

76

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

ДЕТЕКТОРЫ РЕНТГЕНОВСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ
ФИЗИКИ СО АН СССР

ПРЕПРИНТ ИЯФ 79 - 102

Новосибирск

1. РЕЗЮМЕ

Рентгеновое излучение широко применяется для исследования структуры микро- и макрообъектов в различных областях науки и техники. Однако проблема эффективной регистрации рентгеновского излучения (РИ) на протяжении времени не имеет решения. Для регистрации РИ широко используются фотопленки, обладающие высокой чувствительностью к рентгеновскому излучению.

ДЕТЕКТОРЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

А Н Н О Т А Ц И Я

Описаны одно- и двухкоординатные детекторы рентгеновского излучения, разработанные в Институте ядерной физики СО АН СССР и предназначенные для дифракционных рентгеноструктурных исследований и применения в медицине.

В последние годы в литературе [1-4] описаны различные конструкции детекторов рентгеновского излучения (РИ), разработанные для фиксации плоских изображений, возникающих на экране при дифракционных исследованиях. Однако наиболее развитыми являются детекторы РИ в виде пленки, применяемые в медицине [5] и в промышленности [6].

Принцип работы РИ основан на том, что при попадании на него рентгеновского излучения происходит образование пар электронов и позитронов. При этом выделяется тепло, которое приводит к изменению оптических свойств пленки. В результате между экраном и пленкой возникает изображение (3-10) мк. Для получения более высокого разрешения (1-2) мк. детектор должен обладать толщиной (10-30) мк, что требует применения пленки толщиной (10-30) мк. Однако пленки такой толщины имеют очень низкую чувствительность к рентгеновскому излучению, поэтому для повышения чувствительности детектора необходимо использовать пленки толщиной (10-30) мк.

I. ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновское излучение давно используется для исследования структуры микро- и макрообъектов в различных областях науки и техники. Однако проблема эффективной регистрации рентгеновского излучения (РИ) до настоящего времени не решена полностью. Для регистрации РИ широко используется фотопленка, обладающая высоким пространственным разрешением. Существенными недостатками фотопленки являются низкая эффективность и ограниченный динамический диапазон. В некоторых случаях еще большее значение имеет тот факт, что на основе фотопленки нельзя создать детекторы, работающие в режиме прямой связи с ЭВМ, хотя именно такой режим работы должен позволить эффективно использовать большие объемы информации, которые могут быть получены в рентгеноструктурных исследованиях.

Определенные преимущества по сравнению с фотопленкой были получены при решении некоторых рентгеноструктурных задач за счет применения счетчиков рентгеновских квантов и групп таких счетчиков. Однако значительно больший прогресс в этом отношении может быть получен при использовании для регистрации РИ многопроволочных пропорциональных камер.

Уже в первых работах Шарпака /1-3/ в 1968 г., посвященных многопроволочным пропорциональным камерам (МПК), разработанным для физики высоких энергий, указывалось на широкие возможности использования таких камер для регистрации РИ и нейтронов при структурных исследованиях. Большое количество работ, выполненных в последние годы и посвященных использованию МПК в различных прикладных задачах /4-6/, подтвердило этот прогноз.

Принцип работы МПК весьма прост. МПК обычно состоит из трех параллельных плоскостей: анодной и окружающих её двух катодных. Плоскости выполнены из тонких натянутых проволочек. Расстояние между анодной и катодными плоскостями (3-10) мм, расстояние между соседними проволочками (1-5) мм. Диаметр анодных проволочек (10-30) мк, катодных (50-200) мк. Камера помещается в объем, заполненный рабочим газом (обычно одним из благородных газов с какими-нибудь добавками). Напряжение между анодной и катодными плоскостями составляет несколько киловольт.

При поглощении в чувствительном объеме камеры рентгеновского кванта возникает первичная ионизация. Электронная компонента под действием электрического поля дрейфует к анодной проволочке и вблизи нее попадает в область высокой напряженности поля. За счет ударной ионизации возникает электронно-ионная лавина, и на анодную проволочку, около которой образовалась лавина, наводится отрицательный заряд. На катодные проволочки, расположенные вблизи лавины, наводятся положительные заряды. Наведенные заряды регистрируются электроникой. Две плоскости с ортогонально направленными проволочками (две катодные или анодная и катодная) позволяют определить две координаты точки поглощения рентгеновского кванта.

Существует несколько способов съема информации с МПК. Один из них — регистрация наведенного заряда на анодной проволочке с помощью интегрального усилителя — дискриминатора. Номер сработавшего дискриминатора определяет координату зарегистрированного кванта. В МПК, разработанных для прикладных целей, часто используется метод съема информации с помощью линии задержки. Каждая проволочка катодной или анодной плоскости через емкость или гальванически соединяется с линией задержки. Наведенные на проволочки заряды создают сигнал на определенном участке линии задержки, который распространяется в обе стороны к концам линии. По разности времен прихода сигналов на концы линии задержки можно определить координату точки, в которой образовалась лавина. Еще один способ основан на делении тока (связанного с наведенным зарядом) на высоком активном сопротивлении анодной проволочки. В другом методе с помощью зарядо-цифровых преобразователей измеряются заряды, наведенные на катодные проволочки, и затем вычисляется центр тяжести наведенных зарядов.

Основные характеристики пропорциональных камер хорошо удовлетворяют требованиям, которые предъявляются к детекторам рентгеновского излучения, предназначенным для рентгеноструктурных исследований. Эффективность регистрации составляет (10–100)% в широком диапазоне энергий. Пространственное разрешение МПК лежит в пределах (0,1–1) мм, быстродействие составляет (0,1–1) МГц. Возможно получение быстродействия до 10 МГц. Энергетическое разрешение пропорциональных камер составляет (10–30)%. Важными преимуществами МПК являются широкий динамический диапазон ре-

гистрируемых интенсивностей излучения при высокой точности измерений, а также возможность работы в режиме прямой связи с ЭВМ. Это позволяет оперативно наблюдать рентгенограммы с помощью дисплея при настройке и измерении.

В Институте ядерной физики Сибирского отделения АН СССР было разработано четыре детектора рентгеновского излучения /7–10/. При их описании основное внимание будет уделено характеристикам, представляющим наибольший интерес для использования этих приборов в рентгеноструктурных исследованиях.

2. ОДНОКООРДИНАТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

а) Однокоординатный детектор с высоким пространственным разрешением. Детектор состоит из пропорциональной камеры, блока электроники и многоканального анализатора импульсов (АИ). Конструкция пропорциональной камеры и функциональная схема детектора приведены на рис. 1. Анодная нить диаметром 20 мк расположена над распределенной плоской линией задержки, которая выполняет роль катода. Линия задержки намотана медным проводом диаметром 0,15 мм с шагом 0,2 мм; погонная задержка распространения сигнала в линии составляет 5 нс/мм. Второй катод из бериллиевой фольги является одновременно входным окном камеры. Расстояние анод-катод составляет 4 мм. Рабочий газ — Хе +10% CO₂.

Электронно-ионная лавина, возникающая при регистрации рентгеновского кванта, наводит заряд на линию задержки. Сигнал с каждого конца линии задержки через предусилитель и усилитель поступает на дискриминатор. Разность времен между выходными сигналами двух дискриминаторов измеряется с помощью время-амплитудного конвертора и АИ. Эта разность времен линейно связана с координатой зарегистрированного кванта. Шкала анализатора калибруется с помощью коллимированного рентгеновского источника. По этой же калибровке определяется ширина канала в мм.

Для введения энергетической дискриминации дополнительный сигнал снимается с анода пропорциональной камеры. Амплитуда анодного сигнала пропорциональна энергии зарегистрированного кванта. После усиления анодный сигнал подается на дискриминатор с регулируемым нижним и верхним порогами. Выходной сигнал дискриминатора управляет работой время-амплитудного конвертора. Пред-

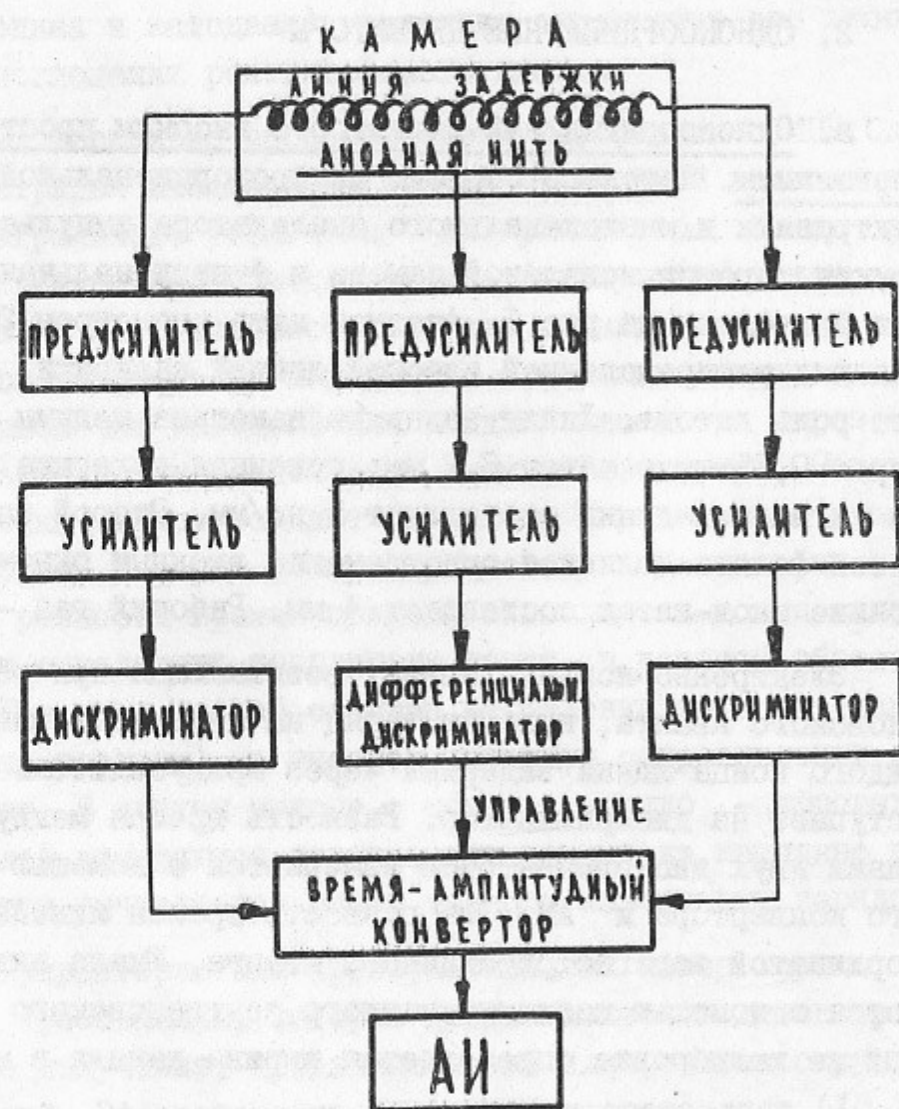
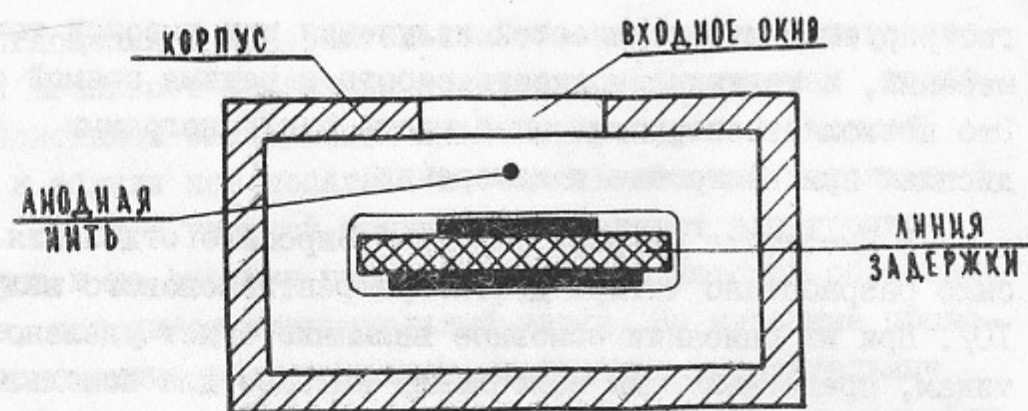


Рис.1. Поперечное сечение пропорциональной камеры и блок-схема однокоординатного детектора.

усилители размещены в корпусе пропорциональной камеры, остальная электроника составляет один электронный блок.

Однокоординатный детектор имеет следующие характеристики: чувствительная поверхность — $100 \times 10 \text{ мм}^2$, пространственное разрешение для РИ с энергией 8 кэВ составляет 0,11 мм (ППВ). Разрешение не ухудшается до загрузки 20.000 квантов/с на 1 мм анодной нити. Интегральная нелинейность — 1 мм, среднеквадратичная дифференциальная нелинейность около 3%. Эффективность камеры при энергии 8 кэВ — 70%, энергетическое разрешение составляет 18%. Максимальное быстродействие детектора — 10 кГц (ограничено быстродействием регистрирующей электроники).

б) Детектор для многокадровой съемки рентгенограмм. Этот детектор был создан для динамических рентгеноструктурных исследований. Блок-схема детектора вместе с оборудованием, использовавшимся для многокадровой съемки процесса сокращения живой мышцы лягушки /II/, приведена на рис.2. В детекторе используется пропорциональная камера с линией задержки, которая была описана выше.

Для повышения быстродействия установки интервал времени между импульсами, приходящими с концов линии задержки, измеряется временным кодировщиком с частотой 250 МГц. Выбранная частота ограничивает пространственное разрешение детектора. Информация о координате зарегистрированного кванта с время-цифрового преобразователя поступает в ЭВМ через статистический разравниватель и сумматор сдвига. Статистический разравниватель на 4 события позволяет уменьшить просчеты, связанные со статистическим характером загрузки. Через сумматор сдвига осуществляется управление сменой кадра.

Во время эксперимента /IO/ ЭВМ управляет такими операциями, как открывание затвора рентгеновского пучка, стимулирование мышц, измерение с помощью тензодатчика силового напряжения мышцы во время каждого кадра. Через программный канал ЭВМ устанавливается также временной режим работы детектора — разбиение времени измерения на определенное число кадров заданной длительности, задание интервала между измерениями и числа повторных стимуляций для улучшения статистической точности. Вывод информации осуществляется с помощью дисплея и широкой

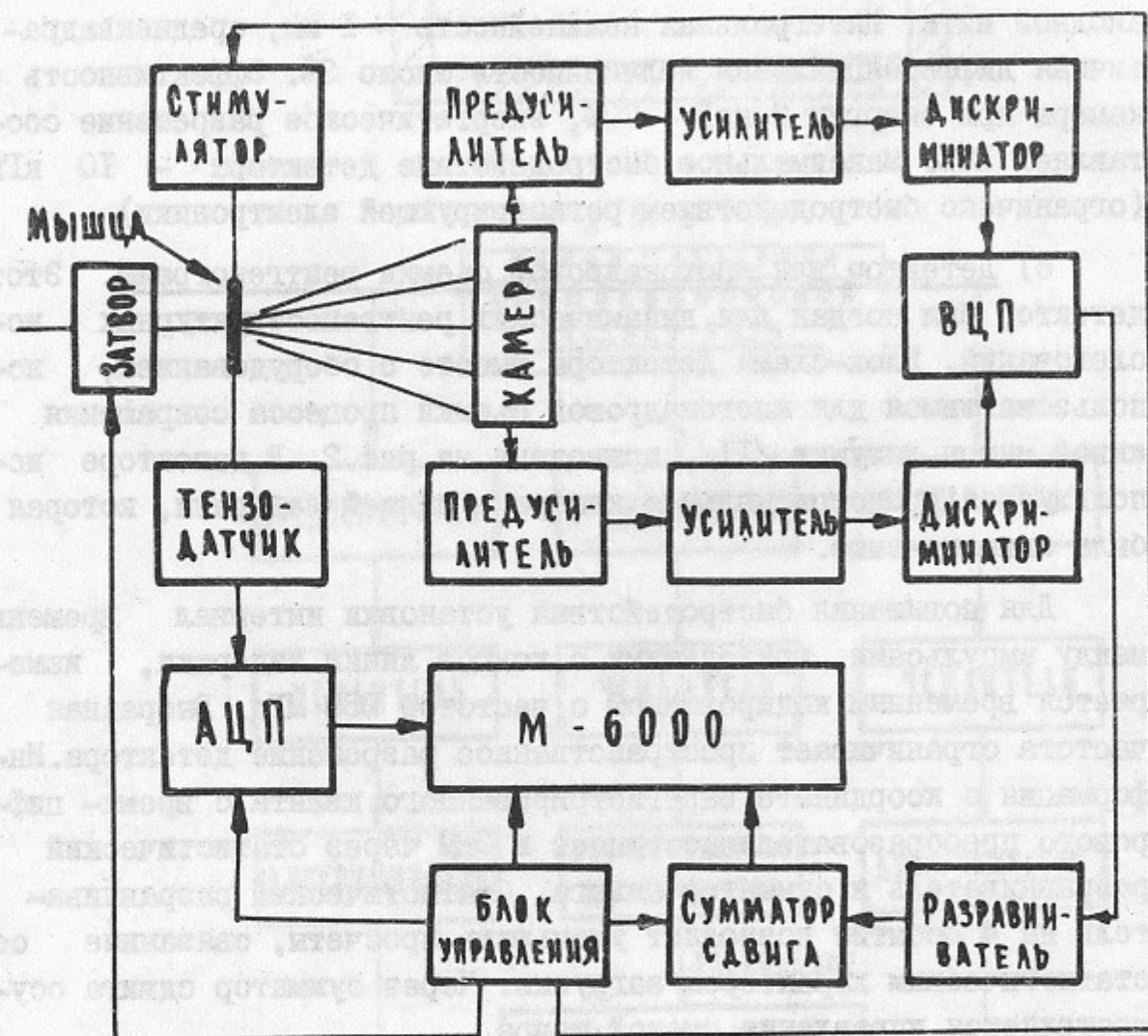


Рис.2. Блок-схема детектора для многокадровой съемки рентгенограмм.

пифропечати. Информация может быть также записана на магнитную ленту.

Детектор имеет следующие характеристики: число каналов - 256, ширина канала - 0,4 мм, число кадров - 64, быстродействие детектора - 250 кГц. Для иллюстрации работы детектора на рис.3 показан один из 64 кадров рентгенограммы, полученный группой А.А.Вазинной, в эксперименте с мышцей на синхротронном пучке накопителя ВЭШ-3 /II/.

В настоящее время для этого детектора изготовлена пропорциональная камера в виде креста, представляющая собой две совмещенные однокоординатные камеры с ортогональными анодными нитями. Такая камера позволяет одновременно измерять экваториально и меридианально рассеянное излучение.

в) Быстрый однокоординатный детектор. Пропорциональная камера этого детектора состоит из 128 коротких анодных проволок, расположенных между двумя катодами, выполненными из фольги. Один из катодов одновременно служит входным окном камеры. Расстояние между анодными проволоками - 2 мм. Каждый анод соединен с усилителем-формирователем. Координата зарегистрированного кванта определяется по номеру сработавшего усилителя-формирователя, сигналы с которых регистрируются 128 пересчетными устройствами. Пересчетные устройства выполнены в стандарте "САМАС" и соединены через контроллер с ЭВМ.

Быстродействие детектора составляет 40 МГц. Чувствительная поверхность камеры - 256x10 мм, число каналов 128, ширина канала - 2 мм, емкость канала - 2^{16} , эффективность регистрации 70% (предварительные результаты).

3. ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ДЕТЕКТОР ДЕД-2

Первый двухкоординатный детектор рентгеновского излучения ДЕД на 64x64 канала был разработан в ИЯФ СО АН СССР в 1975 году /7/. Основным отличием этого детектора от пропорциональных камер, описанных в зарубежной литературе и предназначенных для рентгеноструктурных исследований /12-14/, является его быстродействие, достигнутое за счет параллельного способа съема информации. В ряде областей науки и техники, таких, как меди-

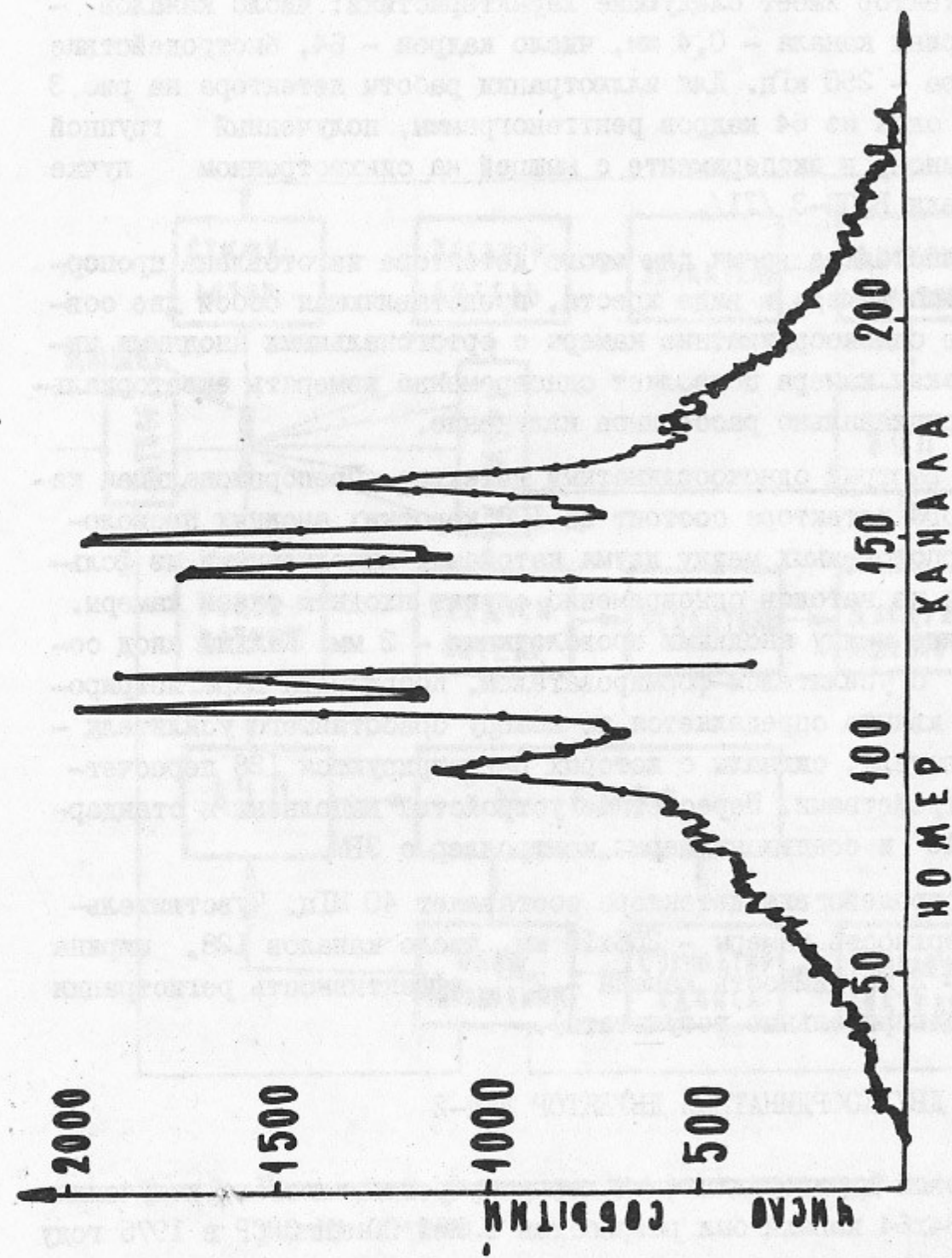


Рис. 3. Кадр № 20 малоугловой рентгенограммы мышцы. Время экспозиции кадра - 10 мс. Число повторных стимуляций - 100.

цинская рентгенодиагностика, некоторые методы рентгеноструктурного анализа, исследования динамики процессов и ряд других, быстроедействие является одной из основных характеристик двухкоординатного детектора и должно составлять 10^6-10^7 соб/с.

Детектор ДЕД-2 имеет 128×128 каналов. Размер многопроволочной камеры составляет 256×256 мм². Анодная плоскость выполнена из проволочек диаметром 20 мкм с шагом 2 мм, катодные плоскости намотаны проволокой диаметром 100 мкм с шагом 1 мм. Направление проволочек в двух катодных плоскостях взаимно ортогонально. Расстояние между анодной и катодными плоскостями - 4 мм. Анодные проволочки соединены вместе, на них подается положительный потенциал. Катодные соединены попарно и к ним подключены пороговые элементы - усилители-формирователи, связанные с электроникой обработки. В камере используется рабочая смесь Xe + 10%CO₂. При работе с мягким рентгеновским излучением применяется более дешевая смесь Ar + 20% CO₂.

При поглощении рентгеновского кванта на анодный и катодные электроды наводятся потенциалы. Величина сигнала на электроде зависит от расстояния до лавины. Поэтому при регистрации кванта в каждой катодной плоскости срабатывает группа трактов, соединенных с проволочками, расположенными вблизи места образования лавины. Обе координаты кванта определяются как центр "пятна" сработавших катодных трактов. Применение в детекторах ДЕД такого метода съема информации с двух катодных плоскостей позволяет получить предельное быстроедействие двухкоординатного детектора, которое ограничивается только временем движения зарядов в пропорциональной камере.

Функциональная схема детектора приведена на рис. 4. Установка состоит из следующих основных устройств: двухкоординатной многопроволочной пропорциональной камеры; электроники регистрации, процессора, блока управления и ЭВМ, служащей для запоминания информации, её обработки и управления работой детектора. Информация передается в оперативную память ЭВМ через инкрементный канал. Команды управления поступают с ЭВМ через программный канал.

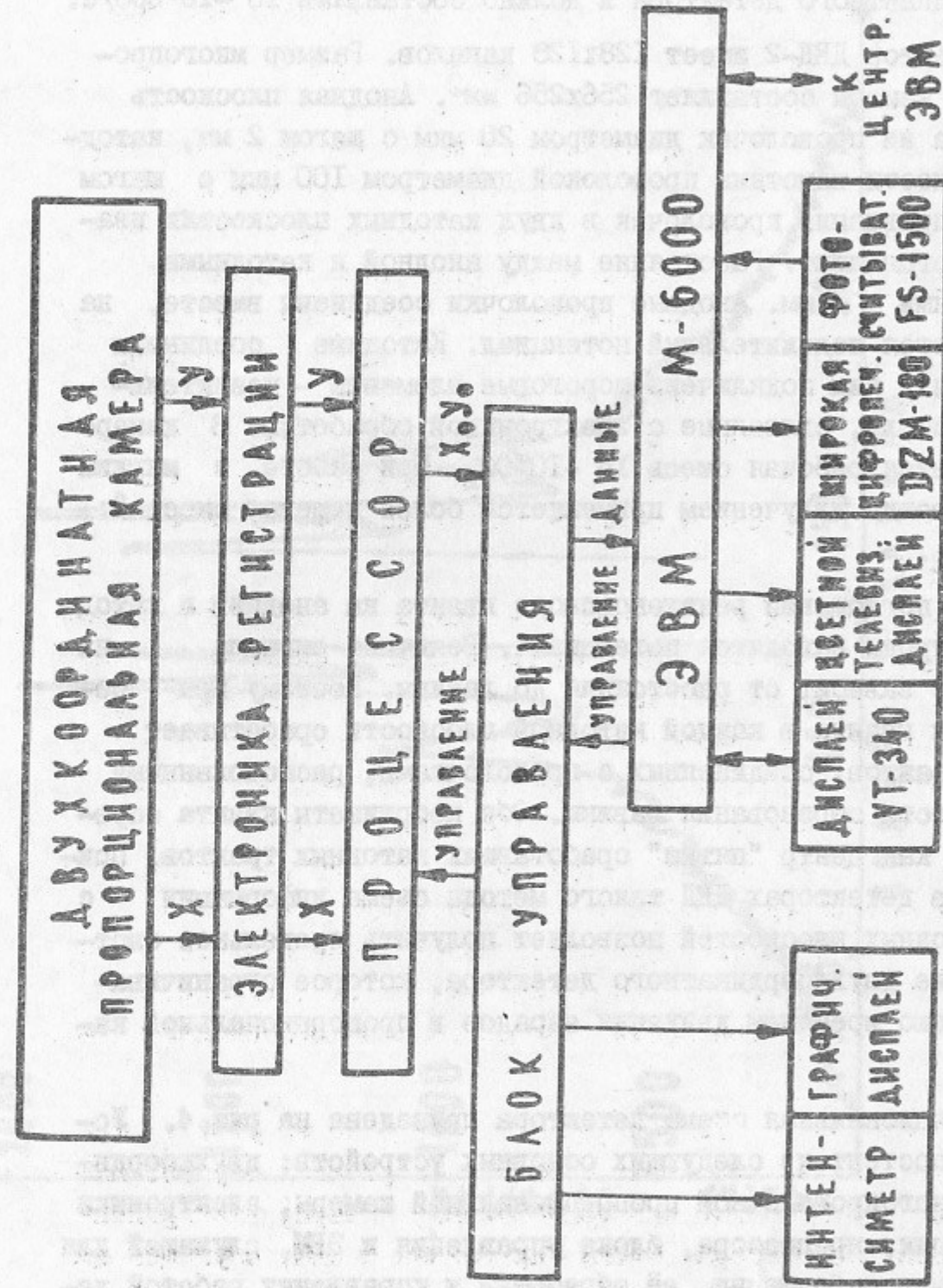


Рис. 4. Функциональная схема двухкоординатного детектора. X, Y, 0 — вычисленные координаты зарегистрированного кванта.

Электроника регистрации представляет собой четыре одинаковых блока по 64 регистрирующих тракта каждый, расположенных по периметру пропорциональной камеры. В качестве усилителя-формирователя применена интегральная микросхема K243AG1, разработанная для съема информации с пропорциональных камер /15/. Примененный способ определения координаты как центра "пятна" сработавших трактов требует высокой идентичности порогов усилителей-формирователей. Порог срабатывания регулируется в пределах (1-5) мВ изменением напряжения питания микросхемы. Для этого в цепь питания каждого тракта включен потенциометр.

Процессор предназначен для быстрого вычисления координат зарегистрированного кванта. Координата события вычисляется как полусумма номеров крайних проволочек сработавших трактов. Процессор бракует событие, если сработали тракты только одной плоскости, а также при числе "пятен" больше 1 по одной или обеим координатам. Определенное процессором число (координаты, центра "пятна" или код "брака") поступает в блок управления.

Блок управления предназначен для передачи информации, поступающей с процессора, в ЭВМ или на дисплей, а также для управления работой детектора. Информация от процессора поступает сначала на статистический разравниватель, а затем на сумматор сдвига. Разравниватель объемом на 4 события применен для уменьшения просчетов при высоких скоростях регистрации. Сумматор сдвига дает возможность программисту наиболее целесообразно распределять оперативную память ЭВМ.

Блок управления содержит также амплитудный дискриминатор, который производит отбор событий по их энергии. Импульсы на вход дискриминатора поступают с анода пропорциональной камеры. В разравниватель поступают только те события, которые удовлетворяют условиям отбора. Кроме процессора и блока управления в электронной стойке расположены также: пульт управления, контрольно-измерительные приборы, дисплей, блок питания электроники и камеры, система газообмена.

Детектор имеет два режима работы. В основном режиме установка передает информацию в память ЭВМ. Результатом работы установки в основном режиме является накопление в памяти ЭВМ квадратной матрицы из 16.000 чисел, каждое из которых представляет

собой количество квантов, зарегистрированных данным каналом детектора. В основном режиме управление работой установки производится с клавиатуры буквенно-цифрового дисплея "Видеотон" через программный канал ЭВМ. Обработку накопленной информации ЭВМ производит по программам, которые передаются с центральной ЭВМ или могут быть считаны с перфоленты. Для вывода информации используются буквенно-цифровой и графический дисплеи. Информация может быть также передана в центральную ЭВМ для запоминания и дальнейшей обработки.

Кроме работы в основном режиме, установка обеспечивает возможность оперативного наблюдения распределения интенсивности квантов по площади детектора. Этот режим осуществлен с помощью дисплея, на экране которого каждый зарегистрированный квант дает вспышку в точке с соответствующими координатами. Такой сервисный режим предназначается для вспомогательных работ — настройки установки, проверки работы пропорциональной камеры и аппаратуры обработки. Сервисный режим удобно использовать в тех случаях, когда необходимо провести взаимное ориентирование источника излучения, образца и детектора, экранирование источника фона. Используя сервисный режим, оператор может сделать предварительную оценку рентгенограммы.

В сервисном режиме установка позволяет также определить полную интенсивность регистрируемого потока рентгеновских квантов, а также интенсивность в любом канале. Для этой цели детектор снабжен устройством типа "трекбол" и интенсивметром. В сервисном режиме оператор имеет возможность проверить основные параметры работы пропорциональной камеры, такие, как эффективность, фон, распределение событий по ширине "пятна", интенсивность любого вида "брака" и др. Работа в сервисном режиме производится без участия ЭВМ. Управление работой установки осуществляется с пульта управления.

Детектор ДЕД-2 имеет следующие характеристики:

1. Число каналов $128 \times 128 \approx 16000$. Площадь канала — $2 \times 2 \text{ мм}^2$; среднеквадратичная ошибка определения координат зарегистрированного кванта — 0,7 мм. Среднеквадратичная неоднородность эффективной площади канала — 4%. При внесении поправок неоднородность может быть уменьшена до 2%. Поправки на неоднород-

ность должны измеряться при равномерном облучении камеры излучением той же энергии, при которой ведутся основные измерения.

2. Рабочее напряжение на камере — 2900 В. Ширина плато составляет 300 В. Эффективность камеры для рентгеновских квантов с энергией 8 кэВ — 60%. При использовании аргона в качестве рабочего газа эффективность составляет 30%.

3. Разрешающее время детектора — 0,1 мкс. Событие, при котором в рабочем объеме камеры в интервале разрешающего времени поглощается два или несколько квантов, регистрируется как "брак". Время вычисления координат кванта составляет 0,7 мкс. Быстродействие детектора — 400 кГц (ограничивается ЭВМ М-6000).

Детектор ДЕД-2 предназначен для рентгеноструктурных исследований и применения в медицине. Для использования детектора разработан комплект программ, которые позволяют с помощью цветного дисплея и широкой цифрочести наглядно представлять полученную в эксперименте информацию (накопленную матрицу чисел). С помощью первой модели такого детектора группа М.А.Мокульского разработала методику рентгеноструктурных исследований кристаллов белка. В настоящее время с помощью этой методики ведется набор данных для расшифровки трехмерной структуры белка-антигиреоидного фитопреципитина /16,17/.

Для иллюстрации возможности применения двухкоординатных детекторов для медицинских целей была снята рентгенограмма кости, помещенной в водный объем толщиной 20 см. Измерения проводились с помощью рентгеновской трубки при напряжении 50 кэВ. Вывод полученной рентгенограммы на цветной дисплей с шестнадцатью градациями интенсивности дает возможность хорошо наблюдать структуру кости. На рис.5 приведена фотография рентгенограммы с экрана дисплея. Здесь следует подчеркнуть, что даже цветной дисплей лишь наглядно представляет рентгенограмму, но далеко не полностью позволяет использовать тот большой объем информации, который дает двухкоординатный детектор. Для каждого типа экспериментов должны быть разработаны специальные методы обработки данных, использующих всю информацию, накопленную в памяти ЭВМ.

Алгоритм съема и обработки информации, используемый в детекторе ДЕД-2, позволяет получить предельное быстродействие

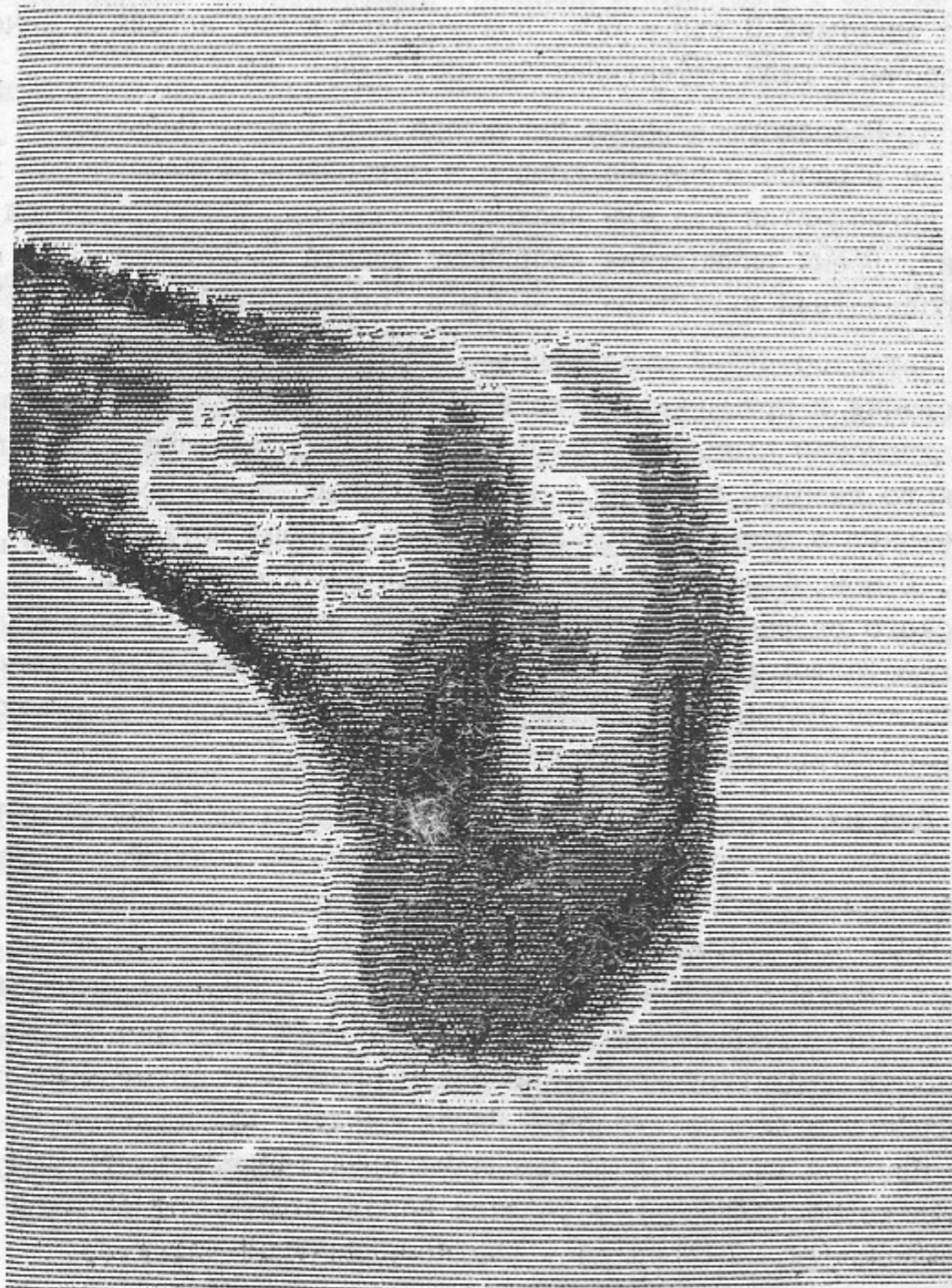


Рис.5. Черно-белый снимок рентгенограммы кости с экрана цветного дисплея

5-10 МГц. Детектор ДЕД-3 с быстродействием 5 МГц в настоящее время разрабатывается в Институте. Его разрешающее время и мертвое время работы процессора будут составлять 50 нс. Для детектора разрабатывается специальная быстрая память с циклом инкремента 100 нс. Для управления работой детектора в электронную стойку будет включена микроЭВМ "Электроника-60".

Л и т е р а т у р а

- I. G.Charpak, R.Bouclier et al. Nucl. Instr. and Meth., 62, 262 (1968).
2. G.Charpak, D.Rahm and Steiner. Nucl. Instr. and Meth., 80, 13 (1970).
3. G.Charpak. Ann. Rev. Nucl. Sci., 20, 195 (1970).
4. V.Perez-Mendez, Proportional and drift chambers in applied investigations. LBL 3851 (1975).
5. G.Charpak. Applications of proportional chambers to some problems in medicine and biology. The Wire Chamber Conference, Vienna, Austria, 14-16 February 1978.
6. Ю.В.Заневский. Проволочные детекторы элементарных частиц. Атомиздат, Москва (1978).
7. С.Е.Бару, В.А.Гусев и др. VIII Международный симпозиум по ядерной электронике, Дубна, 377 (1975).
8. С.Е.Бару, Т.Д.Мокульский и др. ДАН СССР, том 227, I, 82 (1976).
9. S.E.Varu, G.I.Proviz et al. Nucl. Instr. and Meth., 152, 209 (1978).
10. S.E.Varu, G.I.Proviz et al. Nucl. Instr. and Meth., 152, 195 (1978).
- II. А.А.Вазина. Вестник АН СССР, 8, 14 (1978).
12. Борковски и Кошп. Приборы для научных исследований, 8, 3 (1975).
13. S.N.Kaplan, L.Kaufman et al. Nucl. Instr. and Meth., 106, 397 (1973).
14. G.Charpak, C.Demierre et al. Nucl. Instr. and Meth., 141, 449 (1977).
15. С.Е.Бару, С.Г.Басиладзе и др. ПТЭ, 4, 105 (1975).
16. V.A.Bryzgunov, M.D.Lutsik et al. J.Molec Biol., 101, 435 (1976)
17. Т.Д.Мокульская, С.В.Кузев, М.А.Мокульский. Тезисы VI Международного биофизического конгресса, 3-9 сент. 1978. Киото, Япония, стр.190.

Работа поступила - 17 сентября 1979 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ
Подписано к печати 4.X-1979 г. МН 03078
Усл. 2,0 печ.л., 0,9 учетно-изд.л.
Тираж 250 экз. Бесплатно
Заказ № 102.

Отпечатано на роталпринте ИЯФ СО АН СССР