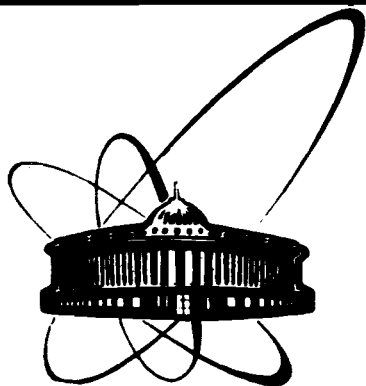


89-550



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

К-56

Д13-89-550

А. Кишваради, Й. Молнар, Л. М. Сороко,
В. В. Терещенко, И. Торма

**ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛА К ШУМУ
В МЕЗООПТИЧЕСКОМ ФУРЬЕ-МИКРОСКОПЕ**

Направлено на Оптическую конференцию
(Эрнст Аббе-конференцию), Иена, ГДР, 1989г.

1989

1. ВВЕДЕНИЕ

Мезооптический фурье-микроскоп /МФМ/ для ядерной фотоэмульсии^{/1-6/} предназначен для быстрого поиска и обмера прямых следов частиц в ядерной фотоэмульсии по заданным значениям угла ориентации и угла погружения искомого следа частицы. При помощи МФМ были обнаружены и обмерены следы частиц высокой ионизации, которые находились в заданном участке ядерной фотоэмульсии и попадали в заданный интервал углов ориентации^{/1/}. При этом регистрировалось только одно из двух мезооптических изображений прямых следов частиц без сканирования вдоль z-координаты. Несмотря на то, что разрешение МФМ вдоль радиальной координаты составляло ± 50 мкм, МФМ формировал четкие мезооптические изображения следов частиц шириной всего 1,5 мкм. Указанная погрешность в оценке радиальной координаты в МФМ соответствовала входной апертуре традиционного оптического микроскопа, равной 1:100. Этот факт свидетельствует о том, что МФМ характеризуется высоким отношением сигнала к шуму. В^{/7,8/} была сделана первая попытка построить модель шумов в МФМ, в которой была учтена зернистая структура следа частицы. В частности, было показано, что отношение сигнала к шуму в МФМ возрастает прямо пропорционально радиусу фокального кольца R и обратно пропорционально диаметру поля зрения D. В^{/9/} было показано, что наличие эффекта естественной аподизации в МФМ приводит к селективному повышению отношения сигнала к шуму для релятивистских следов частиц и к подавлению сигналов от маркировочной сетки на поверхности слоя ядерной фотоэмульсии и от других объектов, ширина которых больше ширины релятивистского следа частицы ~ 1 мкм. Мезооптические изображения следов протонов с энергией 250 ГэВ были впервые зарегистрированы при помощи МФМ в^{/3/}. При этом ширина мезооптического изображения такого следа протона равнялась 1,8 мкм. При помощи отрицательной цилиндрической линзы^{/10/} мезооптическое изображение прямого следа частицы было перенесено на матрицу прибора с зарядовой связью и наблюдалось на экране телевизионного дисплея^{/3,4/}. Причины селективного подавления интенсивности мезооптических изображений широких объектов в МФМ найдены в^{/11/}, где было показано, что сверточное ядро МФМ в меридиональном сечении представляет собой производную от дельта-плюс функции Дирака.

В^{/12/} было доказано, что в сагиттальном сечении МФМ можно рассматривать как одномерную камеру обскура. Там же было получено соотношение между разрешением МФМ в сагиттальном сечении вдоль угловой координаты и диаметром поля зрения МФМ, а также отмечено, что эффективное угловое разрешение МФМ определяется только диаметром кроссовера сходящегося пучка света и радиусом фокальной окружности.

Экспериментально доказано^{/13/}, что конструкцию МФМ для следов частиц высокой ионизации можно существенно упростить. Предпосылкой этого является высокое отношение сигнала к шуму в МФМ. В частности, в^{/13/} в качестве мезооптического элемента в МФМ была использована цилиндрическая линза. Там же показано, что отношение сигнала к шуму в этой упрощенной конструкции МФМ можно дополнительно увеличить, если кроссовер сходящегося пучка света перенести в плоскость, где формируются мезооптические изображения прямых следов частиц заданной ориентации. В^{/13/} найдены также оптимальные условия наблюдения следов частиц высокой ионизации в МФМ с цилиндрической линзой, при этом оптимизация достигается как для радиальной, так и для угловой координаты.

В данной работе проанализированы источники шумов в МФМ и рассмотрены новые методы повышения отношения сигнала к шуму в МФМ при быстром поиске следов частиц с минимальной ионизацией в ядерной фотоэмульсии. Рассмотрены две модели шумов в МФМ: некогерентная и когерентная. Описаны система освещения в МФМ с цилиндрическими линзами, электронно-компьютерный блок подавления постоянной составляющей шумов от фоновых зерен серебра в ядерной фотоэмульсии, результаты моделирования на ЭВМ указанного блока, условия экспериментов по подавлению шумов в МФМ, а также результаты экспериментального опробования МФМ с электронно-компьютерным блоком подавления шумов при регистрации следов протонов с энергией 650 МэВ. В заключение приведены ожидаемые характеристики быстродействующего МФМ с низким уровнем шумов для поиска следов частиц минимальной ионизации с использованием как одноканального фотоприемника, так и одномерной линейки ПЗС.

2. МОДЕЛЬ ШУМОВ В МФМ

След частицы с минимальной ионизацией в ядерной фотоэмульсии состоит из отдельных зерен серебра с линейной плотностью 20-30 зерен на 100 мкм, которые окружены фоновыми зернами серебра с объемной плотностью до 10^9 см⁻³. В традиционном оптическом микроскопе, где используется объектив с числовой апер-

турой 1,4 и полем зрения 0,5 мм, такой след частицы имеет вид цепочки зерен из 100 зерен серебра на фоне около 200 зерен серебра, одновременно попавших в слой глубокой резкости 2-3 мкм. Наблюдатель способен заметить указанный след частицы только потому, что глаз человека сосредотачивает свое внимание на отдельных участках поля зрения. Однако такая работа очень утомительна, малопроизводительна и требует повышенного внимания оператора. В результате этого вероятность обнаружения искомого следа частицы составляет всего около 20%.

В МФМ, который используют в автоматизированной системе поиска следов частиц в ядерной фотоэмульсии, проблема шумов с самого начала была весьма острой потому, что в МФМ слой ядерной фотоэмульсии виден одновременно на всю толщину и отсутствует сканирование вдоль z-координаты. В результате след частицы с линейной плотностью зерен 20-30 на 100 мкм находится на фоне случайных зерен серебра с объемной плотностью $3 \cdot 10^9$ см⁻³. Для получения устойчивой работы МФМ при высокой вероятности поиска следа частицы, ~98% отношение сигнала к шуму в МФМ должно быть равно ~10:1. Однако для того, чтобы получить высокое быстродействие, регистрацию мезооптических изображений в МФМ желательно вести либо одноканальной фотоэлектрической системой, либо системой с небольшим числом каналов, ~50, а двумерную матрицу ПЗС использовать только на стадии обмера найденного следа частицы. Чтобы такая система работала устойчиво, необходимо выявить дополнительные источники подавления шумов в МФМ, а для этого необходимо более подробно исследовать природу шумов в МФМ.

Одной моделью шумов в МФМ была некогерентная модель, которая рассмотрена в^{/7,8/}. Предполагалось, что амплитуда света, дифрагированного на отдельных зернах серебра прямого следа частицы в ядерной фотоэмульсии, формируется когерентно в МФМ благодаря использованию сходящегося пучка света. В^{/7,8/} показано, что, начиная с числа зерен серебра в пределах освещенного следа частицы, равного ~30, интенсивность боковых лепестков картины дифракции света в месте расположения мезооптического элемента с кольцевым откликом становится настолько малой, что картина дифракции далекого поля практически не отличается от той, которая наблюдается для сплошного следа частицы без просветов. В общем случае доля света, которая попадает в центральный дифракционный максимум, пропорциональна отношению p/N_D , где p - число зерен в следе частицы, а N_D - число зерен в следе частицы, когда этот след можно рассматривать как сплошной.

Случайно разбросанные зерна серебра не создают узкой дифракционной картины, как в случае прямого следа частицы, а образуют равномерный фон засветки в пределах фокального кольца. Здесь следует использовать некогерентную модель фоновой засветки, интенсивность которой равна

$$\frac{\Delta I_B}{\Delta \rho \cdot \Delta \ell_\theta} = N_B \cdot a^2 \cdot \frac{1}{2\pi R D}, \quad /1/$$

где N_B - полное число зерен серебра в пределах поля зрения МФМ на всю глубину слоя ядерной фотоэмульсии, a - средний диаметр зерна серебра, $\Delta \rho$ - разрешение вдоль радиальной координаты, $\Delta \ell_\theta$ - линейное разрешение вдоль угловой координаты МФМ. Так как $D = a \cdot N_D$, то отношение сигнала к шуму в МФМ равно

$$\frac{I_S}{I_B} = \frac{\pi n^2 a \alpha_{1/2} R}{N_B \lambda \cdot D}, \quad /2/$$

где $\alpha_{1/2}$ - апертурный угол мезооптического элемента МФМ, λ - длина волны света, n - число зерен серебра в прямом следе частицы в пределах поля зрения МФМ. Для $a = 1$ мкм, $n = 100$, $\alpha_{1/2} = 0,3$, $R = 80$ мм, $\lambda = 0,5$ мкм, $D = 1$ мм получаем

$$\frac{I_S}{I_B} = \frac{1,5 \cdot 10^6}{N_B}. \quad /3/$$

Чтобы уменьшить фон от случайных зерен серебра, целесообразно перейти от поля зрения МФМ в форме окружности к узкому полю зрения, ориентированному вдоль искомого следа частицы, используя для этой цели цилиндрическую линзу в системе освещения МФМ^{15,4,14/}. Для описания фоновой засветки необходимо в этих условиях использовать когерентную модель шумов. Согласно этой модели, в освещенном объеме ядерной фотоэмульсии существуют трубки когерентности, ориентированные преимущественно параллельно искомому следу частицы. Вклад зерен серебра внутри каждой трубки когерентности в фоновую засветку в области расположения мезооптического зеркала с кольцевым откликом определяется амплитудой света в пределах центрального дифракционного максимума. Однако сигналы от различных трубок когерентности складываются по интенсивности, т.е. некогерентно. Чем меньше зерен серебра находится внутри элементарной трубки когерентности, тем меньше их относительный вклад в центральный дифракционный максимум. Характерный объем трубки когерентности определяется разрешением вдоль x -координаты и вдоль z -ко-

ординаты МФМ^{14/}: $\Delta x = 6$ мкм, $\Delta z = 4$ мкм, $\Delta V = 2,4 \cdot 10^{-5}$ мм³. В каждую отдельную трубку когерентности попадает всего $\Delta N_B \approx 10$ фоновых зерен серебра, и, как отмечалось выше, в этих условиях только небольшая часть, $\sim 1/10$, дифрагированного света попадает в центральный дифракционный максимум. Поэтому дифрагированный свет, идущий из каждой трубки когерентности, будет сильно размыт в пределах всего мезооптического зеркала. В рассмотренной когерентной модели шумов мы пренебрегаем вкладом тех конфигураций зерен серебра, которые ориентированы перпендикулярно оси симметрии протяженного поля зрения МФМ, так как число зерен серебра внутри соответствующих трубок когерентности значительно меньше единицы. Все эти эффекты приводят к тому, что интенсивность фона при таком поле зрения МФМ будет примерно в 10 раз меньше, чем в случае некогерентной модели шума. Для этого достаточно, чтобы $(\Delta N_B)_{\text{когер.}} \approx 10$. Тогда

$$\left(\frac{I_S}{I_B}\right)_{\text{когер.}} \approx \frac{1,5 \cdot 10^7}{N_B}. \quad /4/$$

3. СИСТЕМА ОСВЕЩЕНИЯ МФМ

На рис.1 показана схема освещения МФМ с шириной освещенной области 10 мкм /ширина на полувысоте/. Кроме линзы преобразования Фурье с фокусным расстоянием $f = 400$ мм используют рассеивающую цилиндрическую линзу с фокусным расстоянием $f_1 = -10$ мм и собирающую цилиндрическую линзу с фокусным расстоянием $f_2 = +55$ мм. Ширина освещенной области изменяется путем перемещения вдоль опти-

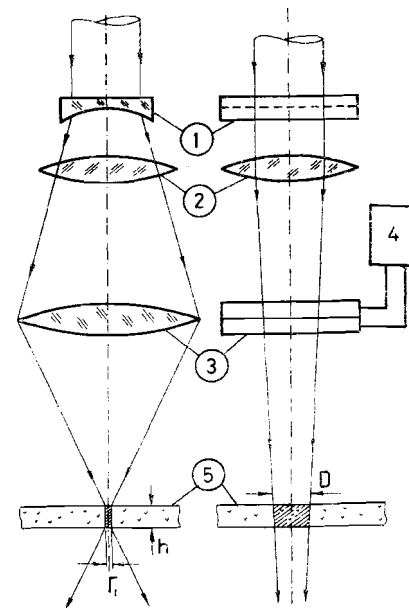


Рис.1. Схема освещения мезооптического фурье-микроскопа: 1 - отрицательная цилиндрическая линза; 2 - линза преобразования Фурье, 3 - положительная цилиндрическая линза, 4 - система вертикального перемещения линзы 3, 5 - ядерная фотоэмульсия, D - продольный размер поля зрения МФМ, Γ - поперечный размер поля зрения МФМ.

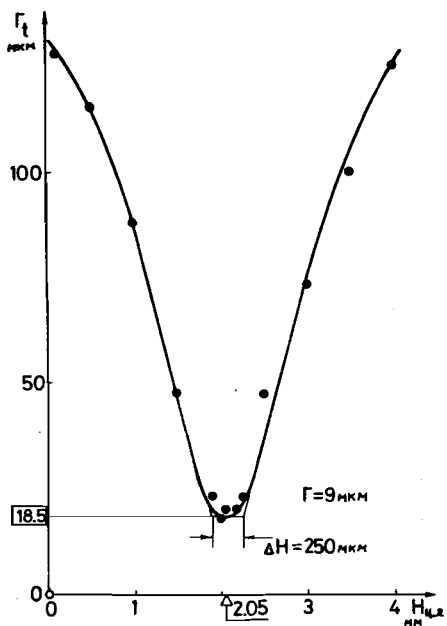


Рис.2. Экспериментально наблюдаемая зависимость между шириной освещенной области Γ_t и положением линзы 3 вдоль z -координаты.

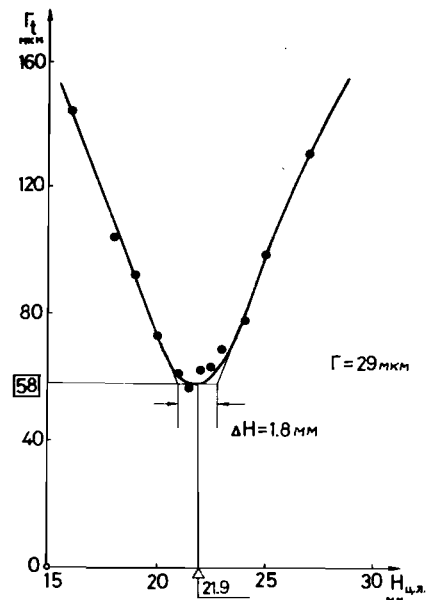


Рис.3. Экспериментально наблюдаемая зависимость между шириной освещенной области Γ_t и положением линзы 3 в отсутствие линзы 1.

ческой оси МФМ второй цилиндрической линзы. На рис.2 показана зависимость между шириной освещенной области и z -координатой второй цилиндрической линзы. На рис.3 приведена аналогичная кривая при отсутствии первой цилиндрической линзы. Размер освещенной области в МФМ был уменьшен с 700 мкм до 20 мкм, т.е. в 35 раз. Во столько же раз увеличилась удельная освещенность в пределах поля зрения МФМ, но одновременно уменьшился угловой диапазон ориентаций следов частиц, одновременно просматриваемых при помощи МФМ. На рис.4 дан поперечный разрез слоя ядерной фотоэмульсии, просвечиваемого пучком света различной ширины. Видно, что объем ядерной фотоэмульсии, из которого в данный элемент фотоприемника идет фоновая засветка, не изменяется, если ширина освещенной области превышает 60 мкм. Только при ширине освещенной области меньше 60 мкм уменьшение ширины освещенной области приводит к повышению отношения сигнала к шуму. Указанная закономерность показана на рис.5, где приведены: интенсивность мезооптических изображений при раз-

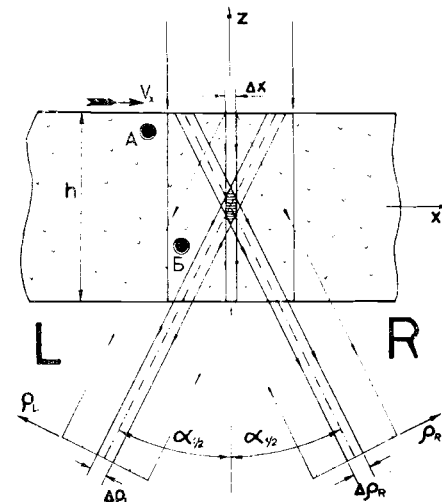


Рис.4. Поперечный разрез слоя ядерной фотоэмульсии при освещении ее пучком света, ширина которого меньше продольного размера поля зрения, ρ_L и ρ_R - радиальные координаты, $\alpha_{1/2}$ - угол между побочной и основной оптическими осями МФМ, $\Delta\rho$ - разрешение вдоль радиальной координаты, Δx - минимальная ширина освещенной области, создаваемой системой освещения /см. рис.1/, L и R - левое и правое плечи МФМ.

ной ширине освещенной области для следов частиц высокой ионизации, для следов частиц минимальной ионизации, а также интенсивность шумов в некогерентной модели шумов. Как видно из рис.4, реализации шумов для левого и для правого мезооптических изображений являются различными и между ними не должно наблюдаться сильной корреляции. Это свойство шумов будет использовано в электронно-компьютерном блоке подавления шумов /см. п.4/.

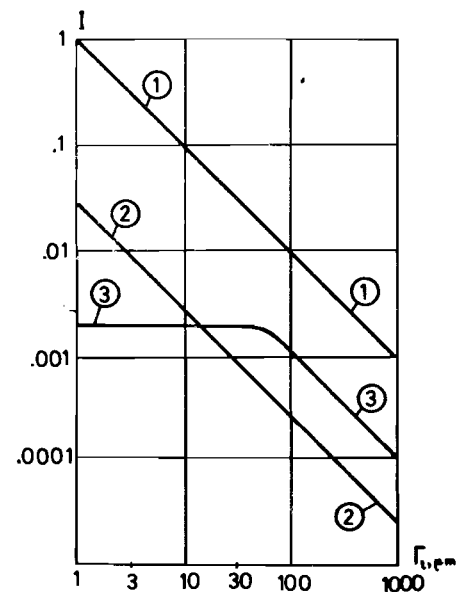


Рис.5. Относительная интенсивность мезооптического изображения при различной ширине освещенной области Γ для следов частиц высокой ионизации /1/, для следов частиц минимальной ионизации /2/, а также интенсивность шумов в некогерентной модели /3/.

4. ПОДАВЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ШУМОВ

Чтобы пояснить принцип действия электронно-компьютерного блока, предназначенного для подавления постоянной составляющей шумов в МФМ, рассмотрим типичные конфигурации искомого объекта и шумов. На рис.6 показаны два следа частицы в пределах узкой освещаемой области МФМ в отсутствие шумов /а/ и при наличии шумов /б/. Задача электронно-компьютерного блока МФМ состоит в том, чтобы повысить отношение сигнала к шуму путем подавления постоянной составляющей шумов. На рис.7

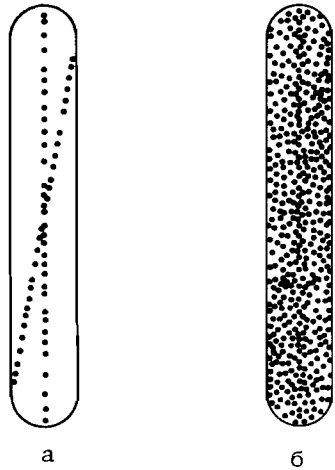
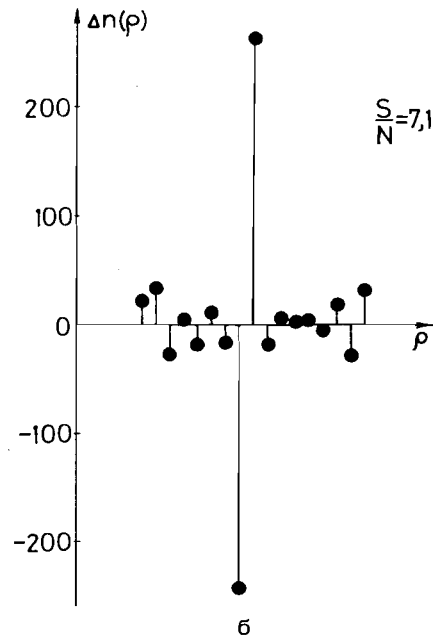
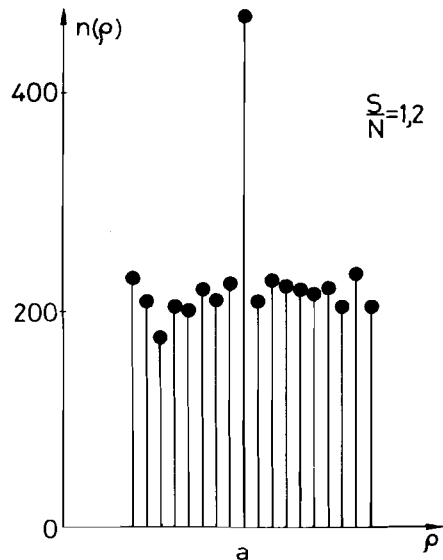


Рис.6. Типичное изображение двух следов частиц в идеализированных условиях без шумов /а/ и при наличии шумов /б/.

Рис.7. Последовательность сигналов на выходе одноканального фотоприемника /а/ и после дифференцирования /б/.



показана последовательность отсчетов в одноканальном фотоприемнике, наблюдаемая в условиях, когда слой ядерной фотоэмульсии последовательно перемещается с шагом 2 мкм относительно МФМ в направлении, перпендикулярном искомому следу частицы. Отношение сигнала к шуму равно $S/N = 1,2$. После дифференцирования исходного сигнала отношение сигнала к шуму возрастает до $S/N = 7,1$, т.е. в 6 раз.

На рис.8 показан текущий граф обработки фотоэлектрических сигналов в двухканальном электронно-компьютерном блоке, при этом на завершающем этапе производится перемножение двух продифференцированных сигналов, сформированных в левом и правом каналах МФМ. В реальной конструкции был использован АЦП К1113 ПВ-1 с тактовой частотой 40 кГц, регистры на 10 бит и компьютер IBM PC/AT. Исходные сигналы с каждого фотоприемника оцифровывались и заносились в блок памяти компьютера. Затем компьютер производил вычитание последующего сигнала из предыдущего, в результате чего возникали биполярные сигналы, которые перемножались поэлементно, а полученный сигнал дискриминировался по амплитуде.

Принцип действия описанной выше системы подавления постоянной составляющей шумов с перемножением сигналов левого и правого каналов МФМ был промоделирован на компьютере. Полезный сигнал соответствовал $S=200$ зернам серебра. Случайный фон зерен серебра, регистрируемый одноканальным фотоприемником, описывался распределением Пуассона со средним значением N . Суммарный сигнал $(S+N)$ дифференциро-

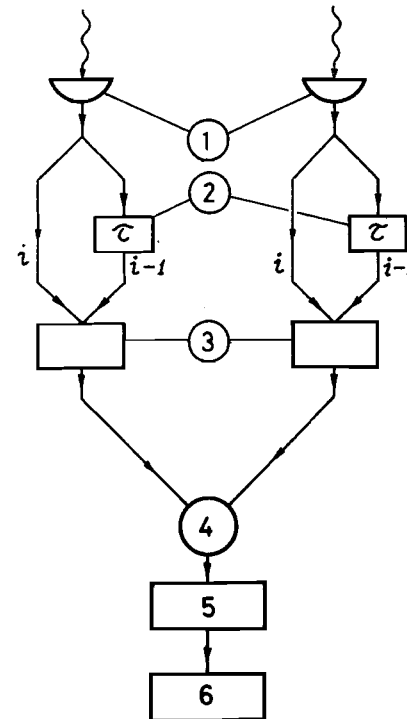


Рис.8. Текущий граф обработки данных в электронно-компьютерном блоке подавления шумов в МФМ: 1 - одноканальные фотоприемники, 2 - элементы задержки сигналов, 3 - блок вычисления разности между i -м и $(i-1)$ -м отсчетами, 4 - блок перемножения, 5 - дискриминатор по амплитуде, 6 - блок записи данных.

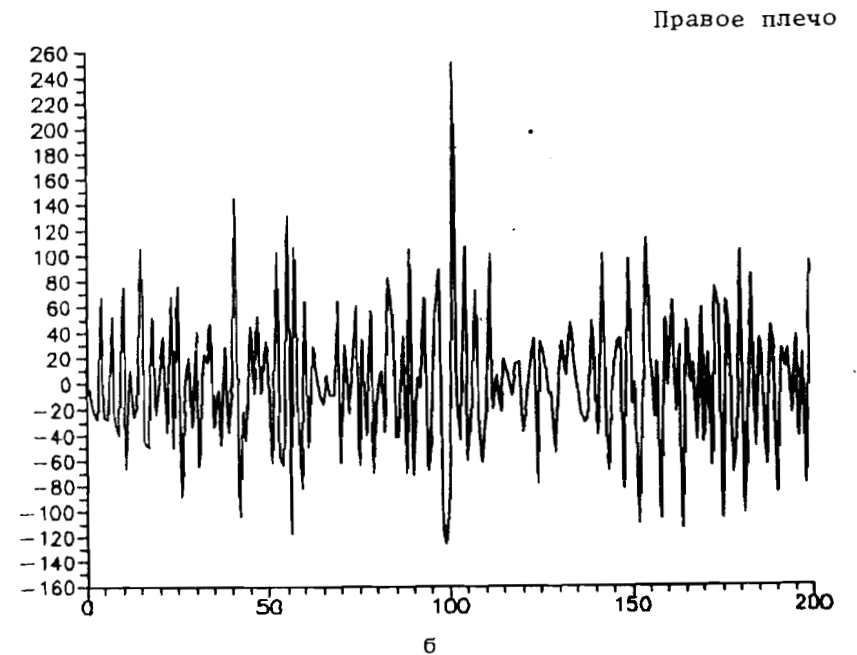
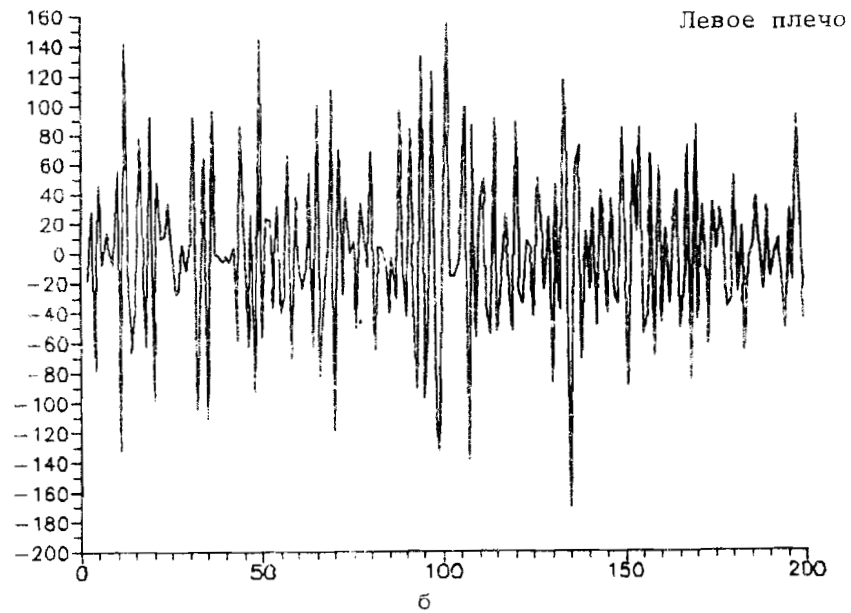
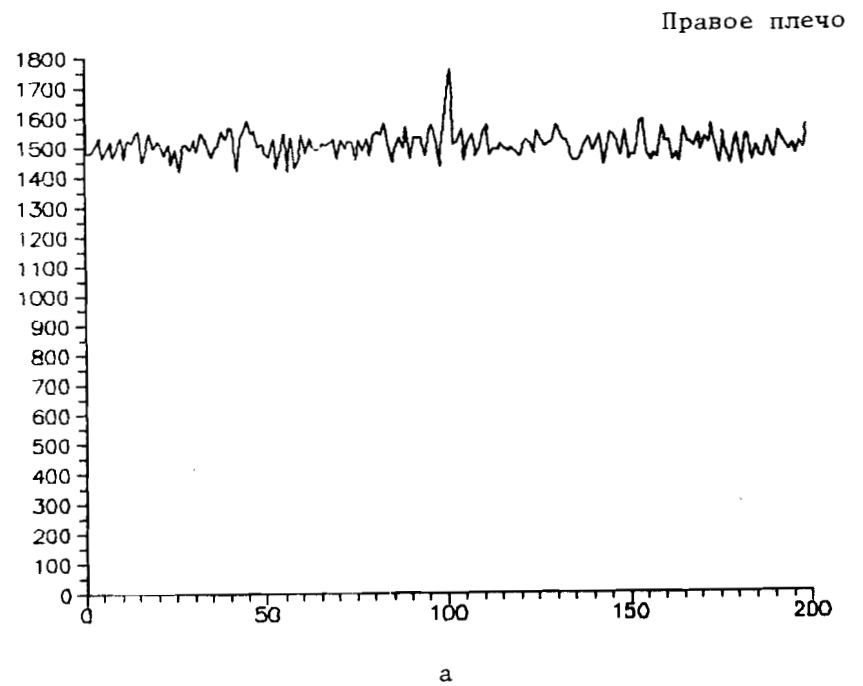
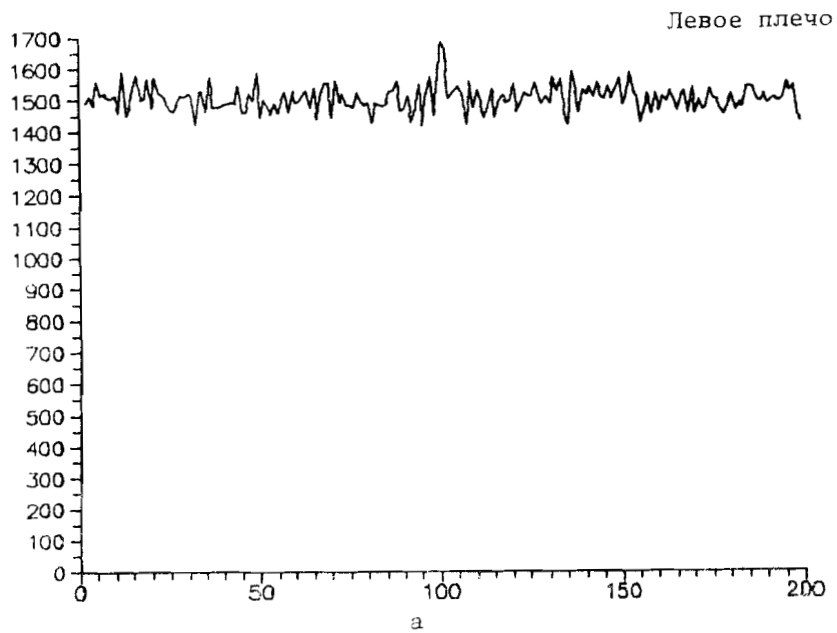


Рис.9. Результаты моделирования электронно-компьютерного блока подавления шумов в МФМ: а - исходные сигналы в левом и правом плечах; б - результаты дифференцирования.

вался, как это описано выше. На рис.9 показаны результаты указанного дифференцирования для случая $S = 200$ и $N = 3000$, т.е. когда $S/N = 1/15$. Это примерно соответствует условию наблюдения, когда мезооптические изображения регистрируют одноканальным фотоприемником, а ширина освещенной области равна 60 мкм. После перемножения сигналов в левом и правом каналах МФМ возникает сигнал /рис.10/, в котором отношение сигнала к шуму повышено дополнительно.

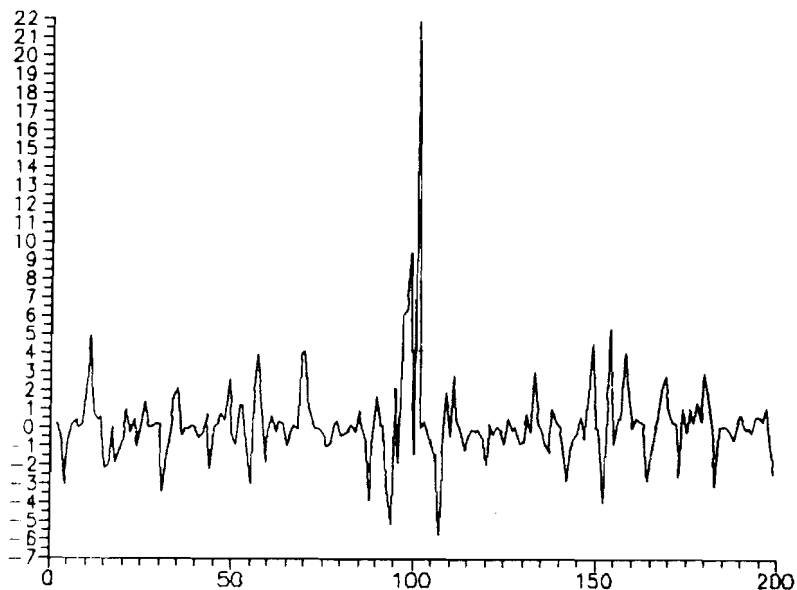


Рис.10. Результаты моделирования электронно-компьютерного блока подавления шумов в МФМ: произведение продифференцированных сигналов в левом и правом плечах МФМ.

5. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис.11 показана схема экспериментальной установки, на которой была опробована описанная выше система подавления шумов в МФМ. Коллимированный пучок света от гелий-неонового лазера 1 проходил через отрицательную цилиндрическую линзу 2, линзу преобразования Фурье 3 и через положительную цилиндрическую линзу 4, которая вместе с отрицательной линзой 2 образует обратный одномерный микроскоп. Мезооптическое зеркало 5 формирует два мезооптических изображения прямого следа части-

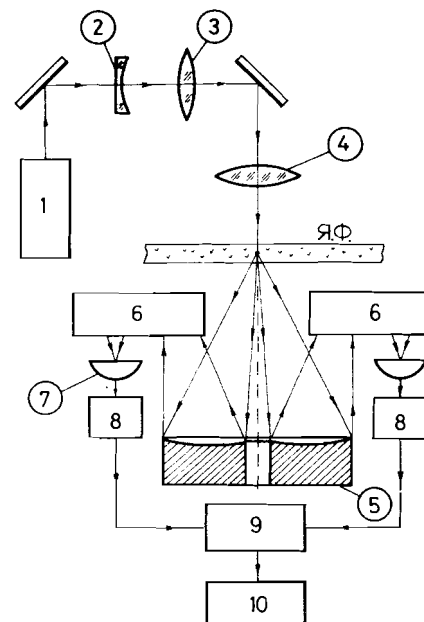


Рис.11. Схема экспериментальной установки: 1 - гелий-неоновый лазер, 2 - отрицательная цилиндрическая линза, 3 - линза преобразования Фурье, 4 - положительная цилиндрическая линза, 5 - мезооптическое зеркало с кольцевым откликом, 6 - оптический интерфейс МФМ, 7 - одноканальные фотоприемники, 8 - усилители тока, 9 - АЦП, 10 - блок записи данных.

цы, которые при помощи оптического интерфейса /4/ 6 переносятся на два фотоприемника 7 в виде двух фотоспротивлений, расположенных рядом друг с другом. Сигналы с фотоспротивлений 7 проходят через усилитель тока 8 и поступают

на вход АЦП 9 с частотой следования информации ~ 1 кГц. Оцифрованные сигналы направляются в блок памяти компьютера 10 и затем подвергаются обработке, алгоритм которой показан на рис.8.

Несмотря на то, что в реальном эксперименте использовался только один действующий канал, мы смогли измерить фотосигналы как в левом, так и в правом плече МФМ. С этой целью оба мезооптических изображения переносились на одно и то же фотоспротивление с рабочей областью размером 6x12 мм. В первом опыте левое плечо МФМ закрывалось черной бумагой и регистрировался фотосигнал, который формируется в правом плече МФМ. Затем измерения проводились в тех же положениях каретки МФМ $\pm 0,5$ мкм/, как и в первом опыте, но с перекрытым правым плечом МФМ.

На рис.12 приведены результаты измерений следов частиц высокой ионизации при ширине освещаемой области около 58 мкм: а/ два исходных сигнала фототока, б/ два продифференцированных сигнала, в/ результаты перемножения двух сигналов, приведенных в /б/, от левого и правого плеч МФМ. На рис.13 показаны аналогичные данные для следов протонов с энергией 650 МэВ при ширине освещаемой области около 58 мкм, а на рис.14 - при ширине освещаемой области около 18 мкм.

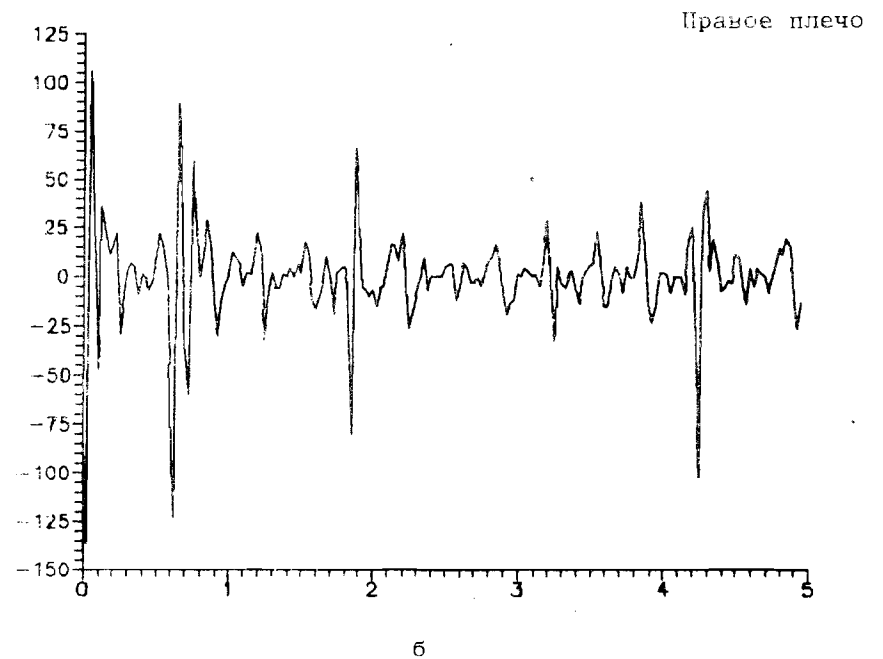
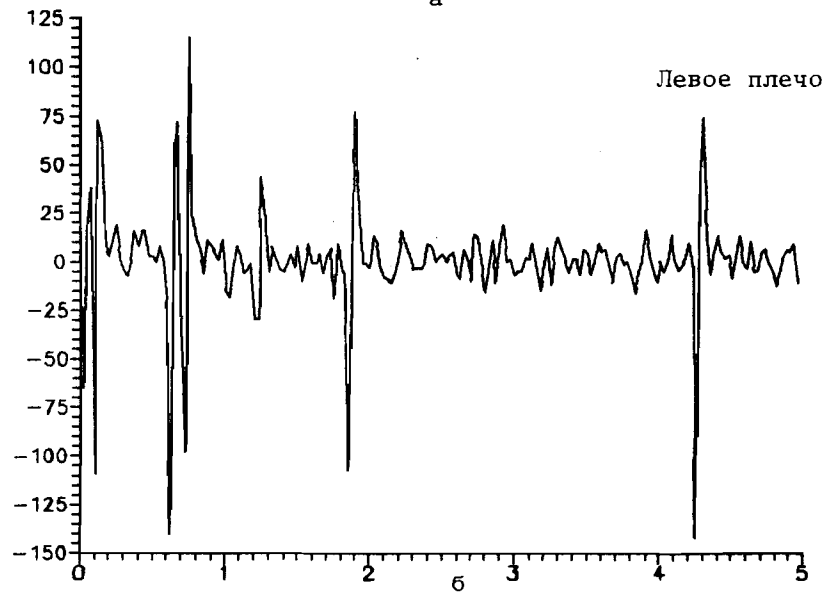
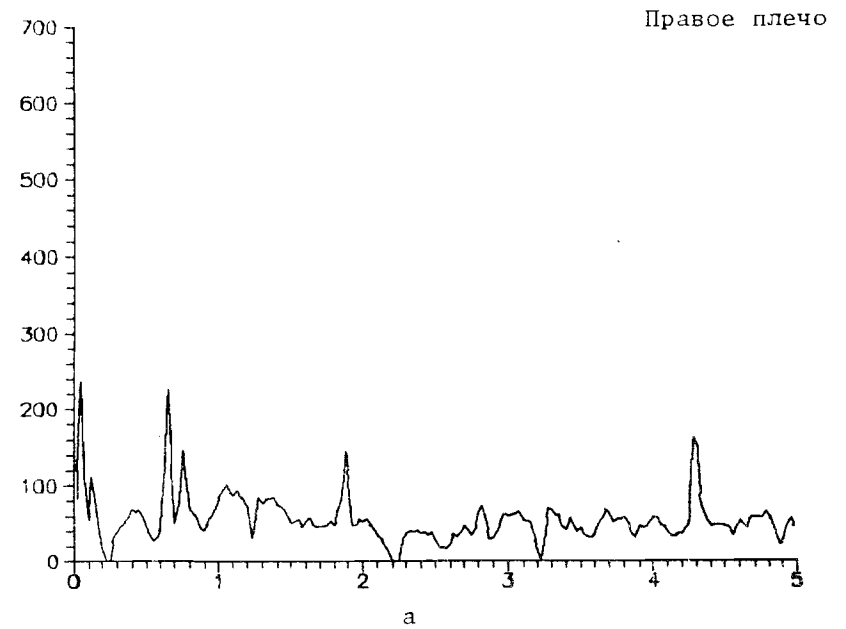
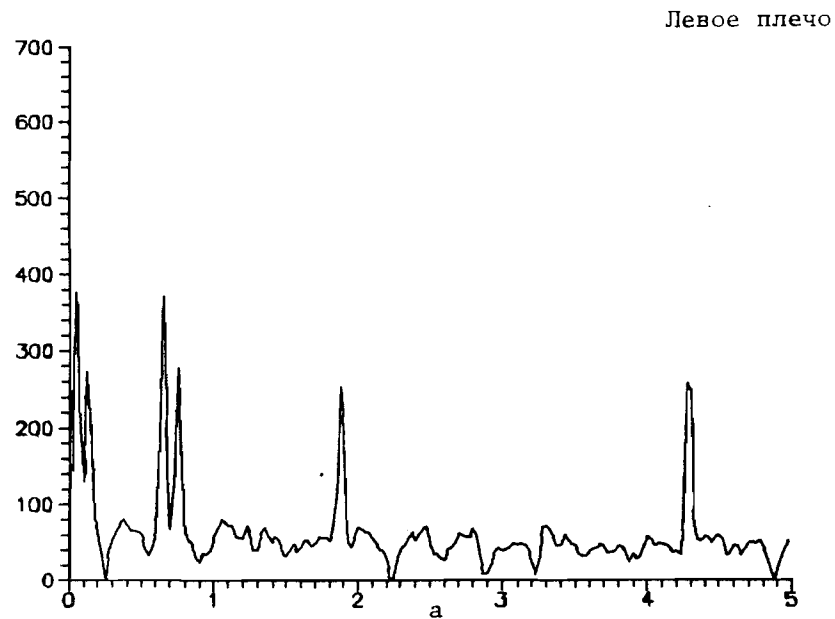


Рис.12. Результаты регистрации в шумах следов частиц высокой ионизации при ширине освещенной области 58 мкм: а - исходные сигналы фототока в левом и правом плечах МФМ, б - продифференцированные сигналы, в - произведение продифференцированных сигналов в левом и в правом плечах МФМ.

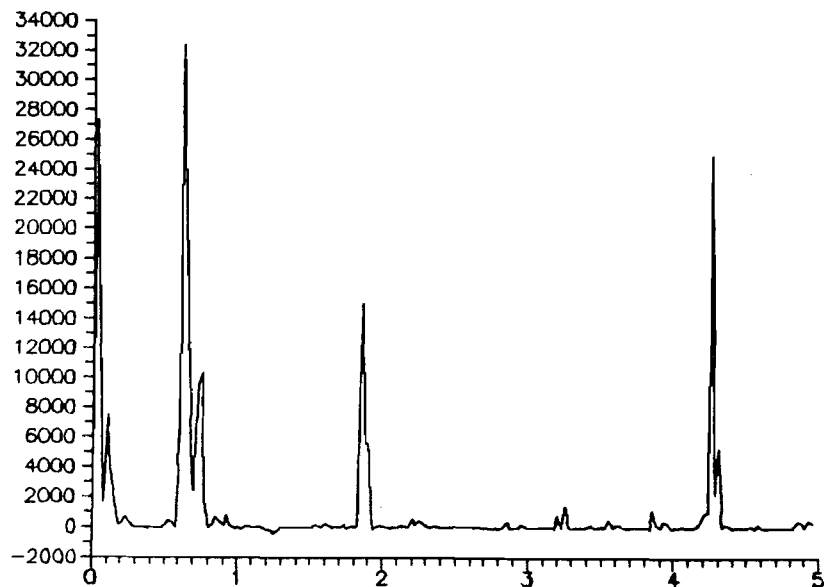


Рис. 12в

6. ОЖИДАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО МФМ

Если шаг перемещения каретки МФМ равен 2 мкм, а тактовая частота АЦП равна 40 кГц, то скорость движения каретки МФМ равна 80 мм/с. Так как длина поля зрения МФМ равна ~ 1 мм, то скорость обработки в быстродействующем МФМ с одним фотоприемником в каждом плече МФМ равна 80 мм²/с, или $2,9 \cdot 10^3$ см²/час. Это в $7,2 \cdot 10^4$:1 раз быстрее, чем при ручном поиске^{/4/}, или в 640:1 быстрее, чем в МФМ с ПЗС-матрицей^{/4/}.

Если ввести 1Д ПЗС-линейки с небольшим числом элементов, например 250, и если использовать два рабочих массива с числом элементов около 50 от каждого плеча МФМ, то при тактовой частоте 1Д ПЗС-линейки в 1 МГц время считывания составит $2,5 \cdot 10^{-4}$ с. В этой альтернативной конструкции МФМ быстродействие равно 8 мм²/с, или 290 см²/ч. Это в $7,2 \cdot 10^3$:1 быстрее, чем для ручного поиска^{/4/}, или в 64:1 быстрее, чем в МФМ с ПЗС-матрицей^{/4/}. Следует ожидать, что отношение сигнала к шуму в альтернативной конструкции МФМ с 1Д ПЗС-линейкой будет в 30:1 раз больше, чем в МФМ с одноканальным фотоприемником, который был подробно проанализирован в данной работе.

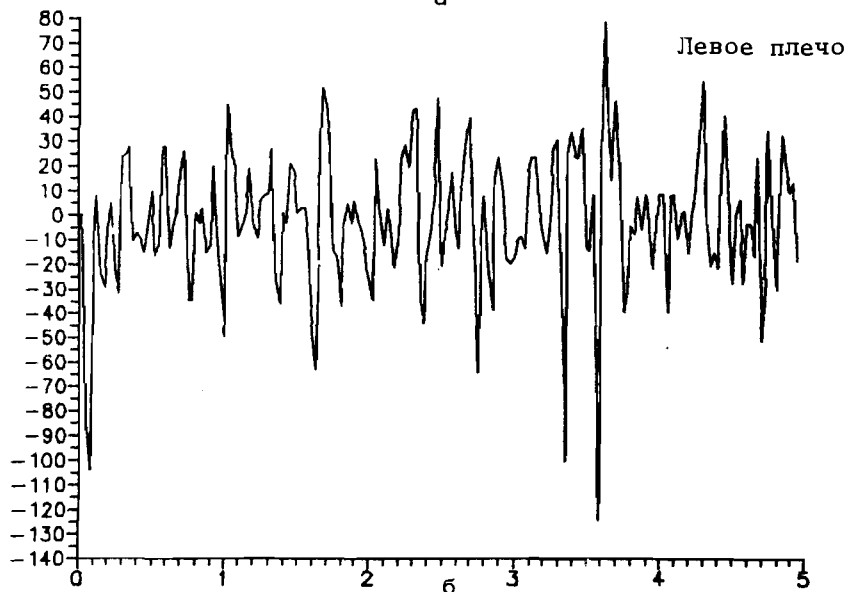
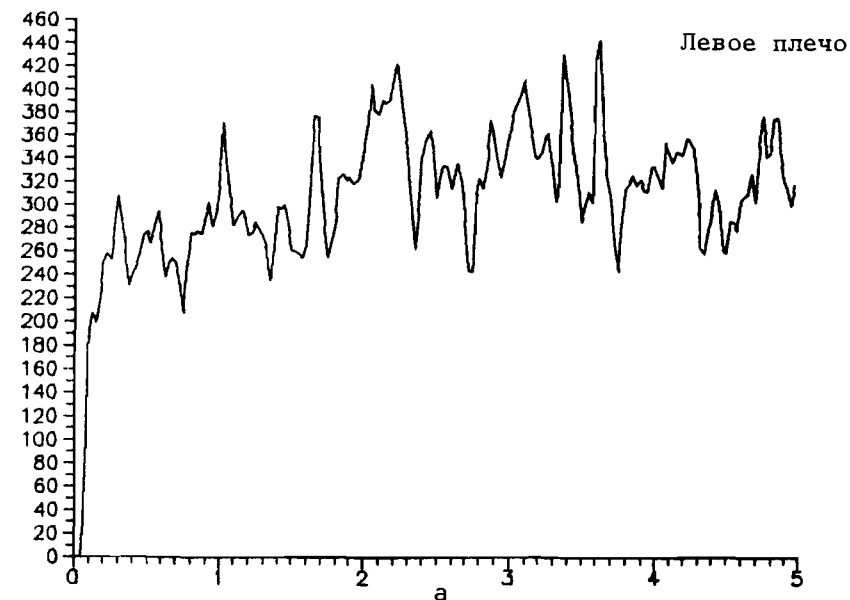


Рис. 13. Результаты регистрации в шумах следов протонов с энергией 650 МэВ при ширине освещенной области 58 мкм: а - исходные сигналы фототока в левом и правом плечах МФМ, б - проинтегрированные сигналы, в - произведение проинтегрированных сигналов в левом и в правом плечах МФМ.

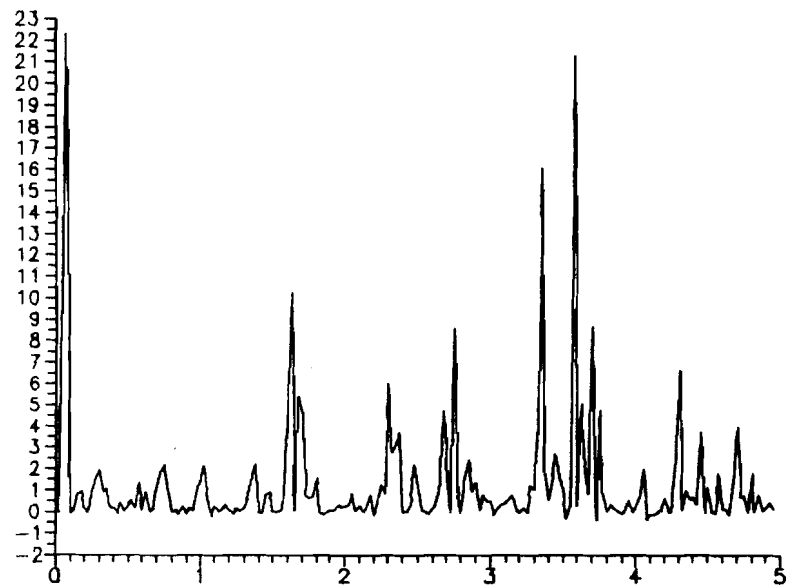
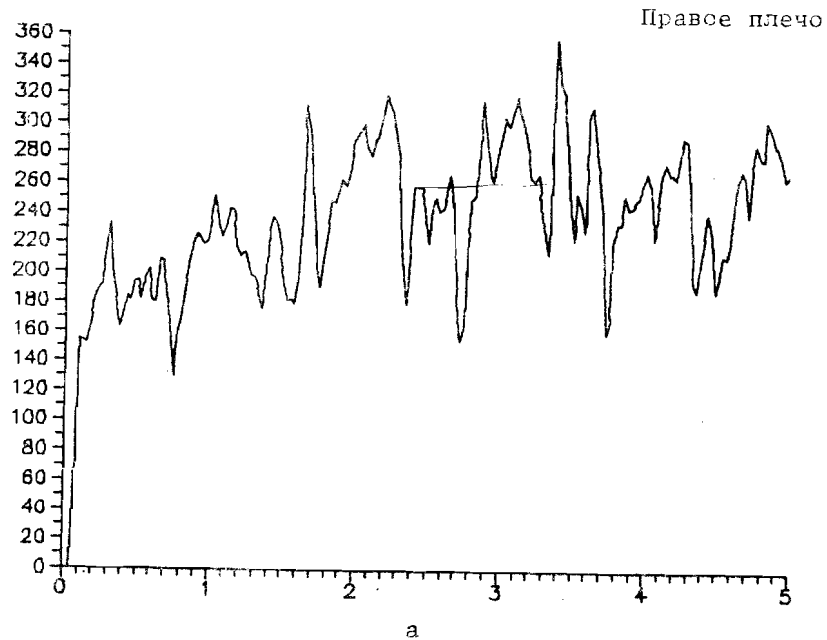
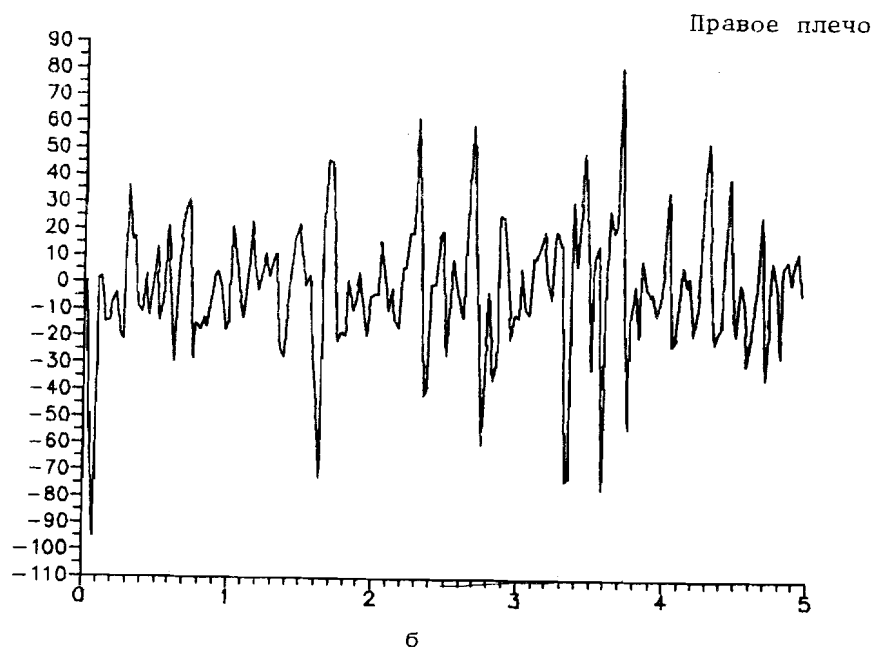


Рис. 13в



7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Описаны новые методы подавления шумов в МФМ для быстрого поиска следов частиц с минимальной ионизацией путем уменьшения ширины поля зрения МФМ, а также путем введения электронно-компьютерного блока подавления постоянной составляющей шумов.

2. Приведены результаты моделирования новых методов подавления шумов на компьютере. Показано, что след частицы еще может быть зарегистрирован в МФМ при отношении сигнала к шуму $S/N = 1/15$.

3. Описана новая конструкция МФМ для быстрого поиска следов частиц минимальной ионизации и приведены результаты экспериментов для следов частиц высокой ионизации и для следов протонов с энергией 650 МэВ.

4. Дана оценка ожидаемых характеристик быстродействующего МФМ с малым уровнем шумов с использованием как одноканальных фотоприемников, так и одномерных линеек ПЗС.

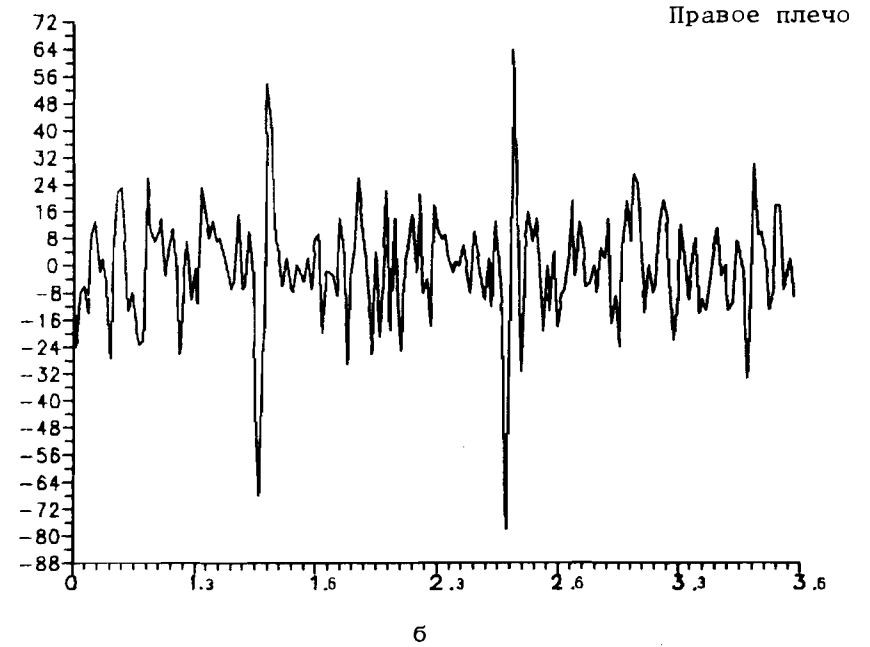
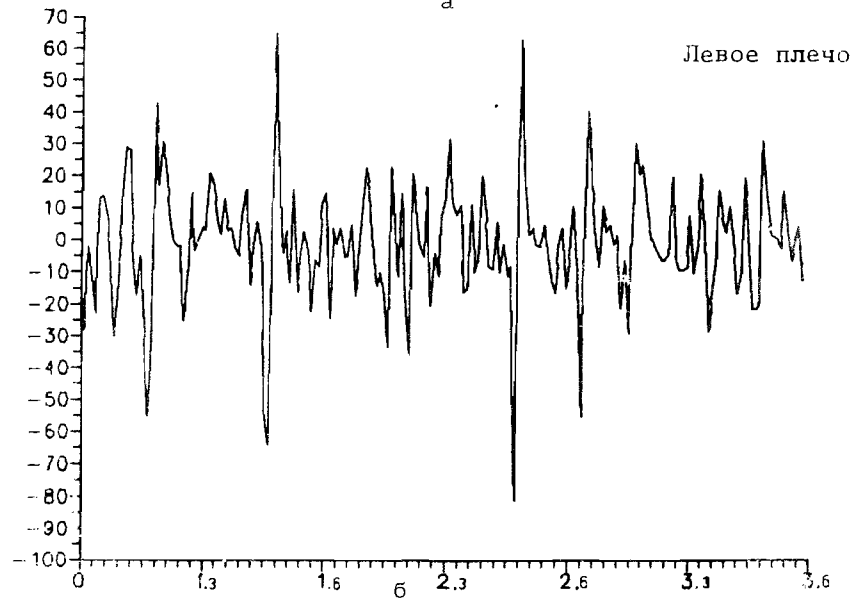
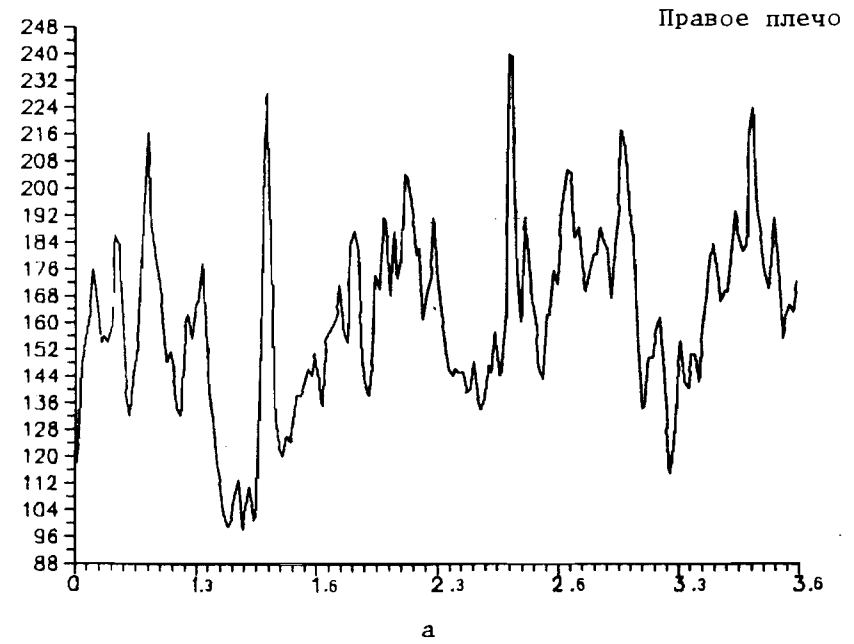
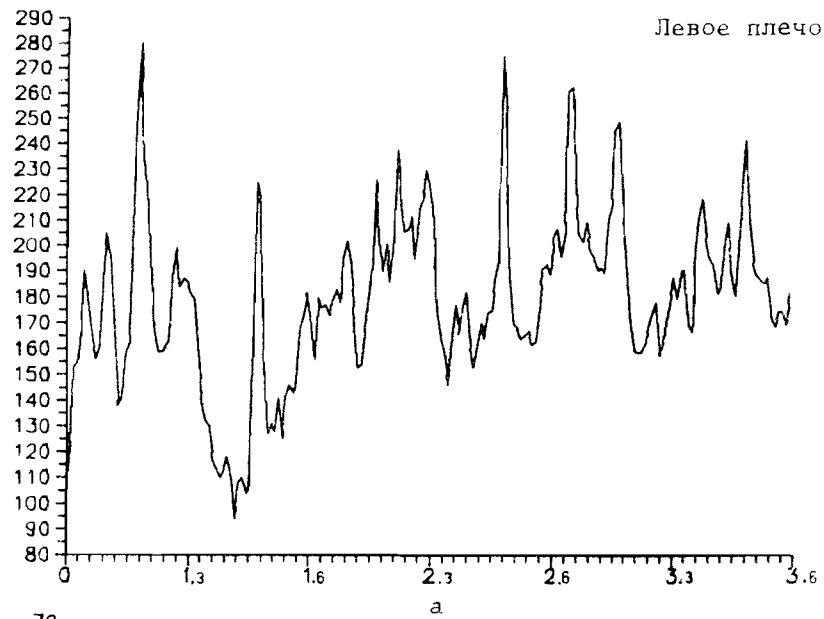


Рис.14. Результаты регистрации в шумах следов протонов с энергией 650 МэВ при ширине освещенной области 18 мкм: а - исходные сигналы фототока в левом и правом плечах МФМ, б - продифференцированные сигналы, в - произведение продифференцированных сигналов в левом и в правом плечах МФМ.

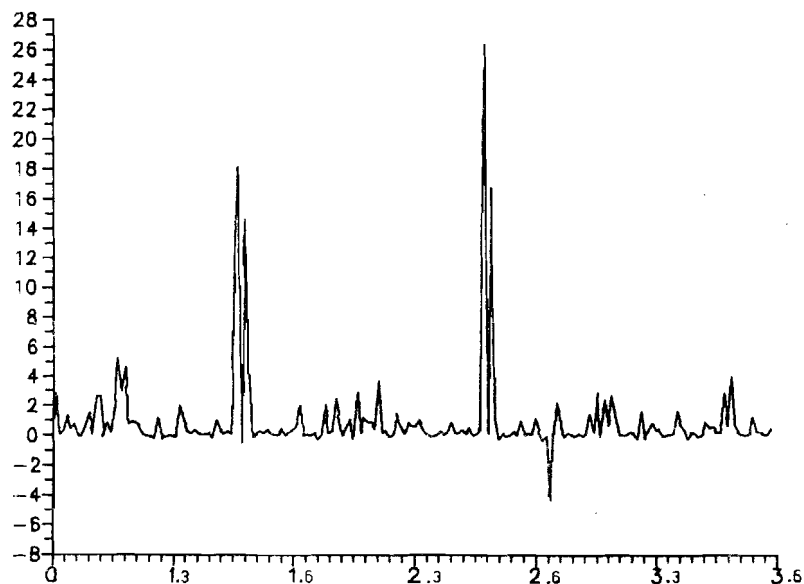


Рис. 14в

10. Астахов А.Я. и др. - А.с. 1.249.601. МКИ⁴ G01 T 5/10; ОИ, 1986, № 29, с.233.
11. Soroko L.M. - JINR Preprint, E13-87-292, Dubna, 1987.
12. Сороко Л.М. - Сообщение ОИЯИ, P13-87-527, Дубна, 1987.
13. Сороко Л.М. - Сообщение ОИЯИ, P13-87-486, Дубна, 1987.
14. Астахов А.Я. и др. - Препринт ОИЯИ, D13-89-450, Дубна, 1989.
15. Сороко Л.М. - А.с. 1.341.596. МКИ⁴ G 01 T5/10; ОИ, 1987, № 36, с.209.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астахов А.Я. и др. - Сообщение ОИЯИ, P13-85-378, Дубна, 1985.
2. Бенце Д., Сороко Л.М. - Сообщение ОИЯИ, P13-86-659, Дубна, 1986.
3. Бенце Д. и др. - Сообщение ОИЯИ, P13-86-630, Дубна, 1986.
4. Astakhov A.Ya. et al. - JINR Preprint, E13-88-630, Dubna, 1988.
5. Soroko L.M. - In: Progress in Optics, ed. E.Wolf, Elsevier, 1989, v.27, p.109-160.
6. Сороко Л.М. - ЭЧАЯ, 1989, т.20, в.1, с.156.
7. Бенце Д., Сороко Л.М. - Сообщение ОИЯИ, P13-85-13, Дубна, 1985.
8. Bencze Gy.L., Soroko L.M. - Communication of JINR, E13-87-387, Dubna, 1987.
9. Бенце Д., Сороко Л.М. - Сообщение ОИЯИ, P13-87-594, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июля 1989 года.