащие определению. Первые слагаемые в этих выражениях служат для описания центральной части пика, вторые - для описания "хвостов".

Определение неизвестных параметров модельных функций (3) и (4) осуществляется с помощью разработанных для этой цели двух программ GAUEX1 и GAUEX2. Те из параметров, которые зависят от энергии электронов, описываются затем подходящими функциями по методу наименьших квадратов. Это позволяет определить значения параметров a_k для тех энергий электронов, которые соответствуют обрабатываемому участку. Затем согласно выражениям (3) и (4) и найденным параметрам a_k строится модельный пик, который далее используется программой UPEAK в виде таблицы.

Кроме указанных программ, математическое обеспечение, разработанное для обработки бета-спектрограмм, включает основную обрабатываемую программу SPRGRAF, обращающуюся к программе UPEAK, программу KALIBR для энергетической калировки спектров по методу трех реперов и расчета полуширин спектральных линий, и программу ХХП2, предназначенную для определения параметров $S(D_m)$ характеристических кривых бета-спектрограмм.

В пятой главе диссертации приведены результаты экспериментальных исследований мультипольностей некоторых γ -переходов ряда нейтронодефицитных изотопов ядер La, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, полученные автором с помощью разработанного устройства автоматического фотометрирования и усовершенствованной методики обработки и анализа бета-спектрограмм. Анализировались отношения L_1^- , L_2^- , L_3^- и, в ряде случаев, M_1^- , M_2^- , M_3^- линий ЭВК на спектрограммах с нелинейной формой характеристической кривой. Всего рассмотрен 61 γ -переход в диапазоне энергий электронов от 14 до 345 кэВ. Полученные результаты представлены в таблице 2/9, II/.

На рассмотренных бета-спектрограммах наряду со смешанными переходами анализировались также и переходы типа E2 (см. таблицу I), мультипольность которых считается надежно установленной. Часть этих переходов является переходами в полосу основного состояния четно-четного ядра, а остальные – ротационными переходами $\Delta I=2$ в полосу основного состояния нечетного ядра. Совпадение в пределах погрешностей измерений экспериментальных и расчетных КВК для чистых по мультипольности переходов типа E2 подтверждает достоверность данных, полученных для смешанных переходов и переходов других мультипольностей.

Из общего количества (33) смешанных $M1+E2$ переходов, представленных в таблице, можно выделить 18 переходов, для которых параметры смешивания δ^2 определены с лучшей точностью, чем имеющиеся литературные данные.

Для переходов I77,2I и I97,95 кэВ ^{169}Tm расчеты смесей мультипольностей проведены также с учетом эффекта проникновения в КВК. Результаты представлены в таблице 3.

На основании имеющихся литературных данных о временах жизни возбужденных состояний ядер ^{153}Tb , ^{155}Tb , ^{155}Dy , ^{159}Dy , ^{161}Dy , ^{161}Er , ^{163}Er , ^{165}Er , ^{167}Er , ^{167}Tm , ^{169}Tm , ^{169}Yb , ^{171}Yb , интенсивностей γ -лучей и полученных значений мультипольного состава γ -переходов рассчитаны приведенные вероятности ряда переходов и факторы запретов для γ -излучения по Вайскопфу.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

I. Создано прецизионное устройство автоматического фотометрирования с шаговыми приводами каретки по обеим осям координат, работающее на линии с ЭВМ. Разработанное устройство обеспечило автоматизацию фотометрирования бета-спектрограмм и позволило создать условия для их массового количественного анализа (Производительность труда по сравнению с ручной обработкой на приборах промышленного изготовления типа МФ-2 или МФ-4 повышена в 100 раз).

Таблица 2. Определение мультипольности γ -переходов в ядрах La, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb

Ядро	E_γ , кэВ	$L_1^{\beta}:L_2^{\beta}$	$L_1^{\beta}:L_3^{\beta}$	$L_1^T:L_2^T$	$L_1^T:L_3^T$	Мультипольность
1	2	3	4	5	6	7
^{133}La	130,80	8,20(34)	11,86(60)			$M1+4,9(6)\%E2$
^{135}La	119,52	8,73(84)	11,74(175)			$M1+4,0(6)\%E2$
^{149}Gd	164,98	1,77(4)	2,11(6)			$M1+46,8(8)\%E2$
^{151}Gd	108,12	0,99(2)	1,03(2)			$M1+41,7(6)\%E2$
-	287,35	14,2(7)	-	14,1		$M1$
^{153}Tb	80,72	7,26(20)	13,69(48)			$M1+1,8(3)\%E2$
-	82,45	6,8(3)	3,8(1)	8,8	4,28	$M2+<0,4\%E3$
-	92,96	8,2(10)	11,5(21)			$M1+2,6(8)\%E2$
-	147,50	2,60(11)	3,38(19)			$M1+26(1)\%E2$
-	99,70	9,3(3)	25,0(20)			$M1+1,2(3)\%E2$
^{155}Tb	65,46	6,94(23)	8,99(35)			$M1+1,8(5)\%E2$
-	90,33	7,17(65)	15,8(29)			$M1+2,1(6)\%E2$
-	226,92	8,3(13)	8,7(17)	8,1	7,3	$E1$
^{155}Dy	39,46	1,52(8)	1,35(7)			$M1+5,2(4)\%E2$
^{159}Dy	56,63	4,2(2)	4,6(2)			$M1+2,9(3)\%E2$
-	121,01	4,91(43)	4,39(40)	5,06	4,29	$E1$
^{160}Ho	59,94	0,013(2)	0,012(2)	0,012	0,012	$E3$
^{161}Dy	25,65	1,43(4)	0,96(3)	1,46	1,0	$E1$
-	77,38	0,38(2)	0,35(1)			$E2+48(2)\%M1$
^{161}Ho	211,2	0,18(2)	0,25(3)	0,17	0,27	$E3$
^{161}Er	59,49	3,32(14)	3,91(21)			$M1+3,6(2)\%E2$
^{163}Er	60,1	2,92(14)	3,50(18)			$M1+4,7(3)\%E2$
-	69,23	3,23(6)	2,60(5)	3,06	2,44	$E1+<0,2\%M2$
-	83,97	0,230(15)	0,228(15)			$E2+28(2)\%M1$
-	104,32	8,8(11)	-			$M1+1,3(8)\%E2$
^{165}Er	113,57	8,5(6)	25,0(40)			$M1+1,8(5)\%E2$

Таблица 2 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
^{167}Er	57,1	1,43(4)	1,17(3)			M1+ 11(1)%E2
^{167}Er	207,8	0,157(6)	0,25(1)	0,149	0,24	E3
^{167}Tm	37,05	0,70(3)	0,61(2)			M1+9,8(8)%E2
-	113,6	4,13(20)	3,65(20)	4,27	3,72	E1
^{169}Tm	63,12	2,94(8)	2,15(6)	2,73	2,18	E1+<0,1%M2
-	93,61	6,6(4)	11,2(11)			M1+3,1(5)%E2
-	109,78	7,87(33)	18,8(11)			M1+2,4(4)%E2
-	177,21	4,78(15)	8,6(3)			M1+15,3(8)%E2
-	197,95	7,1(2)	22,8(15)			M1+8,1(9)%E2
^{167}Yb	24,63	1,42(6)	1,29(6)			M1+2,2(3)%E2
-	29,66	1,42(10)	0,98(6)	1,38	0,99	E1
-	33,91	1,45(6)	0,99(5)	1,56	1,14	E1
^{169}Yb	62,73	0,62(2)	0,61(2)			M1+26(2)%E2
-	70,88	2,13(6)	2,91(6)			M1+ 9(1)%E2
-	87,38	4,67(19)	6,1(2)			M1+5,5(10)%E2
-	144,58	3,74(31)	5,95(77)			M1+15(2)%E2
^{171}Yb	66,73	0,46(3)	0,45(3)			M1+35(2)%E2

Примечание: Для смешанных переходов типа M2+E3 и E1+M2 теоретические отношения КВК ($L_1:L_2^T$, $L_1:L_3^T$) указаны для мультипольности M2 в первом случае и E1 - во втором.

2. Разработано и создано устройство, реализующее с высокой точностью аппаратным способом в аналоговой форме два типа преобразования параметров измеряемого оптического объекта в характеристики спектра ЭК - оптическую или "электронную" плотности.

3. Предложен способ для измерения коэффициента пропускания света через оптический объект (защищено авторским свидетельством на изобретение) [7].

4. Подробно рассмотрены погрешности, возникающие при получении и обработке бета-спектрограмм и разработаны программное обеспечение и методика для фотометрирования, позволяющая снизить и одновременно рас-

Таблица 3. Параметры смешивания мультипольностей δ^2 и ядерные параметры проникновения λ , для M1+E2 переходов I77,2I и I97,95 кэВ ^{169}Tm

E _y , кэВ	L ₁ :L ₂ ³ L ₁ :L ₃ ³ L ₂ :L ₃ ³	λ		F _w (M1)	δ^2	
		настоящ. работа	литерат. данные		без прон.	с проникн.
I77,2I	4,78(I5) 8,6(3) I,8(I)	-6,4±I0,8	= I ³ ≤ 7 ³	8,8·I0 ⁵	0,18(I)	0,24(8)
I97,95	7,I(2) 22,8(I5) 3,2(2)	I0,7±3,3	= I ³ , I ³ 6 ≤ λ ≤ 9 ³ λ = 6 ± 5 ³	7,0·I0 ⁵	0,09(I)	0,042(II)

³Grabovski Z. et al. - Z. Phys., 1962, Bd.169, s.303-314.

³Agnihortry A.P. et al. - Phys. Rev., 1972, vol.66, p.321-330.

³Менцваршвили Р.Я. и др. - В кн.: Тезисы докладов XXV совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. - Наука, Л., 1975, с.166.

³Reddy B.S. et al. - Ind. J. Phys., 1982, vol. A56, p. 283-286.

считать объективные значения дисперсий оптической плотности для каждой точки спектра.

5. Проведены исследования причин возникновения нелинейности формы характеристических кривых бета-спектрограмм и насыщения оптической плотности на них, обусловленные характеристиками фотоэмульсий и их проявлением. На основе полученных данных усовершенствована методика проявления бета-спектрограмм, обеспечивающая получение характеристической кривой с протяженностью линейной области, превышающей в 3 + 5 раз прежнее значение, и расширение диапазона оптических плотностей, пригодного для анализа на бета-спектрограммах до D=4+4,5. Усовершенствована методика определения относительных интенсивностей ЭК, которая позволяет повысить точности и существенно упростить процедуру извлечения данных из бета-спектрограмм.

6. Разработана методика анализа бета-спектрограмм с нелинейной формой характеристической кривой, обеспечивающая получение значений относительных интенсивностей ЭК в диапазоне оптических плотностей

$D \leq 3$ с точностью порядка $(3 + 10)\%$. Выбраны соответствующие алгоритмы и созданы программы для обработки и анализа бета-спектрограмм.

7. Созданное устройство автоматического фотометрирования и разработанная методика обработки и анализа бета-спектрограмм в полном объеме были применены автором к изучению мультипольностей ряда γ -переходов нейтронодефицитных изотопов ядер La, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb. Рассмотрен 61 переход типа E1, E2, E3, M1 и смешанные M1+E2, E1+M2 и M2+E3 в диапазоне энергий электронов от 14 до 345 кэВ. В 18 случаях из 33 смешанных переходов уточнены значения параметров смешивания мультипольностей. Для двух межполосных переходов $I77,2I$ и $I97,95$ кэВ ^{169}Tm параметры смешивания мультипольностей получены также с учетом аномалии в КВК, обусловленной эффектом проникновения. Рассчитаны приведенные вероятности рассмотренных переходов в ядрах ^{153}Tb , ^{155}Tb , ^{155}Dy , ^{159}Dy , ^{161}Dy , ^{161}Er , ^{163}Er , ^{165}Er , ^{167}Er , ^{167}Tm , ^{169}Tm , ^{169}Yb , ^{171}Yb .

8. Разработанное устройство автоматического фотометрирования, усовершенствованная методика обработки и анализа бета-спектрограмм, а также разработанные алгоритмы и программы используются для анализа и обработки бета-спектрограмм и других оптических объектов на протяжении более 10 лет. В результате обработаны сотни спектров ЭВК и получен большой объем новой физической информации о свойствах конкретных ядер, который нашел отражение в 25 публикациях с участием автора.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Кононенко Г.А., Коралова С., Орманджиев С.И., Потемпа М., Ревенко А.В., Цупко-Ситников В.М. Устройство для определения коэффициента пропускания оптического объекта. Авторское свидетельство СССР №559134 от 2.09.1974. Бюллетень ОИПОТЗ, 1977, №19, с.113.
2. Кононенко Г.А., Потемпа М., Ревенко А.В., Цупко-Ситников В.М. Автоматический микрофотометр на линии с ЭВМ с шаговыми приводами перемещения каретки по обеим осям. - В кн.: Тезисы докладов XXVII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра., Л., Наука, 1977, с. 367.
3. Исламов Т.А., Кононенко Г.А., Ревенко А.В., Тангабаев А.А., Фоминых М.И., Цупко-Ситников В.М. Автоматизация фотометрирования бета-спектрограмм на базе микрофотометра с шаговыми приводами каретки на линии с ЭВМ. - Сообщение ОИЯИ, P10-I2794, Дубна, 1979, 16 с.
4. Абдуразаков А.А., Громов К.Я., Исламов Т.А., Кононенко Г.А., Тангабаев А.А., Фоминых М.И., Холматов А.Х., Цупко-Ситников В.М. Погрешности определения плотности почернения фотоэмульсии при обработке бета-спектрограмм.

а) Препринт ОИЯИ, P6-8I-696, Дубна, 1981, 9 с.

б) В кн.: Прикладная ядерная спектроскопия, вып. 13, Энергоатомиздат, Л., 1984, стр. 110-118.

5. Кононенко Г.А., Кондрат Е.Т., Цупко-Ситников В.М. Аналоговый преобразователь сигнала микрофотометра в величины оптической и электронной плотности.
а) Препринт ОИЯИ, 6-83-205, Дубна, 1983, 8 с.
б) В кн.: Прикладная ядерная спектроскопия, вып. 13, Энергоатомиздат, Л., 1984, стр. 203-209.
6. Кононенко Г.А., Кузнецов В.В., Цупко-Ситников В.М. Зависимость сенситометрических характеристик ядерных фотоэмульсий типа Р(НИКФИ) от энергии электронов, типа проявителя и режима проявления. - Сообщение ОИЯИ, I3-85-I25, Дубна, 1985, 11 с.
7. Злоказов В.Б., Кононенко Г.А., Кузнецов В.В., Фоминых М.И., Цупко-Ситников В.М. Анализ бета-спектрограмм. Предварительная обработка. - Сообщение ОИЯИ, P6-85-606, Дубна, 1985, 12 с.
8. Кононенко Г.А., Гуяш Я., Злоказов В.Б., Кузнецов В.В., Фоминых М.И., Цупко-Ситников В.М., Исхаков Г. Анализ бета-спектрограмм. Обработка сложных спектров электронов внутренней конверсии. - Сообщение ОИЯИ, P6-85-717, Дубна, 1985, 13 с.
9. Громов К.Я., Исламов Т.А., Баратова М.А., Кононенко Г.А., Цупко-Ситников В.М. Прецизионное определение мультипольности переходов в ядрах тулия и гольмия. - В кн.: Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тезисы докладов XXXVI совещания. Л., 1986, Наука, с. 115.
10. Кононенко Г.А., Кузнецов В.В., Цупко-Ситников В.М. Методика обработки бета-спектрограмм и погрешности при анализе L-структур ЭВК. Сообщение ОИЯИ, P6-86-536, Дубна, 1986, 13 с.
11. Баратова М.А., Громов К.Я., Исламов Т.А., Кононенко Г.А., Холматов А.Х., Цупко-Ситников В.М. Определение мультипольности γ -переходов в ядрах La, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb на основе усовершенствованной методики обработки бета-спектрограмм. - Препринт ОИЯИ, P6-87-219, Дубна, 1987, 30 с.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 сентября 1987 года.