

6 коп.



АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР

ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Препринт КИЯИ-90-35

В.И.Третьяк

TS2 - ДИАЛоговая СИСТЕМА ОБРАБОТКИ  
ОДНОМЕРНЫХ СПЕКТРОВ

КИЕВ

АКАДЕМИЯ НАУК УССР

В.И. ТРЕТЯК

TS2 - ДИАЛОГОВАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ

ОДНОМЕРНЫХ СПЕКТРОВ

Киев, Институт ядерных исследований, 1990

В.И. ТРЕТЯК

## TS2 - ДИАЛОГОВАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ОДНОМЕРНЫХ СПЕКТРОВ

Описана программа обработки спектров, обеспечивающая выполнение следующих операций: ввод/вывод информации с различных устройств; обработка пиков с возможностью их автоматического поиска (подпрограмма ETAP) и разделения мультиплетов (подпрограмма KATOK); арифметические действия над двумя спектрами или спектром и константой; свертка двух спектров; сглаживание, интегрирование и дифференцирование спектра; калибровка по энергии и эффективности; преобразование спектра из одной энергетической калибровки в другую. Приведен текст подпрограммы, реализующей последнюю возможность. Информация отображается на цветном телевизионном дисплее. Программа написана на языках FORTRAN и MACRO CM 3BM и работает в среде ОС РАФОС.

The program for spectra processing is described. The program place at user's disposal following possibilities: information input/output from different devices; peaks processing with its automatical search (subprogram ETAP) and decomposition of multiplets (subprogram KATOK); arithmetical operations with two spectra or with one spectrum and constant; folding of two spectra; smoothing, integration and differentiation of spectra; calibration for energy and efficiency; spectra transformation from one energy calibration to another. Text of subroutine that realize the last function is presented. The information is represented on colour TV display. The program is written in FORTRAN and MACRO languages for PDP-computers and RT-system.

TS2 - INTERACTIVE SYSTEM FOR ONE-DIMENSIONAL SPECTRA PROCESSING  
V.I. TRETYAK

Печатается по постановлению Ученого совета  
Института ядерных исследований АН УССР

Программа TS2 разработана для удовлетворения нужд в обработке спектрометрической информации, поступающей от низкофонных полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов. В экспериментах с предельно низким уровнем радиоактивного фона получают информацию о крайне редких процессах, относящихся к различным областям фундаментальной физики: двойному бета-распаду, поиску темной материи во Вселенной, проверке принципа Паули и стабильности электрона, переходам ядер в сверхплотные состояния и др. Эксперименты такого рода длятся, как правило, тысячи часов, однако результирующий спектр все еще не обладает статистикой, достаточной для того, чтобы доверить его обработке какой-либо автоматической программе. Используемое программное обеспечение должно быть достаточно гибким и предоставлять пользователю следующие возможности: считывание спектров из анализатора, коррекция их и сохранение на различных носителях; наглядное представление исходной информации и результатов ее обработки на графическом дисплее, желательное цветное; автоматический и ручной режимы поиска и обработки пиков; калибровка по энергии и эффективности; приведение спектров из отдельных серий измерений к единой энергетической калибровке для их корректного сложения или сравнения. Описываемая программа в той или иной степени удовлетворяет этим требованиям. После общей характеристики ее возможностей достаточно внимание уделено вопросу обработки пиков. Представлены результаты обработки спектров разной степени сложности методом моментов, программами ETAP и KATOK (последние используются в TS2 как подпрограммы). Описан способ решения задачи учета при калибровке энергии  $E$  от номера канала  $X$  не только погрешностей табличных значений  $dE$ , но и погрешностей в определении положений пиков  $dX$ . Приведен алгоритм преобразования спектра из одной энергетической калибровки в другую, текст реализующей его подпрограммы и примеры использования в конкретных экспериментах. Аппаратные средства системы накопления и обработки спектрометрической информации описаны в [1].

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММЫ TS2

1.1. Первоначально программа TS2 была реализована на машинах класса CM-3 и Электроника-60 с 28K словами оперативной памяти. Это обусловило ограничение на длину спектра в 4096 вещественных значений. Кроме самого спектра в оперативной памяти и на носителях хранятся коэффициенты двух калибровочных полиномов (не выше 5 степени), передающих зависимость энергии от номера канала и эффективности от энергии, их ошибки и идентификатор спектра - 2 строки по 72 символа каждая. Общая длина спектрометрического массива - 4158 элементов.

1.2. Пользователь TS2 выбирает нужные действия программы вводом после слова-подсказки двухбуквенного идентификатора команды (например, WD - Write Disk и т.п.). За идентификатором следуют один или два численных параметра. В большинстве случаев они определяют начальный канал спектра и число его элементов, на которые распространяется действие команды. При невводе параметров используются их значения по умолчанию. Полный список команд TS2 с краткими пояснениями приведен в приложении 1.

1.3. Реализован также специальный режим работы с терминалом, используемый при просмотре спектра на цветном графическом дисплее и разметке

и обработке отдельных его участков. В таком режиме нажатие клавиши не сопровождается эхо-печатью символа на экране терминала, а реакция программы наступает незамедлительно после нажатия. Разные клавиши дополнительной и основной клавиатуры используются для управления видом спектра (растяжение-сжатие по X и Y), перемещения спектра и маркера (вправо-влево, быстро-медленно), указания начала и конца участка спектра, предварительной разметки участка с перекрывающимися пиками для последующей обработки с помощью подпрограммы KATOK. При перемещении маркера на экран телевизора постоянно выводится его текущее положение, соответствующая энергия и содержание данного канала спектра. После определения каким-либо методом параметров пиков и фона модель обработанного участка отрисовывается на фоне исходного спектра. При неудовлетворительном результате пользователь может сразу повторить обработку, скорректировав границы участка, разметку, области для определения параметров фона.

При отсутствии телевизора всю обработку пиков и фоновых областей можно осуществлять в обычном командном режиме работы, однако это гораздо менее наглядно и удобно.

1.4. Ввод информации в ЭВМ из анализатора в своем становлении прошел 3 этапа. На первом из них спектр передавался через промежуточный носитель - перфоленку. Иредка эти способы приходится пользоваться и сейчас. На втором информация передавалась из анализатора по кабелю через интерфейсную плату, иницирующая режим считывания с перфоленки. Сейчас в основном используется ввод через специально разработанный блок, выполненный в стандарте КАМАК [1]. Максимальное проверенное расстояние устойчивой передачи данных - 150 м, время считывания спектра длиной в 4096 каналов (с проверками) - 7 с. О разработке и применении подобного блока сообщалось также в [2].

Содержимое каждого канала анализатора передается 6 независимыми пикетами, представляющими цифры разрядов 1, 10, 100, ..., 100000. После этого следует признак окончания числа, а после всего переданного массива - признак окончания зоны. Передача цифр может сопровождаться признаком числа и контролем по четности (на перфоленке последний выглядит как дырочка в определенной позиции, пробиваемая для того, чтобы было (не)четным общее число дырок в данной строке). Как показал опыт, конкретные значения всех признаков и порядок следования разрядов может быть разным, поэтому в программе предусмотрена возможность изменить их в ходе диалога. Наиболее часто встречались следующие сочетания параметров:

	AM-4096-A90 N1	AM-4096-A90 N2	блок КАМАК
признак числа	48	-	-
окончание числа	30	16	128
окончание зоны	29	-	32
контроль по четности	-	-	-
порядок следования разрядов	1, 10, ..., 100000	1, 2, 3, 4, 5, 6	6, 1, 2, 3, 4, 5
			1, 2, 3, 4, 5, 6

При считывании спектра проверяется готовность устройства, количество пикетов для данного числа, правильность цифр, представляющей отдельный разряд, производится коррекция на признак числа и контроль по четности. При необходимости выдаются соответствующие предупреждения.

1.5. При записи спектрометрического массива на диск создается файл с размером, зависящим от длины сохраняемого участка спектра. Достигается это сочетанием операторов CALL ASSIGN и DEFINE FILE с размером записи, равным 2 словам. В первые 2 записи файла помещается начальный канал и длина участка спектра, затем следует содержимое участка, а затем - коэффициенты

калибровочных полиномов с их ошибками и идентификатор спектра. При считывании информации с диска в операторе DEFINE FILE можно указывать максимально возможный размер файла - это не приводит к его переопределению или выдаче сообщений о конфликте между предполагаемым и настоящим размерами. Такой способ записи экономит место на магнитном носителе (это особенно существенно при работе с дискетками) и используется также при сохранении информации на перфоленке.

Предусмотрен также вывод спектра на терминал с выдачей графика участка, номеров каналов и их содержимого и печатающее устройство (с выдачей графика или без него). При необходимости можно ввести спектр с терминала вручную.

1.6. Вывод графической и текстовой информации на экран цветного телевизора обеспечивается блоками КАМАК "Текст-цвет 144.10" и "График-цвет 144.11" производства ЛЯФ АН СССР. Графическое поле имеет размер 256 на 256 позиций, текстовое - 32 строки по 64 символа, количество цветов равно 8. Подпрограмма вывода имеет достаточно широкие возможности. Спектр можно отрисовать гистограммой, прямоугольниками заданных размеров (частный случай - точка) или прямоугольниками с размером по Y, пропорциональным погрешности данного элемента (в нынешней версии TS2 считается, что погрешность элемента равна корню из него). Задаются начальные и конечные позиции и шаг по осям X и Y, цвета фона, графика, рамки, осей координат, текста и маркера. Можно нарисовать сам спектр, его логарифм или корень, отрезать от графика составляющую, а изменяющуюся часть растянуть на весь экран. Графики можно выводить в одном и том же или независимых масштабах для сравнения друг с другом. В начале работы программы устанавливаются наиболее употребляемые значения всех регулирующих параметров. При необходимости их можно легко изменить в режиме диалога. Подпрограмму делает компактной использование для отрисовки всех графических элементов одной и той же небольшой подпрограммы вывода на экран прямоугольника заданных размеров, цвета и положения.

1.7. Команды коррекции спектра обеспечивают изменение содержимого в отдельных каналах, вычеркивание или вставку участка спектра в нужное место. При считывании информации с анализатора иногда выявляются сбои, приводящие к добавлению какого-то большого числа к исходному содержимому канала. Есть режим поиска и устранения таких сбоев.

1.8. Следующая группа команд выполняет арифметические операции сложения, вычитания, умножения и деления одного спектра и константы или двух спектров. При желании спектр можно сгладить методом скользящего среднего:

$$S2(i) = \sum_{j=i-k}^k a(j) \cdot S1(i+j)$$

по 5, 7, 15 или 23 соседним точкам. Коэффициенты  $a(j)$  оптимально сглаживающей формулы взяты из [3]. Программа TS2 обеспечивает вычисление свертки двух спектров:

$$S3(i) = \sum_{j=i}^{i-1} S1(j) \cdot S2(i-j)$$

и выполняет операции дифференцирования и интегрирования спектра (реализованы простейшие алгоритмы). Возможно построение модельного спектра следующего вида: полином не выше 10 степени + неограниченное число гауссианов + непрерывные функции вида  $a \cdot X^b$  или  $b \cdot \exp(X \cdot b)$  (любая составляющая - по выбору; X - номер канала). На моделях удобно тестировать различные методы обработки спектров.

1.9. При вычислении интенсивностей фоновых областей (т.н. индексов фона) и параметров пиков все полученные значения последовательно записываются в рабочие файлы. После завершения обработки пользователь может сформировать окончательные таблицы для печати, отбросив неудачные попытки и переставив результаты в желаемом порядке.

1.10. Программа TS2 написана на языке FORTRAN (управление и вычисления) и MACRO (работа с блоками КАМКА, фотосчитывателем, следящим терминалом). Общая длина - приблизительно 900 инструкций MACRO и 3500 операторов FORTRAN, на которые чужие вставки (программы KATOK и ETAP) составляют 900 и 200 операторов соответственно. Работает TS2 в операционной системе RAOC и построена с перекрытиями, что дает возможность использовать ее на машинах с 28K словами оперативной памяти.

## 2. ОБРАБОТКА ПИКОВ

2.1. По публикациям, посвященным обработке спектров, можно убедиться, что разработка, дальнейшее усовершенствование и разнообразие модификации коровки программ занимает у их авторов не один год (SAMPD - [4] (1969), [5] (1984); KATOK - [6] (1970), [7] (1979), [8] (1986); ETAP - [9] (1978), [10] (1982); примеры можно продолжить). Автор этой работы не ставил поэтому перед собой цели разработать собственную программу, которая автоматически искала бы пики, разделяя сложные мультиплеты и т.д. Задача состояла в том, чтобы обеспечить пользователя достаточно яркими разнообразными возможностями, которые в TS2 уже известны и хорошо зарекомендовали себя программы и методы. В качестве последних были выбраны метод моментов, программы KATOK и ETAP.

2.2. В методе моментов [11] реализуются простые формулы для вычисления площади  $S$ , центра тяжести  $X_0$ , полуширины  $M$  пика и соответствующих погрешностей:

$$S = \sum_i [C(i) - B(i)] \quad dS = \sqrt{\sum_i [C(i) + B(i)]}$$

$$X_0 = \frac{\sum_i [C(i) - B(i)] \cdot i}{S} \quad dX_0 = \sqrt{\frac{\sum_i [C(i) + B(i)] \cdot (i - X_0)^2}{S}}$$

$$M = \sqrt{\frac{\sum_i [C(i) - B(i)] \cdot (i - X_0)^2}{S}}$$

$$dM = \sqrt{\frac{\sum_i [(i - X_0)^2 \cdot (1 - 2 \cdot [C(i) - B(i)] / S) - M^2]^2 [C(i) + B(i)]}{(2MS)^2}}$$

Здесь  $C(i)$  и  $B(i)$  - общее число событий и число фоновых событий в канале  $i$ . Фон под пиком в TS2 проводится прямой линией, параметры которой определяются методом наименьших квадратов по участкам спектра справа и слева от указанного пользователем границ пика; размеры участков задаются или используется их значение по умолчанию (5 каналов). Вычисленные таким образом величины  $S$ ,  $X_0$  и  $M$  для пиков гауссовой формы совпадают с площадью, центром и среднеквадратичным отклонением  $\sigma$  гауссиана.

Время обработки одного пика - доли секунды.

2.3. Программа KATOK предназначена для обработки сложных спектров с сильно перекрывающимися мультиплетами [6-8]. Моделью участка спектра служит сумма симметричных гауссианов и полиномиальный фон, причем учитывается интегрирование непрерывного энергетического распределения в пределах одного канала анализатора. Полуширина всех пиков одного мультиплета считается

одинаковой:

$$C(X) = \frac{1}{\sigma^2 \sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^k S_i \int_{X-1}^X \exp[-(X-X_0)^2 / 2\sigma^2] dx + \sum_{i=0}^m a_i X^i$$

здесь  $C(X)$  - число событий в канале  $X$ . Текст используемой в TS2 версии совпадает с опубликованной в [7] - изменен только ввод/вывод информации. KATOK требует предварительной разметки участка спектра - указания его границ и примерных координат максимумов и минимумов каждого пика. Число пиков можно задать большим, чем это есть на самом деле - оно будет уменьшено в ходе обработки.

В [8] предложены 3 тестовые задачи (рис. 1), успешное выполнение которых гарантирует работоспособность программы KATOK. Результаты обработки этих тестов приведены в табл. 1. В большинстве случаев результаты практически совпадают с [8] и везде расхождение между ними минимально. В последней колонке приведено время выполнения теста на СМ-1420 (версия транслятора FORTRAN V02.1-10, код THR).

2.4. Программа ETAP [10] обеспечивает быструю автоматическую обработку спектров от полупроводниковых детекторов. Кроме обычно определяемых параметров пика ( $S$ ,  $X_0$ ,  $FWHM$ ) вычисляется также условная вероятность того, что найденный пик является ложным. Считается, что пик описывается гауссианом, а фон под ним - прямой линией. Мультиплеты не разделяются. В качестве входных величин задаются приближенные значения  $FWHM$  для пиков в спектре и условная вероятность ложного нахождения пика на "чистом" месте из-за статистических флуктуаций. ETAP работает очень быстро - обработка спектра длиной в 4096 каналов с приблизительно 50 пиками занимает 5 с времени СМ-1420.

2.5. Представляется полезным провести сравнение результатов обработки методом моментов, ETAPом и KATOKом одного и того же модельного спектра, характер которого допускает более или менее успешное применение всех трех методов. Такое сравнение проведено для изолированных пиков с обширными фоновыми участками справа и слева (А) и достаточно несложного спектра (Б), представленных на рис. 2. Моделью пика был гауссиан, а фона - прямая линия. Никаких статистических флуктуаций не вносилось. Такие данные являются идеальными для всех трех методов, и найденные параметры пиков должны совпадать с теоретическими. Интересно проследить также влияние интегрирования энергетического распределения в пределах одного канала анализатора, которое учитывается в программе KATOK и не учитывается в методе моментов и ETAPе.

Полученные результаты представлены в табл. 2 и 3. Для компенсации систематических ошибок в определении центра тяжести для каждого метода в случае Б была дополнительно проведена калибровка по энергии (по 1, 4, 8 и 12 пикам; зависимость  $E(N)$  - линейная; в качестве табличных энергий служили теоретические значения  $X_0$ ); скорректированные величины приведены в колонке  $E_0$ . Можно сделать несколько замечаний.

а) Метод моментов успешно справляется с вычислением параметров изолированных пиков. Учет эффекта интегрирования приводит к незначительному изменению в определении  $FWHM$  (тем меньше, чем шире пик) и систематическому смещению центров тяжести, исчезающему после энергетической калибровки. Вычисленные им теоретические погрешности в определении  $X_0$  и  $FWHM$  наиболее велики среди этих 3 методов.

б) Определяемые программой ETAP параметры пиков совпадают с теоретическими в пределах погрешности. Наблюдается однако систематическое занижение площади пиков (на 2-4%) и завышение полуширины (приблизительно на 0.2 канала для нашего случая). ETAP не предназначен для обработки мультиплетов, однако параметры пиков N 5 и N 7 в триплете и N 8 и N 9 в дублете вычислены не хуже, чем для изолированных пиков. Слабые пики N 6 в

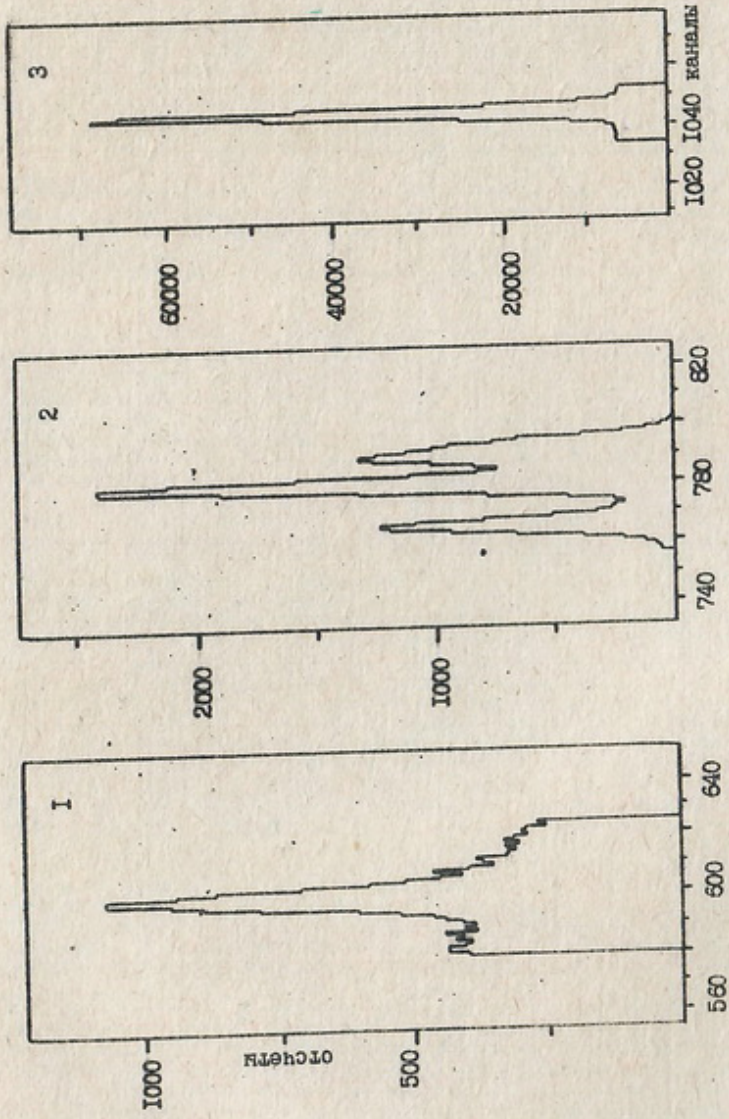


Рис.1. Тестовые спектры /8/ для проверки программы КАТОК

Таблица 1. Результаты обработки программой КАТОК тестовых спектров из [8].

N тесты	N пика	используемая версия КАТОК				[8]				t, сек
		X0	S	FWHM	X0	S	FWHM			
1	1	578.89 ± 0.09	5374 ± 150	7.13 ± 0.21	578.89 ± 0.09	5369 ± 150	7.12 ± 0.21	40		
	2	697.97 ± 0.79	521 ± 89		697.82 ± 0.80	523 ± 89				
2	1	764.17 ± 0.04	6843 ± 89	5.40 ± 0.06	764.16 ± 0.04	6823 ± 89	5.37 ± 0.06	175		
	2	778.55 ± 0.25	830 ± 50		778.56 ± 0.24	839 ± 50				
	3	778.11 ± 0.05	13900 ± 259		778.06 ± 0.06	13639 ± 323				
	4	783.09 ± 0.87	1432 ± 267		782.44 ± 0.70	1606 ± 255				
	5	787.23 ± 0.17	6589 ± 256		787.28 ± 0.13	6663 ± 168				
	6	791.95 ± 0.09	4118 ± 160		791.95 ± 0.08	4129 ± 143				
3	1	1042.92 ± 0.01	247050 ± 1249	3.58 ± 0.02	1042.92 ± 0.01	247152 ± 1338	3.59 ± 0.02	5.		

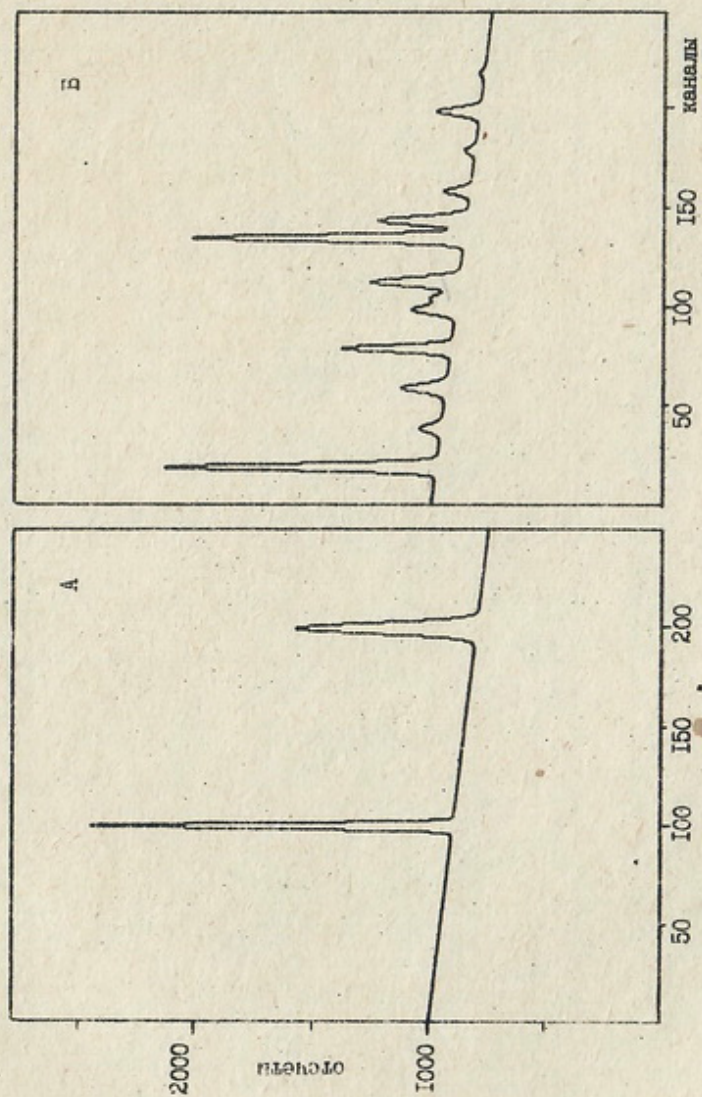


Рис.2. Модельные спектры для сравнения методов обработки пиков

Таблица 2. Результаты обработки модельных спектров (рис. 2). Интегрирование спектрального распределения в пределах одного канала не учитывается.  $\Phi_{\text{он}}(1)=1000-1$ .

N	Теор. значения			Метод моментов			
	X0	S	FWHM	X0	E0	S	FWHM
A	100	5000	3	100.00±0.09		5000±157	3.00±0.32
	200	5000	6	200.00 0.21		4999 192	5.99 0.67
B	20	5000	4	20.00±0.15	20.00	4999±185	4.00±0.54
	40	500	5	40.00 1.63	40.00	499 177	4.97 5.03
	60	1000	5	60.00 0.81	60.00	997 176	4.97 2.49
	80	2000	4	80.00 0.33	80.00	1998 167	3.99 1.12
	100	1000	5	100.15 0.55	100.16	529 127	3.84 0.87
	106	600	5	-	-	-	-
	114	2000	5	114.02 0.28	114.02	1630 148	4.33 0.61
	136	5000	4	135.99 0.09	135.99	4609 151	3.74 0.21
	145	2000	5	145.17 0.23	145.18	1483 133	3.97 0.41
	160	500	4	160.00 1.11	160.01	498 149	3.96 3.44
	180	200	4	180.00 2.74	180.00	200 147	3.98 8.42
	200	1000	5	200.00 0.75	200.01	998 163	4.98 2.29
	220	100	4	220.00 4.79	220.01	100 137	3.96 9.99

N	ЭТАП				КАТОК			
	X0	E0	S	FWHM	X0	E0	S	FWHM
A	100.00±0.06		5050±165	3.25±0.16	99.50±0.01		4944 ± 23	2.78±0.01
	200.00 0.14		4950 197	6.18 0.37	199.45 0.01		4962 15	6.05 0.02
B	19.99±0.09	20.05	4809±184	4.19±0.24	19.51±0.00	20.01	4986 ± 12	3.89±0.01
	40.00 0.92	40.06	490 174	5.18 2.74	39.45 0.04	39.96	489 8	5.05 0.05
	60.00 0.48	60.05	981 175	5.19 1.39	59.44 0.02	59.96	977 10	5.05 0.05
	79.86 0.19	79.91	1922 163	4.19 0.54	79.42 0.03	79.95	1959 35	4.09 0.08
	100.00 0.50	100.13	1213 189	6.25 1.46	99.30 0.39	99.83	992 139	5.14 0.25
	106.50 0.71	106.55	571 164	4.89 2.10	103.40 0.61	103.93	617 136	5.14 0.25
	114.07 0.26	114.12	2068 181	5.46 0.73	113.59 0.10	114.12	1995 100	5.14 0.25
	135.98 0.09	136.01	4824 176	4.21 0.23	135.52 0.03	136.06	5026 75	4.06 0.06
	145.00 0.25	145.10	1990 174	5.26 0.70	144.47 0.07	145.01	1751 59	4.06 0.06
	159.50 0.65	159.53	481 148	4.19 1.92	159.45 0.02	160.00	500 7	4.13 0.05
	180.00 1.52	180.02	192 144	4.19 4.61	179.48 0.05	180.03	199 5	4.13 0.05
	200.00 0.45	200.02	980 163	5.18 1.30	199.42 0.02	199.98	1000 12	5.11 0.06
	221.00 4.47	221.02	84 155	5.18 9.99	219.26 0.04	219.83	98 3	3.85 0.10

Таблица 3. Результаты обработки модельных спектров (рис. 2).  
Интегрирование спектрального распределения в пределах одного канала  
учитывается.  $\Phi_{\text{он}}(i)=1000-i$ .

N	Теор. значения			Метод моментов			
	X0	S	FWHM	X0	E0	S	FWHM
A							
1	100	5000	3	100.50±0.10		5000±163	3.08±0.39
2	200	5000	6	200.50 0.21		5000 192	6.03 0.65
B							
1	20	5000	4	20.50±0.15	20.00	4998±186	4.05±0.55
2	40	500	5	40.50 1.62	40.00	499 177	5.02 4.86
3	60	1000	5	60.50 0.80	60.00	998 176	5.02 2.40
4	80	2000	4	80.50 0.33	80.00	1999 167	4.05 1.07
5	100	1000	5	100.63 0.48	100.13	496 119	3.59 0.68
6	106	600	5	-	-	-	-
7	114	2000	5	114.51 0.29	114.02	1621 148	4.43 0.63
8	136	5000	4	136.48 0.09	135.99	4579 151	3.73 0.20
9	145	2000	5	145.67 0.26	145.18	1510 140	4.12 0.53
10	160	500	4	160.50 0.99	160.01	497 144	4.01 2.71
11	180	200	4	180.50 3.06	180.01	200 152	4.05 9.99
12	200	1000	5	200.50 0.74	200.01	999 163	5.03 2.21
13	220	100	4	220.50 4.74	220.01	100 137	4.03 9.99

N	ETAP				KATOK			
	X0	E0	S	FWHM	X0	E0	S	FWHM
A								
1	100.51±0.06		4833±163	3.20±0.16	100.00±0.00		4878 ± 13	2.95±0.01
2	200.50 0.14		4999 197	6.16 0.37	200.00 0.00		4957 7	5.91 0.01
B								
1	20.50±0.09	20.00	4939±184	4.18±0.23	20.00±0.01	20.00	4887 ± 22	3.91±0.02
2	40.50 0.90	40.00	497 174	5.16 2.68	40.00 0.02	40.00	484 4	4.88 0.02
3	60.79 0.47	60.29	996 175	5.17 1.37	60.00 0.01	60.00	977 4	4.88 0.02
4	80.50 0.19	80.00	1975 163	4.18 0.52	80.00 0.01	80.00	1943 14	3.87 0.03
5	100.18 0.49	99.68	1163 184	5.95 1.42	99.98 0.02	99.98	1001 9	5.01 0.02
6	107.50 0.77	107.00	526 164	4.90 2.28	106.15 0.04	106.14	618 8	5.01 0.02
7	114.50 0.25	114.00	2048 178	5.31 0.70	114.01 0.01	114.00	1981 10	5.01 0.02
8	136.50 0.09	136.00	4963 177	4.20 0.22	136.04 0.03	136.03	4872 83	4.00 0.07
9	145.73 0.24	145.23	1993 173	5.17 0.68	144.92 0.07	144.91	1757 66	4.00 0.07
10	160.90 0.63	160.40	493 147	4.18 1.86	160.00 0.00	159.99	499 1	3.99 0.01
11	180.50 1.47	180.00	197 144	4.18 4.47	180.00 0.01	179.98	199 1	3.99 0.01
12	200.50 0.44	200.00	996 162	5.17 1.27	200.00 0.00	199.98	1000 0	5.00 0.00
13	222.00 6.47	221.50	72 167	6.03 9.99	220.00 0.03	219.98	97 2	3.54 0.06

триплет и N 13 были найдены только при больших условиях вероятности ложного нахождения пика на "чистом" месте (0.98 и 0.75 соответственно); их параметры вычислены менее точно, чем в остальных случаях.

в) Программа KATOK останавливает итерационный процесс раньше, чем происходит выход на теоретические значения параметра (за исключением определения X0 для изолированных пиков). В случае А пик обрабатывался совместно с обширными фоновыми областями (по 50 каналов вправо и влево), но S и FWHM были определены неточно. При неизменных границах участка результаты обработки зависят от начальной разности максимумов и минимумов пиков; расхождения при этом в несколько раз превышает вычисления KATOKом теоретические погрешности параметров. Последние выглядят очень малыми.

Проведенный анализ показывает, что ни один из методов не является идеальным для всех случаев. Окончательное решение о применении той или иной возможности остается за пользователем.

### 3. КАЛИБРОВКА

3.1. В TS2 делаются достаточно стандартные предположения о связи между энергией E и номером канала анализатора N, а также между относительной эффективностью  $\xi$  и энергией [12]:

$$E = \sum_{i=0}^K a_i N^i \quad \ln \xi = \sum_{i=0}^M b_i (\ln E)^i$$

Коэффициенты  $a_i$  находят методом наименьших квадратов по известным из калибровочных измерений децентрам тяжести пиков и соответствующим им табличным энергиям;  $b_i$  находятся аналогичным образом по площадям пиков, их энергиям и относительным интенсивностям отдельных линий, взятым из таблиц. В TS2 число реперных точек ограничено 50, а степени полиномов K, M ≤ 5. Табличные данные по энергиям и относительным интенсивностям приведены в Г 3, 14] (226-Ra и дочерние продукты), [15-17] (232-Th и дочерние продукты), [18-21] (другие элементы).

Достаточно хорошему для многих целей калибровку получают уже при K=2, M=3-4. Реальный пример приведен ниже (226-Ra, Ge(Li)-80 см<sup>3</sup>, K=2, M=3):

N пика	S	Энергия, кэВ			Отн. интенсивность, %		
		табл.	измер.	dE	табл.	измер.	dI
1	32488	186.18	186.20	-0.02	9.67	9.26	-0.19
2	54295	241.92	241.98	-0.06	16.53	17.84	-1.31
3	116444	295.22	295.21	+0.01	42.52	43.68	-1.16
4	192892	351.99	351.89	+0.10	81.29	83.16	-1.87
5	141295	609.31	609.32	-0.01	100.00	100.00	0
6	12604	768.36	768.38	-0.02	10.64	11.18	-0.54
7	6471	934.86	934.10	-0.04	7.64	6.95	-0.41
8	27805	1120.29	1120.23	+0.06	33.52	35.53	-2.01
9	9980	1238.11	1238.10	+0.01	13.25	13.87	-0.62
10	2921	1589.23	1589.19	+0.04	4.77	4.87	-0.10
11	3571	1729.60	1729.67	-0.07	6.56	6.68	-0.12
12	19611	1764.50	1764.42	+0.08	34.31	37.37	-3.06
13	2265	1847.42	1847.57	-0.15	4.59	4.34	+0.25
14	1197	2118.55	2118.63	-0.08	2.51	2.61	-0.10
15	5189	2204.21	2203.97	+0.24	10.66	11.63	-0.97
16	1464	2447.81	2447.89	-0.08	3.28	3.37	-0.09



Только в 2 случаях отклонение найденной энергии от табличной превысило 0.10 кэВ (0.15 и 0.24 кэВ), а средний модуль отклонения равен 0.07 кэВ. Для интенсивностей изменения отклонений  $dI$  лежат в пределах (-3.06, +0.25)%, усредненное  $|dI| = 0.80\%$ ; относительные значения  $i = |dI|/I(\text{табл}) \cdot 100\%$  не превосходят 9.1%, а усредненное  $i = 4.4\%$ .

3.2. При калибровке важно получить не только коэффициенты  $a_i$ , но и их погрешности  $da_i$ , обусловленные погрешностями  $dX_k$ ,  $dE_k$  в значениях центров тяжести пиков  $X_{0k}$  и табличных энергий  $E_{0k}$  (для конкретности будем говорить о калибровке по энергии). В классической схеме метода наименьших квадратов [22] считается, что величины  $X_{0k}$  известны точно, а во внимание принимаются только погрешности  $dE_k$ . Однако в нашем случае учитывать  $dE_k$  и не учитывать  $dX_k$  нелогично, так как относительные погрешности  $dX_k/X_{0k}$ , определяемые условиями проведения нашего эксперимента, могут на 1-2 порядка превосходить  $dE_k/E_{0k}$ , для измерения которых проводились специальные опыты. Общего решения задачи учета  $dE_k$  и  $dX_k$  соответствующая отрасль статистики (конфликтный анализ) пока не дает, ограничиваясь рецептами на случай линейных задач и постоянства  $dE_k$  и  $dX_k$  для всех  $k$  [23]; последнее в нашем случае не выполняется. Между тем, можно предложить [24] использовать здесь метод Монте-Карло, аналогично тому, как это делается при расчете качества и надежности изделий [25].

Будем считать, что центры тяжести  $X_k$  и энергии  $E_k$  - нормально распределенные величины с центрами в  $X_{0k}$ ,  $E_{0k}$  и среднеквадратичными отклонениями  $dX_k$ ,  $dE_k$ . Разыграем значения  $X_k$ ,  $E_k$  для всех реперных точек, пользуясь любой процедурой получения нормально распределенных чисел, например

$$X_k = X_{0k} + dX_k \sqrt{-2 \cdot \ln J_1} \cdot \sin(2\sqrt{J_2}), \quad E_k = E_{0k} + dE_k \sqrt{-2 \cdot \ln J_1} \cdot \cos(2\sqrt{J_2}),$$

где  $J_1$  и  $J_2$  - равномерно распределенные в интервале (0,1) случайные числа. Решив для этих точек задачу метода наименьших квадратов, определив в первый раз коэффициенты  $a_i^k$ . Повторим розыгрыш  $X_k$ ,  $E_k$  и получим второй набор коэффициентов  $a_i^k$  и т.д. Затем остается определить только средние значения и погрешности  $a_i$ :

$$a_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a_i^j, \quad da_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (a_i^j - a_i)^2,$$

здесь  $N$  - число розыгрышей. Такой метод можно применять для определения погрешностей параметров и в случае нелинейных задач.

В ТS2 число розыгрышей не ограничено, однако для практических целей достаточно  $N=100-200$ . Для оценки коэффициентов полинома в зависимости  $\ln E$  от  $\ln E$  и их погрешностей используется аналогичная процедура.

#### 4. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СПЕКТРА ИЗ ОДНОЙ КАЛИБРОВКИ ПО ЭНЕРГИИ В ДРУГУЮ (МЕТОД ПЕРЕСИЛКИ КАНАЛОВ)

Протекающие на протяжении десятков или тысяч часов эксперименты вследствие разных обстоятельств оказываются поделенными на отдельные измерения. В общем случае зависимость между энергией и номером канала анализатора в этих измерениях разная. Получение результирующего спектра простым поканальным сложением отдельных спектров приводит к уширению и раздвиганию пиков; слабоинтенсивные пики могут исчезнуть совсем. Очевидно, нужна процедура, позволяющая преобразовать спектр из одной калибровки по энергии в другую и обеспечить таким образом стабильность спектрометрического тракта.

Пусть наблюдаемые события распределены по энергии с плотностью  $f(E)$ , а энергетическая ось поделена двумя способами на отрезки с помощью точек  $E_i^1$ ,

$E_i^1, E_i^2, \dots$  (1-й способ) и  $E_i^1, E_i^2, E_i^3, \dots$  (2-й способ); точки  $E_i^1$  представляет собой энергетические границы каналов анализатора (рис. 3).

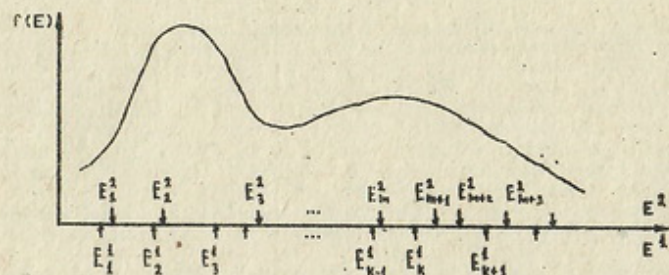


Рис. 3. Плотность распределения событий по энергии и деление оси энергий на каналы

Пусть измеренный нами спектр  $S2(m)$  соответствует 2-му способу разбиения оси энергий, а мы хотели бы получить спектр  $S1(k)$  в 1-м способе разбиения;  $k, m$  - номера каналов. В общем случае число событий в канале  $k$

$$S1(k) = \int_{E_k^1}^{E_{k+1}^1} f(E) dE,$$

если считать, что  $E_k^1, E_{k+1}^1$  - левая и правая границы канала  $k$ . Для ситуации, изображенной на рис. 3,

$$S1(k) = \int_{E_k^1}^{E_{k+1}^1} f(E) dE + \int_{E_{k+1}^1}^{E_{k+2}^1} f(E) dE + \int_{E_{k+2}^1}^{E_{k+3}^1} f(E) dE$$

Интеграл от  $E_{k+1}^1$  до  $E_{k+2}^1$  - это просто известное число событий в канале  $k+1$  спектра 2-го способа разбиения, а оставшиеся 2 интеграла можно вычислить, только сделав какие-то предположения о ходе плотности  $f(E)$  в пределах одного канала. В ТS2 делается простейшее предположение -  $f(E)$  в пределах одного канала считается постоянной. Это дает

$$S1(k) = S2(m) \frac{E_{k+1}^1 - E_k^1}{E_{k+1}^2 - E_k^2} + S2(m+1) + S2(m+2) \frac{E_{k+1}^1 - E_{k+2}^1}{E_{k+3}^2 - E_{k+2}^2}.$$

Приведенный пример иллюстрирует, как работает алгоритм. Полная площадь спектра при таком преобразовании сохраняется. Закон вычисления граничных точек  $E_i^1$  может быть произвольным.

На рис. 4 показаны результаты последовательного преобразования участка модельного спектра (каналы 1 - 256) из калибровки  $E(n) = n$  в калибровку  $E(n) = 1.5 + 1.1 \cdot n + 0.01 \cdot n^2$  и обратно в калибровку  $E(n) = n$ . Как и раньше, пик имел форму гауссиана, а фон в канале  $i$  был равен  $1000-i$ . Параметры пика

изменялись при преобразованиях следующим образом:

	X0	S	ГММ
1. исходный спектр, $E(n)=n$	100	10000	10
2. преобразование в калибровку $E(n)=1.5+1.1n+0.01n^2$	$58.13 \pm 0.10$	$10092 \pm 259$	$4.54 \pm 0.28$
3. возврат в калибровку $E(n)=n$	$100.00 \pm 0.20$	$9986 \pm 249$	$10.23 \pm 0.50$

Как видно, возврат в исходную калибровку прошел вполне удачно.

Описанная процедура использовалась во всех экспериментах по исследованию двойного бета-распада, проведенных в отделе физики левтонов ИЯИ АН УССР, начиная с 1983 г. На рис. 5А показан результат сложения спектров двух измерений (295 и 823 ч) фона  $^{90}\text{Sr}$  детектора объемом  $165 \text{ см}^3$  в Солотвинской подземной лаборатории ИЯИ АН УССР: сверху — прямая сумма, внизу — с использованием метода пересылки каналов (область пика 200—Т1 2614.5 кэВ). Метод применяется также во Всесоюзном научном центре радиационной медицины АМН СССР и других отделах ИЯИ АН УССР. На рис. 5Б представлен участок спектра  $\gamma$ -квантов в реакции  $^{187}\text{Os}(n, \gamma)$ , полученный в отделе физики реакторов и представляющий собой сумму 16 отдельных измерений длительностью по 2—3 ч.

В приложении 2 приведен текст подпрограммы SAND, реализующей предложенный алгоритм. Предполагается, что длина входного и выходного спектров равна 4096 каналов. Зависимость энергии от номера канала вычисляется в подпрограмме-функции EN, которая считает, что эта зависимость — полином. Если это не так, функцию EN нужно заменить другой.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа TS2 работает как единый комплекс в ОДЛ с 1985 г. Предоставляя пользователю достаточно широкий набор возможностей, сервис и наглядность в представлении информации, она существенно облегчила труд экспериментатора по обработке спектров.

Автор хотел бы выразить свою благодарность В.Г.Здесенко, по инициативе и при постоянном внимании которого была выполнена эта работа. Д.Рылов (ОИЯИ) любезно предоставил возможность ознакомиться с системой накопления и обработки спектрометрической информации в ДЯИ ОИЯИ, идеология которой оказала влияние на TS2. Автор благодарит В.Б.Вруданина (ОИЯИ) и С.К.Васильева (Радиологич. ин-т им. В.Г.Хлопина АН СССР) за передачу отдельных программных разработок (в частности, программы KATOK); П.М.Говича и В.В.Сотникова (Харьковский госуниверситет) за запуск и последующее устранение найденных неточностей в программе ETAP. Хотелось бы выразить свою признательность О.А.Вондаренко, А.В.Костелу и особенно В.Н.Куду за полезные обсуждения и предложения, а также Н.П.Куропаткину (ЛИЯФ АН СССР) и В.В.Нузалевскому за отдельные подпрограммы на ассемблере, используемые в TS2. Автор благодарит А.И.Жарулу за данные к рис. 5Б.

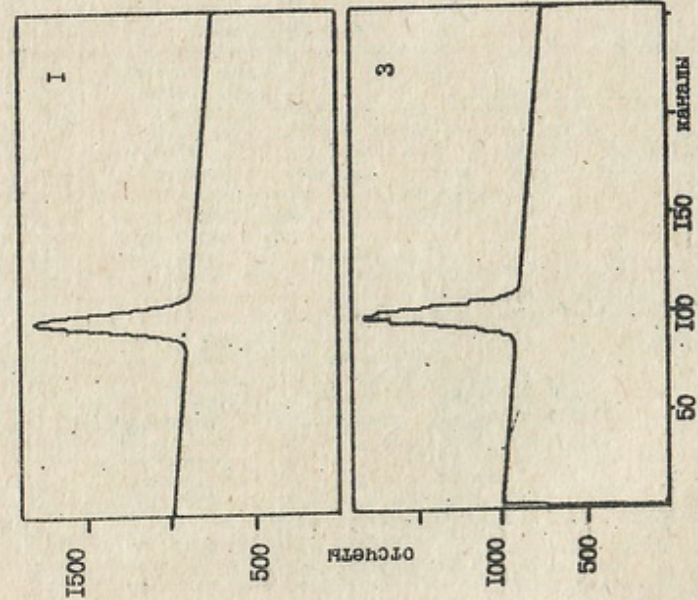
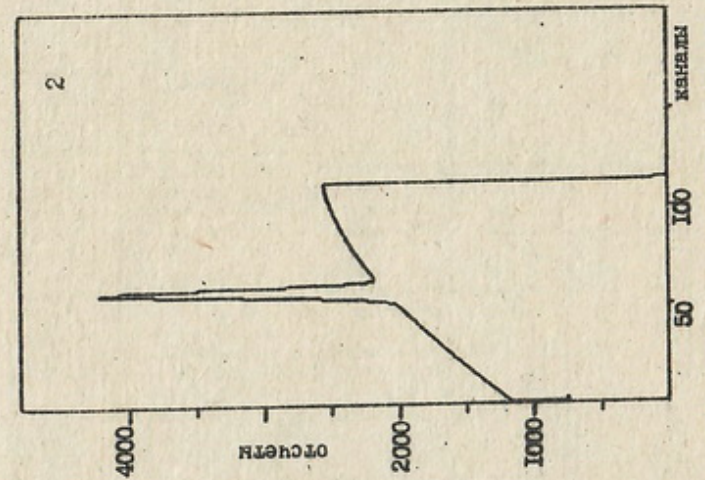


Рис. 4. Последовательное преобразование модельного спектра из калибровки  $E=N$  (1) в калибровку  $E=1.5+1.1N+0.01N^2$  (2) и обратно в  $E=N$  (3)

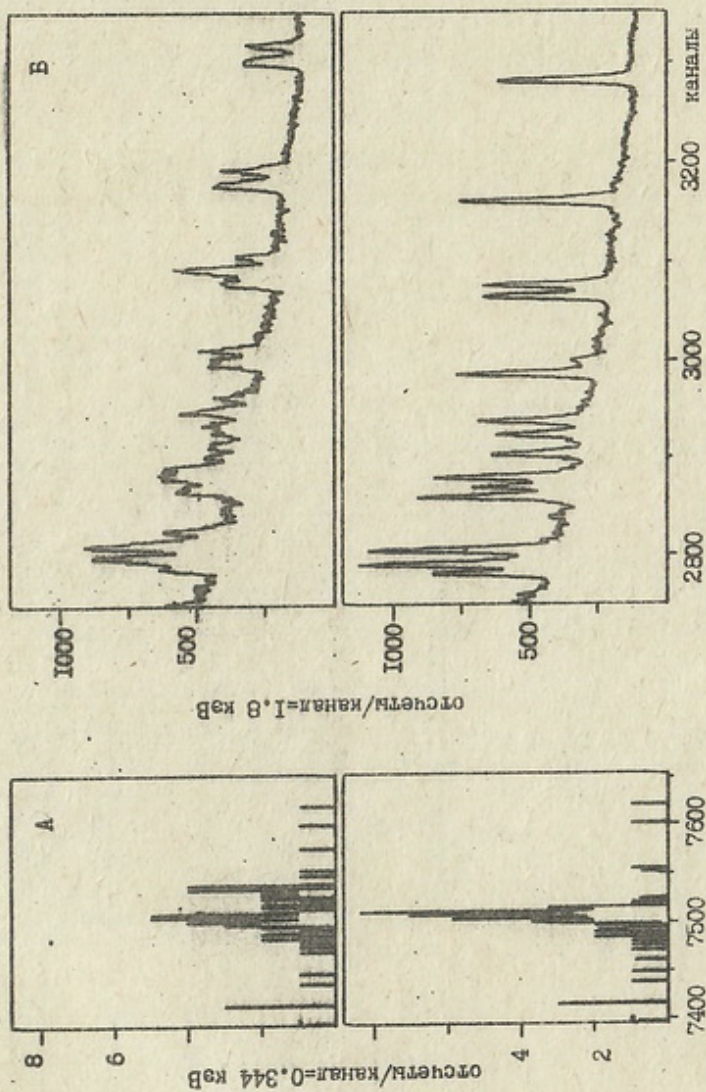


Рис.5. Результаты суммирования спектров: сверху – непосредственное сложение отдельных спектров, внизу – с использованием метода пересычки каналов

Приложение 1. Команды программы T92.

1	RV	считывание спектра с терминала
2	RD	считывание спектра с диска
3	RP	считывание спектра с перфоленты (обратная RP)
4	AN	считывание спектра с анализатора
5	ID	ввод идентификатора спектра (2 строки по 72 символа)
6	VT	ввод данных об объеме детектора и времени измерения
7	CH	изменение содержимого канала
8	ZE	обнуление части спектра
9	FD	устранение сбоев после считывания информации с анализатора
10	DE	вычеркивание участка спектра
11	IN	вставка участка спектра; содержимое запрашивается
12	AC	сложение участка спектра с константой
13	SC	вычитание константы из участка спектра
14	MC	умножение участка спектра на константу
15	DC	деление участка спектра на константу
16	AS	сложение участков двух спектров
17	SS	вычитание участков двух спектров
18	MS	умножение участков двух спектров
19	DS	деление участков двух спектров
20	SH	сглаживание участка спектра методом скользящего среднего
21	RD	округление участка спектра до ближайшего целого числа
22	FO	вычисление свертки двух спектров
23	SD	дифференцирование спектра
24	SI	интегрирование спектра
25	MD	запись участка спектра на диск
26	WP	вывод участка спектра на перфоленту
27	WV	вывод участка спектра на терминал (график, каналы, содержимое)
28	WL	вывод участка спектра на печатающее устройство (аналогично WV)
29	WB	вывод участка спектра на печатающее устройство (без графика)
30	T2	вывод участка спектра на экран TV; параметры запрашиваются
31	T1	вывод участка спектра на экран TV; параметры по умолчанию
32	CL	полная очистка экрана телевизора
33	AR	вычисление площади участка спектра
34	IB	вычисление индексов фона
35	MH	обработка пика методом моментов
36	ET	обработка спектра с помощью (под)программы ETAP
37	KA	обработка участка спектра с помощью (под)программы KATOK
38	R2	вход в режим просмотра и разметки спектра на экране TV
39	R1	аналогична R2, но параметры изображения – по умолчанию
40	CN	калибровка спектра по энергии
41	CR	запоминание текущей калибровки по энергии
42	CB	восстановление калибровки по энергии (обратная CR)
43	CF	калибровка спектра по эффективности
44	WF	запись калибровки по эффективности в файл TSCAEF.DAT
45	RF	считывание калибровки по эффективности из TSCAEF.DAT
46	F1	изменение значения энергии, при которой отн.эфф. = 100%
47	FX	вычисление отн.эфф. для нескольких д.т. пика (в каналах)
48	FE	вычисление отн.эфф. для нескольких энергий
49	SA	преобразование спектра из одной калибровки по энергии в другую
50	TI	формирование окончательной таблицы индексов фона
51	TM	формирование окончательной таблицы пиков, обработанных MH
52	TK	формирование окончательной таблицы пиков, обработанных KATOK
53	TE	формирование окончательной таблицы пиков, обработанных ETAP
54	NO	моделирование участка спектра
55	EN	окончание работы с T92

Приложение 2. Текст подпрограммы SAND, реализующей алгоритм преобразования спектра из одной энергетической калибровки в другую.

С Подпрограмма SAND преобразовывает спектр из одной калибровки по энергии в С другом (метод пересылки каналов). Спектральная плотность событий в пределах С одного канала анализатора во входном спектре считается постоянной.  
 С  
 С пример вызова: DIMENSION SI(4096),SO(4096),CI(7),CO(7)  
 С COMMON/NDOUT/NDOUT  
 С NDOUT=4096  
 С CALL SAND(SI,CI,NB,NF,SO,CO)  
 С вход: SI - входной спектр  
 С CI - массив коэффициентов калибровочного полинома входного спектра.  
 С Считается, что зависимость E(N) энергии от номера канала  
 С описывается полиномом:  $E = C(2) + C(3)*N + C(4)*N**2 + \dots$   
 С В элементе C(1) содержится степень этого полинома. Значение  
 С E(N) вычисляется с помощью подпрограммы-функции EN(CI,N).  
 С Для нелинейной зависимости EN нужно заменить  
 С соответствующей подпрограммой (или двумя - для входного и  
 С выходного спектров).  
 С CP - массив коэффициентов калибровки выходного спектра  
 С NB,NF - начальный и конечный каналы входного спектра, подлежащие  
 С пересылке  
 С NDOUT - размерность выходного спектра  
 С выход: SO - преобразованный спектр  
 С Здесь предполагается, что входной и выходной спектры занимают 4096 каналов,  
 С а степень полиномов, описывающих зависимость E(N), (= 5).  
 С  
 С 20.10.1984, ОФЯ ИЯИ АН УССР, В.И.Третьяк.

```

SUBROUTINE SAND(SI,CI,NB,NF,SO,CO)
DIMENSION SI(1),SO(1),CI(1),CO(1)
COMMON/NDOUT/NDOUT
DO 1 I=1,NDOUT
SO(I)=0.
1 EN(C,I) и EN(C,I+1) - левая и правая границы канала I
IF(EN(CI,NB).GE.EN(CO,NDOUT+1).OR.EN(CI,NF+1).LE.EN(CO,1))
1 GO TO 2
GO TO 10
2 TYPE 3
3 FORMAT(' энергетические границы спектров не пересекаются')
RETURN
С поиск и коррекция начал и концов
10 KIS=NB
11 IF(EN(CI,KIS+1).GT.EN(CO,1)) GO TO 12
KIS=KIS+1
GO TO 11
12 KOS=1
13 IF(EN(CI,KIS).LT.EN(CO,KOS+1)) GO TO 14
KOS=KOS+1
GO TO 13
14 KIF=NF
15 IF(EN(CI,KIF).LT.EN(CO,NDOUT+1)) GO TO 16
KIF=KIF-1
GO TO 15
16 KOF=NDOUT
    
```

```

17 IF(EN(CI,KIF+1).GT.EN(CO,KOF)) GO TO 18
KOF=KOF-1
GO TO 17
18 TYPE 19,KIS,KIF,KOS,KOF
19 FORMAT(' каналы ',I4,'-',I4,' исходного спектра будут соответствовать '// каналы ',I4,'-',I4,' пересыланного спектра')
С формирование выходного спектра
JI=KIS
JO=KOS
DI0=EN(CI,JI)
DI1=EN(CI,JI+1)
DO0=EN(CO,JO)
DO1=EN(CO,JO+1)
21 IF(JI.EQ.KIF+1.OR.JO.EQ.KOF+1) RETURN
IF(DI1-DO1) 22,23,24
22 SO(JO)=SO(JO)+SI(JI)/(DI1-DI0)*(DI1-AMAX1(DI0,DO0))
JI=JI+1
DI0=DI1
DI1=EN(CI,JI+1)
GO TO 21
23 SO(JO)=SO(JO)+SI(JI)/(DI1-DI0)*(DI1-AMAX1(DI0,DO0))
JI=JI+1
JO=JO+1
DI0=DI1
DI1=EN(CI,JI+1)
DO0=DO1
DO1=EN(CO,JO+1)
GO TO 21
24 SO(JO)=SO(JO)+SI(JI)/(DI1-DI0)*(DO1-AMAX1(DI0,DO0))
JO=JO+1
DO0=DO1
DO1=EN(CO,JO+1)
GO TO 21
END
    
```

С подпрограмма-функция EN вычисляет значение полинома  
 С  $C(2) + C(3)*I + C(4)*I**2 + \dots$   
 С вызов: DIMENSION C(NDIM)  
 С E=EN(C,I)  
 С вход: C(1) - степень полинома (NDIM=C(1)+2), C(2),C(3),... - коэффициенты  
 С полинома, начиная с коэффициента при I=0  
 С I - точка, в которой нужно вычислить полином  
 С выход: E - значение полинома  
 С 20.10.1984, ОФЯ ИЯИ АН УССР, В.И.Третьяк.

```

FUNCTION EN(C,I)
DIMENSION C(1)
X=I
N=C(1)
EN=C(2)
IF(N.EQ.0) RETURN
DO 1 L=1,N
EN=EN+C(L+2)*X**L
RETURN
END
    
```

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Н.Гарькина, В.Г.Здесенко, В.Н.Куд, В.И.Третьяк, Система накопления и обработки спектрометрической информации в низкофонных измерениях — препринт КИЯИ-86-4, Киев, 1986, 12 с.
2. А.Г.Григоренко, В.В.Зеркин, В.Е.Козырь, Н.М.Ткач, "Передача информации из амплитудного анализатора УНО-4096-90 в ЭВМ типа СМ", — препринт КИЯИ-89-6, Киев, 1989, 11 с.
3. Дж.Поллард, "Справочник по вычислительным методам статистики", — М., "Финансы и статистика", 1982, 344 с.
4. J.T.Routti, S.G.Prussin, "Photopack method for the computer analysis of gamma-ray spectra from semiconductor detectors", Nucl. Instrum. Meth., N 72, 1969, p.125-142.
5. P.A.Aarnio, J.T.Routti, J.V.Sandberg et al., "Adopting gamma-spectrum analysis program SAMPO for microcomputers", Nucl. Instrum. Meth., N 219, 1984, p.173-175.
6. В.Гадзюков, "Обработка спектров от Ge-Li-детекторов на Э.В.М. (программа КАТОК)", — Приборы и техника эксперимента, N 5, 1970, с. 82-85.
7. V.Gadzjokov, "Processing of discrete nuclear spectra on small computers", preprints JINR E10-12352, E10-12353, E10-12354, Dubna, 1979.
8. В.Гадзюков, В.Б.Бруданин, С.К.Васильев, "О тестировании программы КАТОК", — препринт ОИЯИ Р10-86-824, Дубна, 1986, 6 с.
9. П.И.Говин и др., препринт ОИЯИ Д10-11-11264, Дубна, 1978.
10. П.И.Говин, И.И.Забавовский, В.В.Сатников, "Автоматическая обработка линейчатых спектров с явным учетом показателей качества идентификации пиков (программа "СТАЛ")", — Прикладная ядерная спектроскопия, в. 11, М., "Энергоиздат", 1982, с. 86-101.
11. C.M.Lederer, "Computer analysis of spectra", in "Radioactivity in nuclear spectroscopy", ed. by J.N.Hamilton, J.C.Manthuruthile, v.1, New York-London-Paris, Gordon and Breach, Sci. Publ., 1972, p.73-108.
12. Ц.Вилов, В.П.Осипенко, В.И.Чумин, "Прецизионная спектрометрия излучений радиоактивных нуклидов с помощью полупроводниковых детекторов", ЭЧАЯ, т.9, вып.6, 1978, с. 1350-1459.
13. M.A.Farouk, A.M.Al-Soraya, "226-Ra as standart source for efficiency calibration of Ge(Li) detectors", Nucl. Instrum. Meth., N 200, 1982, p.593-595.
14. V.Zobel, J.Eberth, U.Eberth et al., "226-Ra as calibration standart for Ge(Li) spectrometers", Nucl. Instrum. Meth., N 141, 1977, p.329-336.
15. R.B.Helmer, "γ-ray energies for 228-Ra - 228-Ac decay and the 228-Th decay chain", Nucl. Instrum. Meth., N 164, 1979, p.355-362.
16. S.Sadasivan, V.M.Raghunath, "Intensities of gamma rays in the 232-Th decay chain", Nucl. Instrum. Meth., N 196, 1982, p.561-563.
17. J.Dalmasso, H.Maria, B.Ardisson, "228-Th nuclear states fed in 228-Ac decay", Phys. Rev. C34, N 6, 1987, p.2510-2527.
18. E.Browne, R.B.Firestone, "Table of radioactive isotopes", ed: by V.S.Shirley, 1986.
19. "Table of isotopes", ed. by C.M.Lederer, V.S.Shirley, 7-th ed., 1978.
20. Ц.Вилов, А.А.Клячников, А.Ф.Новгородов и др., "Атлас спектров излучений радионуклидов медицинского назначения", — препринт КИЯИ-88-51, Киев, 1988, 31 с.
21. В.Н.Горожанкин, А.И.Иванов, В.Б.Бруданин и др., "Нормали энергий гамма-квантов, применяемые для градуировки спектрометров с ППД", препринт ОИЯИ Р6-85-248, Дубна, 1985, 11 с.
22. Д.Худсон, "Статистика для физиков", изд. 2, М., "Мир", 1970, 296 с.
23. С.А.Айвазян, И.С.Енюков, Л.Д.Мешалкин, "Прикладная статистика: Исследование зависимостей. Справочное издание", М., "Финансы и статистика", 1985, 487 с.
24. А.И.Соколов, частное сообщение, 1985.
25. И.И.Соболь, "Метод Монте-Карло", изд. 4, М., "Наука", 1985, 80 с.

©

Владимир Ильич Третьяк

ТБ2 - ДИАЛОГОВАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ОДНОМЕРНЫХ  
СПЕКТРОВ  
(Препринт КИЯИ-90-35)

Рецензенты:  
А.М.Соколов  
В.Н.Куц

Подписано к печати 10.10.90 г.

Бумага офсетная Усл.-печ.л. - 1,5

Изд. КИЯИ-90-35 Печать офсетная Уч.-изд.л. - 0,8

Тип. заказ 26 Формат бумаги 60x90/16

Тираж 200 экз. Цена 6 коп.

---

СКТБ с ЭИ Института ядерных исследований  
252028, Киев-28, проспект Науки, 47

---