

Ц-869



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-81-246

ЦУПКО-СИТНИКОВ
Всеволод Михайлович

**РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ
И МЕТОДОВ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ
И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
В ЯДЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

**Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук**

Дубна 1981

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:
член-корреспондент АН ЛатвССР
профессор

П.Т.Прокофьев
(ИФ, Рига)

доктор технических наук
профессор

В.К.Ляпидевский
(МИФИ)

доктор физико-математических
наук

В.Б.Флягин
(ОИЯИ)

Ведущее научно-исследовательское учреждение - Институт ядерных исследований АН УССР, Киев.

Защита диссертации состоится " 6 октября 1981 в _____ час.
на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при ЛЯП ОИЯИ,
г.Дубна, Московской области.

Автореферат разослан "22" нояб 1981 г.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Специализированного
совета
доктор физико-математических наук

Ю.А.Батусов

Цель работы. Целью работы является разработка и внедрение методов, аппаратуры и программ, обеспечивающих комплексную автоматизацию измерений, накопления и обработки информации в задачах ядерной спектроскопии. Конечная задача этого процесса - повышение эффективности ядерно-спектроскопических исследований, проводимых с целью изучения структуры и свойств атомного ядра. В настоящей диссертации обобщен комплекс работ, который был проведен автором в этом направлении.

Актуальность проблемы. Задача автоматизации исследований в ядерной спектроскопии - одной из крупных областей экспериментальной ядерной физики - остро встала в середине 60-х годов в связи с бурным развитием этого направления. Новый этап исследований в ядерной спектроскопии, помимо собственных проблем ядерной физики, был обусловлен в значительной степени потребностями в полной и точной информации о свойствах и излучениях радиоактивных ядер в связи с широким внедрением изотопов в народное хозяйство, а также новыми экспериментальными возможностями, которые предоставили в распоряжение исследователей интенсивные пучки ускорителей, техника эффективной сепарации изотопов и полупроводниковые детекторы.

Необходимость систематического изучения свойств всех доступных радиоактивных изотопов и реализация новых экспериментальных возможностей требовали перестройки существовавшей практики измерений в направлении резкого повышения их массовости и эффективности, создания новых установок для многомерного корреляционного анализа с вытекающими из этого задачами централизованного накопления большого объема данных и разработки методов и программ их анализа.

Эффективное исследование свойств атомных ядер методами ядерной спектроскопии возможно лишь при комплексном подходе, когда изучаются все виды излучений данного ядра и проводятся корреляционные измерения.

Специфика ядерной спектроскопии состоит в разнообразии аппаратных средств, с помощью которых получают экспериментальную информацию, и в необходимости ее совместного анализа.

Успех такого подхода решается комплексной автоматизацией всех приборов и видов измерений, централизацией сбора и обработки информации.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Научная новизна. В работах, представленных в диссертации, впервые предложен, разработан и реализован комплексный подход решения задачи автоматизации измерений и обработки информации в ядерной спектроскопии. В основе этого подхода лежит исследование проблемы в целом, от измерений до анализа данных, с целью наиболее полного и эффективного получения физической информации. В процессе реализации этого подхода разработаны и внедрены новые методы измерений, разработаны и созданы новые высокоэффективные приборы, впервые предложен и разработан комплексный подход к созданию математического обеспечения для обработки спектрометрической информации, включающий новые методы и алгоритмы обработки одномерных и многомерных спектров и анализа получаемых данных. Впервые создана многоуровневая система измерений и обработки спектрометрической информации, позволявшая комплексно решить задачу автоматизации исследований в ядерной спектроскопии.

Практическая ценность. Все разработки, отраженные в диссертации, были реализованы в аппаратуре и программах и обеспечили полную перестройку ядерно-спектроскопических исследований на основе комплексной автоматизации измерений и обработки информации. Это позволило в 1967-1979 годах выполнить обширную программу ядерно-спектроскопических и радиохимических исследований, а также некоторых других задач, в том числе прикладных, проводившихся в НЭОЯС и РХ ЛЯП ОИЯИ как сотрудниками Института, так и многими организациями СССР и других стран-участниц ОИЯИ. Ряд разработок (методика, аппаратура, документация, программы) был передан в научно-исследовательские организации СССР и других стран, где они используются для решения научных проблем и прикладных задач.

Созданная многоуровневая система измерений и обработки информации в ядерной спектроскопии как первая в своем роде явилась базой по распространению опыта для многих НИИ СССР и ряда других стран-участниц ОИЯИ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех частей (девять глав), заключения, приложения и списка литературы из 332 наименований. Она содержит 333 страницы, включая 19 таблиц и 90 рисунков на 54 страницах и литературу на 37 страницах.

Основные результаты докладывались на семинарах ЛЯП ОИЯИ, международном семинаре по ядерной электронике (Варна, 1969 г.), II и III международных школах по применению ЭМВ в экспериментальной физике (Алушта, 1970 г.; Ташкент 1974 г.), XII и XIV совещаниях по ядерной спектроскопии и теории атомного ядра (Дубна: 1971 и 1975 гг.), ХУП+

XXX совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (1967-1980 гг.), I, II и III рабочих совещаниях по установке СПИН (Дубна, 1976 г.; Бехине (ЧССР), 1978 г.; Лишно (ЧССР), 1980 г.), Всесоюзной школе по применению полупроводниковых детекторов (Рига, 1980 г.).

Основное содержание диссертации опубликовано в работах I-49 в советских и зарубежных журналах, Бюллетене изобретений, сборниках, трудах школ, семинаров, совещаний и сообщениях ОИЯИ в период 1967-1980 годов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко показано положение в ядерно-спектроскопических исследованиях, сложившееся к 1967 г. - моменту начала разработок, описанных в настоящей диссертации, и дается постановка задачи комплексной автоматизации в этой области.

Для этого периода характерно широкое использование магнитных спектрометров различного типа для исследования спектров заряженных частиц и сцинтилляционных детекторов для спектрометрии γ -излучения. Из-за плохого энергетического разрешения последних (~10%) возможности исследования γ -излучения были крайне ограничены.

Перелом, произошедший в связи с появлением в 1964 г. полупроводниковых детекторов (ПЩ), открыл новые возможности и поставил целый ряд специальных задач. Новые детекторы сделали доступными массовые измерения γ -спектров с энергетическим разрешением, превосходящим разрешение сцинтилляционных детекторов на полтора-два порядка. Удельный вес γ -измерений в ядерной спектроскопии резко возрос. Кроме того, ПЩ позволили поставить впервые или на существенно более высокий уровень ряд корреляционных измерений.

На этом этапе возникли следующие задачи /1,2/:

1. Создание электроники - от чувствительных малощумящих усилителей до многоканальных анализаторов, - позволяющей реализовать высокое энергетическое разрешение ПЩ.
2. Автоматизация измерений, вывода и обработки информации для большой группы магнитных спектрометров.
3. Создание централизованной системы накопления и обработки спектрометрической информации как единственной возможности обеспечить на высоком уровне массовые измерения и массовую обработку данных.
4. Разработка аппаратуры для корреляционных измерений, представляющих собой системы многомерного анализа с регистрацией большого объема информации.

5. Разработка специализированных устройств для анализа распределения активности источников и обработки большого объема информации на оптических носителях.

6. Разработка аппаратуры, методов и программ анализа спектрметрической информации большого объема с использованием ЭВМ разного класса и современных математических методов /2/.

Реализация этой программы была начата под руководством и при участии автора в 1966-67 гг. в Научно-экспериментальном отделе ядерной спектроскопии и радиохимии Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и привела к созданию развитой многоуровневой системы измерений, накопления и обработки ядерно-спектроскопической информации.

В этой работе принимал участие большой коллектив сотрудников нескольких отделов ЛЯП, специалисты ЛВТА и ЛНФ ОИЯИ и сотрудники ряда институтов стран-участниц ОИЯИ.

Первая часть диссертации (три главы) посвящена аппаратурным средствам автоматизации измерений, накопления и обработки информации в ядерной спектроскопии.

Время, отводимое на синхротронном ЛЯП для ядерно-спектроскопических исследований, возможности радиохимической лаборатории по выделению химических фракций из облученных мишеней, а в последующем и масс-сепараторов, обеспечивающих получение моноизотопных источников, определяли общий объем измерений в несколько тысяч спектров в год, причем большая часть из них - γ -спектры с числом каналов не менее 4000.

Для массовых параллельных измерений γ -спектров наиболее удобным прибором являются автономные многоканальные анализаторы, обладающие достаточной универсальностью и простотой в обращении. Однако сложившаяся практика их использования с выводом информации на печать необходимо было менять, так как это приводит к большим потерям времени и не позволяет автоматизировать обработку.

Возникла задача связи анализаторов с ЭВМ для быстрой передачи спектров и организации на внешних устройствах-накопителях буферного хранения информации. С другой стороны, многомерные корреляционные измерения для эффективной реализации требуют прямого использования ЭВМ. Помимо систем на базе полупроводниковых спектрометров значительный объем информации должен поступать от магнитных спектрометров и спектрографов, для которых необходимо было автоматизировать измерения и ввод информации на ЭВМ.

В результате рассмотрения всех потребностей были выработаны следующие требования к структуре системы: она должна базироваться на ЭВМ (доступного типа и класса), иметь несколько многоканальных анализаторов, связанных с ЭВМ или вспомогательными промежуточными накопи-

телями данных. Машина должна быть приспособлена для многомерных измерений и связи с рядом автоматизированных приборов. Кроме того, она должна обеспечивать оперативную обработку части спектрметрической информации и иметь прямую связь с мощными ЭВМ, обеспечивающую удобную и надежную передачу большого объема данных.

На этом этапе одна из главных проблем - проблема интерфейса, то есть решение аппаратурных и программных задач связи детекторной электроники, многоканальных анализаторов, ЭВМ и внешних устройств в единую систему. Проблема интерфейса является одной из наиболее сложных задач на всех этапах автоматизации физического эксперимента даже при использовании новых стандартов электроники и микросхем высокого уровня интеграции. При разработке интерфейса должен быть учтен ряд разнообразных и часто противоречивых требований и найдено оптимальное решение. Такими требованиями являются: универсальность и простота, оптимальное распределение функций между аппаратурным и программным уровнями, реализация связи с учетом необходимого быстродействия и допустимой сложности, максимальная адаптация к специфике связываемых объектов.

В первой главе рассматриваются аппаратурные средства, решающие три основные проблемы для базовой ЭВМ спектрметрического комплекса: связь с разнообразной измерительной аппаратурой, визуальный контроль информации и оперативная связь с машиной, связь с мощной ЭВМ /3/.

На первом этапе работ указанные проблемы были решены для ЭВМ "Минск-2". Был разработан универсальный канал или устройство связи (УС) /4/, обеспечивший быструю и надежную связь машины со следующими устройствами:

1. Несколькими аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), работающими в режимах одномерного и многомерного анализа.
2. Промежуточными анализаторами-накопителями на 2048 24-разрядных слова и 4096 18-разрядных слова (АИ-4096).
3. Осциллографическим дисплеем со световым карандашом (ОСК).
4. Автоматическим микрофотометром (АМФ) и сканирующим автоматом для снятия распределения бета-активности на поверхности.
5. Многоканальной системой для снятия распределения бета-активности.

УС обеспечило накопление спектрметрической информации в оперативной памяти машины (8 К 37-разрядных слова) как в интегрирующем, так и в неинтегрирующем режимах с возможностью разбиения машинного слова на 2 и 4 "этажа" для проведения измерения с 16 или 32 тысячами каналов, что существенно расширило возможности ЭВМ как одномерного и многомерного анализатора.

Сочетание УС с рядом специальных режимов работы машины, которыми она была дополнена (анализаторный, мультискеллерный, многомерный анализ и др.), осуществленных аппаратурными средствами, обеспечило большое удобство и простоту обращения с машиной для массового и, как правило, мало подготовленного пользователя.

В дальнейшем был разработан целый ряд устройств как специализированных для связи отдельных приборов или анализаторов с ЭВМ и различными внешними устройствами, так и универсальных для связи машин (НР 2116С, СМ-3) с комплексом спектрометрической аппаратуры /16, 18, 32/.

Прямое интенсивное использование ЭВМ в спектрометрических измерениях, а также проведение обработки спектрометрической информации требуют подключения дисплея с системой, обеспечивающей работу с ЭВМ в интерактивном режиме. Для этих целей наиболее удобным является осциллографический дисплей. Добавление к нему светового карандаша (или пера), светочувствительного элемента, позволяющего через прерывание вводить в машину информацию о любой точке изображения, позволяет получить высокоэффективное средство для интерактивного режима работы с ЭВМ /5/. Это подтверждается многолетним опытом работы.

Приведено описание основных блоков прибора, имеющих принципиальное значение для удобства представления и обработки информации, и, в частности, блока управления выводом изображения и светового карандаша.

Разработка описанной модели ОСК, выполненная в сотрудничестве со специалистами ЛНФ и ЛВГА ОИЯИ, завершилась подготовкой подробного описания и документации /5/. Опыт этой разработки был использован в ряде организаций СССР и при создании в ОИЯИ серии осциллографических дисплеев, нашедших широкое применение.

Создание УС и ОСК позволило успешно использовать ЭВМ в анализаторных режимах и для сбора и обработки информации /6/.

Малые ЭВМ из-за ограниченного быстродействия и памяти не могут обеспечить в полной мере ни необходимого объема обработки информации, ни соответствующего ее качества. Эти обстоятельства определили необходимость создания прямой связи ЭВМ "Минск-2" с БЭСМ-6.

Реализация этой связи, выполненной совместно со специалистами ЛВГА ОИЯИ, объединила в систему периферийный измерительный комплекс на базе "Минск-2" и "Минск-22" и центральный вычислительный комплекс ОИЯИ на базе БЭСМ-6 /7/. При этом были решены три основные задачи:

- 1) разработка надежной линии связи между ЭВМ;
- 2) создание математического обеспечения для работы машин;
- 3) создание развитых, максимально автоматизированных программ обработки спектров и анализа данных.

В линии связи (длина 700 метров) использованы симметричные магистральные кабели (типа МКСБ 7x4x1,2 + 6x0,9), техническая скорость линии связи 500 Кбит/с по каждой паре кабеля. Система связи проработала 8 лет, показала высокую надежность. Через нее передано на БЭСМ-6 свыше четырех тысяч спектров и несколько тысяч массивов данных с результатами предварительной обработки (разметки). Эффективность системы определяется следующими показателями: обработка одного сложного спектра на малых машинах занимает часы, на БЭСМ-6 – минуты.

Недостаток промышленных анализаторов, особенно остро ощущавшийся в начале 70-х годов, вызвал необходимость создания многоходовой измерительной системы на базе МОЗУ ЭВМ типа "Минск-2" /8/.

Вторая глава посвящена разработке специализированных устройств и систем автоматизации измерений.

Для обработки бета-спектрограмм, получаемых на магнитных спектрографах, нами был разработан первый в Союзе автоматический микрофотометр (АМФ), работающий на линии с ЭВМ /9/. Магнитные бета-спектрографы используются для исследования спектров конверсионных электронов в широком диапазоне энергий (10+3500 кеВ). Информация регистрируется на пластинках с ядерными фотоэмульсиями и представляет собой спектры с высоким энергетическим разрешением – до 0,02+0,04%, благодаря чему отдельные спектрограммы содержат информацию в объеме от 8 до 50 тысяч каналов. Ручная обработка требует десятков часов на одну спектрограмму. Обычно одна спектрограмма фотометрируется несколько раз, и результат усредняется. Таким образом, эффективная обработка возможна только для прибора, работающего на линии с ЭВМ. Были разработаны две модификации АМФ: прибор с асинхронным приводом и оптикомеханической системой дискретизации отсчета /10/ и прибор с шаговым приводом /11, 12/ (рис.1). Обе модификации имеют базу фотометрирования 400x80 мм². Минимальный шаг в приборе с приводом от шаговых двигателей – 4 мкм в продольном направлении и 25 мкм – в поперечном. Скорость фотометрирования – до 10 мм/с независимо от величины шага. Точность установки положения каретки ±2 мкм. В приборах использована прямоотсчетная система, обеспечивающая максимальную скорость фотометрирования и минимальную сложность оптикомеханической системы. За счет стабилизации источника света, питания ФЭУ и большой скорости фотометрирования сведены к минимуму отрицательные качества прямоотсчетных систем /12/.

Предложен оригинальный метод измерения коэффициента пропускания оптического слоя τ . На это решение получено авторское свидетельство /13/.

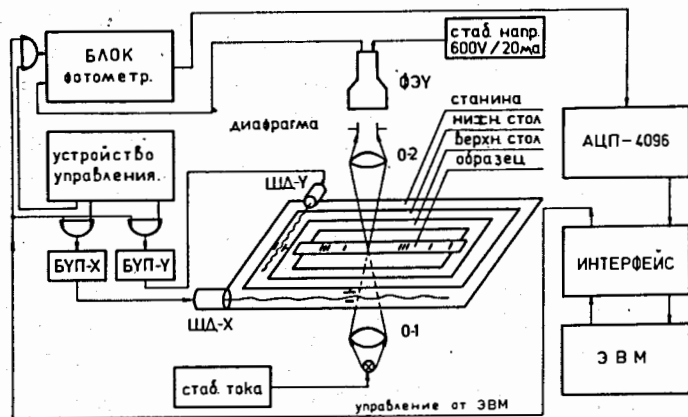


Рис.1 Блок-схема автоматического микрофотометра с шаговым приводом перемещения. БУП-Х, БУП-У – блоки управления шаговыми двигателями ШД-Х и ШД-У.

В работу устройства, действующего согласно относительному методу измерений, заложен следующий принцип. На вход фотоприемника последовательно подаются три световых потока: прошедший через измеряемый объект с плотностью d_u , прошедший через расположенный в одном канале измеряемый объект (d_u) и дополнительный поглотитель (d_g), суммарный поток через два независимых канала с объектом (d_u) и референтным поглотителем (d_p). Тогда

$$\tau = e^{-d_u} = \frac{e^{-d_p}}{1 - e^{-d_g}} \cdot \frac{U_1 - U_2}{U_3 - U_1} = C \frac{U_1 - U_2}{U_3 - U_1}, \quad (I)$$

где U_1, U_2 и U_3 – электрические сигналы, отвечающие световым потокам для трех указанных случаев измерений. При этом $U_i = U_0 + \varphi \Phi e^{-d_i}$, где U_0 – смещение начала характеристики преобразования измерительного канала, φ – коэффициент преобразования светового потока Φ в электрический сигнал. В данном случае измеряемая величина τ не зависит от U_0 и $\varphi \Phi$ (как в прототипе), а лишь зависит от двух констант и трех величин сигналов. Это позволяет существенно повысить точность измерений, введя небольшие изменения в оптико-механическую схему общепринятого варианта.

Разработанные приборы, методика измерений и обработки полученных спектров позволили в 100 раз повысить производительность труда

при обработке спектрограмм и поставить анализ содержащейся в них информации на надежную количественную основу /14/. За несколько лет эксплуатации на приборах обработано свыше 500 спектрограмм, получена обширная информация по конверсии ядерного излучения. АМФ является универсальным прибором и широко используется для обработки разнообразных оптических объектов: авторадиограмм, оптических спектрограмм, фотографий со спутников и т.д.

В ряде задач, в частности, при поиске сверхплотных ядер по возможности для них аномальному дефекту необходимо знать распределение по массам продуктов сепарации мишеней, облученных на ускорителях. При поиске в широком диапазоне – десятки массовых единиц – подходящим методом является снятие распределения бета-активности продуктов разделения на ленте приемного устройства масс-сепаратора. Для решения этой задачи были разработаны две системы, работавшие на линии с ЭВМ: одноканальный последовательный сканнер с шаговым приводом перемещения /15/, в котором лента с активностью движется относительно заколлимбированного бета-счетчика, и многоканальная система с параллельным просмотром всей ленты 120 гейгеровскими счетчиками /16/ (рис.2).

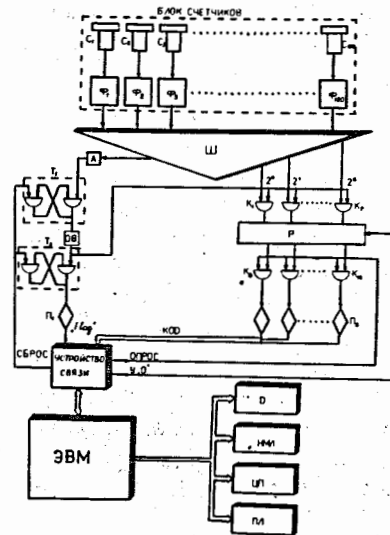


Рис.2 Многоканальная система для снятия распределения бета-активности.

- $C_1 - C_{120}$ – счетчики;
- $\Phi_1 - \Phi_{120}$ – формирователи;
- Ш – шифратор номера счетчика;
- А – схема исключения наложений;
- $K_1 - K_{14}$ – ключи; Р – регистр номера счетчика;
- $\Pi_1 - \Pi_8$ – схемы преобразования уровней сигнала.

Для последней системы нами разработана электроника отбора сигналов от счетчиков, кодирования их и передачи в ЭВМ.

Последовательный сканнер является универсальным автоматом для снятия распределения бета-активности на поверхности образцов (рабочее поле $400 \times 80 \text{ мм}^2$), однако,

имеет определенные ограничения при работе с короткоживущими изотопами, так как является одноканальным прибором (чувствительность 25 расп./с). Многоканальная система, являясь специализированной, имеет существенно более высокую чувствительность (0,2 расп./с) за счет расположения счетчиков вплотную к обследуемой поверхности и лучшее пространственное разрешение, благодаря оригинальному конструктивному решению узла приемника изотопов масс-сепаратора.

Для исследования распада радиоактивных ядер, ориентированных при сверхнизких температурах (~ 10 мК), на установке СПИН был создан специальный измерительный комплекс ^{17/}. Его назначение – обеспечить несколько типов измерений: регистрацию углового распределения γ -излучения радиоактивных ядер относительно ориентирующего магнитного поля (0, 90 и 180°), измерения ядерного магнитного резонанса на ориентированных ядрах наиболее чувствительным методом его детектирования по изменению анизотропии γ -излучения за счет резонансной деориентации, измерения поляризации γ -излучения ориентированных ядер.

Установка в целом включает в себя криогенную систему и измерительный модуль, состоящий из ПЦД, спектрометрической электроники и многоканальных анализаторов типа ICA-70, связанных 300 метровой линией с ЭВМ ^{18/}, на которую осуществляется передача большого объема информации (200–300 спектров за эксперимент). В настоящее время ведется разработка и создание нового измерительного модуля на базе ЭВМ SM-3, который помимо указанных измерений обеспечивает работу установки в режиме многомерного анализа для исследований возмущенных угловых корреляций при гелиевых температурах.

Измерительный модуль обеспечил в течение 1976–1980 годов выполнение обширной программы физических исследований нейтронодефицитных изотопов методом изучения распада ориентированных радиоактивных ядер. Измерено и обработано свыше 4000 спектров. Основная обработка данных ведется с помощью системы программ SIMP ^{19/} на ЭВМ БЭСМ-6 и ЭВМ ICL-72/4 (Прага). Предварительная обработка данных, контроль аппаратуры и термометрия в процессе эксперимента осуществляется малой ЭВМ.

Предложен одноимпульсный метод измерения сверхнизких температур, основанный на прецизионной спектрометрии импульсного сигнала разбаланса моста, отличающийся малой мощностью, подводимой к датчику сопротивления в ванне растворения рефрижератора ³He — ⁴He ^{20/} (получено авторское свидетельство).

В третьей главе I части диссертации описан многоуровневый аппаратный комплекс измерений и обработки информации в ядерной спектроскопии ^{22/} (рис.3). Система базируется на оборудовании спектрометрического комплекса ЛЯП ^{21/} и Вычислительного центра ОИЯИ в ЛБА.

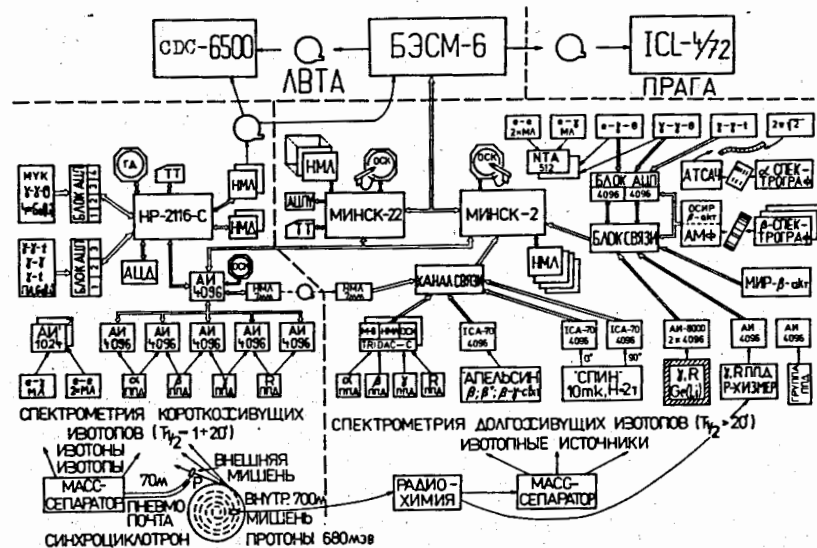


Рис.3 Многоуровневая система измерений, накопления и обработки информации в исследованиях по ядерной спектроскопии на базе синхротронного ЛЯП ОИЯИ (программа ЯСНАПП-I).

Первый уровень (детекторная аппаратура) – физические приборы, детекторы излучения и связанная с ними электроника преобразования и отбора аналоговых сигналов.

Второй уровень – многоканальные анализаторы (до 20 единиц), большая часть из которых имеет прямой выход на ЭВМ. В комплексе по изучению долгоживущих изотопов (ДЖИ) этот уровень неоднороден и связи анализаторов с ЭВМ осуществлены по радиальному принципу через два внешних канала ЭВМ "Минск-2". В комплексе по изучению короткоживущих изотопов (КЖИ) уровень представлен анализаторами типа AI-4096 (дополненными прецизионными АЦП на 4096 каналов), которые соединены в систему и имеют выход на ЭВМ и накопитель на узкой магнитной ленте через буферное накопительное устройство ²¹. Функции этого уровня: формирование с помощью детекторной аппаратуры различных распределений.

Третий уровень представляют ЭВМ: HP 2116C ²², "Минск-2" и "Минск-22". Введение новых режимов, внешних устройств, связей и разработка специального программного обеспечения позволили в течение многих лет эффективно использовать машины "Минск-2" и "Минск-22" для

²¹ С.В.Медведь и др. Сообщение ОИЯИ, IO-6883, Дубна, 1973.

²² С.В.Медведь и др. ПТЭ, 1975, № I, с.75.

накопления и обработки спектрометрической информации. Аппаратура этого уровня выполняет разнообразные функции:

- а) прием и хранение информации от многоканальных анализаторов;
- б) работа в линию с автоматическими приборами и детекторной аппаратурой (многомерные корреляционные измерения);
- в) предварительная обработка спектрометрической информации;
- г) экспрессная автоматическая обработка спектров;
- д) обработка сложных спектров;
- е) передача данных на мощные ЭВМ.

Функции а), б) обеспечиваются связями с анализаторами и специальным математическим обеспечением /33/. Задачи в), г) и д) обеспечиваются наличием осциллографов со световым карандашом, комплекса дисплейных программ /33/, программ экспрессного автоматического анализа спектров /37/, хорошо себя зарекомендовавшей программы обработки сложных участков спектров "КАТОК" * , программ обработки информации многомерных измерений **, калибровочных и других программ. Данные на машины более высокого уровня передаются по линии связи "Минск-2" ("Минск-22") - БЭСМ-6 /7/ или переносятся на магнитных лентах с ЭВМ HP 2116С.

Четвертый уровень - ЭВМ БЭСМ-6, CDC-6500 (ЛВТА ОИЯИ) и ICL -72/4 (Прага), используемые для полной обработки спектрометрической информации и анализа полученных данных. Подключение в систему четвертого уровня поставило обработку на более высокую ступень за счет создания и использования высокоэффективных программ /35/.

В исследованиях ДЖИ широко используется вся традиционная техника ядерной спектроскопии (для которой проведена автоматизация измерений, съема информации, обработки данных, получаемых на ядерных эмульсиях), а также разнообразные корреляционные многомерные спектрометры, созданные на базе полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов и магнитных приборов.

Рассмотрены особенности исследования КЖИ, связанные с временами их жизни и малостью сечения образования удаленных от полосы бета-стабильности изотопов. Достаточную статистику можно получать лишь накоплением информации в последовательных сериях измерений. Это выдвигает дополнительные требования к аппаратуре:

- а) высокие нагрузочные характеристики и стабильность при резко изменяющихся интенсивностях;
- б) высокий уровень автоматизации эксперимента;
- в) возможность проведения корреляционных измерений, дающих максимум информации в одном опыте;

* В.Гаджиков. ПТЭ, 1970, № 5, с.85.

** М.Гонусек, В.Д.Фромм. Сообщение ОИЯИ, IO-10007, Дубна, 1977.

г) наличие автоматических экспрессных программ, позволяющих за десятки секунд оценить данные и внести коррективы в условия эксперимента.

Эти требования определили особенности разработанного аппаратного комплекса и соответствующего математического обеспечения. Основная методика изучения короткоживущих изотопов основана на применении полупроводниковых спектрометров для различных видов излучения, установок для измерения времен жизни возбужденных состояний ядер на базе магнитных линз и установок многомерного анализа типа γ - γ -задержанных совпадений.

В течение периода 1967-1979 гг. аппаратура комплекса позволила выполнить на базе синхротронного ЛЯИ обширную программу исследований в области ядерной спектроскопии нейтрондефицитных изотопов. Измерено и обработано около 20 тысяч спектров, проведены сотни многомерных измерений, позволивших получить данные по совпадениям, угловым корреляциям и временам жизни возбужденных состояний ядер. Выполнена широкая программа радиохимических исследований, развита техника прецизионной спектроскопии ядерных излучений с использованием полупроводниковых детекторов.

Вторая часть диссертации посвящена вопросам корреляционных многомерных измерений в ядерной спектроскопии. Корреляционный анализ характеристик ядерного излучения приобретает все более важную роль в изучении структуры атомного ядра. В таких измерениях одновременно регистрируется энергия нескольких видов излучения и связывающие их корреляционные характеристики. Информация о γ - γ -, e - γ -, альфа- γ -совпадениях используется при построении схем распада ядер, то есть установлении системы возбужденных состояний и размещении между ними γ -переходов. Измерения временного интервала между испусканием двух квантов позволяют получить информацию о временах жизни возбужденных состояний ядер и определить вероятности электромагнитных переходов, чувствительные к деталям структуры ядра.

В свою очередь, пространственные корреляции, в том числе возмущенные магнитными и электрическими полями, при которых измеряется энергия излучения и угол между направлением вылета частиц, позволяют получить ценную информацию о спинах, четности, магнитных и квадрупольных моментах основных и возбужденных состояний ядер и мультипольном составе излучения.

Общим свойством корреляционных измерений различного типа с методической точки зрения является принадлежность их к многомерным измерениям, где общее число каналов регистрации определяется произведением, куда сомножителями входит число градаций, с которым измеряется каждый параметр. Типичные значения числа каналов лежат в диапазоне

$10^7 \div 10^{10}$. Это показывает, что проблема регистрации и обработки информации в корреляционных измерениях становится серьезной задачей, требующей специальных технических средств и методов.

Ограниченные возможности анализаторов и ряда малых машин потребовали разработки различных приемов выборочной регистрации информации или применения методов ее сжатия. На этом пути были сделаны оригинальные разработки и созданы установки, позволившие получить интересные физические результаты.

В данной части диссертации рассмотрен ряд вопросов, связанных с созданием корреляционных установок, используемых в ядерно-спектроскопических исследованиях, главным образом, с точки зрения обеспечения эффективной регистрации информации.

В первой главе описаны методы и комплекс аппаратуры для корреляционных измерений с отбором полезной информации методом цифровых окон на базе ЭВМ.

Принцип выборочной регистрации информации широко использовался в корреляционных измерениях. Однако применявшиеся для этих целей системы на базе аналоговых дифференциальных дискриминаторов и многоканальных анализаторов имеют ограниченные возможности как с точки зрения удобства организации нужных режимов, так и по возможностям регистрации. ЭВМ позволяют построить такие режимы существенно более эффективным способом, используя цифровые "окна" для задания многочисленных областей выборочной регистрации информации и возможности процессора для анализа и сортировки поступающих данных.

Рассмотрим реализацию такого режима на примере трехмерного анализа задержанных γ - γ -совпадений, цель которого — получить информацию о спектрах совпадений и временных распределениях между испусканием каскадных γ -квантов ^{/23/}. Часть памяти ЭВМ отводится под предварительное накопление одномерных интегральных спектров совпадений двух линейных трактов А и Б. Затем с помощью специальной программы и ОСК на этих спектрах размечаются "окна" — выбранные участки, для которых необходимо регистрировать ответные спектры совпадений. Для окон, установленных в спектре тракта А, регистрируются ответные спектры тракта Б. Кроме того, для указанных окон тракта А и тракта Б могут регистрироваться временные распределения (спектры) — между испусканием соответствующих γ -квантов. При этом программа разметки автоматически формирует так называемую шкалу, представляющую собой набор констант, определяющий начальный адрес записи в МОЗУ ЭВМ события тракта Б, совпавшего с "окном" в тракте А (вне окон константы равны нулю). Для временных спектров начальный адрес зоны МОЗУ для регистрации временных распределений определяется комбинацией соответствующих констант, присвоенных окнам в спектре А и спектре Б.

Режим анализа реализуется комбинацией аппаратных и программных средств, что делает его достаточно гибким для различных видов анализа и достаточно быстрым при выполнении операций опроса АЦП, выборки из памяти и записи событий в ее ячейки. Поскольку регистрация спектров осуществляется в интегрирующем режиме, то их количество определяется свободной от служебной информации (размеченные спектры, шкалы, программа) частью памяти и выбранным числом градаций для этих спектров.

По описанному выше принципу было создано несколько установок многомерного корреляционного анализа. Это система γ - γ -совпадений с использованием двух германиевых ^{/26/} или германиевого и скintилляционного детектора ^{/24/}, а также система рентген-гамма-совпадений ^{/23/}. Для измерения времен жизни возбужденных состояний ядер использовались две системы — установка двумерного анализа для измерения времен жизни возбужденных состояний на базе скintилляционного и полупроводникового детектора ^{/25/} и трехмерный анализатор задержанных совпадений с использованием двух полупроводниковых детекторов ^{/23/}. С целью эффективного изучения угловых корреляций был создан автоматизированный трехмерный спектрометр с двумя полупроводниковыми детекторами ^{/23/}. В интегрирующем режиме анализа можно установить до 64 окон для одного тракта и 21 окно для другого тракта для каждого из трех углов взаимного расположения детекторов. Такой режим позволяет получить за один сеанс измерений всю необходимую информацию по угловым корреляциям для данного ядра при оперативной памяти ЭВМ до 32 К слов.

Вторая глава посвящена применению некоторых методов сжатия информации в постановке экспериментов по γ - γ -совпадениям. Описывается предложенный и защищенный авторским свидетельством ^{/27/} способ регистрации двумерных спектров совпадений с уменьшением необходимого объема памяти без потери существенной информации. Достигается это тем, что перед записью информации осуществляется переход от поля двумерной матрицы, определяемой числом каналов в спектре каждого параметра N , к полю двумерной матрицы, определяемой числом участков M , на которые разбивается спектр каждого параметра. Для регистрации каждого возможного варианта совпадений между различными участками отводится один канал памяти. Выигрыш в объеме памяти определяется отношением N^2/M^2 и достигает $\sim 10^3$. Возможен учет фоновых эффектов в процессе накопления информации с регистрацией уже бесфоновых данных. Описано несколько вариантов реализации такого режима измерений с уплотнением данных ^{/28/}.

Другим методом уплотнения информации является изменение формы записи каждого многомерного события путем использования функционального преобразования составляющих его кодов ^{/29/}. Результатом преоб-

разования является число (функция параметров), которое и регистрируется по соответствующему адресу. При этом в преобразования включаются и такие операции (например, извлечение корня из произведения), которые ограничивают масштаб числа в соответствии с реальным объемом памяти ЭВМ. Это позволяет регистрировать многомерную информацию как обычную одномерную в интегрирующем режиме накопления.

Эксперименты по Y - Y -совпадениям в такой постановке показали, что, сохраняя информацию о совпадениях, можно обходиться числом каналов на уровне $(3+4)N$ вместо N^2 при обычной регистрации, где N - число уровней преобразования АЦП. Кроме того, можно осуществлять визуальный контроль результатов в ходе эксперимента, а также легко проводить количественную обработку информации, что существенно при исследованиях короткоживущих изотопов.

На принципе преобразования кодов построен оригинальный спектрометр суммарных совпадений $^{30}/$, также защищенный авторским свидетельством, позволяющий различать между собой Y -совпадения с одинаковыми значениями разностей между крайними энергетическими уровнями, но разными наборами компонент. Это достигается одновременной регистрацией нескольких разных преобразований.

Третья глава посвящена вопросам многомерных измерений при исследованиях КЖИ. Важным условием при этом является возможность получения максимума информации в интервалы времени, соизмеримые с периодом полураспада источников. Поэтому большой интерес представляет постановка трехмерных измерений в режиме амплитуда-амплитуда-время с регистрацией полной информации обо всех параметрах в широком диапазоне их изменения. Такая постановка возможна лишь в режиме последовательной записи трех соответствующих кодов на магнитные носители через ЭВМ. Трудности, связанные с последующей сортировкой информации, постепенно преодолеваются путем совершенствования методов сортировки и использования быстрых современных ЭВМ с объемом памяти в несколько мегабайт.

Регистрация всей информации существенно упрощает постановку эксперимента, так как не требует установки цифровых окон, что связано с затратами времени и необходимостью предварительных данных, которые часто отсутствуют.

Была создана установка трехмерного анализа, в которой могут использоваться два полупроводниковых или полупроводниковый и сцинтилляционный детекторы $^{31}/$ (рис.4). Для связи трех АЦП на 4096 каналов, используемых в амплитудных и временном трактах, с ЭВМ HP 2116С разработан специальный интерфейс $^{32}/$, позволяющий вести трехмерные, двумерные и одномерные измерения с тремя спектрометрическими трактами.

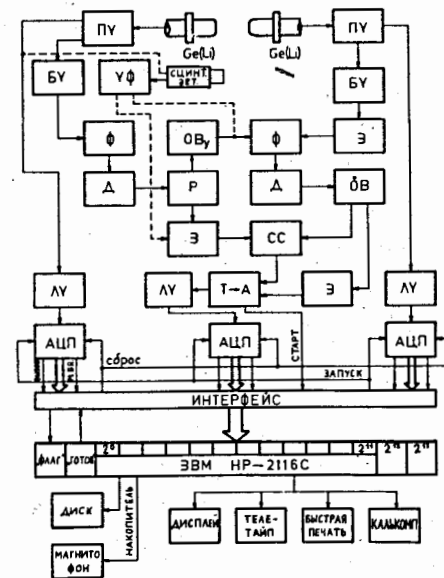


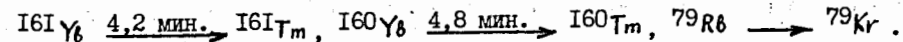
Рис.4 Блок-схема установки трехмерного анализа Y - Y -совпадений на базе ЭВМ HP 2116С.

ПУ - предусилители;
ЛУ - усилители; БУ - быстрые усилители;
УФ, Ф - формирователи;
З - задержка; Д - дискриминаторы; Р - разветвитель; СС - схема совпадений; Т-А - конвертер время-амплитуда.

Оптимизация алгоритма сортировки позволила в 20 раз ускорить этот процесс по сравнению с обычным подходом. Система программ, используемая в интерактивном режиме, обеспечивает накопление информации,

контроль хода эксперимента и полную обработку данных. Высокая эффективность системы в значительной мере определяется возможностями ЭВМ и подключенных к ней внешних устройств (диск, НМЛ, графический и алфавитно-цифровой дисплей, графопостроитель).

Временное разрешение установки при использовании в ней сцинтилляционного и $Ge(Li)$ -детекторов позволяет определять прямыми измерениями времена жизни в области $T_{1/2} \geq 5$ нс. Определение меньших времен осуществляют с использованием метода сдвига центра тяжести временных распределений. Данная установка позволяет успешно реализовать этот метод, так как в полном трехмерном спектре всегда содержатся наряду с исследуемыми также калибровочные данные (мгновенные совпадения в широком диапазоне энергий), что повышает точность метода. Описанная установка отличается от всех предыдущих универсальностью и по своим параметрам не уступает лучшим установкам этого типа в мире. В течение четырех лет эксплуатации на ней выполнен большой цикл физических исследований, главным образом в области короткоживущих изотопов с периодом полураспада выше двух минут. Приводятся полученные на установке физические результаты по схемам распада и измерению времен жизни возбужденных состояний ядер при изучении распада



Третья часть диссертации посвящена обработке спектрометрической информации.

В I главе рассмотрены предпосылки и задачи обработки спектрометрической информации на базе обобщенной структуры измерительного центра (рис.5), функций и возможностей его аппаратуры и потоков информации, характерных для интенсивных ядерно-спектроскопических исследований.

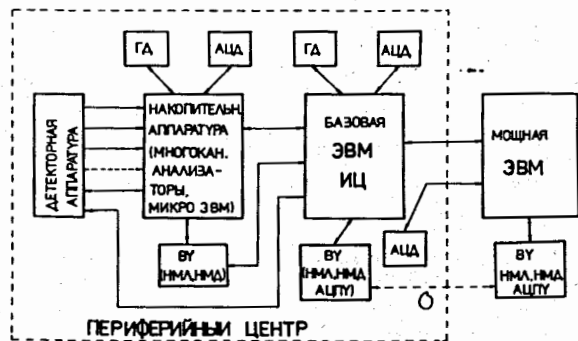


Рис.5 Обобщенная структура спектрометрического измерительного центра (ГД и АЦД – графический и алфавитно-цифровой дисплей, соответственно).

Опыт показывает, что целесообразно использовать вариант, когда начальные этапы обработки, требующие интерактивного режима работы, решаются на уровне периферийного измерительного центра (ИЦ), а обработка большого потока подготовленных, таким образом, задач выполняется мощными ЭВМ, на которые данные и дополнительная информация передаются по линии связи или переносятся на магнитных носителях. При этом техника периферийного ИЦ освобождается для обеспечения задач, где эффективность ее наиболее высока. Такая система достигает максимальной эффективности при организации оперативной двухсторонней связи между ИЦ и мощной ЭВМ и возможности для экспериментатора работать со всем комплексом вычислительной техники со своего рабочего места.

С появлением ПЦД большая часть обработки приходится на анализ сложных γ -спектров. Задача обработки состоит в определении наборов энергий и относительных интенсивностей линий наблюдаемого γ -спектра по заданному спектру импульсов, то есть является обратной задачей. Известны два основных подхода к обработке γ -спектров: метод последовательного вычитания компонент (ПВК) и метод анализа фотопиков (МАП).

Метод ПВК успешно используется лишь при наличии большого объема предварительной информации и поэтому применим только в частных случаях. МАП – может применяться при сравнительно небольшом количестве предварительной информации и является поэтому универсальным и наиболее широко используемым в настоящее время. На рис.6 представлена общая схема преобразования спектрометрической информации в данные о γ -спектре при использовании МАП. Формулируются и рассматриваются в математической постановке задачи, к которым сводится метод анализа пиков.

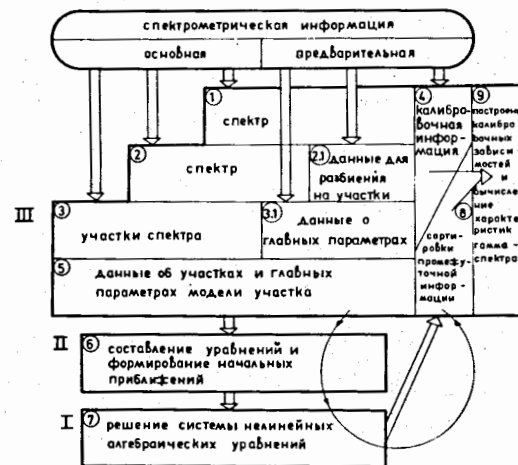


Рис.6 Общая схема преобразования спектрометрической информации в данные о γ -спектре при использовании метода анализа пиков.

Во второй главе рассмотрены различные реализации МАП. Соединение осциллографического дисплея, ЭВМ и светового карандаша как средства оперативной связи между ними открыло новые возможности в обработке и представлении информации с участием человека.

Информационная емкость памяти ЭВМ становится доступной человеку через дисплей практически мгновенно и в нужной форме. С другой стороны, способности человека в опознавании образов и "осмысливании" информации дополняются недоступной человеку реакцией и аналитическими (счетными) возможностями ЭВМ. Вывод на экран функциональной "клавиатуры" в виде светящихся символов обеспечивает высокую оперативность связи и облегчает работу оператора. Реализация технических возможностей, заложенных в системе ЭВМ-дисплей-СК, осуществляется через соответствующее программное обеспечение [33].

Программы, обслуживающие дисплей, состоят из набора подпрограмм, переход к которым осуществляется с помощью СК после пометки соответствующего символа. Обязательными для всех дисплейных программ являются подпрограммы формирования изображения, преобразующие исходные данные в X-Y координаты на экране дисплея. Участок памяти ЭВМ с преобразованной исходной информацией и набором символов представляет собой формат, который выводится на экран. Символы – это константы, определяющие начало подпрограмм.

Разработанное программное обеспечение можно разбить на три основные группы /33/.

1. Обработка простых спектров (участков спектров) – фактически автоматизация применявшейся ранее "ручной" методики. При указании СК точки спектра происходит увеличение ее яркости, если указан символ – переход к подпрограмме, выполняющей одну из функций: вычисление площади пиков и фона с выдачей результатов на печать, нахождение в заданном интервале центра тяжести, сдвиг спектра для просмотра, изменение масштаба, сглаживание участка и т.д.

2. Предварительная обработка сложных спектров (участков) – задание начальных приближений для программ точного машинного анализа информации. Характерными для данного режима обработки являются операции: запоминание начала и конца сложного участка и отмеченных СК максимумов пиков и "долин" на участке, запись сложного участка с данными на НМЛ и др. Предусмотрен режим обработки серий спектров, когда результат одной разметки переносится на спектры всей серии.

3. Программы обслуживания двумерного анализа на базе ЭВМ. Они включают программы разметки цифровых окон, программы сортировки и собственно программы обработки спектров совпадений. Последние производят обработку по довольно сложному алгоритму с учетом особенностей фона, характерных для регистрации γ - γ -совпадений. Средние затраты времени при обработке совпадений с 12 цифровыми окнами сократились с полутора-двух недель до полутора часов.

Перечисленные программы позволили существенно повысить производительность труда экспериментаторов и создать условия (программы разметки сложных участков) для эффективной массовой обработки спектров с использованием специальных математических методов.

Сравнение результатов обработки γ -спектров различными программами и детальное изучение задачи показывают, что создание универсальной программы наталкивается на принципиальные трудности /34/. Любой конкретный алгоритм, успешно применяемый при обработке значительной части информации, ненадежен при обработке остальной ее части. Программа обработки будет универсальной, если она располагает наборами алгоритмов, причем выбор одного из них обуславливается характером данных. Этим требованиям удовлетворяет разработанная нами система программ SIMP /35/.

Особенностью системы является заложенная в ее структуре возможность использования различных алгоритмов для решения всех частных задач, метода анализа пиков. Конкретная программа в системе SIMP представляет собой организующую программу, которая последовательно

обращается к фиксированным алгоритмам, реализующим частные задачи.

В систему включены разные алгоритмы для решения одинаковых задач, совокупность таких алгоритмов называется блоком, всего в системе пять блоков (рис.7). Первый блок содержит подпрограммы определения параметров пиков, второй – подпрограммы составления уравнений соответственно конкретным моделям. К третьему блоку относятся организующие подпрограммы калибровки, вычисления характеристик γ -спектра, сортировки, выдачи результатов. Основные программы, вызывающие головные подпрограммы третьего блока, объединены в четвертый блок – блок "шапок". Сопутствующие программы (см. рис.7) составляют пятый блок.

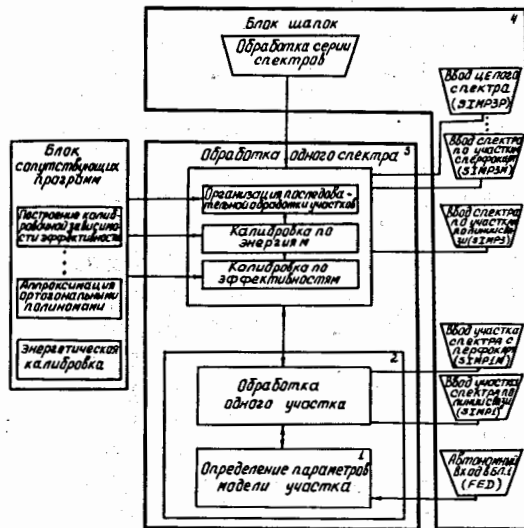


Рис.7 Блок-схема системы программ SIMP.

Для определения параметров нелинейной модели экспериментальных данных используются два алгоритма: Левенберга-Маркардта и "минимальных поправок". Первый – для быстрой обработки значительной части информации, второй – для анализа сложных участков спектров. Алгоритмом Левенберга-Маркардта мы называем итерационный процесс

$$x_0: x_{k+1} = x_k - \beta_k D_k [D_k F'(x_k) V F'(x_k) D_k + \alpha_k I]^{-1} D_k F'(x_k) V F(x_k) \quad (2)$$

минимизации функционала взвешенной невязки

$$\Phi(x) = \sum_{j=1}^m V_j (U(z_j) - S_j)^2, \quad (3)$$

где $U(z_j)$ – модель информативного участка спектра S_j ($j=1, \dots, m$) зависящая от параметров $X = (x_1, \dots, x_n)$, и $\sqrt{V_j} = \sqrt{S_j}$. При этом $F(x) = U(z) - S$, $F'(x)$ – якобиан $F(x)$ относительно x , $V = \text{diag}(V_1, \dots, V_m)$, D – матрица масштабирования. α_k и β_k – управляющие параметры итерационного процесса, определяемые экспериментально. Сравнение обработки с рядом других широко используемых

алгоритмов показало, что алгоритм Левенберга-Маркардта более устойчив на особо сложных участках спектров.

Система $SIMP$ написана на ФОРТРАНе и поставлена на ЭВМ БЭСМ-6 в ОИЯИ, ЭВМ ICL-72/4 в Праге и ЭВМ ЕС-1020 в Софии. На базе системы $SIMP$ создан комплекс программ прикладного назначения.^{*)}

Средние затраты времени на обработку одного пика зависят от их количества в спектре и составляют от 0,2 с при 30 пиках до 1,5 с при 200 пиках.

Приведены сравнительные данные обработки сложных спектров программами комплекса $SIMP$ и рядом других известных программ.

К настоящему времени число спектров, обработанных программами системы $SIMP$ в ОИЯИ, составляет около 4500, большая часть из которых была передана по линии связи "Минск-2" - БЭСМ-6. Создание комплекса программ $SIMP$ позволило поставить обработку сложных γ -спектров на более высокий уровень с использованием новых алгоритмов и возможностей мощной ЭВМ и значительно разгрузило машины периферийного центра от времязатрат для них задачи.

Далее рассмотрены вопросы, связанные с разработкой и эффективностью использования полностью автоматизированных программ анализа спектров γ -излучения. В большинстве существующих программ полностью автоматизирован лишь окончательный этап обработки - точное определение параметров математической модели спектра. Предварительный этап обработки - приближенное определение положений пиков (исходные данные для итерационного процесса) - трудно поддается алгоритмизации и поэтому обычно предоставляется экспериментатору. Такой подход дает хорошие результаты и вполне приемлем, если поток информации невелик и нет потребности в срочной обработке. Однако ряд прикладных задач - различные виды активационного анализа, а в ядерной спектроскопии обработка радиохимической методики и исследования КЖИ характеризуются большими потоками информации и необходимостью ее экспрессного анализа.

В связи с этим в НЭОЯС и РК ЛЯП в течение ряда лет велась работа по созданию полностью автоматизированных программ обработки γ -спектров /17/, в том числе экспрессных, использующих для решения задачи минимизации функционала невязки метод статистической подгонки, разработанный Г.Элером /2/. Наиболее развитой программой этого типа является система ЭПОС-75 /36,37/, внедренная на ЭВМ БЭСМ-6. Кроме того, существует набор автоматических экспрессных программ, представляющих собой упрощенные варианты системы ЭПОС-75, ориентированные на частные задачи и приспособленные к возможностям машин, на которых они непосредственно используются.

*) Л.И.Москвин и др. АЭ, 1975, т.39, в.5, с.363.

В ЭПОС-75 задача обработки решается в несколько этапов: I - автоматический поиск пиков, приближенное определение их параметров, разбиение спектра на участки; II - аппроксимация участков спектра, содержащих один пик (синглет), функцией Гаусса по методу статистической подгонки, точное определение параметров модели; III - обработка методом статистической подгонки всех участков спектра, содержащих более одного пика; IV - анализ участков спектра, на которых обработка по критерию χ^2 или полуширине линий не была успешной на III этапе.

Тщательное сравнительное исследование программы ЭПОС-75 по обработке большого числа экспериментальных спектров показало: среднее время обработки на один пик - 0,6 с (200 пиков в спектре, БЭСМ-6). Удовлетворительно обрабатывается уже на III этапе 80-85% и окончательно на этапе IV - (90-95)% пиков. Таким образом, ЭПОС-75 обеспечивает автоматическую обработку спектров для решения многих задач.

Простейший вариант программы был реализован на ЭВМ "Минск-2", что позволило автоматизировать радиохимические исследования и поставить на количественную основу с экспрессным анализом изучение динамики физико-химических процессов при отработке методики выделения радиоактивных химических элементов из облученных мишеней. За несколько лет измерено и обработано ~ 12000 γ -спектров. Был разработан специальный вариант программы для ЭВМ М-6000, ориентированный для активационного анализа. Один из вариантов программы передан в НИИАР (СССР), разработан и внедрен вариант для ЭВМ ZRA-2 Вычислительного центра Института ядерных исследований в Россендорфе (ГДР).

Третья глава посвящена проблеме обработки информации многомерных спектрометрических измерений. Описаны впервые разработанные методы и программы, позволяющие с достаточно высокой эффективностью осуществлять полностью автоматизированную обработку многомерных спектров, используя мощные ЭВМ и современные математические методы, в том числе для предварительного сжатия информации, упрощающего последующий анализ.

Постановка задачи определялась увеличением удельного веса многомерных измерений в ядерной спектроскопии и создавшимся в последние годы большим разрывом между достаточно развитыми аппаратными средствами многомерных измерений и методами обработки больших объемов получаемой информации.

Для обработки спектров задержанных γ - γ -совпадений разработаны два варианта программ: вариант полностью автоматического анализа, идущего без участия человека /38/, и вариант с возможностью контроля результатов обработки и коррекции со стороны экспериментатора на различных этапах анализа /39/. Программы написаны на ФОРТРАНе и реализованы на ЭВМ ЕС-1040, имеющей оперативную память в один мегабайт.

В последнем варианте программы используется графический дисплей типа GD-7I, связанный с ЕС-1040.

Программа автоматически разбивает одну из осей (например, Y) на ряд зон, являющихся произвольными окнами, в которые набираются одномерные спектры вдоль другой оси (X). Эти спектры автоматически анализируются на наличие пиков, что позволяет установить окна вдоль оси X . В эти окна набираются спектры уже вдоль оси Y , что позволяет в конечном счете определить двумерные окна-зоны возможных совпадений. В эти зоны с использованием эффективного метода двойной индексации /38/ осуществляется набор двумерных спектров совпадений. Разрешение мультиплетов в зонах осуществляется путем анализа их интегральных одномерных спектров - проекций. Это дает начальные приближения параметров пиков. Сами параметры определяются аппроксимацией двумерных областей двумерной аналитической гауссовой моделью. Разработана автоматическая методика учета случайных совпадений на основе анализа пиков самосовпадений или использования спектров задержанных совпадений. Анализ трехмерного А-А-Т спектра, содержащего $2 \cdot 10^6$ событий и около 200 пиков совпадений, занимает два часа работы ЭВМ ($3 \cdot 10^5$ операций в секунду). Время обработки сложного спектра с контролем и коррекцией составляет около 3 часов.

Трудоемкость обработки многомерной информации, необходимость использования для накопления и хранения данных большого количества магнитных лент - с одной стороны, и относительно небольшая плотность полезной информации в полном объеме накопленных данных - с другой стороны, выдвигают задачу поиска эффективных методов сжатия данных многомерных измерений. Описанию системы обработки с использованием сжатия данных по методу разложения полной экспериментальной матрицы по сингулярным значениям (метод SVD - Single Value Decomposition) /40/ предшествует краткий обзор и систематизация методов сжатия данных, применяемых в спектрометрии. Методы сжатия делятся на три группы: методы, вытекающие из классической теории информации (оптимальное кодирование и т.д.); методы, основанные на обработке (оценка количества информации по А.Н.Колмогорову)^{*)}; методы, основанные на разложении по системам линейно-независимых функций (оценка информации по критерию "сложности объекта" А.Н.Колмогорова)^{*)}. Оцениваются методы по степени сжатия данных, обратимости, быстродействию, вносимым искажениям. Наиболее полно удовлетворяют этим требованиям метод окон, некоторые виды преобразования данных, учитывающие их специфику, и сингулярное разложение. Последний метод обладает еще и свойством фильтрации помех и не требует наличия априорной информации.

^{*)} А.Н.Колмогоров. В кн: "Проблемы передачи информации", т. I, в. 2, 1965, с. 3.

Суть метода SVD состоит в следующем: любая действительная матрица A представима в виде:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^R \sigma_k U_{ik} V_{jk}, \quad (4)$$

где R - ранг матрицы A ; σ_k - ее сингулярные значения; U и V - матрицы, составленные из собственных ортонормированных векторов матриц AA^T и $A^T A$. Для записи левой части нужно $N \times N$ ячеек, а для правой - $2NR + R$. Разработана методика и программы, позволяющие определять истинный ранг матрицы экспериментальных данных, который в реальном спектре завышен за счет искажений. В новом представлении данные записываются более компактно (от пяти до десятков раз). Это позволяет упростить их хранение и обработку (сжатые данные легко разворачиваются для любого вида обработки), осуществлять обработку экспрессно, что ранее было недоступно. Возможно применение такого сжатия в он-лайн режиме (достигнута скорость регистрации со сжатием в $200+400$ событий в секунду), что позволяет упростить аппаратуру для многомерных измерений.

В последнем параграфе 3 главы излагается предложенное новое решение обратной задачи обработки: восстановления схемы распада на основе строгого формального-логического анализа матрицы Y - Y -совпадений /41/. Задача построения схем распада по экспериментальным данным является одной из наиболее сложных и трудоемких в ядерной спектроскопии.

Суть предлагаемого подхода заключается в выделении всех возможных полных мод распада ядра (полная мода - путь распада, каскад Y -переходов одного конкретного ядра) и последующего согласованного их упорядочения. С этой целью в симметричной экспериментальной матрице, строки и столбцы которой соответствуют энергии определенных Y -переходов, наличие совпадений отмечается "1", отсутствие - "0". Нулевая главная диагональ такой матрицы заменяется на единичную. Показано, что логическими операциями над строками (столбцами) матрицы можно выделить и упорядочить все моды. Методика выделения и согласования мод обоснована тремя специальными теоремами.

В приложении приводятся результаты ряда физических исследований, выполненных на аппаратуре комплекса при непосредственном участии автора диссертации и характеризующих возможности описанного комплекса.

К наиболее ранним исследованиям относится изучение распада $^{182}\text{Os} \rightarrow ^{182}\text{Re}$ ($T_{1/2} = 22$ час.) /42/. Измерения с ПЦД, в том числе Y - Y -совпадений, позволили сделать существенный шаг вперед по сравнению с предыдущими исследованиями этого распада. Были получены данные об энергиях и относительных интенсивностях конверсионных электронов и

γ -лучей ^{182}Re (измерено 34 перехода, ранее было известно лишь 5). Приводятся значения КВК, вычисленные по данным наших измерений.

На основе всей совокупности полученных данных построена схема распада ^{182}Os и приписаны с достаточной определенностью квантовые характеристики основному и ряду возбужденных состояний ^{182}Re .

Уровни ^{145}Sm , возбуждаемые при распаде ^{145}Eu /43/ ($T_{1/2}=5,9_{\pm 0,7}$ д). Сводная таблица содержит данные для 76 γ -переходов и интенсивности соответствующих конверсионных электронов. Определены коэффициенты конверсии α_K и мультипольный состав излучения. В области энергий γ -квантов до 900 кэВ обнаружено 19 переходов впервые, 13 новых переходов измерены в области энергий от 900 до 2600 кэВ. Сравнением экспериментальных и теоретических КВК впервые определены мультипольности для 11 переходов.

Впервые измерены γ - γ -совпадения при распаде ^{145}Eu с использованием двух $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторов /24/ и для данного распада впервые произведена их количественная обработка. Введено 20 возбужденных уровней ^{145}Sm с энергиями выше 1830 кэВ.

Проведенные сравнения теоретических расчетов с экспериментальными данными подтверждают представления о сложном характере возбужденных состояний в ядре ^{145}Sm , для описания которых необходимо учитывать связь одночастичных состояний и коллективных возбуждений ос-това.

В переходной области четно-нечетных изотопов диспрозия с $A=155$, 157, 159, 161 наибольший интерес представляет ядро ^{155}Dy , лежащее на границе области ядер со статически равновесной деформацией. С целью дополнения полученной ранее информации и разрешения ряда противоречий было проведено детальное комплексное исследование возбужденных уровней ^{155}Dy , заселяемых при бета-распаде ^{155}Ho ($T_{1/2}=48$ мин.) /44/. Изучались γ -спектры, спектры конверсионных электронов, e - γ - и γ - γ -совпадения /31/.

Для подавляющей части переходов вплоть до энергии 1333 кэВ измерены интенсивности электронов конверсии. В области до 1333 кэВ вновь найдено 28 γ -переходов, спектры γ -лучей выше 1333 кэВ изучены впервые. Впервые определены мультипольности для ряда переходов и уточнены характеристики некоторых уровней. На основе этих данных предложена схема распада ^{155}Ho .

На установке СПИИ нами проводится систематическое изучение распада нечетных изотопов тербия с $A=147+155$ /45-49/, ориентированных при СМТ в гадолиниевой матрице. Эта область ядер интенсивно исследуется в связи с обнаружением ряда данных, указывающих на возможность существования при $Z = 64$ замкнутой оболочки.

Измерены угловые распределения интенсивностей γ -излучения $W(\theta)$ при температуре образца тербия в гадолинии ниже 20 мК и температурные зависимости угловых распределений $W(\theta, T)$ в диапазоне температур $T = 15+80$ мК. Анализ зависимости $W(\theta, T)$ позволил впервые определить значения параметров сверхтонкого магнитного дипольного расщепления $a_0 = \frac{\mu_{\text{eff}}}{I}$ для ^{153}Tb (Gd) и ^{155}Tb (Gd). Из этих данных оценены величины магнитных дипольных моментов основных состояний ядер ^{153}Tb ($\mu > 3,1$ я.м.) и ^{155}Tb ($\mu = 1,5+2,3$ я.м.). Определены спины ряда уровней ^{153}Gd и мультипольности переходов между ними.

Распад ориентированных ядер $^{147}, ^{149}, ^{151}\text{Tb}$ не проявил анизотропии в угловых распределениях γ -излучения /45, 48/, что не противоречит значениям спинов материнских ядер 1/2, но допускает значения 3/2. Получены новые данные по низкоэнергетичным γ -переходам /46/ для распада ориентированных ядер ^{153}Tb .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты настоящей работы могут быть кратко сформулированы в виде следующих выводов:

1. Впервые разработан и реализован комплексный подход, включающий методы, аппаратуру и программные средства, обеспечившие автоматизацию измерений и обработку спектрометрической информации в исследованиях по ядерной спектроскопии и радиохимии на базе широкого использования вычислительной техники и современных математических методов анализа экспериментальных данных.

2. Впервые разработана и создана многоуровневая система измерений, накопления и обработки информации в ядерной спектроскопии, связывающая в единый комплекс детекторную аппаратуру, многоканальные анализаторы, малые ЭВМ и мощные машины.

Созданы средства визуального представления спектрометрической информации и работы с ЭВМ в интерактивном режиме, интерфейсные устройства, обеспечивающие использование малых ЭВМ в различных режимах обмена информацией с многоканальными анализаторами и другими ЭВМ и их прямую работу с автоматическими устройствами и детекторной аппаратурой в режимах многомерного анализа. На базе этой системы в период 1967-1980 гг. выполнена широкая программа ядерно-спектроскопических и радиохимических исследований на синхротроне ЛЯП ОИЯИ с энергией протонов 680 МэВ (программа ЯСНАП).

3. Создан комплекс автоматических устройств, работающих на линии с ЭВМ:

а) Первый в Союзе автоматический микрофотометр на линии с ЭВМ и

прецизионный автоматический микрофотометр с шаговым приводом перемещения каретки по обеим осям, обеспечивающие автоматизацию фотометрирования бета-спектрограмм, получаемых на магнитных спектрографах (повышение производительности труда в 100 раз) и позволившие создать базу для массового количественного анализа информации, получаемой на этих приборах. Разработана методика анализа спектрограмм и оценки получаемых ошибок обработки.

Предложен оригинальный метод измерения коэффициента пропускания τ оптического слоя (получено авторское свидетельство) /14/.

б) Два варианта устройств для снятия распределения бета-активности на ленте приемного устройства масс-сепаратора: универсальный одноканальный сканнер, позволяющий снимать распределение активности на поверхности размером $80 \times 400 \text{ мм}^2$, и специализированная многоканальная система, обеспечивающая параллельное измерение бета-активности 120 счетчиками с высокой чувствительностью и улучшенным пространственным разрешением. Эти устройства позволили провести методические исследования и начать систематические поиски сверхплотных ядер по возможному для них аномальному дефекту массы.

4. Создан и автоматизирован комплекс установок для корреляционных измерений типа γ - γ - и e - γ -совпадений, β - γ -, γ - γ - и e - γ -угловых и возмущенных угловых корреляций, позволивший осуществлять эти измерения на базе малых ЭВМ в эффективных режимах выборочной регистрации информации, регистрации со сжатием данных, а γ - γ - и γ - γ - t - анализ в наиболее полной форме с записью значений двух или трех параметров во всем диапазоне их регистрации. Установка трехмерного амплитудно-временного анализа с регистрацией энергетической и временной информации в полном объеме по своим параметрам не уступает лучшим установкам такого типа в мире. Она обеспечила высокую эффективность исследований схем распада и времен жизни возбужденных состояний короткоживущих изотопов. В этих разработках реализованы два оригинальных предложения: метод регистрации каскадных переходов и анализатор совпадений со сжатием информации по обоим регистрируемым параметрам, защищенные авторскими свидетельствами /27,28/.

5. Создан измерительный модуль установки СПИН для исследования углового распределения γ -излучения радиоактивных ядер, ориентированных при сверхнизких температурах, измерений ЯМР и поляризации γ -излучения.

Модуль установки включает полупроводниковые спектрометры, многоканальные анализаторы, связанные с ЭВМ и автономными накопителями на магнитной ленте, и систему для измерений γ - γ -угловых корреляций при гелиевых температурах.

Разработан оригинальный метод одноимпульсного измерения температуры в диапазоне от нескольких единиц до десятков милликельвинов, снижающий на два порядка подводимую к датчику тепловую мощность (получено авторское свидетельство) /20/.

6. Разработан и внедрен комплекс программ, обеспечивающих связь и работу аппаратуры всех уровней системы измерений, накопления и обработки информации. Разработаны и внедрены методы и программы обработки спектрометрической информации и, в частности, следующие системы программного обеспечения:

а) комплекс программ обработки спектрометрической информации в интерактивном режиме с использованием графического дисплея со световым карандашом, позволивший автоматизировать "ручные" процессы обработки спектров и задание начальных приближений для программ разложения мультиплетов неразрешенных линий;

б) комплекс программ автоматической экспрессной обработки γ -спектров, внедренный на ряде ЭВМ разного класса в ОИЯИ и других организациях и используемый для быстрого количественного анализа в радиохимических исследованиях, определении продуктов деления, загрязнения среды, он-лайн экспериментах на ускорителях;

в) система программ анализа сложных спектров *SIMP* с модульной структурой, позволяющей выбирать необходимую конфигурацию алгоритмов обработки. Программы *SIMP* внедрены в ОИЯИ (БЭСМ-6), Болгарии (ЕС-1020) и Чехословакии (ЭВМ ICL-72/4);

г) впервые разработанная система автоматизированных и полностью автоматических программ анализа спектров двумерных и трехмерных (задержанных) γ - γ -совпадений, в том числе со сжатием данных методом разложения по сингулярным значениям (*SVD*-разложение), реализованная на ЭВМ ЕС-1040 ИЦ ЛЯП ОИЯИ. Программы позволяют обрабатывать результаты многомерного анализа в течение нескольких часов, а с применением методов сжатия данных - за десятки минут, что создает возможности для экспрессного анализа информации в ходе эксперимента.

7. Проведены анализ и систематика методов сжатия данных применительно к многомерным измерениям и обработке информации в задачах физики низких энергий.

8. Предложен и обоснован новый метод восстановления схем распада ядер на основе формально-логического анализа матрицы γ - γ -совпадений.

9. С участием автора диссертации на аппаратуре комплекса выполнен ряд физических исследований свойств нейтронодефицитных изотопов, представляющий самостоятельный интерес и характеризующий возможности комплекса в плане измерений и обработки экспериментальных данных.

Детально исследованы схемы распада $^{182}\text{Os} \rightarrow ^{182}\text{Re}$; $^{145}\text{Eu} \rightarrow ^{145}\text{Sm}$; $^{155}\text{Ho} \rightarrow ^{155}\text{Dy}$. Проведены исследования распада ориентированных при сверхнизких температурах нечетных изотопов тербия с $A = 147, 149, 151, 153, 155$, в ходе которых определены спины основных и ряда возбужденных состояний, мультипольный состав переходов, впервые получены значения параметров сверхтонкого магнитного дипольного расщепления для ядер ^{153}Tb (нижняя граница) и ^{155}Tb в гадолинии, оценены магнитные дипольные моменты основных состояний этих ядер.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.М.Цупко-Ситников. Организация накопления и обработки информации в физике низких энергий. В кн.: ЭВМ в экспериментальной физике. П школа ОИЯИ, Алшшта, 1970. ОИЯИ, IO-5255, Дубна, 1970, стр.125-138.
2. В.М.Цупко-Ситников. Автоматизация обработки спектрометрической информации в прикладных задачах и научных исследованиях. В кн.: ЭВМ в ядерных исследованиях. III международная школа, Ташкент, 1974. ОИЯИ, IO, II-8450, Дубна, 1974, стр.285-307.
3. Г.И.Забиякин, В.М.Цупко-Ситников. Вопросы автоматизации накопления и обработки информации в ядерной спектроскопии. В кн.: Международный семинар по ядерной электронике, Варна, 1969. ОИЯИ, I3-4720, Дубна, 1969, стр.337-344.
4. В.А.Владимиров, Ф.Дуда, З.Зайдлер, В.И.Талов, В.И.Приходько, М.И.Фоминных, В.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Устройство связи многоканальных измерительных систем с ЭВМ "Минск-2".
а) В кн.: Международный семинар по ядерной электронике, Варна, 1969. ОИЯИ, I3-4720, Дубна, 1969, стр.345-348;
б) Сообщение ОИЯИ, IO-4630, Дубна, 1969.
5. Ф.Дуда, З.Зайдлер, И.Томик, Р.В.Трубников, Ю.В.Тутьшкин, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Осциллограф со световым карандашом для наблюдения и обработки спектрометрической информации на ЭВМ "Минск-2". Сообщение ОИЯИ, IO-4977, Дубна, 1970.
6. З.Зайдлер, И.Звольски, З.В.Льсенко, А.К.Ревенко, Н.Станчева, С.Станчев, М.И.Фоминных, В.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Повышение эффективности использования ЭВМ "Минск-2" в задачах спектрометрии за счет совмещения анализаторных режимов и режимов обработки информации с использованием дисплея. Сообщение ОИЯИ, I3-5044, Дубна, 1970.

7. С.Аврамов, А.Александров, И.А.Емелин, Г.И.Забиякин, Н.С.Заикин, И.Звольски, З.В.Льсенко, В.Н.Поляков, В.В.Федорин, В.И.Фоминных, М.И.Фоминных, В.П.Шриков, В.М.Цупко-Ситников. Автоматизация обработки спектрометрической информации с использованием системы ЭВМ "Минск-2" - БЭСМ-6. Сообщение ОИЯИ, IO-6467, Дубна, 1972.
8. З.Зайдлер, Е.Т.Кондрат, Н.С.Станчева, С.М.Станчев, В.М.Цупко-Ситников. Четырехходовая регистрирующая система на базе МОЗУ ЭВМ "Минск-2" для спектрометрических измерений. Сообщение ОИЯИ, IO-7074, Дубна, 1973.
9. Л.А.Вилова, Г.Исхаков, Ф.В.Левчановский, М.Потемпа, В.И.Приходько, А.В.Ревенко, З.Стахура, В.М.Цупко-Ситников. Автоматическая обработка бета-спектрограмм, получаемых на магнитных спектрографах. В кн.: Совещание по ядерной спектроскопии и теории атомного ядра, Дубна, 1971. ОИЯИ, Д6-5783, Дубна, 1971, стр.180.
10. Л.А.Вилова, В.А.Залите, Г.Исхаков, Ф.В.Левчановский, М.Потемпа, В.И.Приходько, А.В.Ревенко, З.Стахура, В.М.Цупко-Ситников. Автоматический микрофотометр на линии с ЭВМ. Обработка бета-спектрограмм.
а) Препринт ОИЯИ, P10-6751, Дубна, 1972;
б) ПТЭ, № I, 1974, стр.64.
11. Г.А.Кононенко, М.Потемпа, А.В.Ревенко, В.М.Цупко-Ситников. Автоматический микрофотометр на линии с ЭВМ с шаговым приводом перемещения каретки по осям осям. В кн.: Тезисы докладов XXVII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Ташкент, 1977. "Наука", Л., 1977, стр.367.
12. Т.А.Исламов, Г.А.Кононенко, А.В.Ревенко, А.Тангабаев, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Автоматизация обработки бета-спектрограмм на базе микрофотометра с шаговым приводом каретки на линии с ЭВМ. Сообщение ОИЯИ, P10-12794, Дубна, 1979.
13. Г.А.Кононенко, С.Коралова, С.И.Орманджиев, М.Потемпа, А.В.Ревенко, В.М.Цупко-Ситников. Устройство для определения коэффициента пропускания оптического объекта. Авторское свидетельство СССР № 559134 кл. G 01L 1/10 от 2.09.1974. Вестник ОИПЮТЗ, 1977, № 19, стр.113.
14. А.А.Абдуразаков, К.Я.Громов, Т.А.Исламов, А.Караходжаев, Г.А.Кононенко, А.А.Тангабаев, А.Х.Холматов, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Количественный анализ бета-спектрограмм, получаемых на магнитных спектрографах. В кн.: Тезисы докладов XXX совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Ленинград, 1980. "Наука", Л., 1980, стр.552.

15. Г.А.Коновенко, В.Д.Кузнецов, В.В.Попов, А.В.Ревенко, М.И.Фоминных, В.И.Фоминных, Ю.В.Пшкевич, В.М.Цупко-Ситников. Сканирующий автомат для снятия распределения бета-активности на поверхности. Сообщение ОИЯИ, I3-11576, Дубна, 1978.
16. В.А.Карнаузов, В.Д.Кузнецов, Л.А.Петров, В.В.Попов, М.И.Фоминных, В.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Многоканальная система для снятия распределения бета-активности на сборнике масс-сепаратора. Препринт ОИЯИ, I3-122II, Дубна, 1979;
17. И.И.Громова, Я.Дупак, Я.Конишек, Т.И.Крацикова, Н.А.Лебедев, А.Махова, Б.С.Неганов, Й.Ота, В.Н.Павлов, И.Прохазка, И.Ржиговска, М.Фингер, В.И.Фоминных, М.И.Фоминных, Хан Хен Мо, В.М.Цупко-Ситников, А.Ф.Шусь, З.Яноут. Физический комплекс для исследования распада ориентированных ядер. Установка СПИН.
а) Препринт ОИЯИ, P13-11363, Дубна, 1978;
б) В кн.: Прикладная ядерная спектроскопия, вып.9, Атомиздат, М., 1979, стр.3.
18. В.И.Фоминных, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Устройство связи многоканальных анализаторов ICA-70 с ЭВМ. В кн.: Тезисы докладов XXII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Ташкент, 1977. "Наука", Л., 1977, стр.497.
19. С.Р.Аврамов, И.Ржиговска, Е.Стейскалова, Й.Ференцей, М.Фингер, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Программное обеспечение обработки данных по изучению распада ориентированных ядер на установке СПИН. В кн.: Тезисы докладов XXII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Ташкент, 1977. "Наука", Л., 1977, стр.368.
20. В.Н.Павлов, М.Фингер, В.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Устройство для измерения температур. Авторское свидетельство СССР № 669219 кл. G 01 K 7/16 от 16.01.1978. Бюллетень ОИПОТЗ, 1979, № 23, стр.127.
21. С.В.Медведь, Е.Б.Озеров, А.Н.Синаев, В.И.Фоминных, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Комплекс накопления и обработки спектрометрической информации Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Сообщение ОИЯИ, P10-12997, Дубна, 1979.
22. К.Я.Громов, Й.Звольски, В.М.Цупко-Ситников. Многоуровневая система измерений, накопления и обработки информации в ядерной спектроскопии. Препринт ОИЯИ, P6-80-131, Дубна, 1980.
23. Ц.Вьлов, З.Зайдлер, Й.Звольски, Е.Т.Кондрат, В.А.Морозов, В.И.Фоминных, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Многомерные измерения на базе ЭВМ "Минск-2" в задачах ядерной спектроскопии. Сообщение ОИЯИ, IO-7034, Дубна, 1973.
24. В.С.Александров, Ф.Дуда, О.И.Елизаров, Г.П.Жуков, Г.И.Забиякин, Э.Зайдлер, Й.Звольски, Е.Т.Кондрат, Э.В.Лысенко, В.И.Приходько, В.Г.Тишин, В.И.Фоминных, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Двумерный анализатор γ - γ -совпадений с полупроводниковыми детекторами на базе ЭВМ "Минск-2" с возможностью отбора полезной информации методом цифровых окон в процессе эксперимента.
а) Препринт ОИЯИ, I3-4273, Дубна, 1969;
б) Известия АН СССР, сер.физ., 1970, т.34, № I, стр.69.
25. В.А.Морозов, В.И.Разов, В.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Двумерный анализатор для измерения времен жизни методом задержанных γ - γ -совпадений на базе ЭВМ "Минск-2".
а) Препринт ОИЯИ, P13-5485, Дубна, 1970;
б) ПТЭ, № 5, 1971, стр.83.
26. Е.Т.Кондрат, Б.П.Осипенко, В.И.Фоминных, М.И.Фоминных, Я.Юрковски, В.М.Цупко-Ситников. Двумерный анализатор γ - γ -совпадений с Ge(Li)-детекторами на базе ЭВМ "Минск-2". В кн.: Программа и тезисы докладов XXV совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Ленинград, 1975. "Наука", Л., 1975, стр.450.
27. С.И.Орманджиев, В.И.Фоминных, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Устройство для регистрации каскадных γ -переходов. Авторское свидетельство СССР № 518070 кл. G 01 T 1/47 от 30.07.1975. Бюллетень ОИПОТЗ, 1977, № 29, стр.233.
28. С.И.Орманджиев, В.И.Фоминных, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Двумерный анализ γ - γ -совпадений с отбором полезной информации по обоим параметрам.
а) Препринт ОИЯИ, I3-8797, Дубна, 1975;
б) ПТЭ, № I, 1976, стр.66.
29. К.Я.Громов, Э.Зайдлер, С.И.Орманджиев, В.И.Фоминных, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Применение методов сжатия информации в постановке экспериментов по γ - γ -совпадениям.
а) Препринт ОИЯИ, P6-7355, Дубна, 1973;
б) ПТЭ, 1974, № 4, стр.64.
30. К.Я.Громов, Э.Зайдлер, С.И.Орманджиев, В.И.Фоминных, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Спектрометр совпадений. Авторское свидетельство СССР № 424256 кл. H 01 j 39/34 (G 01 1/36) от 6.02.73. Бюллетень ОИПОТЗ, 1974, № 14, стр.174.
31. М.Гонусек, Я.Лштак, К.М.Муминов, Т.М.Муминов, Ф.Пражак, Р.Р.Усманов, В.М.Цупко-Ситников. Трехмерный амплитудно-временной анализ γ -совпадений с применением полупроводниковых детекторов.
а) Препринт ОИЯИ, P13-12422, Дубна, 1979;
б) В кн.: Прикладная ядерная спектроскопия, вып.10, Атомиздат, М., 1981, стр.53.

32. В.И.Гилев, М.Гонусек, Р.Лушински, С.И.Орманджиев, В.М.Цупко-Ситников. Устройство связи трех амплитудно-кодовых преобразователей с ЭВМ HP 2116C для одномерных и многомерных измерений. Сообщение ОИЯИ, 13-9993, Дубна, 1976.
33. Л.А.Вылова, М.Потемпа, В.И.Фоминных, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников. Программы предварительной обработки спектрометрической информации на ЭВМ "Минск-2" с использованием дисплея. Сообщение ОИЯИ, P10-7061, Дубна, 1973.
34. С.Р.Аврамов, В.М.Цупко-Ситников. О подходе к задаче обработки γ -спектров от $Ge(Li)$ -детекторов. В кн.: Материалы XIV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра, Дубна, 1975. ОИЯИ, Д6-8846, Дубна, 1975, стр.159.
35. С.Р.Аврамов, Е.В.Сосновская, В.М.Цупко-Ситников. Система программ γ ИМР для обработки γ -спектров. Сообщение ОИЯИ, P13-9741, Дубна, 1976.
36. Г.В.Винель, В.М.Цупко-Ситников, Г.Элер. Программа ЭПОС для автоматической обработки γ -спектров от полупроводниковых детекторов. Часть I. Вариант программы для ЭВМ БЭСМ-6. Сообщение ОИЯИ, IO-10843, Дубна, 1977.
37. Г.В.Винель, В.М.Цупко-Ситников, Г.Элер. Программа ЭПОС для автоматической обработки γ -спектров от полупроводниковых детекторов. Часть II. Основные алгоритмы программы. Сообщение ОИЯИ, IO-10844, Дубна, 1977.
38. Н.Г.Волков, А.К.Чураков, В.М.Цупко-Ситников. Программа автоматической обработки двумерных спектров γ - γ -совпадений "PROSPECT".
а) Препринт ОИЯИ, IO-12400, Дубна, 1979;
б) В сб.: Прикладная ядерная спектроскопия, вып.10, Атомиздат, М., 1981, стр.36.
39. Ф.Булла, Н.Г.Волков, В.М.Цупко-Ситников, А.К.Чураков. Методика автоматизированной обработки трехмерных амплитудно-временных спектров γ - γ -совпадений на ЭВМ ЕС-1040 с использованием графического дисплея. Препринт ОИЯИ, P10-80104, Дубна, 1980.
40. А.А.Бялко, Н.Г.Волков, В.М.Цупко-Ситников, А.К.Чураков. Система обработки спектров γ - γ -совпадений со сжатием данных. Препринт ОИЯИ, P10-80107, Дубна, 1980.
41. А.А.Бялко, Н.Г.Волков, А.А.Коршенинников, В.М.Цупко-Ситников. Восстановление схемы распада на основе анализа матрицы γ - γ -совпадений. Препринт ОИЯИ, P10-80106, Дубна, 1980.
42. А.И.Ахмаджанов, Р.Брода, В.Валкс, Й.Звольски, Й.Молнар, Я.Стнчень, В.И.Фоминных, А.Хрынкевич, В.М.Цупко-Ситников. О схеме распада $^{182}O_5$.
а) Препринт ОИЯИ, 6-4471, Дубна, 1969;

- б) Изв. АН СССР, сер.физ., т.34, № 4, 1970, стр.777.
43. И.Адам, Б.Г.Амов, С.К.Бацев, Ц.Д.Вывлов, М.М.Еникова, Ж.Д.Желев, Хр.Н.Протохристов, В.М.Цупко-Ситников. Исследование свойств состояний ядер переходной области. Нейтронодефицитные изотопы самария. I. Уровни ^{145}Sm , возбужденные при распаде ^{145}Eu . Болгарский физический журнал, № 11, 1975, 1, стр.12.
44. А.А.Абдуразаков, Ц.Вывлов, В.Гнатович, К.Я.Громов, В.Звольска, Й.Звольски, Т.А.Исламов, А.Караходжаев, Г.А.Кононенко, В.В.Кузнецов, В.М.Цупко-Ситников. Уровни ^{155}Dy из бета-распада ^{155}Ho .
а) Препринт ОИЯИ, P6-12486, Дубна, 1979;
б) Изв. АН СССР, сер.физ., т.43, № 11, стр.2266-2275, 1979.
45. В.Бенда, Я.Дупак, Я.Конишек, Т.И.Крацкова, Н.А.Лебедев, В.Н.Павлов, И.Прохазка, М.Фингер, В.М.Цупко-Ситников, Ю.В.Кшкевич, Й.Мухонен, У.Д.Гамильтон, Д.Гирит. О распаде изомерного состояния ^{147}Tb ($T_{1/2} = 17$ час.). В кн.: Тезисы докладов на XXX совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Ленинград, 1980. "Наука", Л., 1980, стр.238.
46. Я.Дупак, Я.Конишек, Т.И.Крацкова, В.Н.Павлов, М.Петрич, М.Фингер, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников, Й.Мухонен. О магнитном моменте основного состояния ^{153}Tb . В кн.: Тезисы докладов на XXX совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Ленинград, 1980. "Наука", Л., 1980, стр.242.
47. И.И.Громова, Я.Конишек, Н.А.Лебедев, Б.С.Неганов, Й.Ота, В.Н.Павлов, Й.Ржиговская, М.Фингер, В.И.Фоминных, М.И.Фоминных, В.М.Цупко-Ситников, З.Яноут. Изучение ориентированных ядер ^{152}Tb , ^{155}Tb , ^{156}Tb . В кн.: Труды международной конференции по избранным вопросам структуры ядра, Дубна, 1976. ОИЯИ, Д-9682, т.1, Дубна, 1976, стр.51.
48. Б.С.Неганов, В.Н.Павлов, Й.Ржиговская, М.Фингер, В.М.Цупко-Ситников, З.Яноут. О спине основного состояния ^{151}Tb ($T_{1/2}=18,2$ час.). В кн.: Тезисы докладов на XXII совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Ташкент, 1977. "Наука", Л., 1977, стр.366.
49. J.Dupak, M.Finger, M.I.Fominych, J.Konisek, V.N.Pavlov, M.Petrik, I.Prochazka, V.M.Tsupko-Sitnikov, J.Muhonen. Study of beta-decay of ^{153}Tb oriented in a Gd matrix. Proc. 6-th Conf. Czech. Phys., Ostrava, 1979, p.2-6.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 апреля 1981 года.