

9071

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



1/x11-75  
P6 - 9071

8-9261  
Хорошецкий  
4651 / 2-75

Ц.Вылов, И.Н.Егошин, Е.Т.Кондрат, Б.П.Осипенко,  
М.И.Фоминых, Я.Юрковски, В.В.Авдейчиков,  
В.С.Александров, С.К.Васильев, В.М.Горожанкин,  
Ш.Оманов

СПЕКТРОМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ  
РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ  
С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

1. Спектрометрическая аппаратура

**1975**

Ц.Вылов, И.Н.Егошин, Е.Т.Кондрат, Б.П.Осипенко,  
М.И.Фоминых, Я.Юрковски, В.В.Авдейчиков,<sup>1</sup>  
В.С.Александров,<sup>2</sup> С.К.Васильев,<sup>1</sup> В.М.Горожанкин,<sup>3</sup>  
Ш.Оманов<sup>4</sup>

СПЕКТРОМЕТРИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ  
РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ  
С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

1. Спектрометрическая аппаратура

Направлено в сборник "Прикладная ядерная  
спектроскопия"

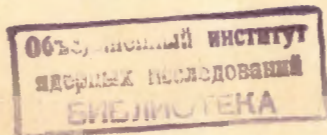
---

<sup>1</sup> Радиевый институт им. В.Г.Хлопина, Ленинград

<sup>2</sup> ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, Ленинград

<sup>3</sup> Воронежский государственный университет

<sup>4</sup> Самаркандский государственный университет



Распределение излучений, испускаемых радиоактивными нуклидами по энергии, называют истинным спектром. Распределение сигналов от детектора по амплитудам называют аппаратурным спектром. Связь между аппаратурным и истинным спектрами описывается интегральным уравнением Фредгольма первого рода:

$$N(V) = \int \Phi(E) G(E, V) dE, \quad /1/$$

где  $E$  - энергия регистрируемого излучения;  $\Phi(E)$  - функция истинного распределения излучения;  $G(E, V)$  - вероятность того, что излучение с энергией  $E$  при попадании в детектор создаст сигнал  $V$  /аппаратурная функция; функция отклика/. Задача измерения состоит в получении  $N(V)$  с помощью спектрометра, а затем, зная  $G(E, V)$ , в нахождении истинного спектра.

Идеальным случаем обработки результатов эксперимента является решение уравнения /1/ и нахождение  $\Phi(E)$ . Такой путь, однако, пока неприменим по следующим причинам: по А.Н.Тихонову /1/ поставленная таким образом задача является некорректной; точное экспериментальное измерение  $G(E, V)$  сильно затруднено. Поскольку в ядерной спектроскопии чаще всего исследуются дискретные спектры, где  $N(V)$  с достаточной точностью можно представить в виде линейной комбинации  $\delta$ -функций, в обработке экспериментальных данных применяют модельный подход, т.е. строится математическая модель исследуемого спектра и далее определяют такие значения параметров модели, при которых она наиболее точно аппроксимирует  $N(V)$ . Разумеется, представление  $N(V)$  в виде линейной комбинации  $\delta$ -функций справедливо тогда,

когда расстояние между отдельными линиями достаточно велико по сравнению с их собственной шириной. К сожалению, в практике физического эксперимента часто нарушается именно это предположение.

Качество спектрометра для измерения излучений радиоактивных нуклидов характеризуют:

а/ энергетическое разрешение  $\Delta E$  - ширина распределения амплитуд импульсов, измеренная на его высоте и соответствующая полному поглощению в чувствительной области ППД данного моноэнергетического излучения /чаще  $\Delta E$  выражают в энергетических единицах, иногда приводят значение  $\Delta E/E\%$  /;

б/ абсолютная эффективность  $\epsilon$  - отношения числа импульсов, зарегистрированных в пике полного поглощения, к полному числу испускаемого источником моноэнергетического излучения за единицу времени ;

в/ избирательность спектрометра - отношение вероятностей регистрации исследуемого и сопровождающего излучения.

Сравнение ширин спектральных линий на их полувысоте и абсолютных эффективностей для самых распространенных типов спектрометров приведены на *рис. 1* и *2*. К сожалению, из-за одноканальности или применения низкоэффективной фотоэмульсионной методики реалистичное сравнение абсолютных эффективностей магнитных бета-спектрометров провести нельзя. Поэтому на *рис. 2* указана светосила спектрометров. Как видно, спектрометры с полупроводниковыми детекторами /ППД/ обладают сравнительно высоким энергетическим разрешением и большой абсолютной эффективностью, что делает их важнейшими приборами ядерноспектроскопических исследований.

В представленном цикле статей подводятся итоги разработок спектрометров  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ -радиоактивных излучений с использованием полупроводниковых детекторов. Проиллюстрированы характеристики спектрометров, рассмотрены эффекты, которые искажают форму аппаратурного спектра. Основное внимание обращается на повышение точности определения энергий и интенсивностей ядерных излучений. Решение подобной задачи связано с широким использованием ЭВМ.

Ниже рассматриваются характеристики спектрометрической аппаратуры.

## I. ДЕТЕКТОРЫ

Характеристики исходных материалов <sup>2,3/</sup>, которые применяются для изготовления ППД, приведены в *табл. 1* и на *рис. 3-5*. Хотя к настоящему времени и имеются некоторые достижения в технологии изготовления детекторов из GaAs и CdTe, требованиям ядерноспектроскопического эксперимента пока удовлетворяют только детекторы из Si и Ge.

### 1. Ge(Li) - детекторы <sup>4-6/</sup>

Спектрометрия бета-частиц и мягких  $\gamma$ -лучей проводится с помощью Ge(Li)-детекторов, базовый материал которых сошлифован и переход получен путем внедрения ионов галлия <sup>4/</sup>. Технология позволяет изготавливать ППД с большой поверхностью и тонким "входным окном". Заметим, что в этих задачах целесообразнее применять высокочистый германий, но такой материал пока мало доступен. Имплантированные Ge(Li)-детекторы упаковываются в специальную оправку, в которой смонтирован охлажденный каскад предусилителя - *рис. 6а*.

В задачах по измерению спектров низко- и средне-энергетических  $\gamma$ -квантов /до  $\approx 1$  МэВ/ применяются Ge(Li)-детекторы, облучение которых проводится со стороны открытого p-n-перехода <sup>5/</sup> - *рис. 6б*. Для спектрометрии же  $\gamma$ -лучей с энергией больше 100 кэВ применяются коаксиальные Ge(Li)-детекторы <sup>6/</sup>, повышения эффективности которых достигают выбором размеров чувствительной области: диаметр выбран возможно большим; высота кристалла приблизительно равна диаметру; диаметр p-области равен 6 мм. Детектор упакован в цанговую оправку /*рис. 6в*/ с крышкой из тонкого алюминия, что позволяет улучшить условия охлаждения кристалла и уменьшить температурные градиенты.

## 2/ Si(Li) - детекторы<sup>/7/</sup>

Поверхностно-барьерные Si(Li) - детекторы используются в спектрометрии электронов конверсии и низкоэнергетических  $\gamma$  - квантов. Для работы в условиях высокого энергетического разрешения ППД упаковываются в оправку, показанную на *рис. 6а*. Если нет необходимости в охлаждении первого каскада предусилителя или Si(Li) - детектора, то упаковка проводится в оправке, показанной на *рис. 6з*.

## 3/ Si(Au) - детекторы<sup>/8/</sup>

Для спектрометрии  $\alpha$  - частиц, электронов конверсии и рентгеновского излучения применяются Si(Au) - детекторы из кремния *p* - типа<sup>/8/</sup>. Удельное сопротивление исходного материала выбирается в зависимости от конкретной задачи в пределах от 500 Ом.см до 100 кОм.см. Детекторы упаковываются в оправки, показанные на *рис. 6а, з*.

## 4/ Si(Al) - детекторы

В некоторых задачах спектрометрии заряженных частиц применяют также поверхностно-барьерные детекторы, изготовленные из кремния *p* - типа<sup>/16/</sup>. Удельное сопротивление исходного материала - 30-120 кОм.см, время жизни носителей - 0,8-2,0 мс. При комнатной температуре обратные токи составляют 0,10-0,15 мкА. Обратный контакт неинжектирующий, что позволяет детекторам выдерживать значительное перенапряжение /до 1,5 кВ/мм/.

Характеристики применяемых нами детекторов приведены в *табл. 2*. Заметим, что характеристики Si(Au), Si(Al) и Si(Li) - детекторов, которые применяются для спектрометрии заряженных частиц, являются в некотором смысле усредненными, ибо в процессе работы они ухудшались, и ППД заменялись.

## II. КОНСТРУКЦИЯ СПЕКТРОМЕТРОВ

Конструкции спектрометров разрабатывались с учетом особенностей регистрации  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и X-излучений - *рис. 7*. Для замены источника без нарушения вакуума в камерах спектрометров заряженных частиц построена специальная вакуумная система - *рис. 8*<sup>/10/</sup>. Давление / $1,3 \cdot 10^{-4}$  Н/м<sup>2</sup>/ создается с помощью форвакуумного насоса /ФН/ с азотной ловушкой, и магнитного электроразрядного насоса НЭМ-100. Все применяемые вакуумные уплотнения безмасляные. Второй ФН предназначен для откачки шлюзов ввода-вывода источников и для работы ППД без охлаждения.

### 1/ Спектрометры рентгеновского и гамма-излучений<sup>/4-6/</sup>

Оправки с Si(Li) и Ge(Li) - детекторами /*рис. 6а, б*/ упакованы в криостат с хладопроводом и сорбентом, который погружался в стандартный сосуд Дьюара с жидким азотом - *рис. 7а*. Для достижения более высокого вакуума /лучше  $1,3 \cdot 10^{-4}$  Н/м<sup>2</sup>, что необходимо для получения низких обратных токов в ППД/ применяются криостаты с мобильной вакуумной отсечкой сорбента<sup>/9/</sup>. Методика подготовки криостата и монтажа ППД описана в работе<sup>/6/</sup>. Толщина входного окна /бериллий/ рентгеновских спектрометров равна 150-200 мкм, гамма-спектрометров /дюраль/ - 400 мкм.

### 2/ Спектрометры конверсионных электронов<sup>/7, 10/</sup>

Для спектрометрии конверсионных электронов в конструкции гамма-спектрометров внесены следующие изменения: замена источника без нарушения вакуума проводится с помощью шлюзовой системы - *рис. 7б*; в некоторых задачах спектрометрия электронов конверсии /Si(Li) или Ge(Li) / ведется с помощью системы, входное окно которой сделано из майлара /0,90 мг/см<sup>2</sup>/.

Заметим, что держатель источника шлюзового спектрометра позволяет изменять расстояние источник-детектор в пределах от 0,5 до 20 см.

### 3/ Спектрометрия $\alpha$ -частиц

В зависимости от конкретной задачи нами применяются различные конструкции  $\alpha$ -спектрометров с Si (Au)-детекторами: для одновременного измерения  $X$ -,  $\gamma$ -,  $\beta$ - и  $\alpha$ -излучений применяется шлюзовая камера /рис. 7б/; для измерения спектров  $\alpha$ -частиц при комнатной температуре применяется камера с нарушением вакуума при замене источника /винтовое устройство позволяет изменять расстояние источник-детектор в пределах от 0,5 до 5 см без нарушения вакуума/ - рис. 7в.

### 4/ Спектрометр конверсионных электронов и бета-частиц /10/

Общий вид спектрометра показан на рис. 7г. Бездисперсионное магнитное устройство /однородное магнитное поле/ применяется для фильтрации фоновых излучений при исследовании спектров электронов или позитронов. Детектор размещается ниже источника, причем защита от прямого попадания излучения осуществляется слоем из W/40 мм/, Cd / 1 мм/, Cu / 0,5 мм/, Al /0,5 мм/. Дискриминация бета-частиц с энергией ниже определенного порога /зависящего от напряженности магнитного поля/ осуществляется алюминиевым экраном /2 мм/, расположенным по диаметру на 100 мм от стенки камеры. Этот же экран играет роль защиты от частиц противоположного знака, которые должны фокусироваться на поверхности детектора симметрично относительно источника. Для охлаждения ППД используется специальный L-образный криостат, который соединен с вакуумной камерой спектрометра.

Вакуум в камере создается с помощью системы, показанной на рис. 8. Применяется шлюзовая система для замены источника без нарушения вакуума.

## III. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРОВ /11/

Блок-схема спектрометра для исследования энергетического распределения излучений радиоактивных нуклидов представлена на рис. 9. Сигналы от ППД поступают на вход зарядочувствительного предусилителя /ПУ/ и далее - на линейный спектрометрический усилитель /ЛУ/. С ЛУ сигналы поступают на блок амплитудно-цифрового преобразователя /АЦП/ и запоминающего устройства /ЗУ/. Характеристики этих блоков /частота генераторной серии АЦП и время обращения к ЗУ/ определяют максимальную скорость счета, а иногда и энергетическое разрешение спектрометра /вход АЦП рассчитан на сигнал определенной длительности и часто оптимальное значение постоянной формирования  $\tau_{\text{ОПТ}}$  не совпадает с этим параметром/. Из ЗУ информация поступает на ЭВМ для последующей обработки. Генератор эталонных импульсов /ГЭИ/ применяется для стабилизации спектрометрического тракта.

Учитывая все источники шума, для зарядочувствительного ПУ и ЛУ с однократным CR-RC формированием можно записать /18/:

$$(\Delta E [\text{эВ}])^2 = (2,354 \sqrt{\epsilon EF})^2 + \left(\frac{4,52\epsilon}{q}\right)^2 \left\{ \frac{0,6kT}{\tau S} (C_d + C_{\text{ВХ}} + C_0)^2 + 0,15kT C_{\text{ИЗ}}^2 + kT \tau \left[ \left(\frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_H}\right) + \frac{q}{2kT} (I_d + I_z) \right] \right\} + \Delta_M^2 + \Delta_{\text{ОСТ}}^2, \quad /2/$$

где F - фактор Фано;  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  [Кл];  $\tau$  - постоянная формирования в ЛУ, [с];  $\epsilon$  - энергия образования пары электрон-дырка в ППД [эВ]; S - крутизна полевого транзистора /ПТ/ [А/В];  $C_d$  и  $C_0$  - емкости ППД и обратной связи [Ф];  $C_{\text{ИЗ}}$  - емкость исток-затвор ПТ [Ф];  $C_{\text{ВХ}}$  - емкость на входе ПТ /кроме  $C_d$  и  $C_0$ / [Ф];  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж.К<sup>-1</sup> - постоянная Больцмана; T - абсолютная температура [К];  $I_d$  - обратный ток ППД [А];

$I_3$  - ток затвора ПТ [А];  $\Delta_M$  - разрешение, обусловленное микрофонными шумами [эВ];  $\Delta_{\text{огт}}$  - разрешение, связанное с шумом всех последующих электронных блоков. Заметим, что не учтен вклад эффекта захвата носителей заряда, роль которого в некоторых случаях может быть существенной<sup>/3/</sup>.

Из выражения /2/ вытекают все требования, которые предъявляются к элементам спектрометра: необходимость охлаждения ППД -  $I_D$  уменьшается; необходимость увеличения /либо исключения/ значений  $R_C$  и  $R_H$ ; необходимость уменьшения  $C_D$  /либо за счет площади, либо за счет глубины чувствительного слоя/; необходимость применения ПТ с большой крутизной  $S$ .

Минимальное значение шумов наблюдается при  $\tau_{\text{огт}} = \tau_{\text{инт}} = \tau_{\text{дифф}}$ , где  $\tau_{\text{инт}}$  - постоянная интегрирования ЛУ;  $\tau_{\text{дифф}}$  - постоянная дифференцирования ЛУ. Тогда:

$$\tau_{\text{огт}} [\text{с}] = \left\{ \frac{0,6(C_g + C_{\text{вх}} + C_0)^2 + 0,15C_{\text{из}}^2}{S/R_H + S/R_C + (I_D + I_3)Sq/2kT} \right\}^{1/2} \quad /3/$$

Если  $\tau > \tau_{\text{огт}}$ , преобладают параллельные шумы /  $I_D$ ,  $I_3$ ,  $R_C$ ,  $R_H$  /, если  $\tau < \tau_{\text{огт}}$  - последовательные шумы /  $C_D$ ,  $C_{\text{вх}}$ ,  $C_0$ ,  $C_{\text{из}}$ ,  $S$  /. Понижение параллельных шумов увеличивает  $\tau_{\text{огт}}$  и улучшает разрешение.

В то же время, однако, ухудшаются загрузочные характеристики спектрометра за счет наложений. Заметим, что микрофонные шумы являются параллельным источником шума. Для уменьшения их вклада в конструкции криостатов<sup>/9/</sup> внесено изменение: хладопровод ниже сильфона укрепляется тремя упорными винтами.

Изменение величины сигнал/шум за счет изменений кратности интегрирования и дифференцирования можно найти в сравнительных таблицах, например, в<sup>/3/</sup>.

В зависимости от конкретной физической задачи /вид регистрируемых частиц; требования к эффективности, энергетическому разрешению и загрузочным характеристикам/ применяются различные спектрометры, характеристики которых приведены в *табл. 2*. Вопросы опти-

мизации системы ППД-ПУ рассмотрены в работе<sup>/11/</sup> /в спектрометрах применяется резисторная обратная связь/. Отметим противоречивость требований к значениям  $R_C$  и к схеме подключения ППД-ПУ с точки зрения величины сигнал/шум и загрузочных характеристик. Действительно, для гальванического подключения ППД-ПУ мгновенное значение падения напряжения на  $R_C$  равно<sup>/5/</sup>:

$$U_{C \text{ max}} = (Qn + I_g) R_C + 3 \frac{Q}{C_0} \sqrt{\frac{n\tau_C}{2}} \quad /4/$$

где  $Q = \frac{E}{e} q$ ;  $\tau = R_C C_0$ ; ;  $n$  - скорость регистрации частиц в 1 с. Очевидно /4/, что загрузку спектрометра можно увеличить при подключении ППД с помощью разделительного конденсатора /первый член = 0/.

В конструкции головного каскада ПУ особое внимание уделялось выбору механической конструкции упаковки ППД /температурные режимы/, номиналов и типов применяемых деталей /  $R_H$ ,  $R_C$ ,  $C_0$ , ПТ / и оптимального температурного режима ПТ - *рис. 6*. Номиналы элементов головного каскада, характеристики ПУ и спектрометров приведены в *табл. 2*. Характерные аппаратурные спектры показаны на *рис. 10-19*.

В заключение приведем факторы, влияющие на энергетическое разрешение спектрометра с ППД<sup>/17/</sup> - *табл. 3*.

#### IV. ВВЕДЕНИЕ ТИПОВЫХ РЕЖИМОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В зависимости от условий физической задачи мы применяем различные комбинации спектрометрических каналов и анализирующей аппаратуры /*рис. 20*/. Выбор электронных блоков осуществляется на основании следующих требований: получение оптимального отношения сигнал/шум; хорошие загрузочные характеристики спектрометрической системы /до  $5 \cdot 10^4$  имп/с/; температурная стабильность, линейность, возможно большая схемная простота /без ухудшения спектрометрических характеристик/.

Принципиальные схемы ПУ и ЛУ приведены в<sup>/11/</sup>. В линейных усилителях применяется дискретная система переключения коэффициентов усиления, что связано с

простотой обращения во время эксперимента, а также с требованиями, возникающими при измерениях характеристик излучений /нелинейность системы, удобство при измерениях  $T_{1/2}$  и т.д./. Контроль за загрузкой спектрометра ведется с помощью стрелочного интенсиметра /И/, подключенного в момент измерения к соответствующему каналу.

Следует заметить, что для получения высоких характеристик спектрометров существенную роль играет также качество вспомогательных электронных блоков: источников питания  $\pm 12 В$ ;  $\pm 24 В$ ; высоковольтных источников питания ППД  $\pm 3кВ$ ; генератора эталонных импульсов, применяемого для контроля и стабилизации спектрометрических каналов.

В измерениях применяются амплитудно-цифровые преобразователи двух систем: АЦП-4096 с частотой генераторной серии  $f = 18 МГц$  и АЦП-6144 с  $f = 12 МГц$ <sup>/12/</sup>; АЦП-8192 с  $f = 100 МГц$ <sup>/13/</sup>. Используемые АЦП дают возможность работать с импульсами, имеющими фронт  $\leq 8$  мкс, что в случае однократного дифференцирования и четырехкратного интегрирования накладывает предел  $\tau \leq 2$  мкс.

В качестве ЗУ используется: четырехходовая регистрирующая система АИ-8192 с временем регистрации  $t_p = 25$  мкс и объемом памяти 8192 18-разрядных слов<sup>/14/</sup>; анализатор АИ-4096 - 2-АВ-100 с  $t_p = 26$  мкс и объемом памяти 4096 18-разрядных слов; система TRIDAC-C с  $t_p = 5$  мкс и объемом памяти 4096 20-разрядных слов<sup>/13/</sup>.

Цифровая информация из АИ-4096 и АИ-8192 поступает по каналам связи в ЭВМ "Минск-2" ОЯС и РХ ЛЯП ОИЯИ<sup>/19/</sup>. Для передачи цифровой информации из системы TRIDAC-C построена специальная односторонняя связь с помощью магнитофона RG-23<sup>/15/</sup>. Предварительная обработка экспериментальных данных производится с помощью ЭВМ "MULTI-8" и "Минск-2", окончательная - с помощью ЭВМ "Минск-22" ЛЯП.

Для каждого спектрометра выбраны стандартные режимы работы, и переход к данному режиму осуществляется по инструкции, в которой указаны: детектор; источник питания ППД - полярность и  $U$ ; № ЛУ - полярность,

коэффициент усиления /№ клавиши/, тип формирователя /одно- и двухполярного/; АЦП и возможные переключения на его панели; № ГЭИ и значения показаний прецизионных гелипотов, осуществляющих стабилизацию выбранного режима /если это необходимо/; соответствующая этому режиму цена канала и измеряемый энергетический диапазон; загрузочные характеристики спектрометра.

Детальное исследование характеристик спектрометров и их применение рассматриваются в последующих работах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное сообщение подводит итог исследованиям, проводимым с 1970 года по разработке технологии изготовления ППД и построения спектрометров излучений радиоактивных нуклидов. При этом главное внимание уделялось достижению высокого энергетического разрешения при рабочих нагрузках  $\approx 10^4$  имп/с, а также простоте и надежности вакуумных камер и систем замены источников в спектрометрах заряженных частиц. Все это время описанные спектрометры /а также их аналоги/ интенсивно применялись в экспериментах по программе ЯСНАПП<sup>/20/</sup>. Поэтому представляет интерес сравнить параметры этих спектрометров с лучшими результатами, известными из литературных источников - рис. 21.

Заметим следующее: приведенное энергетическое разрешение  $8,9$  кэВ<sup>/3/</sup> для  $\alpha$ -частиц является пока единственным результатом, полученным в особо идеализированных условиях; энергетическое разрешение полупроводниковых (Si, Ge) бета-спектрометров близко к предельно возможному, и, учитывая сложность физических экспериментов /качество источников, системы замены источников без нарушения вакуума/, трудно ожидать его существенного улучшения; в силу специфичности ядерноспектроскопических задач работы по получению сверхвысокого разрешения в области низкоэнергетических  $\gamma$ -квантов  $< 20$  кэВ/ у нас не проводились; неко-



торое отставание в получении высоких значений абсолютных эффективностей и отношения пик/комpton /П/К/ для Ge(Li) - детекторов с большим объемом связано с ограниченными возможностями выбора размеров кристалла /в год обычно изготавливалось 4-6 ППД с объемом >30 см<sup>3</sup> /.

Таблица 1  
Основные характеристики полупроводниковых материалов, применяющихся для изготовления ППД /2,3/

Полупроводник	Z	Плотность [ат.см <sup>-3</sup> ]	Температура [°K]	Ширина запрещенной зоны [эВ]	Энергия образования пары электрон-дырка [эВ]	Диэлектрическая постоянная
Si	14	5,02x10 <sup>22</sup>	300	1,12	3,61	12
Si	14	5,02x10 <sup>22</sup>	77	1,16	3,76	12
SiC	I4-6	1,9x10 <sup>23</sup>	300	2,4-3,3	II, 3	-
Ge	32	4,44x10 <sup>22</sup>	77	0,74	2,98	16
GaAs	3I-33	2,21x10 <sup>22</sup>	300	1,43	4,2	-
CdTe	48-52	3,04x10 <sup>22</sup>	300	1,47	4,43	-
HgI <sub>2</sub>	80-53	2,50x10 <sup>22</sup>	300	2,13	6,5	-
GaSb	3I-5I	-	0,77	-	0,77	-
InSb	49-5I	-	0	-	0,265	-
InAs	49-33	-	77	-	0,43	-

Таблица 2  
Характеристики применяемых ППД, ЛУ и спектрометров

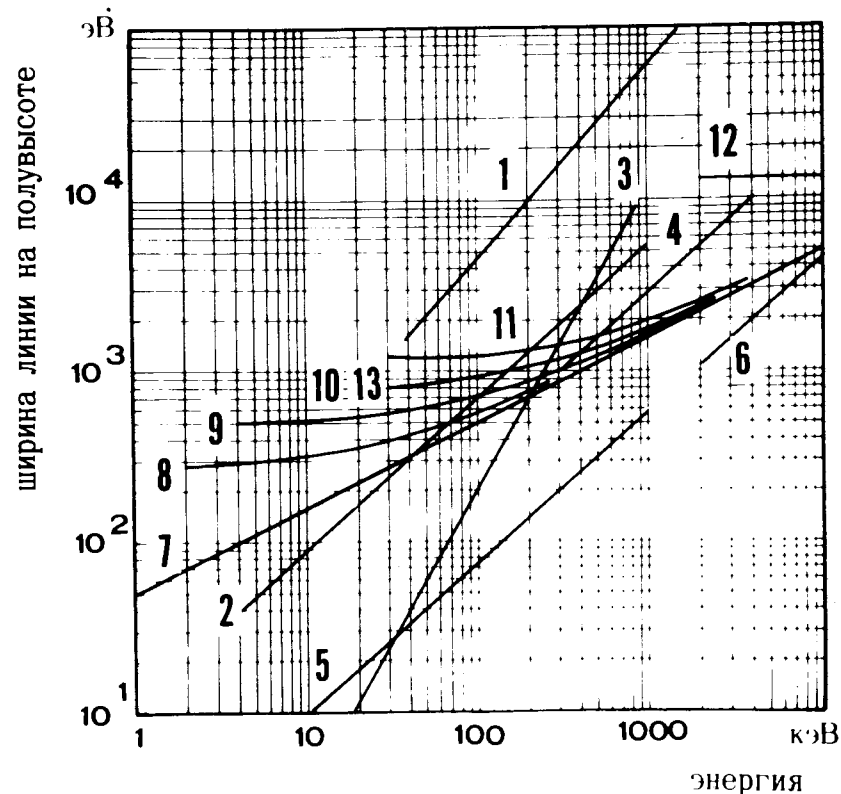
N	ДЕТЕКТОР				ПРЕДУСИЛИТЕЛЬ				СПЕКТРОМЕТР												
	T [K]	ρ [г/см <sup>3</sup> ]	ε [см <sup>2</sup> ]	объем [см <sup>3</sup> ]	х+у [см]	Т [K]	С <sub>0</sub> [с/св]	А <sub>и</sub> [с/св]	В <sub>0</sub> [с/св]	Δ <sub>и</sub> [с/св]	F <sub>0</sub> [с/св]	С <sub>0</sub> [с/св]	С <sub>0</sub> [с/св]	С <sub>0</sub> [с/св]	С <sub>0</sub> [с/св]	С <sub>0</sub> [с/св]	С <sub>0</sub> [с/св]	С <sub>0</sub> [с/св]	С <sub>0</sub> [с/св]	С <sub>0</sub> [с/св]	
1	Si, 300	5,02	250	1000-10000	15+0,04	300	1	0,1	0,5	15											
2	Si, 300	5,02	250	100-1500	15+0,04	300	1	0,1	0,5	20	9,0										
3	Si, 77	5,02	250	10-2000	0,3+0,05	2444/6/110	0,5	-	2,2	-	0,9	0,5	-	2,1							
4	Si, 77	5,02	250	10-2000	0,3+0,05	2444/6/110	0,5	-	2,2	-	1,1	0,5	-	1,9							
5	Si, 77	5,02	250	2-300	0,15+0,05	2444/6/110	0,3	-	4,7	-	-	0,28									
6	Ge, 77	5,32	210	50-500	0,3+0,05	2444/6/110	0,5	-	2,2	14	1,2	0,7		2,2							
7	Ge, 77	5,32	210	15-500	0,4+0,05	2444/6/110	0,7	-	2,2	-	-	0,6									
8	Ge, 77	5,32	210	15-500	0,4+0,05	2444/6/110	0,5	-	2,2			0,6	1,7						0,5 · 10 <sup>-3</sup>	5,1	
9	Ge, 77	5,32	210	20-3000	0,6+0,05	2444/6/110	1	1,0	1,0					2,2					1,4 · 10 <sup>-3</sup>	10,1	
10	Ge, 77	5,32	210	100-5000	0,8+0,03	2444/6/110	1	1,0	1,0					2,1					0,4 · 10 <sup>-3</sup>	20,1	
11	Ge, 77	5,32	210	100-5000	1,0+0,04	2444/6/110	1	1,0	1,0					2,2					0,7 · 10 <sup>-3</sup>	26,1	

ГЕОМЕТРИЯ	1	2	3	4	ГЕОМЕТРИЯ
	Плоско-параллельный	Плоско-параллельный	Коаксиальный с двумя открытыми концами	Коаксиальный с одним открытым концом	

**Таблица 3**  
**Факторы, влияющие на энергетическое разрешение спектрометров с ППД**

РАДИОАКТИВНЫЙ ИСТОЧНИК Флуктуирующая потеря энергии в источнике.	ПРИЧИНА ВОЗНИКНОВЕНИЯ А) Непостоянство толщины источника. Б) Статистические флуктуации потерь энергии в толщине источника.
П.П.Д. 1. Флуктуации потерь энергии во входном окне П.П.Д. 2. Флуктуации числа освобожденных пер носителей в П.П.Д. 3. Флуктуации эффективности собирания носителей. 4. Шум П.П.Д.	А) Непостоянство толщины входного окна. Б) Статистические флуктуации потерь энергии в толщине входного окна. В) Разброс в углах падения. Передача энергии решетке за счет: а) взаимодействия с электронами; (Обычно а) << б) б) рассеяния на ядрах. А) Статистика рекомбинации и прилипания. Б) Неоднородности (локальные флуктуации времени жизни носителей) В) Краевые эффекты (Обычно А) << Б)
ПРЕДУСИЛИТЕЛЬ (ПУ) 1. Шумы ПУ. 2. Стабильность коэффициента усиления.	А) Тепловой шум резисторов на входе ПУ. Б) Дробовой шум тока затвора. В) Тепловой шум канала ПУ. Г) Микрофонные шумы. Д) Шум элементов следующих за ПУ. А) Стабильность С. Б) Температурная стабильность элементов ПУ.
ЛИНЕЙНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ 1. Характеристики ЛУ. 2. Загрузочные характеристики. 3. Стабильность коэффициента усиления.	А) Приведенный шум на входе ЛУ. Б) Тип формирователя. В) Стабильность нулевой (разовой) линии. Г) Компенсация ползса нулем.
АЦП 1. Определение параметров выходного импульса ЛУ. 2. Температурная стабильность.	



**Рис. 1.** Сравнение ширин спектральных линий на их полувысоте для разных спектрометров в зависимости от энергии регистрируемого излучения /в скобках даны значения желесного угла<sup>7/</sup> /; 1 - NaJ(Tl) ; 2 - безжелезный тороидальный спектрометр  $\Delta p/p = 0,4\% / 7\%$ ; 3 - кристалл - дифракционный типа Дюмонда; 4 - магнитный безжелезный  $2\pi\sqrt{2} : \Delta p/p = 0,2\% / 0,015\%$ ; 5 - магнитный железный типа Даныша:  $\Delta p/p = 0,04\% / 0,01\%$ ; 6 - магнитный альфа-спектрограф  $\pi\sqrt{2} : \Delta p/p = 0,04\% / 0,04\%$ ; 7 - предельное значение для Ge при  $F = 0,13$ ; 8 - Si(Li) для измерения X-лучей -  $300 \text{ мм}^2 \times 4 \text{ мм} / 1\%$ ; 9 - Ge(Li) для измерения  $\gamma$ -лучей -  $1 \text{ см}^3 / 1,5\%$ ; 10,13 - Si(Li) для измерения спектров электронов конверсии -  $800 \text{ мм}^2 \times 4 \text{ мм}$ ; 12 - Si(Au) для измерения спектров  $\alpha$ -частиц -  $80 \text{ мм}^2 \times 0,5 \text{ мм} / 10\%$ ; 13 - Si(Li) бета-спектрометр с однородным магнитным полем -  $80 \text{ см}^2 \times 4 \text{ мм}$ .

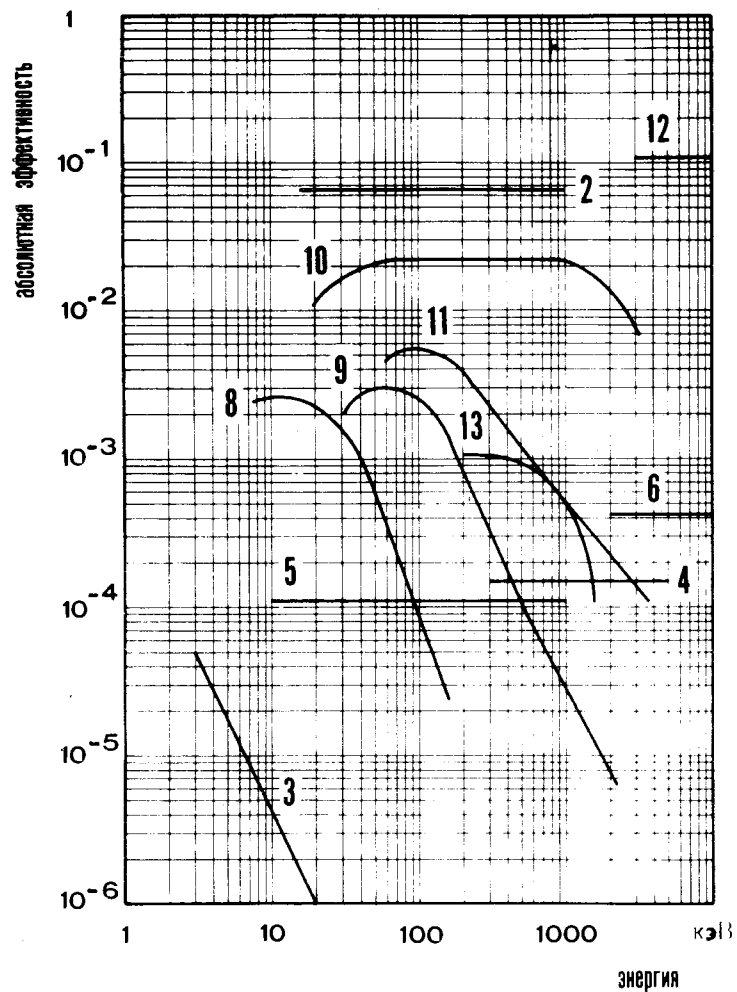


Рис. 2. Сравнение абсолютных эффективностей для разных спектрометров в зависимости от энергии регистрируемого излучения /обозначения см. на рис. 1/.

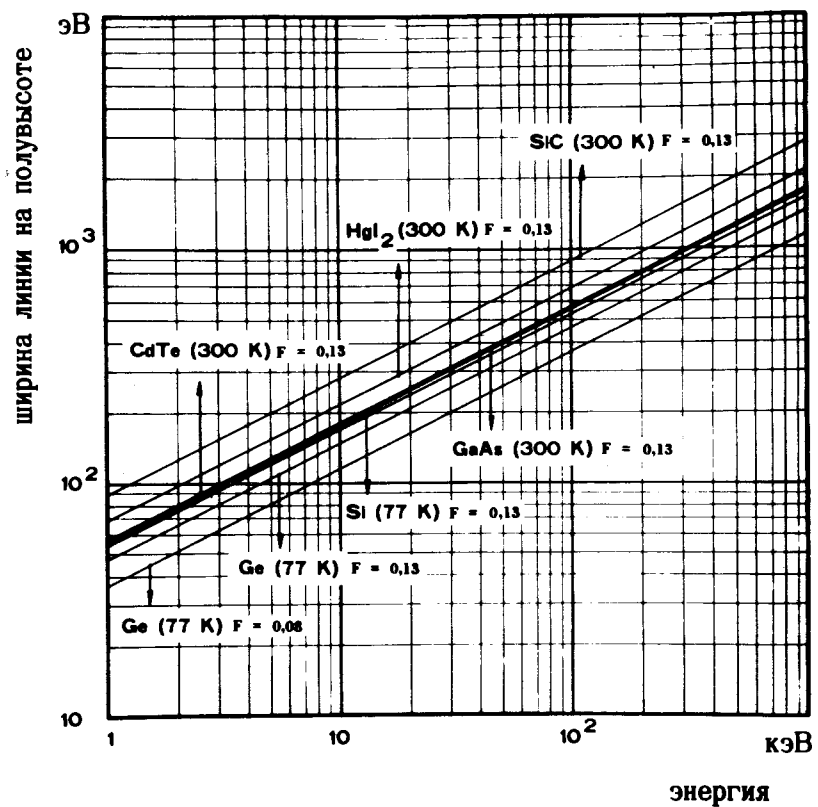


Рис. 3. Зависимость предельного энергетического разрешения различных ППД от энергии регистрируемого излучения /величина фактора Фано  $F = 0,13$  принята условно/.

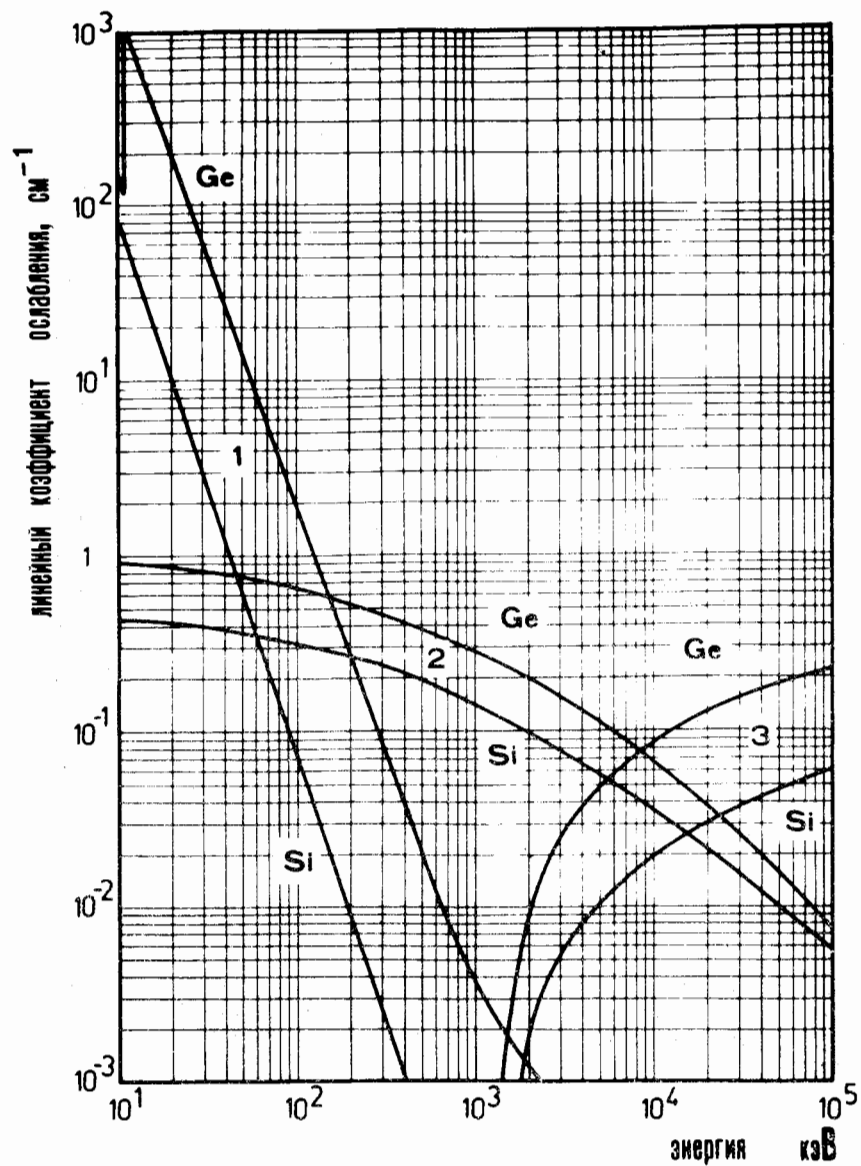


Рис. 4. Линейный коэффициент ослабления гамма-лучей в Si и Ge /1 - фотоэффект; 2 - комптон-эффект; 3 - образование пар/.

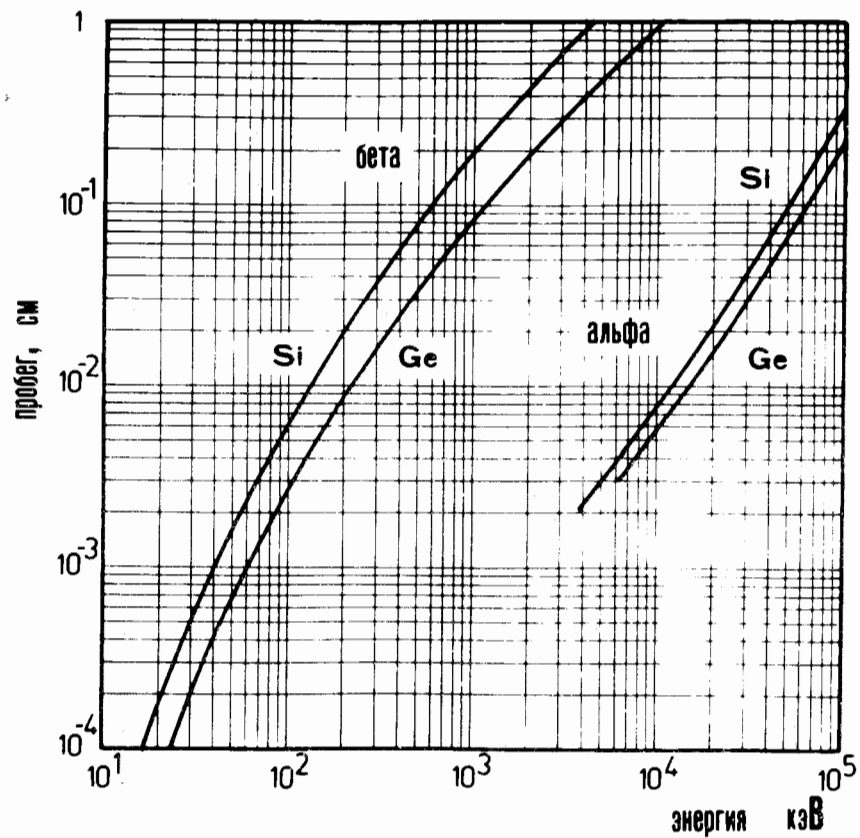


Рис. 5. Пробег электронов и  $\alpha$ -частиц в кремнии и германии /17/.

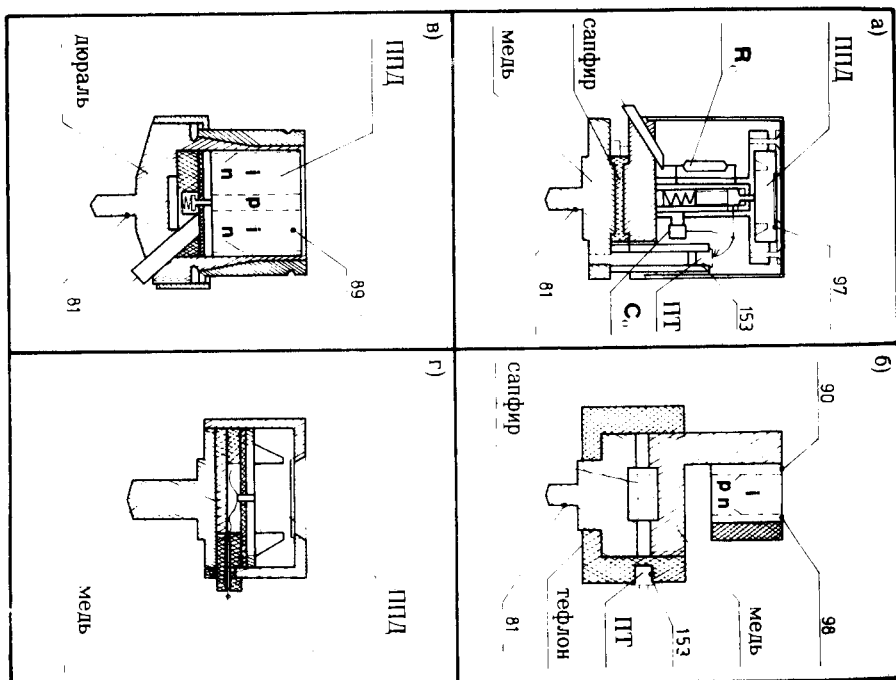


Рис. 6. Характерные узлы ППД, применяющиеся в наших спектрометрах /температурные режимы приведены в К/.

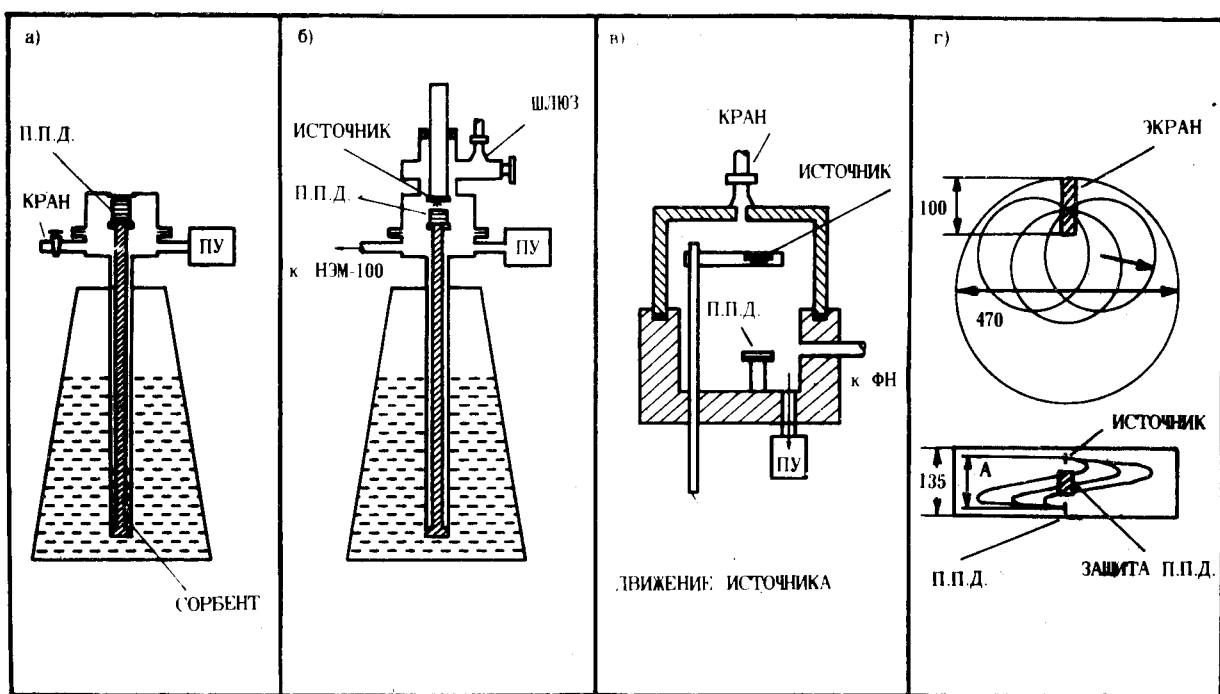


Рис. 7. Конструкции спектрометров для исследования спектров излучений радиоактивных нуклидов.

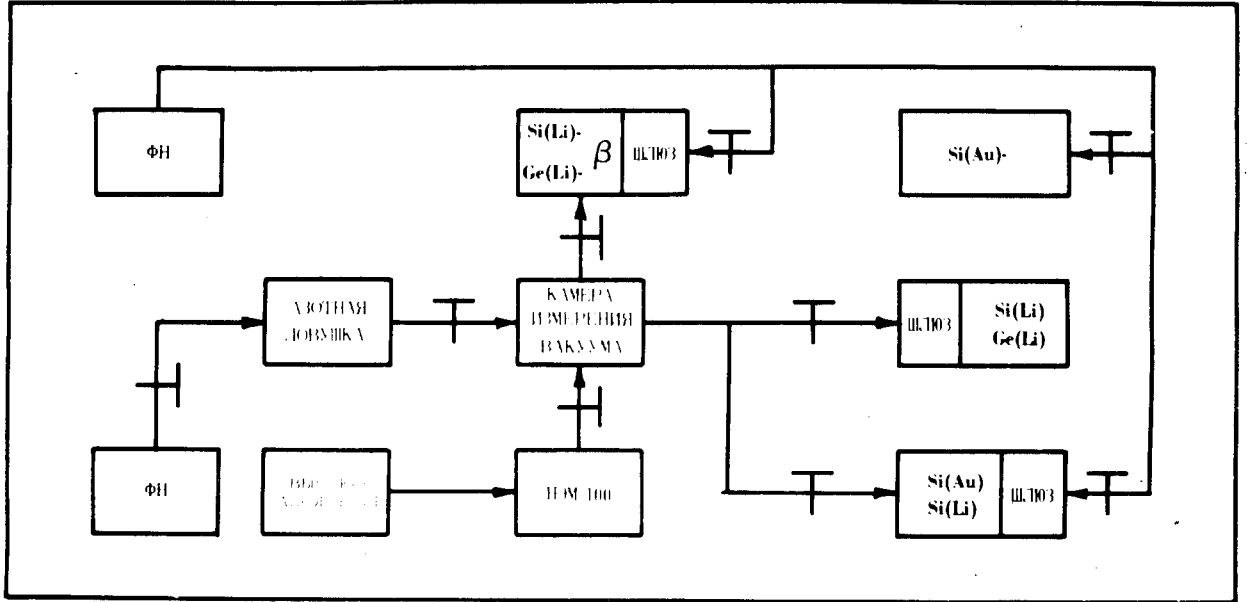


Рис. 8. Схема вакуумной системы спектрометров с ППД для исследования излучений радиоактивных нуклидов.

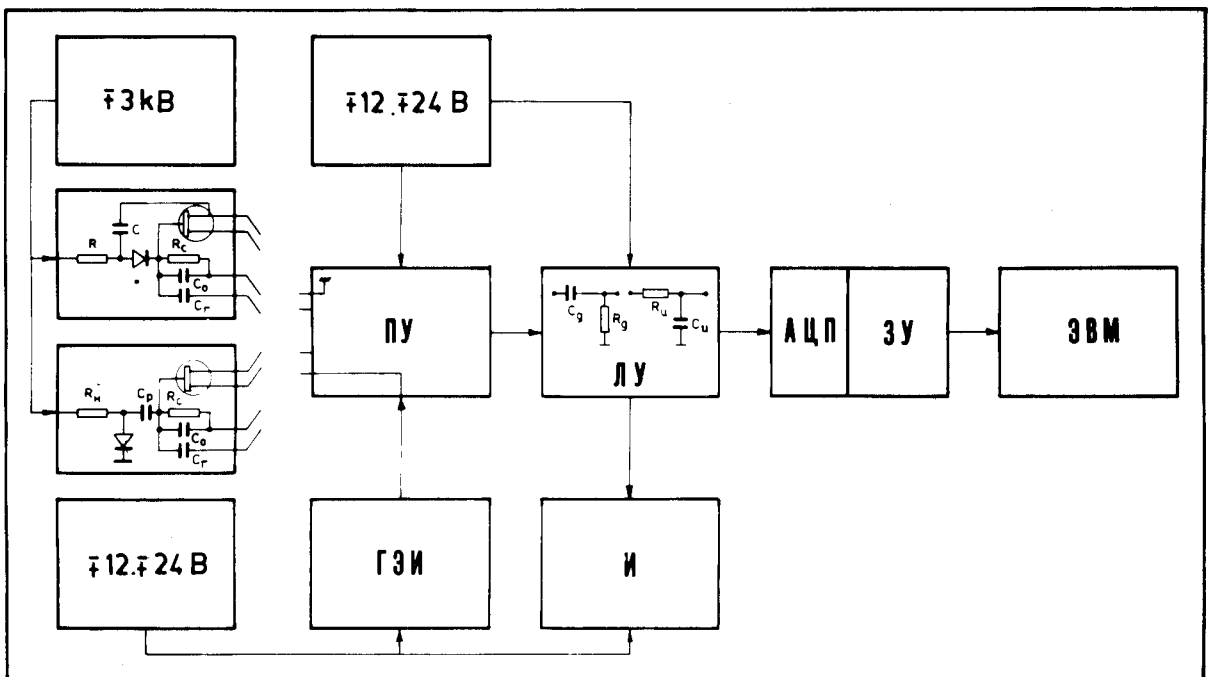


Рис. 9. Блок-схема спектрометров с ППД для исследования излучений радиоактивных нуклидов /ПУ - предусилитель; ЛУ - линейный усилитель; ГЭИ - генератор эталонных импульсов; И - интенсиметр; АЦП - аналого-цифровой преобразователь; ЗУ - запоминающее устройство/.

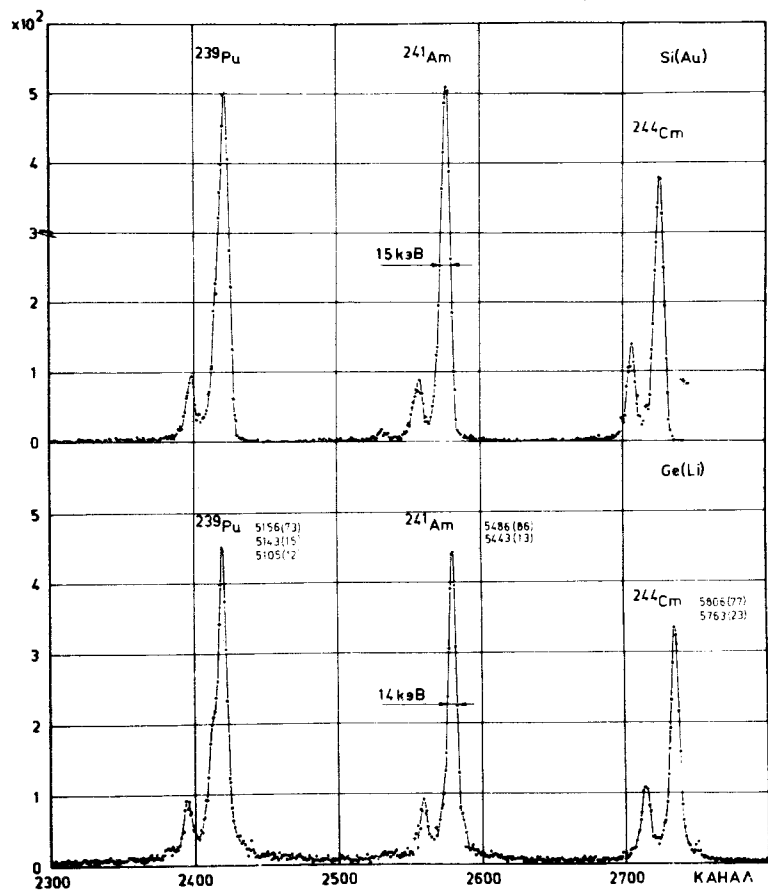


Рис. 10. Спектр  $\alpha$ -частиц  $^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Am} + ^{244}\text{Cm}$ , измеренный с помощью Si(Au)-детектора /30 мм<sup>2</sup> x 0,5 мм -  $T = 295\text{K}$ / и имплантированного Ge(Li) детектора /30 мм<sup>2</sup> x 4 мм -  $T = 77\text{K}$ /. Приведены энергии  $\alpha$ -групп и их относительных интенсивностей /в скобках/.

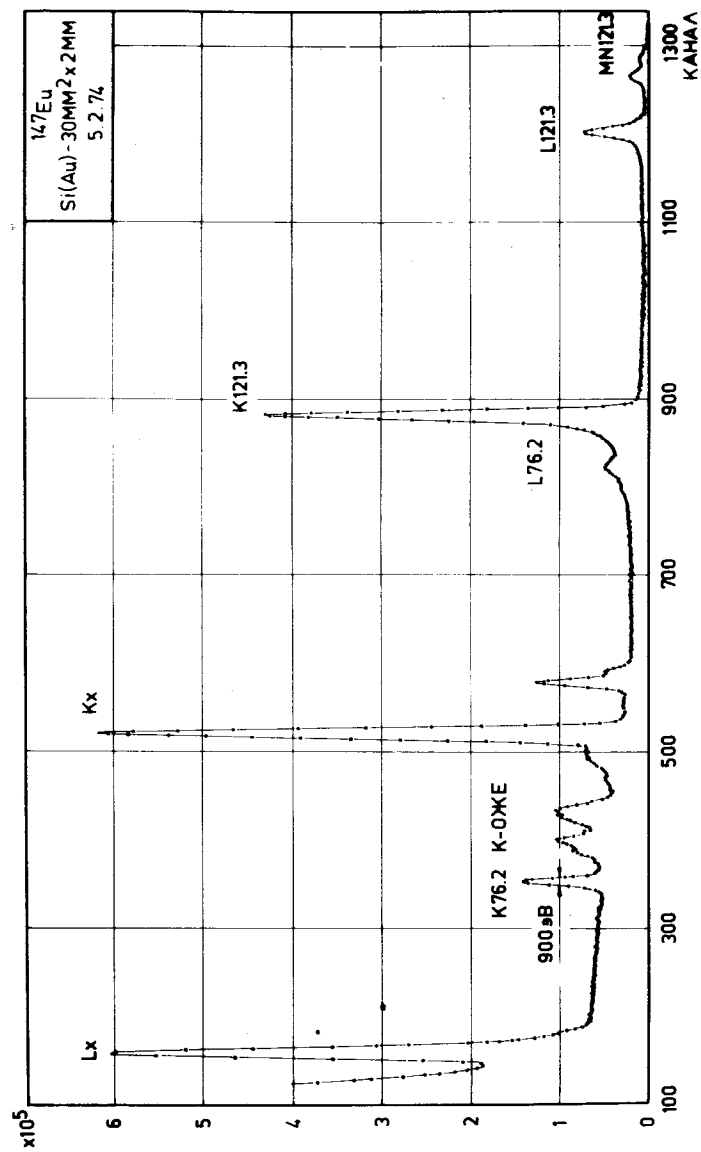


Рис. 11. Спектр конверсионных электронов и низкоэнергетических  $\gamma$ -квантов  $^{147}\text{Eu}$ , измеренный с помощью Si(Au) -детектора /30 мм<sup>2</sup> x 2 мм/.

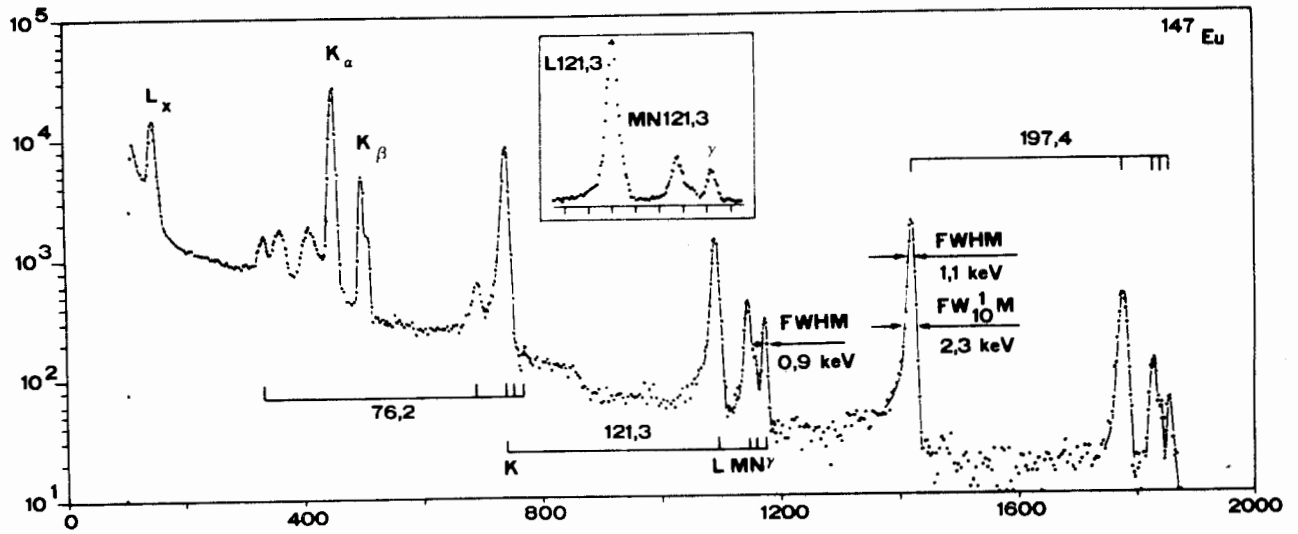


Рис. 12. Спектр конверсионных электронов и низкоэнергетических  $\gamma$ -квантов  $^{147}\text{Eu}$ , измеренный с помощью  $\text{Si}(\text{Li})$ -детектора  $/30 \text{ мм}^2 \times 4 \text{ мм}/$ . Вставка приведена в натуральном масштабе.

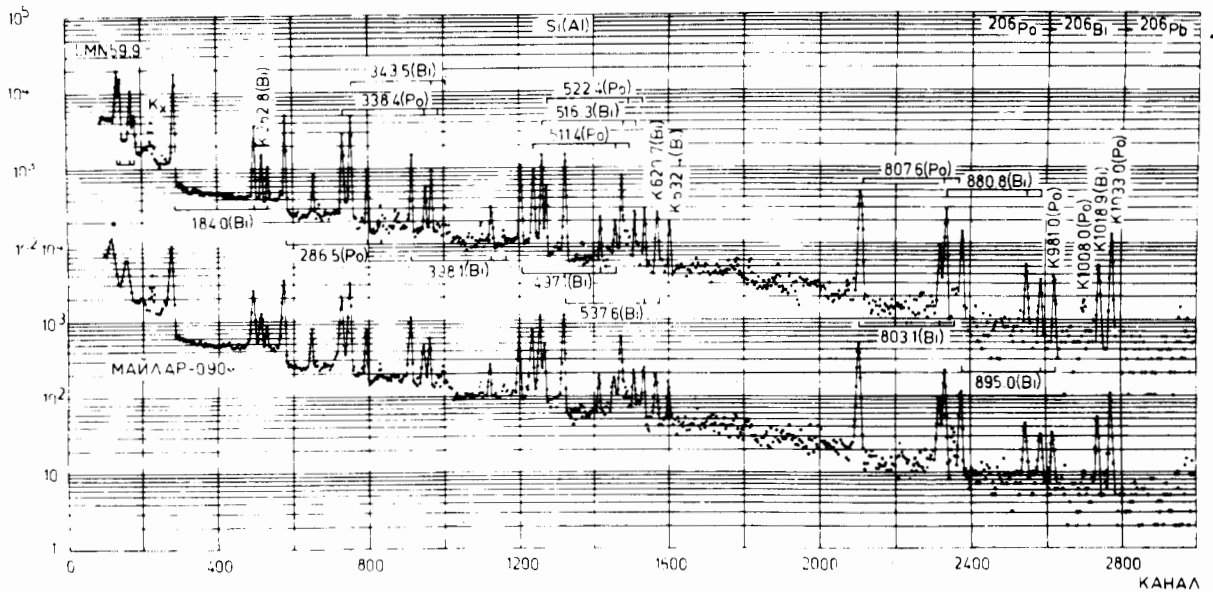


Рис. 13. Спектр конверсионных электронов  $^{206}\text{Po} + ^{206}\text{Bi}$ , измеренный с помощью  $\text{Si}(\text{Al})$ -детектора  $/30 \text{ мм}^2 \times 2 \text{ мм}/$  с майларовым входным окном  $/0,90 \text{ мг/см}^2/$  и без него.



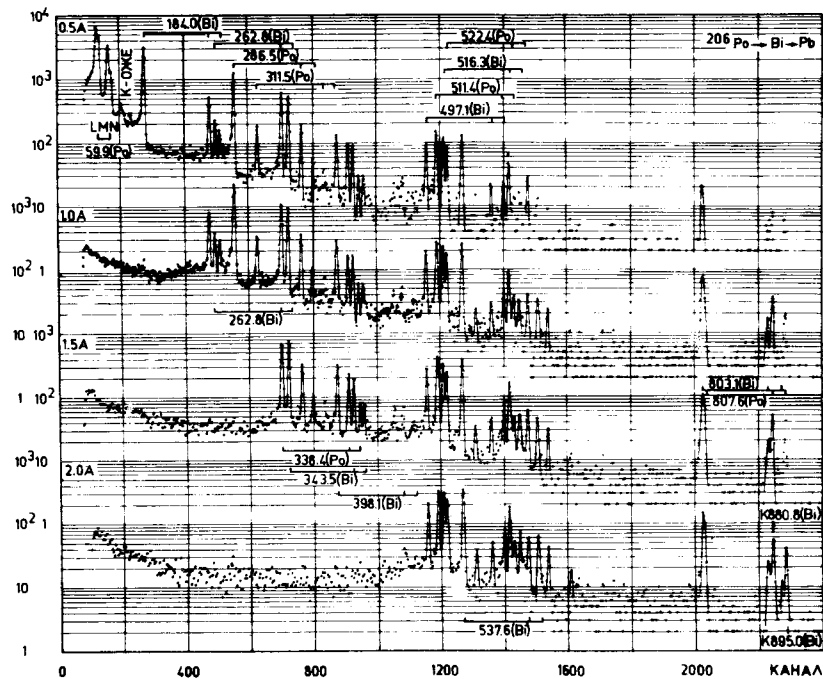


Рис. 14. Спектр конверсионных электронов  $^{206}\text{Po} + ^{206}\text{Bi}$ , измеренный с помощью  $\text{Si}(\text{Li})$ -детекторов  $/800 \text{ мм}^2 \times 4 \text{ мм}/$  в однородном магнитном поле при различных значениях тока в обмотках магнита.

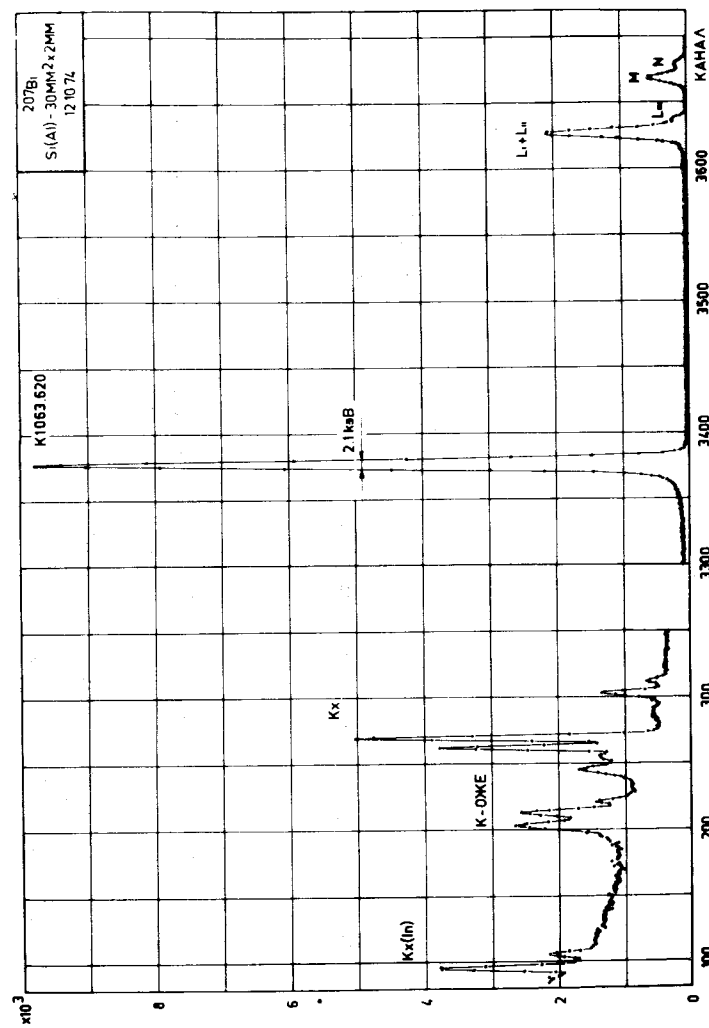


Рис. 15. Фрагменты спектра электронов и низкоэнергетических  $\gamma$ -квантов  $^{207}\text{Bi}$ , измеренного с помощью  $\text{Si}(\text{Li})$ -детектора  $/30 \text{ мм}^2 \times 2 \text{ мм}/$ .

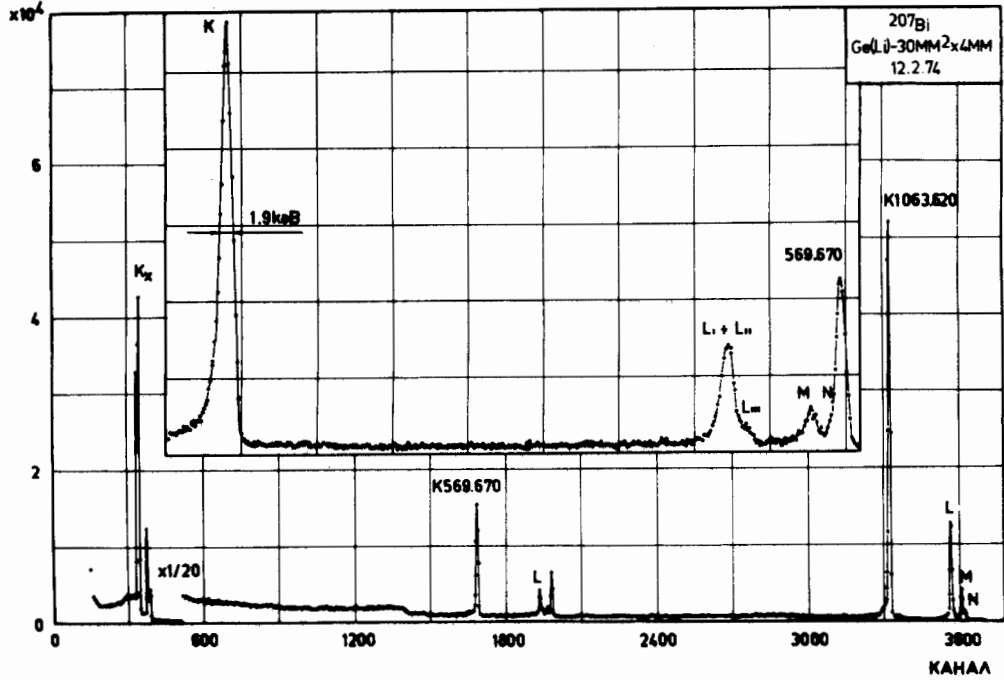


Рис. 16. Спектр конверсионных электронов и  $\gamma$ -лучей  $^{207}\text{Bi}$ , измеренный с помощью имплантированного  $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектора /30 мм<sup>2</sup> x 4 мм/.

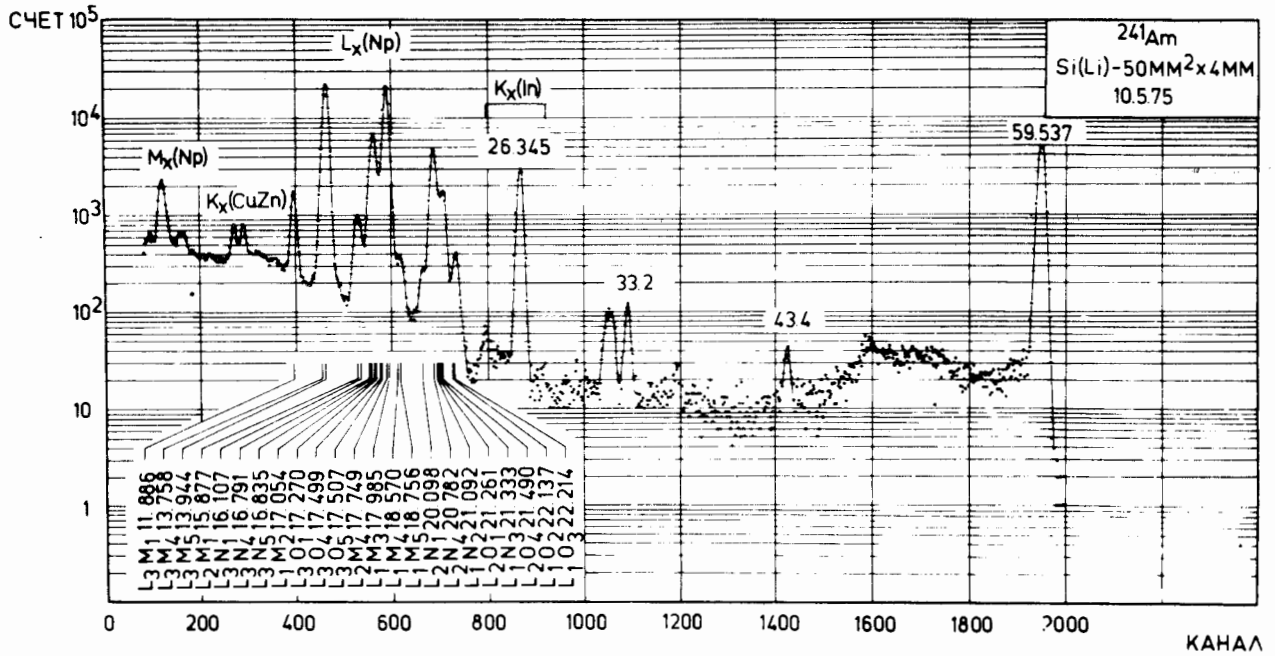


Рис. 17. Спектр гамма-лучей  $^{241}\text{Am}$ , измеренный с помощью  $\text{Si}(\text{Li})$  /50 мм<sup>2</sup> x 4 мм/-детектора /энергетическое разрешение 280 эВ для  $E_\gamma = 5,6$  кэВ/.

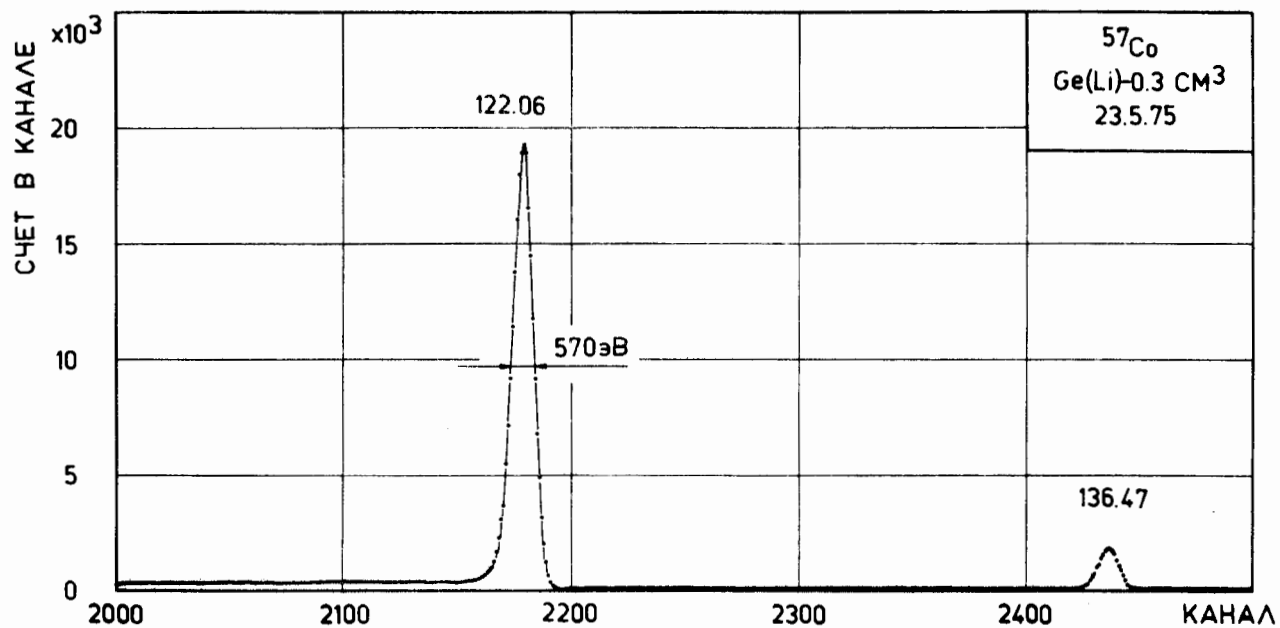


Рис. 18. Спектр гамма-лучей  $^{57}\text{Co}$ , измеренный с помощью Ge(Li)-детектора /0,3 см<sup>3</sup>/.

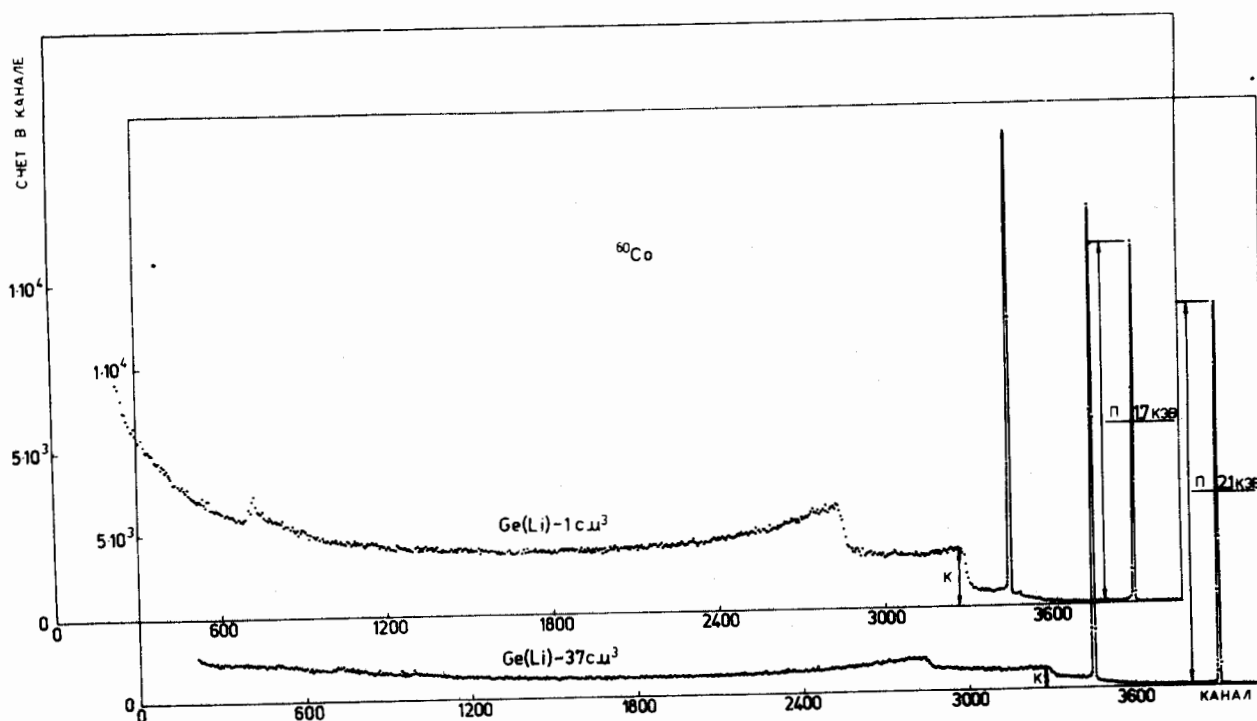


Рис. 19. Спектр гамма-лучей  $^{60}\text{Co}$ , измеренный с помощью Ge(Li)-детекторов 1 см<sup>3</sup> и 37 см<sup>3</sup>.

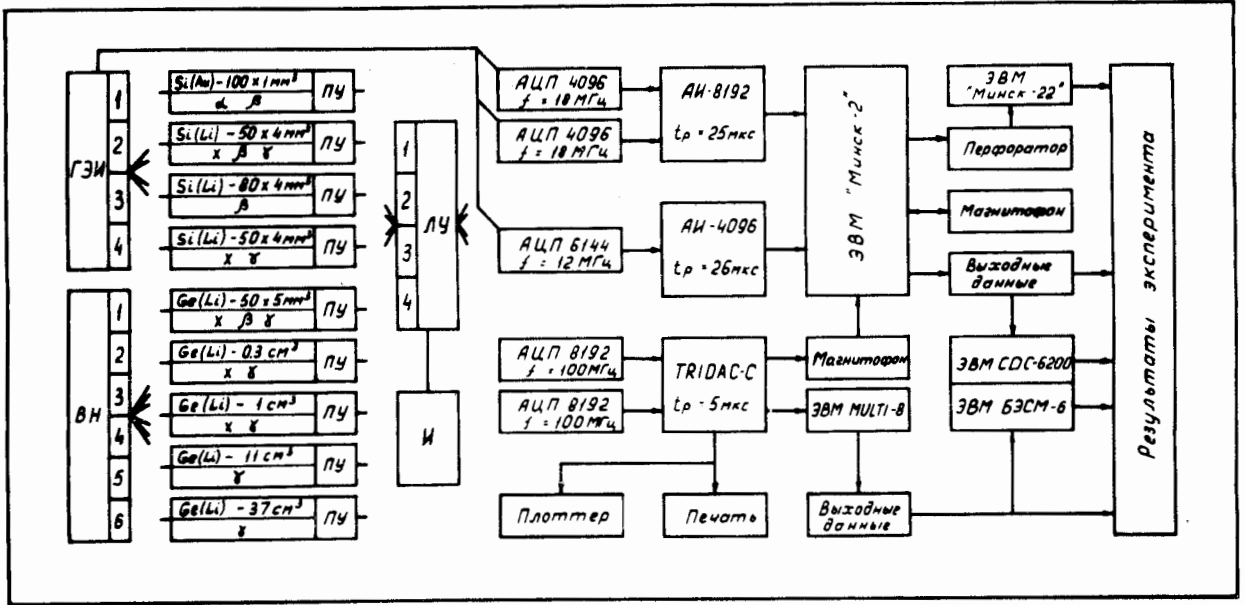


Рис. 20. Спектрометрические каналы и анализирующая аппаратура для исследования излучений радиоактивных нуклидов.

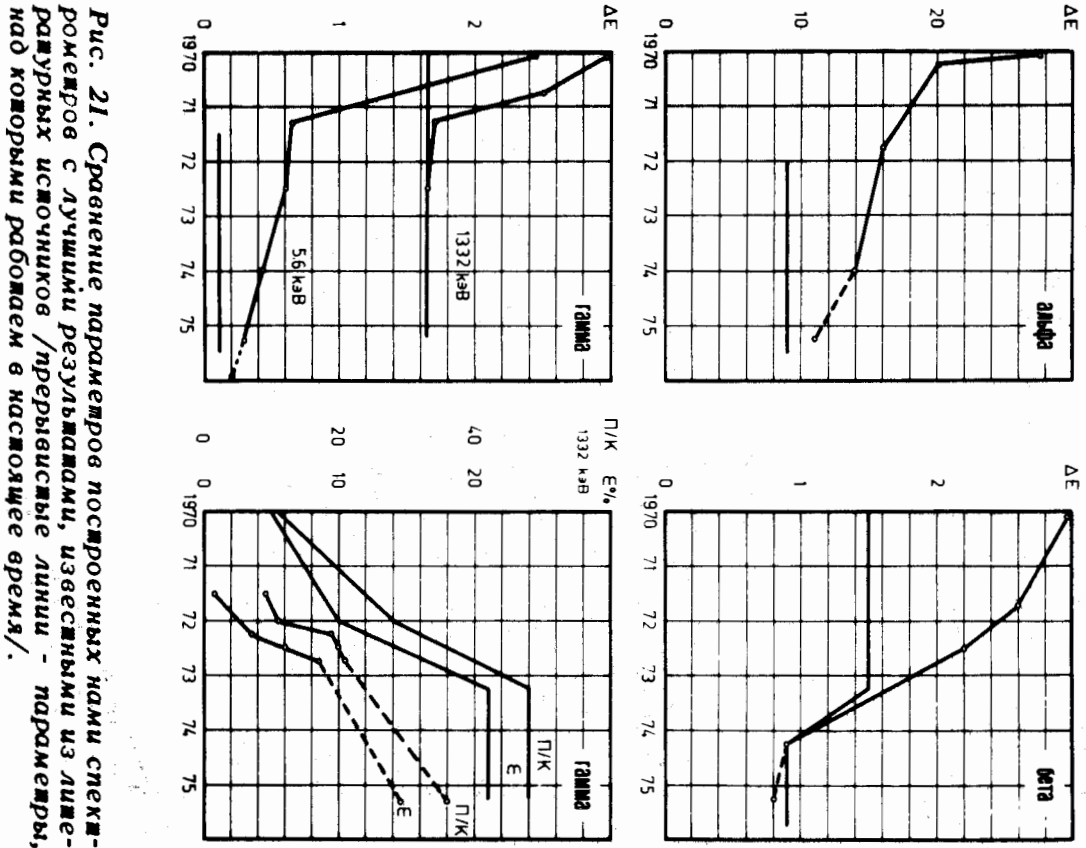


Рис. 21. Сравнение параметров построенных нами спектрометров с лучшими результатами, известными из литературы источников /первыи известные линии - параметры, над которыми работаем в настоящее время/.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить проф. К.Я.Громова, В.Г.Чумина, Ж.Желева и В.Г.Калинникова за постоянный интерес к данной работе, С.Орманджиева, З.Зайдлера, В.И.Фоминных, Д.Срнку, В.Г.Сандуковского, Й.Крацикову, Е.Береги, Л.Пермякову - за советы, помощь и участие на различных этапах работы, Н.Калинину, Л.Мионову и В.Жукову - за большую помощь в изготовлении ППД, а также С.Минькова, В.Пелевинова и Г.Илиева за выполнение всех механических работ.

#### Литература

1. А.Н.Тихонов. ДАН СССР, 151, 501 /1963/.
2. G.Bertolini, F.Cappellani and G.Restelli. Nucl.Instr. and Meth., 112, 219 (1973).
3. Прикладная спектроскопия с полупроводниковыми детекторами, М., Атомиздат, 1974.
4. Ц.Вылов, И.Н.Егошин и др. Препринт ОИЯИ, Р6-8378, Дубна, 1974.
5. Ц.Вылов, И.Н.Егошин и др. ПТЭ, №3, 45 /1973/.
6. Ц.Вылов, И.Н.Егошин и др. Сообщения ОИЯИ, Р13-6759, Дубна, 1972.
7. С.К.Васильев, Ц.Вылов и др. Препринт ОИЯИ, Р13-8026, Дубна, 1974.
8. Л.Гумнерова, Б.П.Осипенко и др. Сообщения ОИЯИ, 13-7341, Дубна, 1973.
9. Э.В.Васильева, Б.И.Воронов, А.М.Говоров. Сообщения ОИЯИ, Р13-6103, Дубна, 1971.
10. Е.Береги, Ц.Вылов и др. Сообщения ОИЯИ, Р13-6830, Дубна, 1972.
11. В.С.Александров, Ц.Вылов и др. Сообщения ОИЯИ, Р6-7308, Дубна, 1973.
12. Э.Г.Имаев и др. ОИЯИ, Р10-3332, Дубна, 1967.
13. TRIDAC-C. Specifications and Operation, Intertechnique, 1971.
14. З.Зайдлер, Е.Г.Кондрат и др. Сообщения ОИЯИ, 10-7074, Дубна, 1973.
15. В.С.Александров, Ц.Вылов и др. Сообщения ОИЯИ, 11-7319, Дубна, 1973.
16. В.В.Авдейчиков, О.В.Ложкин. Сб. "Прикладная ядерная спектроскопия", Атомиздат, стр. 200 /1970/.

17. Ю.К.Акимов, А.И.Калинин, А.Ф.Кушнирук, Х.Юнг-клауссен. Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение, Атомиздат, 1967.
18. E.Elad. Proc. Ispra Nucl. Electronics Symp., p. 21, 1969.
19. С.Аврамов, Л.Александров и др. Сообщения ОИЯИ, 10-6467, Дубна, 1972.
20. К.Я.Громов и др. ЭЧАЯ, т. 6, вып. 4, Атомиздат, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 июля 1975 года.