

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пр-540

Н.М.Шотте, А.И.Пуолокайнен, Г.И.Волков,  
А.И.Беляшин, Л.И.Денщикова, Л.Е.Гасилин,  
В.Ф.Копылов, Ю.М.Грашин, В.И.Дворецкий,  
О.А.Тюриков

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР  
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ  
ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ В ИОНОСФЕРЕ  
И МАГНИТОСФЕРЕ

Представлено к печати заместителем директора  
В.М.Балебановым

1980

Описывается аппаратура, предназначенная для изучения энергетических спектров электронов и протонов с энергиями от 100 до 20000 эВ в околоземном космическом пространстве.

В качестве датчика использован электростатический анализатор с системой канальных электронных умножителей /КАУ/, работающих в режиме счета отдельных импульсов. Для преобразования скорости счета в дифференциальную интенсивность потока частиц экспериментально определялся энергогеометрический коэффициент и эффективность регистрации заряженных частиц на выходе анализатора для каждого КАУ. Рассматривается принцип построения анализатора, его структурная схема и основные характеристики.

Аппаратура успешно работала на спутнике "Космос-900".

## ВВЕДЕНИЕ

Последнее десятилетие отличается интенсивным развитием космических исследований, характеризующихся как многочисленностью проводимых измерений, так и многообразием направлений; повышением сложности используемой аппаратуры и, соответственно, увеличением модификации применяемых приборов.

Многие из выполненных экспериментов были связаны с измерениями характеристик космической плазмы и потоков заряженных частиц с энергиями от сотен электронвольт до сотен килоэлектронвольт.

В настоящее время интерес к этим исследованиям возрастает еще больше ввиду их существенной значимости для физики земной ионосферы и магнитосферы. А именно, многие геофизические явления, такие как авроральные события, магнитные бури, динамика радиационных поясов, ионосферные нерегулярности, поглощение космических шумов прямо или косвенно связаны с потоками заряженных частиц указанных энергий. В частности, исследования пространственно-временных вариаций характеристик плазмы и потоков заряженных частиц позволят понять механизм вторжения их в магнитосферу и влияние этого вторжения на события в полярных областях, определить как природу, так и области ускорения частиц и т.д.

Поставленные задачи предъявляют дополнительные требования к аппаратуре и методике измерений, а также к точности и адекват-

ности предполетных калибровок [1 - 4].

Повышение информативности, улучшение энергетических, угловых и временных характеристик аппаратуры привели к появлению различных модификаций приборов, в которых одновременно используется несколько чувствительных элементов [5 - 12]. Применение в качестве чувствительных элементов канальных электронных умножителей (КЭУ), весьма активно начавшееся примерно десять лет назад, дало большие возможности для создания подобных приборов [5 - 12].

Большинство из описанных многоканальных систем представляет собой, по существу, сочетание нескольких одинаковых одноканальных ячеек [5,7 - 12], при этом во многих случаях каждый канал был настроен на регистрацию одного фиксированного значения энергии [5,7 - 9].

Существенный интерес представляют собой приборы, дающие возможность получать данные о функции распределения заряженных частиц по энергиям [13 - 15], являющейся одной из важнейших характеристик плазмы, которая позволяет судить не только о ее состоянии и основных параметрах, но и о ряде протекающих в ней процессов.

Данная работа посвящена описанию аппаратуры, предназначенной для исследования энергетических распределений высших в ионосферу потоков электронов и протонов, а также для изучения временных и пространственных изменений параметров этих потоков.

Комплект аппаратуры (с кодовым названием КС-1) состоит из электростатического анализатора, снабженного системой из пяти канальных электронных умножителей (КЭУ), и блока электро-

ники. Блок-схема аппаратуры, позволяющей одновременно регистрировать энергетический спектр заряженных частиц для пяти значений энергий, приведена на рис. 1.

Далее будет дано описание этих элементов по отдельности, приведены результаты предполетных калибровок, сведения об основных параметрах спектрометра и примеры энергетических спектров, полученных во время полета.

## 1. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР

Одним из основных требований, предъявлявшихся к конструкции и принципу действия электростатического анализатора, являлось одновременное измерение потоков заряженных частиц в нескольких энергетических интервалах.

По принципу действия разработанный анализатор представляет собой, на наш взгляд, более совершенную модификацию прибора, описанного в работе [6]. В приборе [6] поток заряженных частиц, пройдя входное коллимирующее отверстие, попадает в отклоняющее поле плоских пластин, параллельных направлению потока частиц, разделяется в зависимости от энергии и затем через пространство дрейфа попадает на серию детекторов. Основным недостатком такой конструкции, по нашему мнению, является сравнительно низкое энергетическое разрешение, а главное, существенное различие в разрешении от канала к каналу и значительное искажение траекторий частиц с меньшими энергиями за счет влияния краевых эффектов при входе частиц в пространство дрейфа. Вторым существенным недостатком конструкции является плохая защита входов детекторов от фонового солнечного излучения.

С целью уменьшения влияния краевых эффектов отклоняющего поля, улучшения энергетических и угловых характеристик, а так-

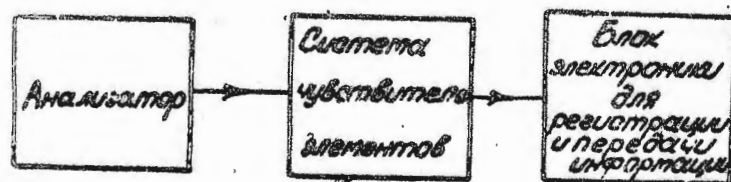


Рис. 1. Блок-схема спектрометра.

же защиты от фонового солнечного излучения нами была выбрана другая конструкция прибора, принцип действия которого показан на рис. 2.

В рассматриваемом анализаторе коллимирующая щель расположена в плоскости одной из пластин отклоняющей системы. В этой же пластине находятся и входные отверстия, за которыми располагаются детекторы заряженных частиц.

Частицы попадают в отклоняющее электростатическое поле под определенным углом  $\alpha$ . Проведенные расчеты показали, что оптимальные параметры приведенной на рис. 2 анализирующей системы реализуются при  $\alpha = 68 \pm 2,5^\circ$ .

Как видно из рисунка, анализирующиеся частицы, прошедшие через коллимирующие щелевые отверстия  $\delta_1$  и  $\delta_2$  в пластине I и электроде II, попадают под углом  $\alpha$  в электростатическое поле  $\bar{E}$ , образованное плоскими параллельными электродами II и III. Пройдя по параболам, они в соответствии со значением их энергии, повернувшись на  $180^\circ$ , придут к электроду II на расстоянии  $X$  от входной щели  $\delta_1$ . Таким образом, в зависимости от энергии и заряда частиц произойдет их разделение в поле  $E$  с последующей регистрацией в точках 1, 2, 3, 4 и 5, соответствующих пяти значениям так называемого "коэффициента выигрыша":

$$k = \frac{m v_0^2}{2} / ZeU,$$

где  $v_0$  — скорость частиц;  $m$  — масса;  $Ze$  — заряд;  $U$  — отклоняющий потенциал.

Анализирующая система была выбрана таким образом, что в канал  $1/k=1/$  могли попасть частицы с энергией  $ZeU$ ; в канал  $2/k=2/$  — с энергией  $2ZeU$ ; ... в канал  $5/k=5/$  — с энергией  $5ZeU$ . Расчетные значения разрешающей способности по энергии  $\Delta E/E$  в точках приема  $\delta_3 - 1, 2, \dots, 5$  на уровне 0,1 составляли 0,22; 0,11; 0,07; 0,055 и 0,043, соответственно.

Для уменьшения краевых эффектов входное окно  $\delta_2$  коллимирующей системы было затянато сеткой.

Теоретические расчеты и лабораторные исследования нескольких макетов позволили создать оптимальную конструкцию прибора, принципиальная схема которого показана на рис. 3.

Как следует из рис. 3, электронно-оптическая система прибора размещается в металлическом корпусе 8, имеющем прямоугольное входное отверстие. Корпус закрыт сверху и снизу крышками 9 и 10.

Коллимирующие щели 3 и 4 — прямоугольные, их размеры и расположение формирует узкие пучки частиц и обеспечивает обзор пространства в плоскости рис. 3 в пределах  $\pm 1^\circ$  от основного направления  $\alpha = 68^\circ$ , а в плоскости, перпендикулярной рисунку —  $\pm 4,5^\circ$  от нормали к поверхности входного отверстия.

Отклоняющая пластина 2 имеет С-образную форму, ее прямоугольное отверстие затянато позолоченным сеточным полотном с ячейкой  $0,5 \times 0,5$  мм, что позволяет уменьшить отражение света от поверхности отклоняющей пластины. Размеры и форма пластины (длина 135 мм, ширина 56 мм, высота краев 2 мм) обеспечивают в рабочем пространстве электростатическое поле, близкое к полю бесконечного плоского конденсатора.

Над отклоняющей пластиной параллельно ей установлены заземленные пластины I и 5, в которых на расчетных расстояниях находятся диафрагмирующие прямоугольные отверстия.

Через соответствующие отверстия в пластинах I и 2 частицы с определенными энергиями попадают в трубчатые каналные электронные умножители 6, блок которых устанавливается в верхнем отсеке анализатора. В этом же отсеке устанавливается блок входных ячеек 7 импульсных усилителей.

Для предотвращения попадания на входы КЭУ света, отраженно-

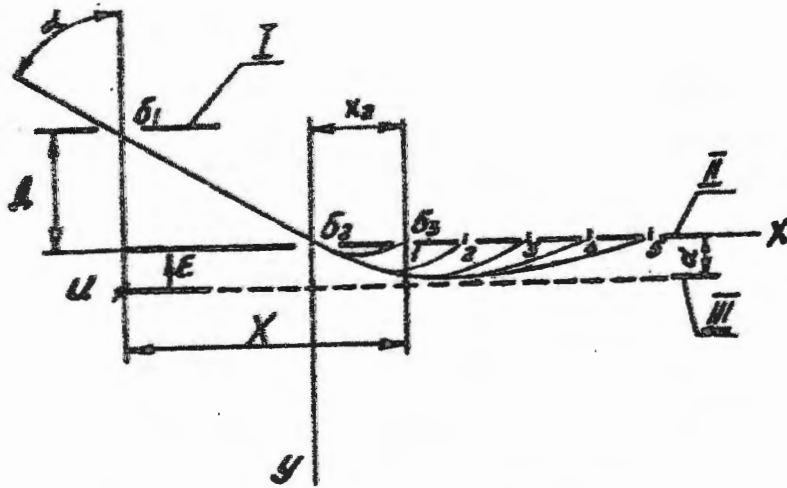


Рис. 2. Принципиальная схема электронно-оптической системы.

го от электродов и стенок прибора, была предусмотрена система экранов II, расположенных между двумя заземленными пластинами I и 5.

Прибор имеет 8 выводов, обозначенных на рис. 3 (I - УШ). Выводы каналов (I-V) к импульсным усилителям оканчиваются приборными вилками СР-50-267Ф. Вход КЭУ (УI), выход КЭУ (УII) и вывод отклоняющей пластины (УШ) оканчиваются специальными высоковольтными разъемами.

Внешний вид прибора показан на рис. 3б.

## 2. СИСТЕМА ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В качестве чувствительных элементов были использованы каналные электронные умножители типа четырехканальной линейной спирали.

Проведенные исследования различных типов КЭУ показали, что умножители этого типа отличаются повышенной стабильностью и токоустойчивостью, т.е. сохранением неизменных значений коэффициента усиления при повышенных значениях входных потоков [16, 17]. На рис. 4 в качестве примера приведены интегральные амплитудные распределения выходных импульсов для четырехканального и одноканального КЭУ идентичной геометрии при облучении их потоками электронов с энергиями 5 кэВ и интенсивностью  $10^5$  ч/с. Нетрудно заметить, что амплитуды выходных импульсов четырехканального КЭУ выше, чем у одноканального.

Необходимость одновременной регистрации потоков заряженных частиц в нескольких энергетических интервалах при использовании для этого нескольких чувствительных элементов в качестве детекторов, каждый из которых в каждый данный момент предназначен для определенного энергетического диапазона, предъявляет некоторые дополнительные требования к этим чувствительным

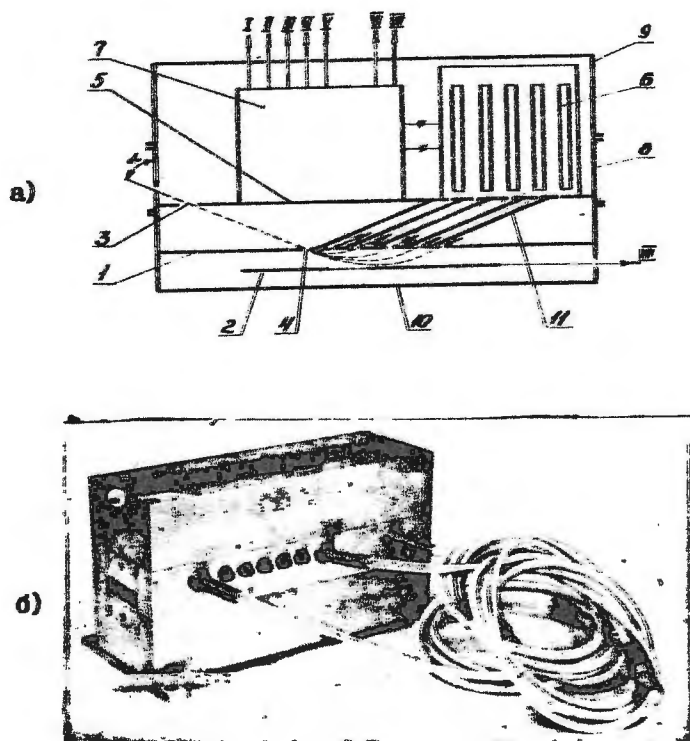


Рис. 3. Принципиальная схема анализатора (а) и его внешний вид (б).

1 - заземленная пластина; 2 - отклоняющая пластина;  
3,4 - коллекторные щели; 5 - заземленная пластина;  
6 - блок каналных электронных умножителей;  
7 - блок входных ячеек импульсного усилителя; 8 - корпус прибора; 9,10 - края корпуса; 11 - экран; I-УШ - выводы прибора.

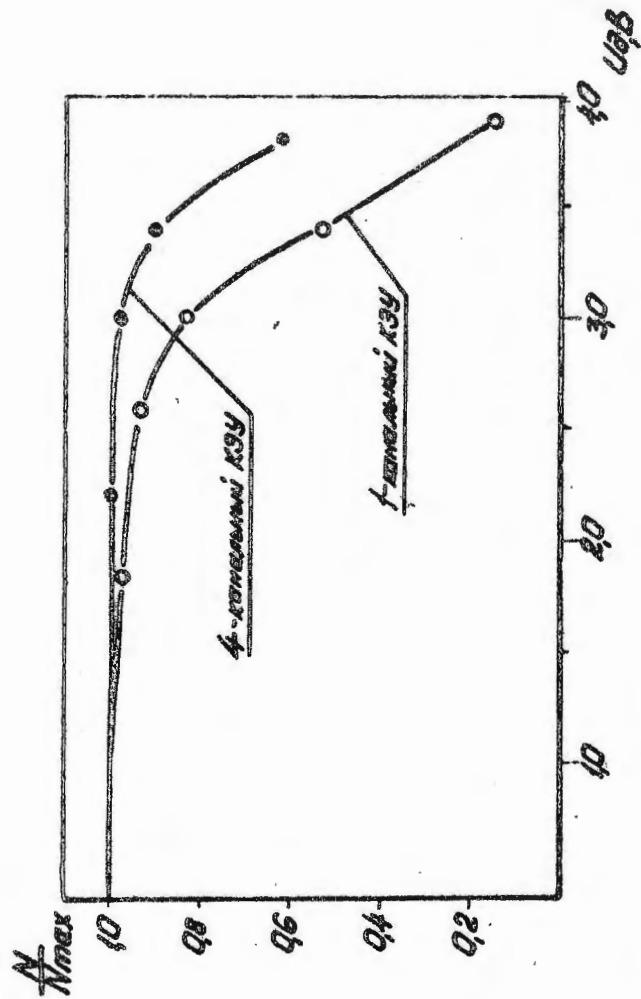


Рис. 4. Интегральные амплитудные характеристики четырехканального и одноканального КЭУ.

элементам. А именно, необходимо принимать во внимание не только характеристики этих элементов в отдельности, но и учитывать степень возможных изменений их параметров относительно друг друга как во времени, так и при вариациях энергии и интенсивности входного потока.

Учитывая тот факт, что параметры КЭУ, как известно, имеют весьма существенный разброс от образца к образцу [ 6,8 ] , а также обладают свойствами ухудшения своих усилительных свойств во времени [ 18 ] и, особенно, в процессе работы [ 8,19,20 ] , нами проводился предварительный анализ параметров КЭУ в зависимости от сорта, энергии и интенсивности частиц на входе. Контролируемыми параметрами являлись эффективность КЭУ и амплитудные распределения выходных импульсов. Общее число исследованных образцов составило ~ 80 шт. [ 21 ] .

На рис. 5 для пяти образцов КЭУ показаны изменения эффективности счета импульсов  $\xi$  от напряжения питания  $U_к$  и амплитудные распределения импульса  $A = F(U_г)$  при облучении их электронами и протонами. Из рисунков видно, что для всех КЭУ  $\xi$  достигает ~100% для электронов при  $U_к \geq 2,2$  кВ и для протонов при  $U_к \geq 3$  кВ; минимальные амплитуды выходных импульсов составляют в обоих случаях ~1,0 В, а максимумы амплитудных распределений лежат в диапазоне 2,3 + 2,8 В.

Характерно, что для приведенных образцов разброс параметров от экземпляра к экземпляру незначителен.

Амплитудные распределения КЭУ при облучении его электронами и протонами различных энергий приведены на рис. 6а. Амплитуды выходных импульсов для электронов оказываются примерно в 1,5 раза выше, чем для протонов, а амплитудные распределения, соответственно, более узкие и в меньшей степени зависят от энергии  $E$ .



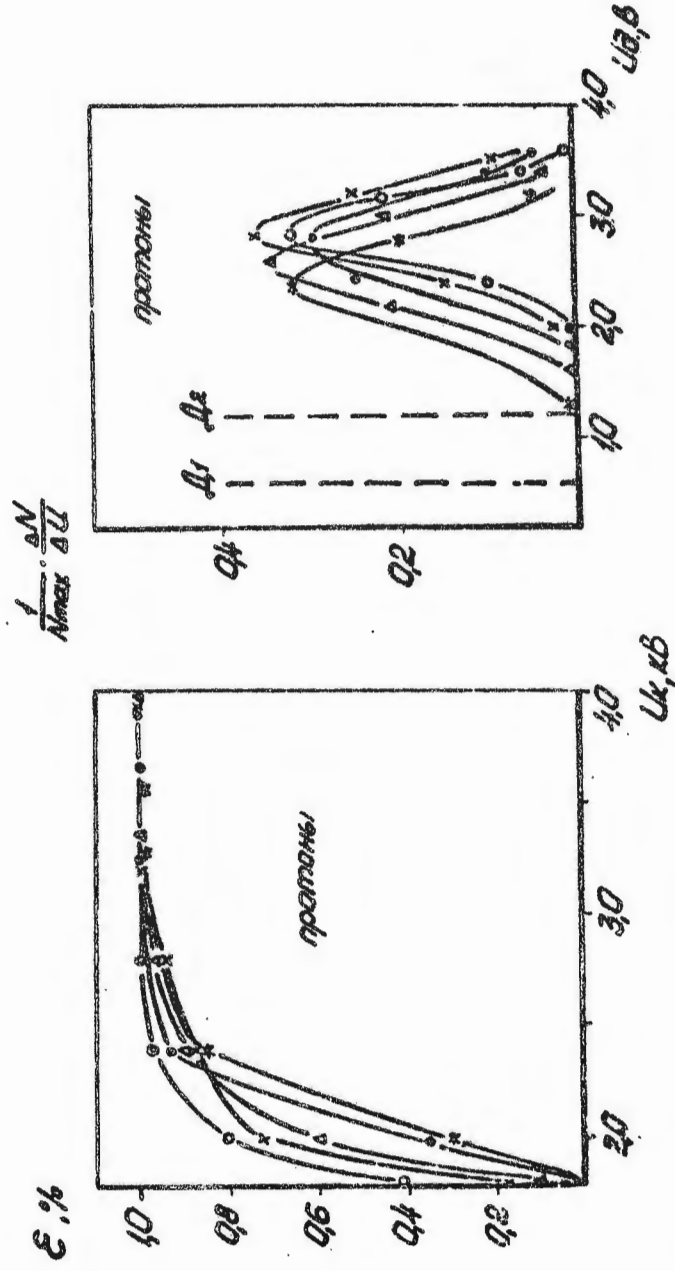


Рис. 5а. Эффективность и амплитудные распределения 4-канальных КЭУ для протонов с  $E = 1$  кэВ.

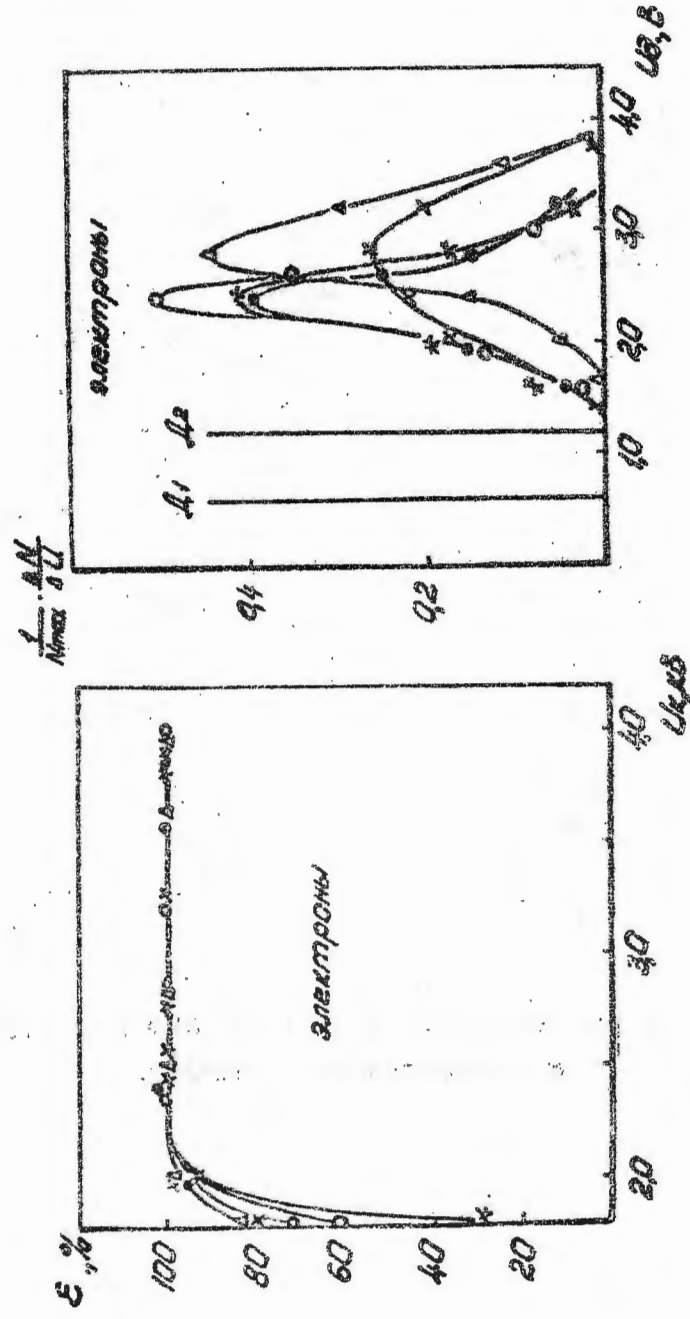


Рис. 5б. Эффективность и амплитудные распределения 4-канальных КЭУ для электронов с  $E = 1$  кэВ.



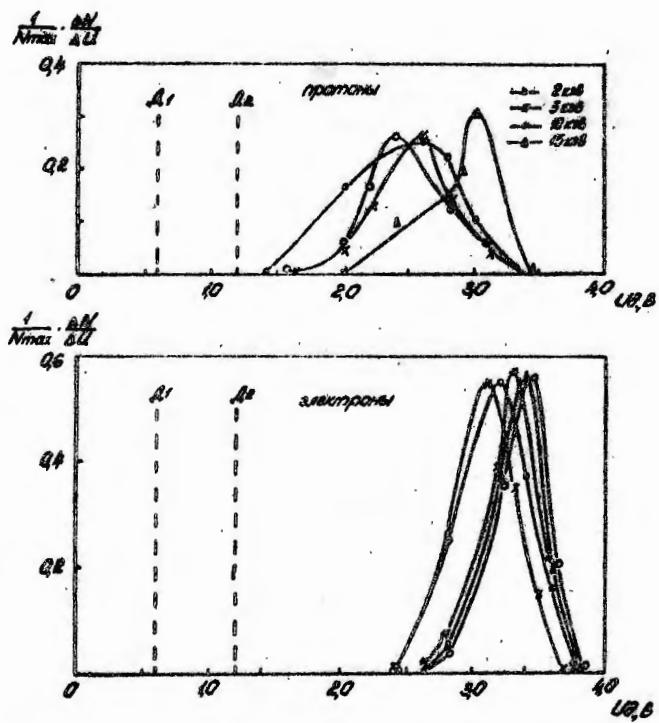


Рис. 6а. Амплитудные распределения КЭУ в зависимости от энергии протонов и электронов.

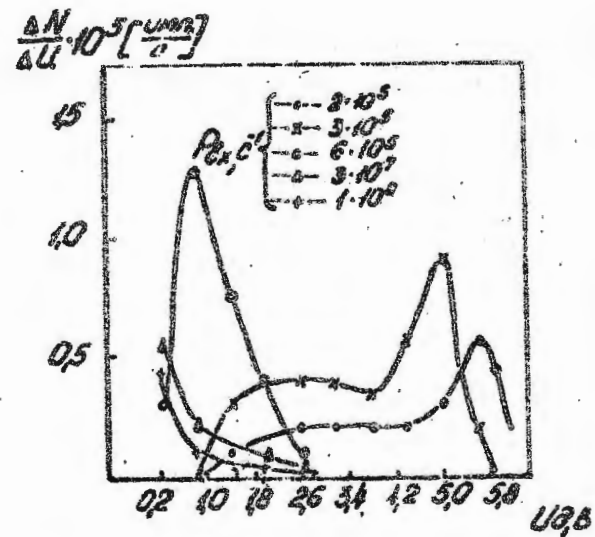


Рис. 6б. Амплитудные распределения КЭУ в зависимости от интенсивности входного потока.

Изменения амплитудных распределений КЭУ от величины потока на входе показаны на рис. 66. Из рис. 66 следует, что нелинейные эффекты в работе КЭУ начинают наблюдаться, если величина потока на входе превышает  $\sim 10^6$  имп/с, что соответствует интенсивности  $7 + 8 \cdot 10^5$  ч/с. Это означает, что данный тип КЭУ позволяет регистрировать потоки  $R \ll 10^6$  с $^{-1}$  практически со 100% эффективностью, если порог чувствительности усилителя равен  $\sim 1,0$  В. Степень появляющейся с ростом интенсивности нелинейности можно оценить, сравнивая выходную скорость счета КЭУ для разных порогов регистрации.

Данные рис. 5 и 6 показывают, что если порог чувствительности регистрирующей аппаратуры не выше, чем  $1 + 1,2$  В, то для данных КЭУ будет обеспечена 100% эффективность регистрации независимо от рода частиц и их энергии.

Из рис. 7, на котором представлена динамика амплитудных распределений КЭУ по прошествии 2 лет его хранения в лабораторных условиях, следует, что существенное изменение выходных параметров КЭУ имеет место для образцов, срок изготовления которых превышает 2 года. Для этих образцов минимальные амплитуды и значения максимума амплитудного распределения уменьшаются в 5 и 2 раза, соответственно, по сравнению со свежизготовленными, выходная скорость счета для свежизготовленного КЭУ при прочих равных условиях остается неизменной при изменении порога чувствительности усилителя вдвое — от  $D_1 = 0,6$  до  $D_2 = 1,2$  В, в то время как для двухгодичных КЭУ она при этом уменьшается в 1,5 раза.

Очевидно, что одновременная регистрация выходных импульсов КЭУ на разных уровнях дискриминации электронной аппаратуры дает возможность контролировать изменение их усилительных свойств. Это обстоятельство целесообразно использовать в приборах, устанавливаемых на спутниках.

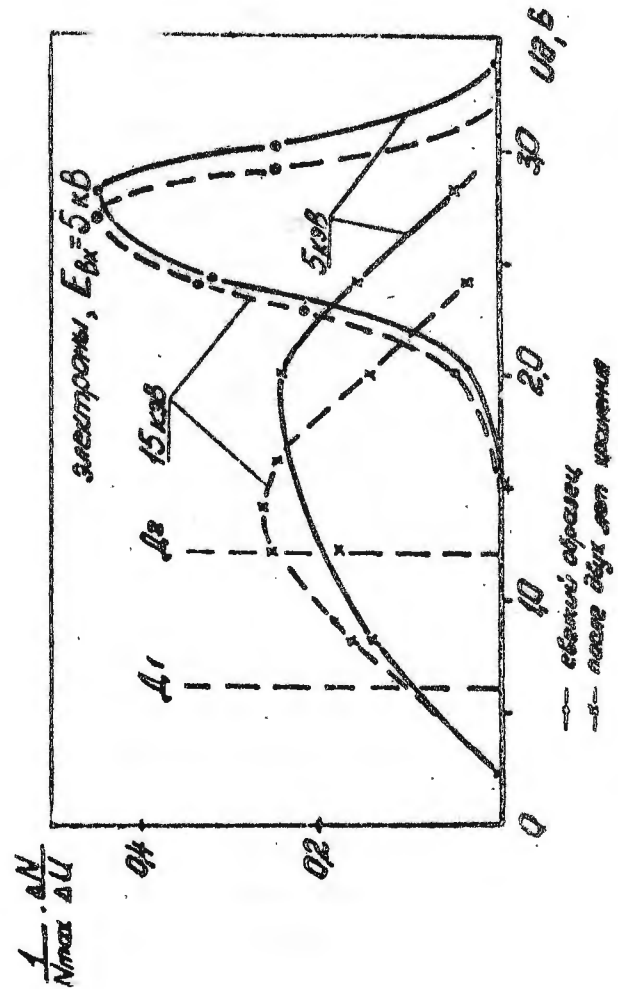


Рис. 7. Динамика амплитудного распределения КЭУ от времени.

## 3. БЛОК ЭЛЕКТРОНИКИ

Структурная схема блока электроники спектрометра, представляющего собой пятиканальную систему с одним электростатическим анализатором, показана на рис. 8.

Блок электроники имеет пять независимых каналов усиления выходных сигналов КЭУ, дискриминации и обработки информации. Выделение частиц определенного знака и энергии осуществляется последовательным переключением 16 напряжений (ступеней) на отклоняющей пластине ОП анализатора, которые принимают восемь симметричных по абсолютной величине положительных и отрицательных значений  $\sim (0,1; 0,25; 0,5; 0,7; 1,0; 1,5; 3,0; 4,0)$  кВ.

КЭУ питаются источником напряжения  $\sim 4$  кВ. Для повышения эффективности регистрации частиц с энергиями  $E < I$  кэВ на вход подается ускоряющее напряжение  $I$  кВ, знак которого меняется в соответствии с изменением знака регистрируемых частиц.

Прибор управляется периодическими сигналами "кадр" и "оброс", которые задаются по внешней программе ТМ-устройством. Смена ступени напряжения на ОП происходит каждый период, наименьшая длительность которого равна 2,4 с. Время набора информации пересчетным устройством — 100 мс. Спектральное распределение частиц одного знака в 40 энергетических интервалах снимается, следовательно, за время — 20 с.

Импульсы тока, получаемые при регистрации КЭУ каждой заряженной частицы, поступают с выхода КЭУ через трансформатор на усилитель У, а затем на два дискриминатора Д1 и Д2 с установленными уровнями 0,6 В и 1,2 В. Чувствительность канала регистрации и усиления

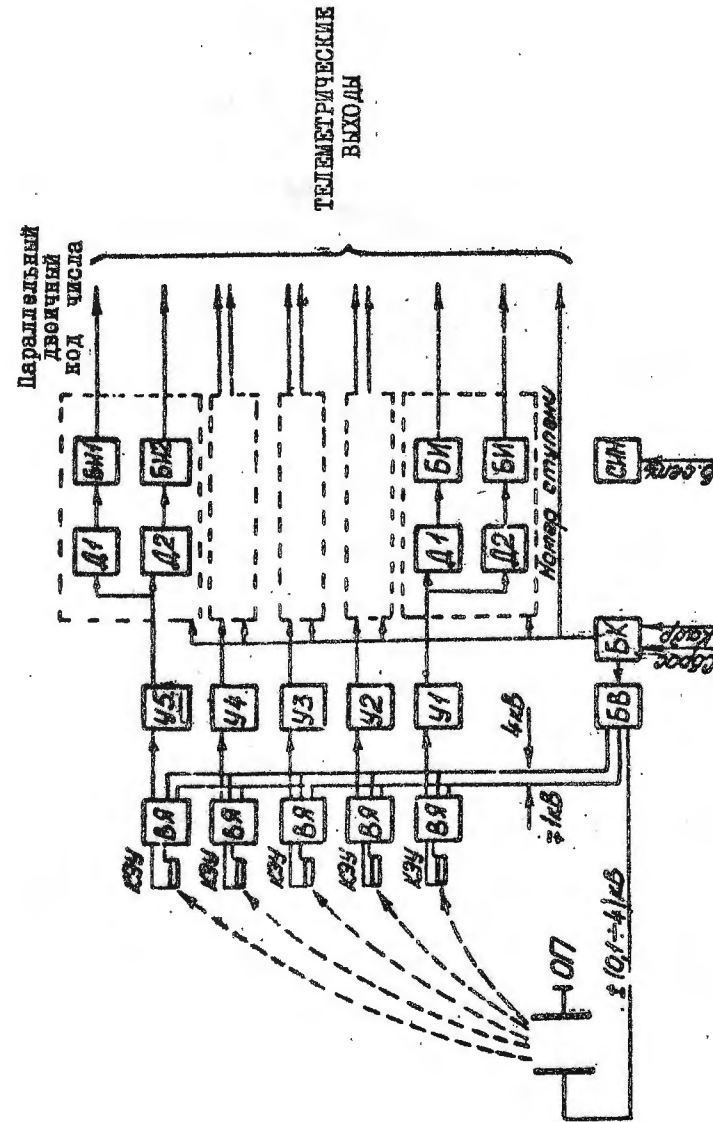


Рис. 8. Структурная схема блока электроники

была рассчитана, а затем экспериментально установлена таким образом, чтобы при среднем коэффициенте усиления КЭУ  $\sim 10^7$  амплитуда импульса на выходе усилителя составляла 2-3 В. Различие в скорости счета каналов Д1 и Д2 позволяет контролировать в изменение чувствительности КЭУ в процессе работы как в результате повышения интенсивности входного потока, так и во времени. С этой целью разность между уровнями дискриминации выбиралась после анализа усредненного амплитудного распределения для серии выбранных образцов КЭУ.

Во многих случаях съем сигналов с КЭУ осуществлялся через конденсатор [6, II-22-24]. В работе [5] была реализована трансформаторная связь КЭУ с предусилителем. Этот способ связи выхода КЭУ с усилителем предпочтителен, если усилитель расположен на значительном расстоянии. Кроме того, благодаря насыщению сердечника трансформатора предотвращается возможность пробоя транзисторов во входных цепях усилителя в моменты подачи высоковольтных напряжений, а также сводятся до минимума наводки на входе усилителя, что особенно важно при одновременной работе нескольких чувствительных элементов.

В рассматриваемом приборе КЭУ через тороидальный трансформатор (см. рис. 9) нагружен на 50-омный коаксиальный кабель длиной  $\sim 1,5 + 2$  м, к которому подключен усилитель с входным сопротивлением  $R_{вх} = 50$  Ом. Высокочастотные помехи по питанию КЭУ снимаются с помощью емкостей  $C_1$  и  $C_2$ , кроме того, емкость  $C_2$  обеспечивает ускорение процесса распространения сигнала от выхода КЭУ к его входу. Такая входная ячейка (ВЯ) позволяет регистрировать импульсы со скоростью счета  $\sim 10^6$  имп/с. Проведенные нами исследования показали, что в результате оптимизации параметров трансформатора может быть достигнуто быстроедействие до  $10^7$  имп/с.

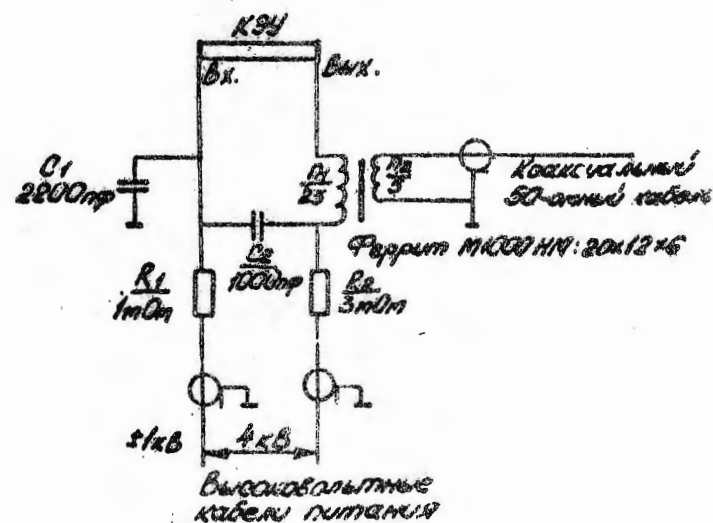


Рис. 9. Схема входной ячейки.

Сигналы, прошедшие дискриминаторы, поступают на два идентичных блока информации БИ1 и БИ2, где их число сосчитывается, координируется со "сжатием" и параллельным двоичным кодом передаются на телеметрические входы.

Блок команд БК (см. рис. 10), управляемый бортовыми синхроимпульсами, координирует работу всех устройств прибора: задает время набора информации пересчетным устройством, а по его окончании через 100 мс, после прохождения импульса "оброс", с помощью внутреннего синхроимпульса СИ переключает анализирующее напряжение на пластине анализатора ОП и, соответственно, после каждой 8-ой ступени — полярность высоковольтных источников преускоряющих и анализирующих напряжений; кроме того, блок БК вырабатывает эталонные низковольтные напряжения, пропорциональные напряжениям на ОП и необходимые для работы высоковольтного преобразователя.

Типовая схема высоковольтного преобразователя, описанная в работе [ 23 ], в данном приборе была значительно модернизирована. На рис. 11 представлена структурная схема, формирующая высоковольтные напряжения, из которой видно, что положительные и отрицательные напряжения получаются в результате подачи команд, выдаваемых дешифратором через последовательно соединенные высоковольтные преобразователи ( $ПВ_1$ ) и ( $ПВ_2$ ).

Блокинг-генератор [ 23 ], задающий частоту преобразования, заменен на мультивибратор МВ, отличающийся высокой стабильностью частоты колебаний и правильной формой выходных импульсов, а также широкими возможностями изменения частоты и скважности для экспериментального определения режима колебаний, при котором обеспечивается максимально возможный к.п.д. преобразования. Обычно используемый эмиттерный повторитель на Р-П-Р и П-Р-П транзисторах для передачи эталонных напряжений в данном случае

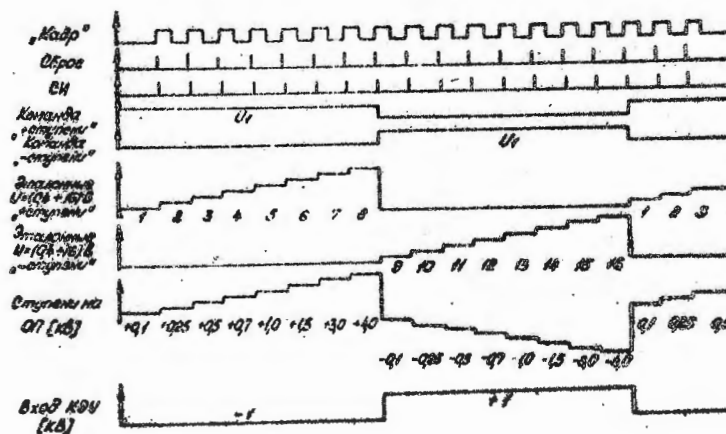


Рис. 10. Временной цикл работы прибора.



ся в определении энерггеометрического фактора прибора в целом:

$$\bar{f}_{ji} \approx \bar{f}_{ji} = \eta \iiint_{E, \psi, \theta} F(E) f(\psi, \theta) \sin \theta dE d\theta d\psi \dots, \quad (2)$$

где  $\eta$  - абсолютная эффективность КАУ, равная 1 в данном случае.

При облучении прибора моноэнергичным пучком заряженных частиц известной интенсивности  $\bar{f}_{ji}$  можно, с достаточной степенью точности представить как

$$\bar{f}_{ji} = S_{ji}(E) (\Delta E/E)_i E \cdot \Omega_i \dots, \quad (3)$$

где  $\Omega_i = \int_{\psi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} f(\theta, \psi) \sin \theta d\theta d\psi$  - геометрический фактор,  
 $S_{ji}(E) = N_{ji}(E) / P_{j_{вх}}(E), [см^2]$ , где  $N_{ji}(E)$  - скорость счета  $i$ -го канала для частиц с энергией  $E$ ;  $P_{j_{вх}}(E)$  - плотность потока частиц с энергией  $E$  (при нормальном падении).

Калибровка спектрометра, заключающаяся в последовательном облучении прибора направленными, моноэнергичными потоками электронов и протонов известной интенсивности, проводилась на специальной вакуумной установке. Установка была оснащена источниками ионов и электронов, двухкоординатным поворотным устройством, системой напуска рабочего газа в источник ионов и датчиком контроля интенсивности потоков заряженных частиц - ДКП.

Принципиальная схема установки показана на рис. 12.

Вакуумная камера, в которой помещался исследуемый прибор, представляла собой шар диаметром 800 мм, усеченный с шести взаимно перпендикулярных направлений плоскими фланцами. К одному из боковых фланцев пристыкован источник ионов с системой напуска газов и отстоящий от камеры приемника на расстоянии 4800 мм.

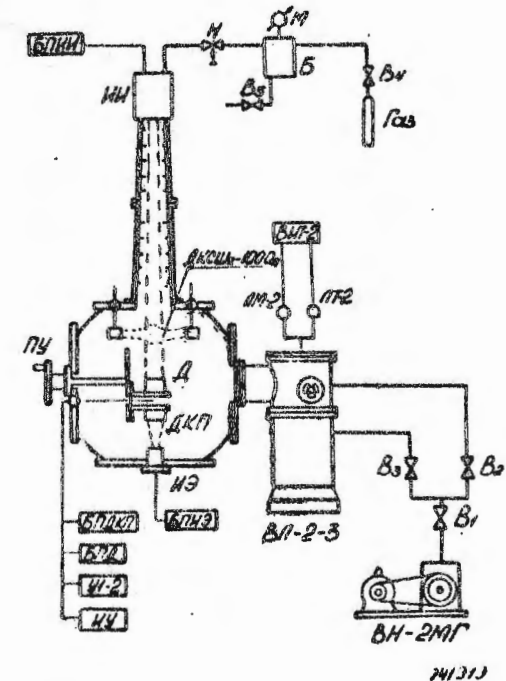


Рис. 12. Принципиальная схема экспериментальной установки.



Откачка камеры производилась вакуумными насосами с быстрой действия 2000 л/с.

Исследуемые приборы облучались пучками положительных ионов или электронов, энергия которых могла изменяться от  $\sim 100$  до 10000 эВ. Расходимость ионного пучка не превышала  $\pm 0,5^\circ$ , а электронного  $\pm 1^\circ$  от основного направления, а разброс по энергии — не более 1% для ионов и 3% для электронов от среднего значения энергии.

Пучки ионов создавались источником, представляющим собой одну из модификаций источника Нира без магнитного поля.

Примененная шестигранная конструкция ионизационной камеры источника с тремя спиральными катодами, расположенными вокруг ионизационной камеры под углом  $120^\circ$  относительно друг друга, давала возможность создавать три пересекающихся в центре ионизационной камеры электронных пучка, что позволяло получать на расстоянии 4800 мм от источника пучки ионов с плотностью не менее  $10^{-10}$  А/см<sup>2</sup>. В качестве рабочего газа использовался водород.

Пучки электронов создавались источником, представляющим собой одну из разновидностей электронной пушки Пирса. В качестве эмиттера использовался прямокальный вольфрамовый катод. Источник устанавливался на одном из боковых фланцев на расстоянии 400 мм от входа прибора.

Контроль за равномерностью интенсивности потоков заряженных частиц в сечении приемного устройства и анализ распределения их по энергии производились датчиком контроля пучка ДКП. ДКП представляет собой одну из разновидностей плоского электростатического спектрометра заряженных частиц с задерживающим потенциалом. Анализирующий, супрессорный и экранный электроды ДКП выполнены из золоченой вольфрамовой сетки (20 мкм).

Плоский сотовый коллектор изготовлен из никеля. Сотовая конструкция снижала вторичную эмиссию и отражение ионов и электронов с поверхности коллектора. Токи измерялись электрометрическим усилителем с предельной чувствительностью  $10^{-14}$  А.

Как уже упоминалось выше, рабочая камера установки была оснащена двухкоординатным поворотным устройством. Кроме исследуемого прибора, на поворотном устройстве на некотором расстоянии от оси вращения устанавливался ДКП, который периодически подводился под пучок для определения его параметров. С другой стороны, поворотное устройство позволяло во время эксперимента вращать исследуемый прибор относительно направления потока заряженных частиц по двум взаимно-перпендикулярным направлениям (по горизонтальной оси с шагом  $0,2^\circ$ , а по вертикальной оси с шагом  $0,4^\circ$ ) и снимать при этом не только энергетические, но и его угловые характеристики.

Для оценки чувствительности приборов к воздействию солнечного излучения использовались газоразрядные источники света типа ДКСШ-1000 и Е-209.

Газоразрядная лампа ДКСШ-1000 является источником света большой яркости, обеспечивающим непрерывное излучение в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра, начиная с длин волн  $\lambda \sim 2000 \text{ \AA}$ . Интегральная интенсивность излучения лампы на расстоянии 350 мм составляла  $0,03 \text{ Вт/см}^2$ .

Проведенные измерения показали, что в диапазоне длин волн  $\sim 2000 - 4000 \text{ \AA}$ , наиболее ответственного за фотоэмиссию, спектральная интенсивность лампы ДКСШ-1000 соответствует реальному солнечному излучению и существенно превышает последнюю для  $\lambda > 7000 \text{ \AA}$ .

Газоразрядная лампа Е-209, наполненная химически чистым дейтерием и снабженная окном из  $\text{LiF}$ , давала поток

$2,2 \cdot 10^{11}$  фотон/с с максимумом спектральной характеристики излучения при  $\lambda \sim 1216 \text{ \AA}$ .

Как следует из выражения (3), для определения  $f_i$  необходимо знание энергетических, угловых и "токовых" характеристик прибора, т.е. зависимостей выходной скорости счета от энергии, угла падения и интенсивности входного потока при разных значениях его энергии, соответственно.

На рис. 13 приведены примеры энергетических характеристик прибора. При этом рис. 13а иллюстрирует взаимосвязь между напряжением, подаваемым на отклоняющую пластину, и энергией анализируемых частиц в зависимости от номера канала. Из этого рисунка видно, что потоки частиц для ряда энергий регистрируются двумя или тремя каналами, что позволяет повысить точность измерения интенсивности, а также проводить сравнительную оценку чувствительности этих каналов в полете. Энергетическое разрешение приборов приведено на рис. 13б, из которого видно, что, как и следовало ожидать, энергетическая избирательность повышается с уменьшением номера канала.

Результаты измерений значений  $\Delta E/E$  в зависимости от номера канала для частиц обоих знаков показаны на рис. 14. Характерно, что экспериментальные значения  $\Delta E/E = f(i)$ , полученные при облучении реального прибора потоками электронов и протонов, оказались, во-первых, отличными от расчетных, а во-вторых, неодинаковыми для частиц разных знаков. А именно, значения  $\Delta E/E$  для протонов существенно ниже, чем для электронов. Можно полагать, что эта разница связана с большим относительным рассеянием электронов на стенках прибора, что, соответственно, должно приводить к "расширению" энергетических характеристик, т.е. к ухудшению разрешения по энергиям. Экспериментальные значения  $\Delta E/E$  превышали расчетные, которые соот-

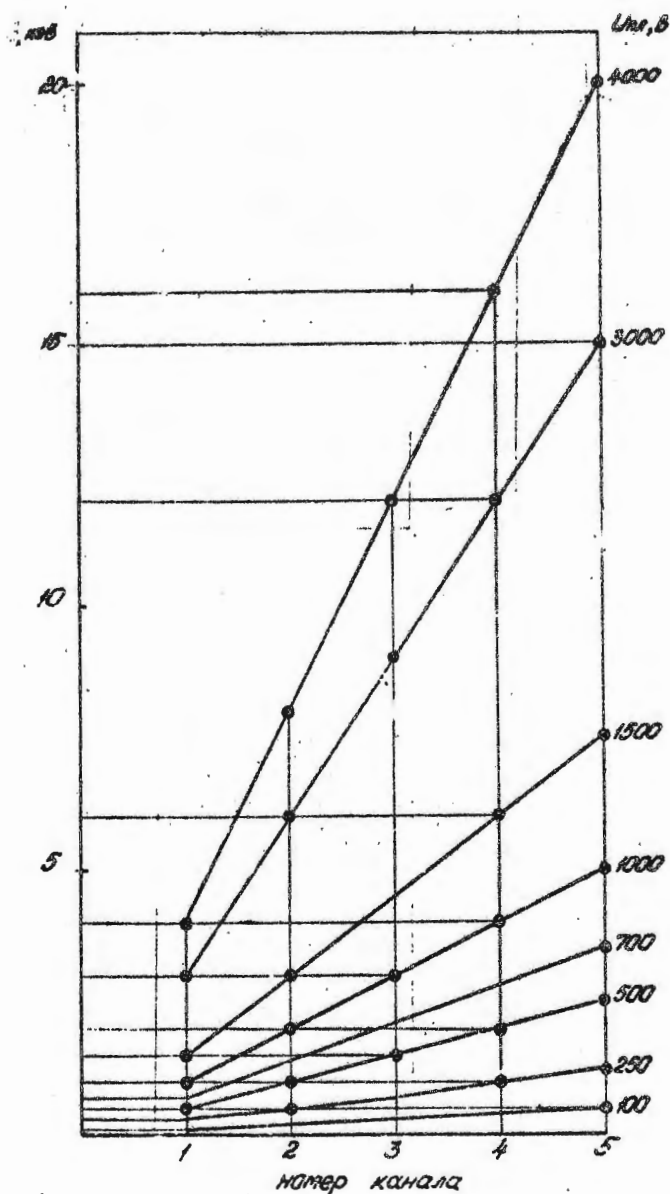


Рис. 13а. Изменение энергетической чувствительности спектрометра в зависимости от анализирующего напряжения  $U_{ан}$ .

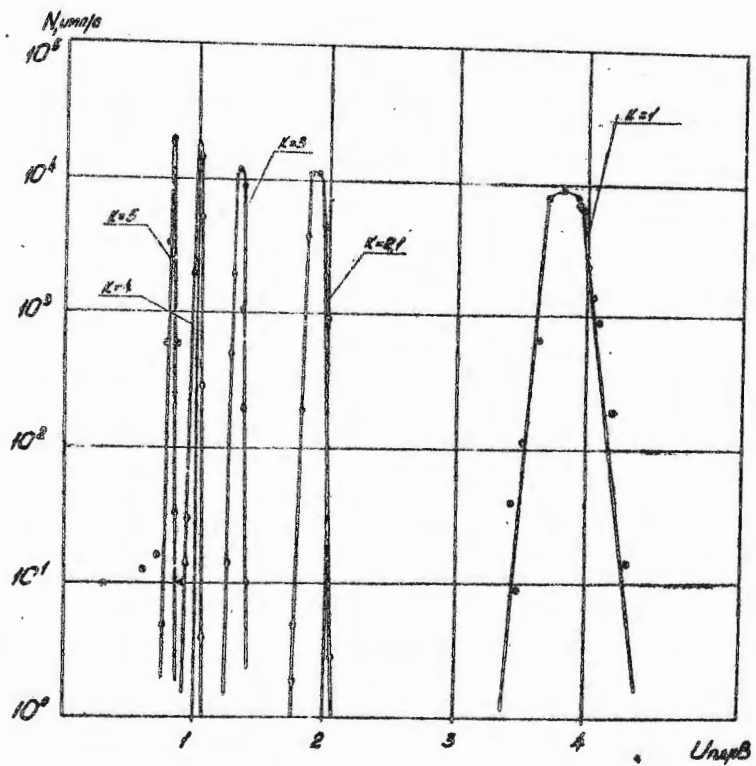


Рис. 136. Энергетические характеристики спектрометра  
 ( $E_{ВХ}=4$  кВ;  $P_{ВХ}=8 \cdot 10^6$  ч/с.см<sup>2</sup>).

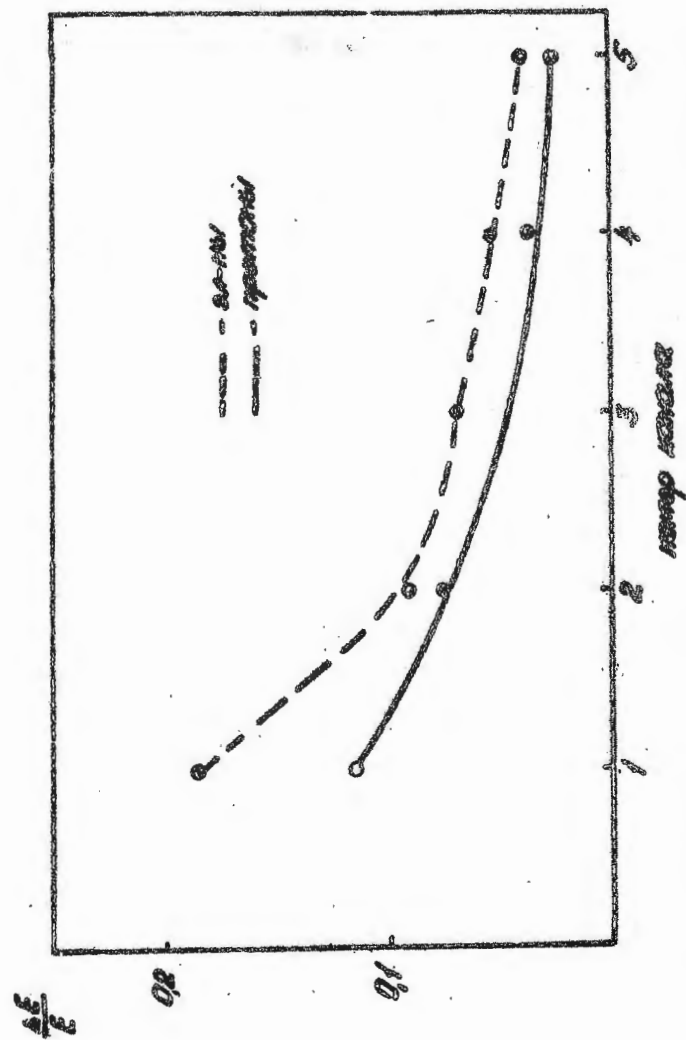


Рис. 14. Изменение разрешения спектрометра  $\Delta E/E$  в зависимости от номера канала.

ветствуют координатам приема 1, 2...5 принципиальной схемы анализатора, приведенной на рис. 2, как для электронов, так и для протонов. Очевидно, что наблюдаемое расхождение экспериментальных и расчетных значений  $\Delta E/E$  обусловлено тем, что в реальном приборе частицы, пройдя координаты 1, 2...5, прежде чем попасть на вход КЭУ, попадали в пространство дрейфа, у которого размеры выходной щели были меньше, чем входной. В итоге величины  $\Delta E$  существенно уменьшились.

Примеры угловых характеристик приборов, полученных как при продольном, так и при поперечном сканировании входного потока, приведены на рис. 15 и 16 для электронов и протонов различных энергий, соответственно. Из рисунков видно, что диаграммы направленности в обоих направлениях симметричны и уменьшаются по величине по мере увеличения номера канала. Изменение диаграмм направленности в зависимости от энергии проиллюстрировано на рис. 17 и 18, из которых следует, что эффекты рассеяния частиц внутри прибора наибольшим образом проявляются для энергий  $E < 1$  кэВ, что приводит (в зависимости от направления сканирования) к уширению или сужению угловых характеристик.

Ранее было отмечено, что эффективность КЭУ не меняется, если величина падающих потоков частиц не превышает  $\sim 10^6$  част/с. С целью выяснения динамического диапазона чувствительности прибора, в пределах которого его абсолютная эффективность остается неизменной, регистрировались зависимости скорости счета каждого канала от плотности потока частиц на входе (см. рис. 19). Из рис. 19 видно, что линейный характер зависимости  $N_{\text{вых}} = kP_{\text{вх}}$  сохраняется при изменении интенсивности входного потока более, чем на четыре порядка. Полученные зависимости  $N_{\text{вых}}/P_{\text{вх}} = S_0(E)$  для линейного диапазона изменений входного потока приведены на рис. 20. Для всех каналов наиболее сильные изменения  $S_0(E)$

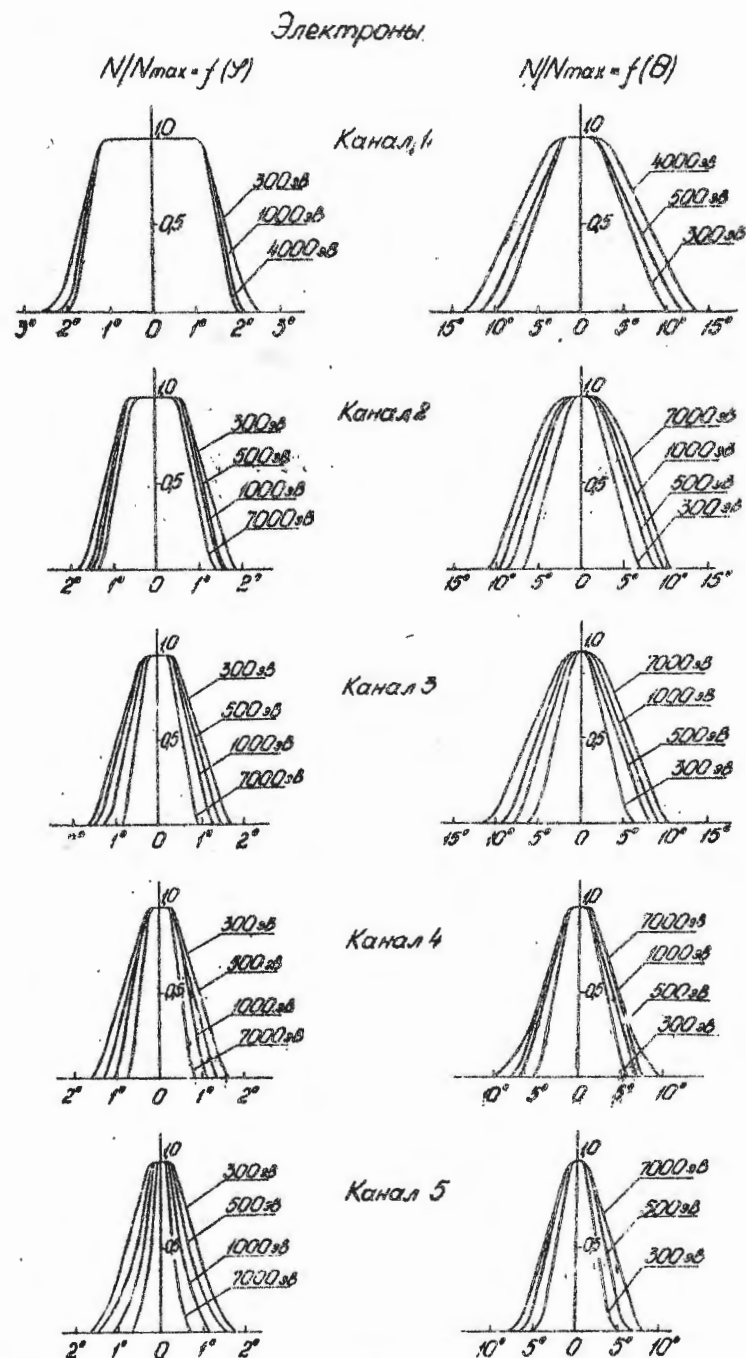


Рис. 15. Угловые характеристики спектрометра в зависимости от энергии электронов.

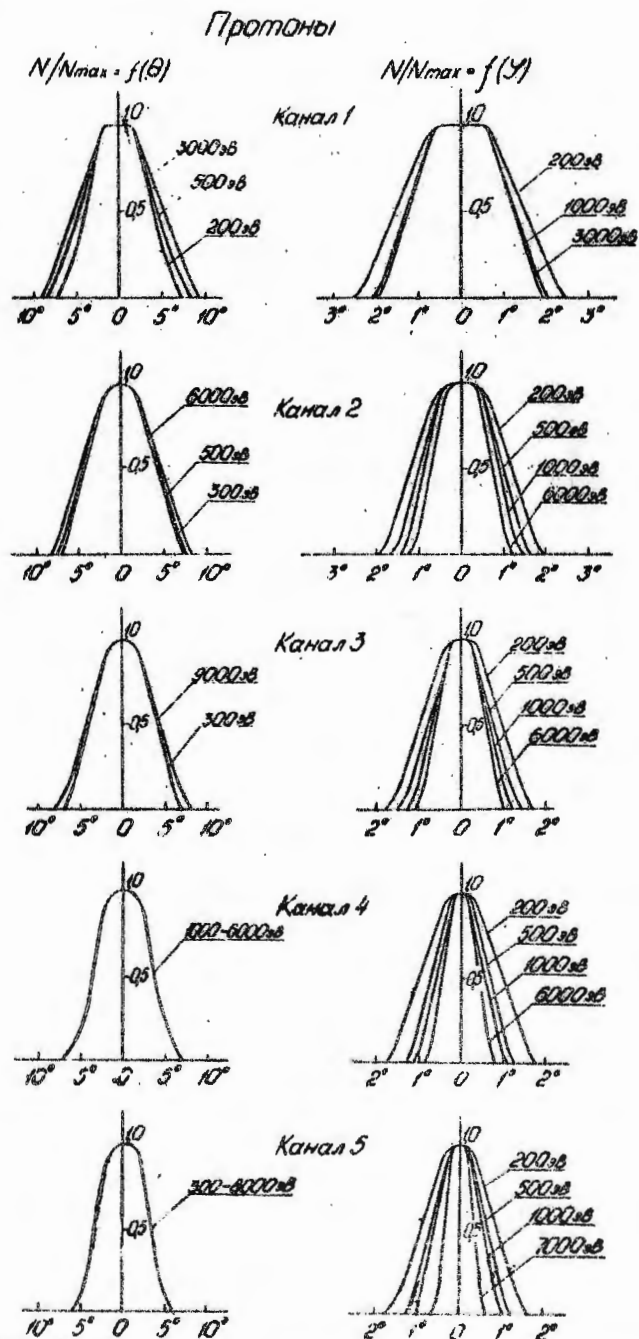


Рис. 16. Угловые характеристики спектрометра в зависимости от энергии протонов.

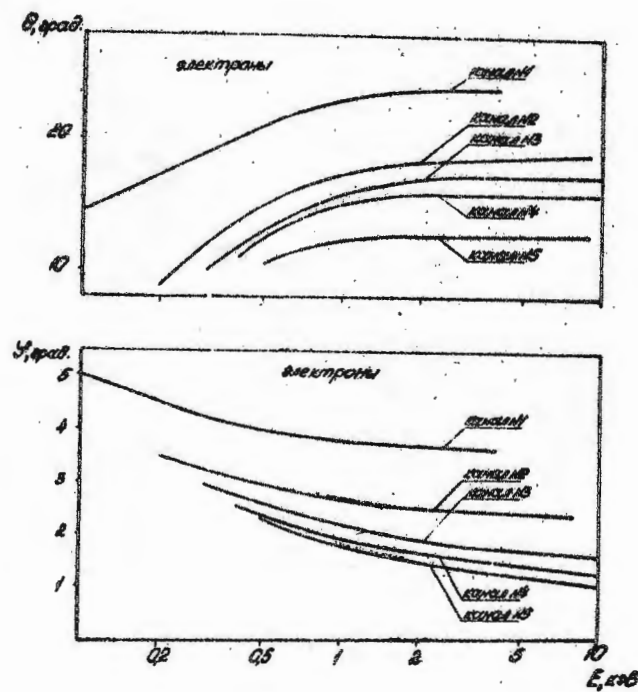


Рис. 17. Изменение диаграммы направленности спектрометра в зависимости от энергии электронов.

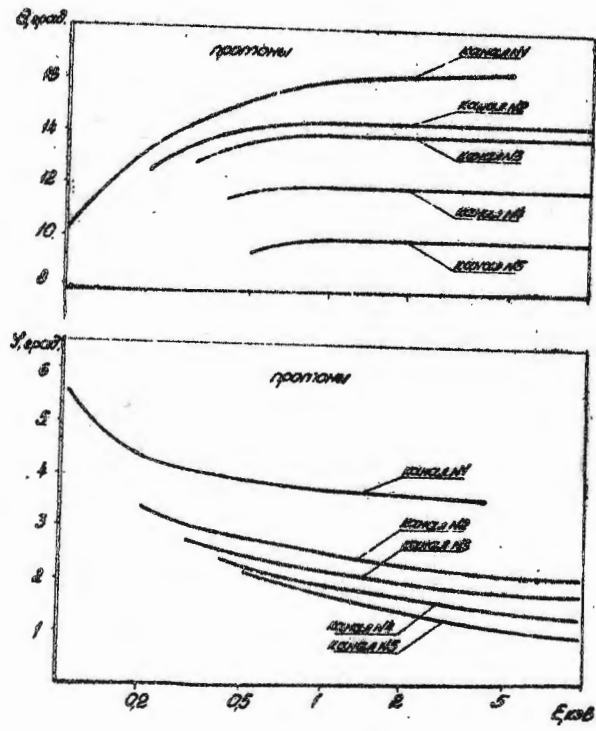


Рис. 18. Изменение диаграммы направленности спектрометра в зависимости от энергии протонов.

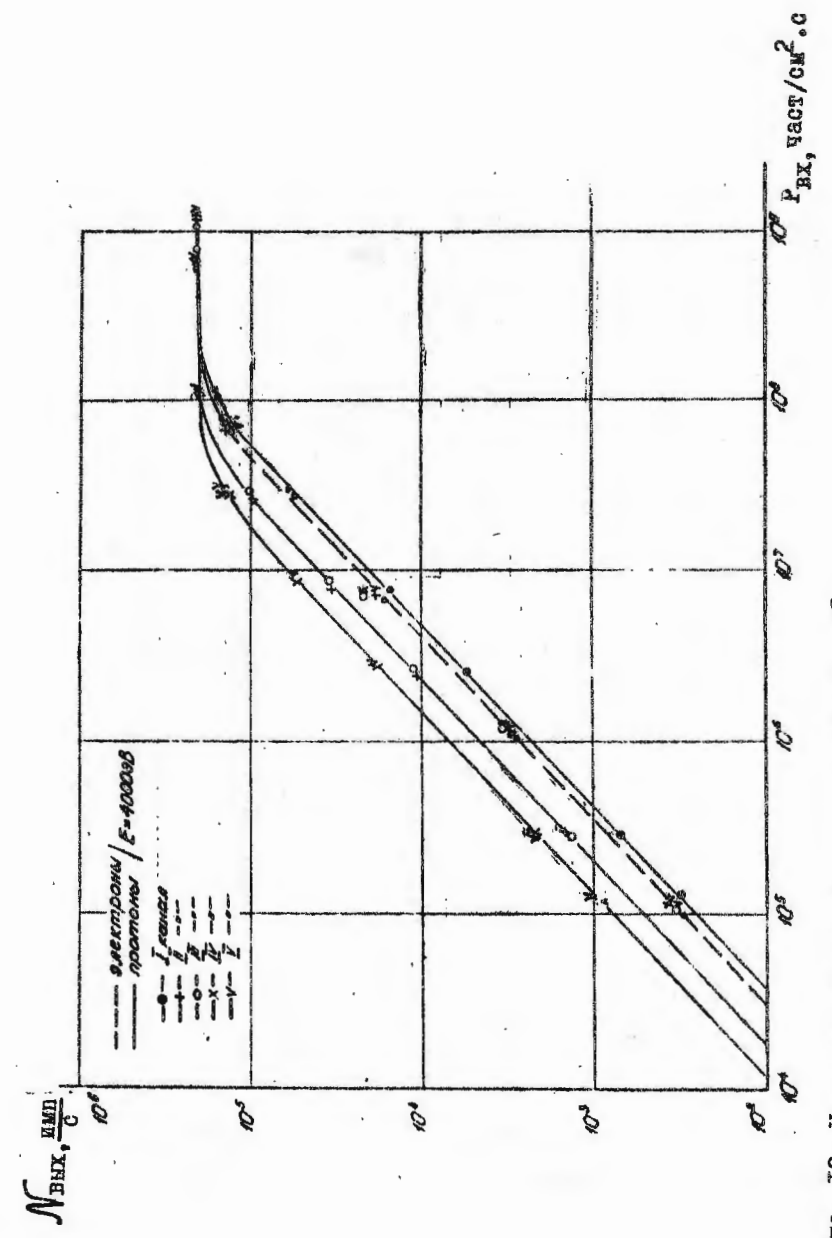


Рис. 19. Изменение выходной скорости счета  $N_{\text{ВЫХ}}$  от величины потока частиц на входе.

от  $E$  имели место для  $E < \text{кэВ}$ , когда эффекты рассеяния максимальны. Соответственно, это обстоятельство во и проявилось максимальным образом для младших каналов. Для  $E > 3 \text{ кэВ}$  величины  $S_0$  с энергией практически не изменялись.

Напомним, что для проверки чувствительности КЭУ в процессе работы выходная скорость счета одновременно регистрировалась на двух уровнях дискриминации. Поскольку все эффекты "старения" КЭУ максимальным образом проявляются при повышенных интенсивностях, для оценки динамики первоначального амплитудного распределения выходных импульсов исследовалось изменение скорости счета на выбранных уровнях чувствительности регистрирующей аппаратуры в зависимости от интенсивности частиц на входе. На рис. 21 показано типичное изменение отношения  $N_1/N_2$ , где  $N_1$  и  $N_2$  скорости счета, зарегистрированные на уровнях дискриминации 0,6 В и 1,2 В, соответственно, в зависимости от  $P_{\text{вх}}$ . Отклонение отношения  $N_1/N_2$  от единицы начинает иметь место, когда интенсивность потока на входе прибора превышает  $\sim 5 \cdot 10^7 \text{ ч/см}^2 \cdot \text{с}$ ; при этом для младших каналов имеет место тенденция смещения этого порога в сторону более высоких потоков. При потоках  $\sim 10^7 \text{ ч/см}^2 \cdot \text{с}$  изменение отношения  $N_1/N_2$  в течение  $\sim 1$  часа непрерывной работы не превышало нескольких процентов.

Наконец, были проведены исследования чувствительности приборов к фоновому солнечному излучению. С этой целью проводились измерения выходной скорости счета при облучении входной щели с помощью указанных выше источников света.

Эксперименты по проверке чувствительности приборов к воздействию У.Ф. излучения от источника Е-209, установленного на расстоянии 3-4 мм от входного окна прибора, показали, что прибор не чувствителен к излучению этого источника, независимо от

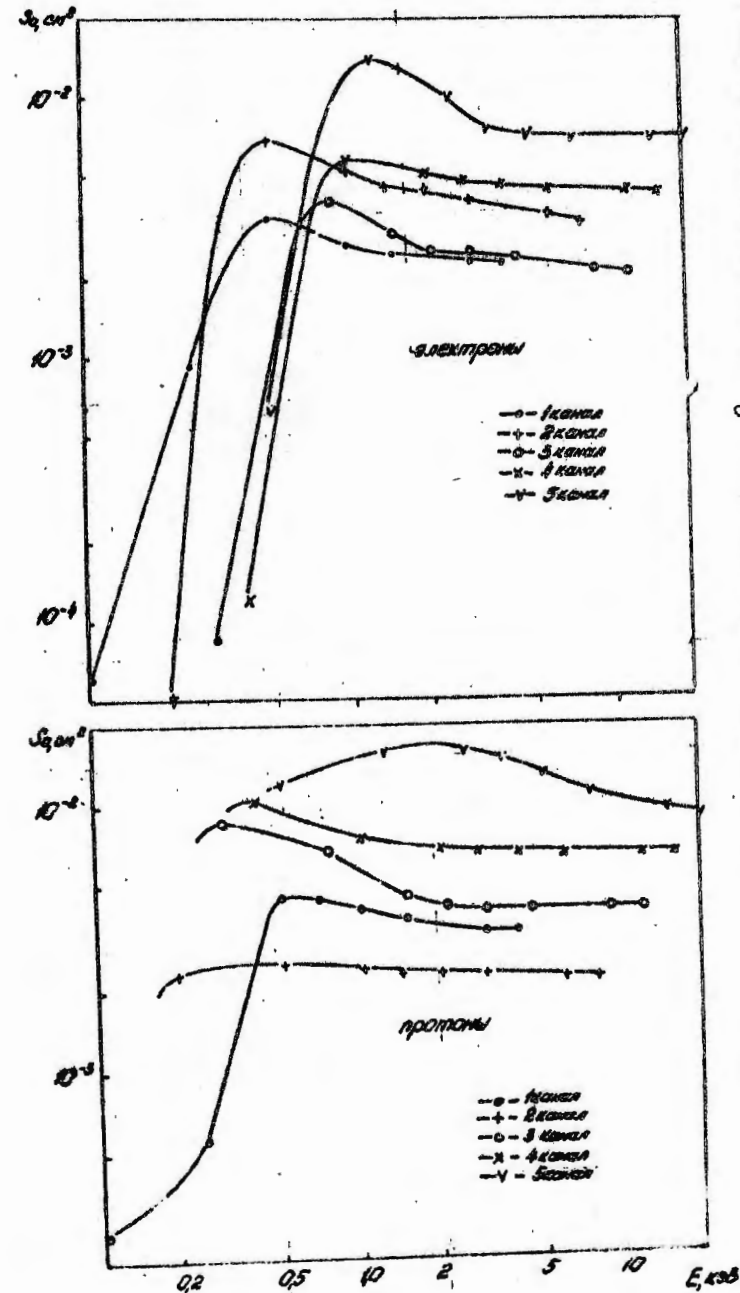


Рис. 20. "Изменение эффективной площади" спектрометра  $S_0$  от энергии падающих частиц.



направления падающего потока.

Результаты проверки спектрометров к воздействию более интенсивного излучения от источника ДКСШ-1000 приведены на рис. 22-23. На всех графиках по осям ординат отложено значение выходных сигналов каналов  $N$  [имп/с], по осям абсцисс напряжение на отклоняющей пластине  $U_{от}$  [В], номера каналов  $i$  и положение входного окна исследуемого прибора относительно нормали к входному потоку  $\varphi$ .

Как видно из рис. 22а, значения выходных сигналов каналов 1, 3, 4 и 5 не зависят от напряжения, прикладываемого к отклоняющей пластине и не превышают 1+2 имп/с, тогда как для второго канала значения выходных сигналов меняются с изменением напряжения на отклоняющей пластине от 5 до 13 имп/с. На рис. 22б специально показано изменение выходного сигнала 2-го канала в зависимости от напряжения на отклоняющей пластине. Наблюдаемое увеличение скорости счета для этого канала можно объяснить, вероятно, тем, что при данной геометрии анализатора некоторая доля фотоэлектронов с отклоняющей пластины попадает на вход КЭУ этого канала. Проведенные исследования показали, также, что только для 2-го канала выходной сигнал зависел от изменения направления падающего светового потока (см. рис. 23). Правда, зарегистрированная при этом максимальная скорость счета была существенно ниже порога срабатывания блока электроники в бортовом режиме работы.

Таким образом, показано, что прибор практически не чувствителен к фоновому солнечному излучению, что позволяет его использовать в условиях непосредственной засветки его входной щели Солнцем и сохраняет постоянную чувствительность в широком диапазоне изменений плотности входного потока заряженных частиц.

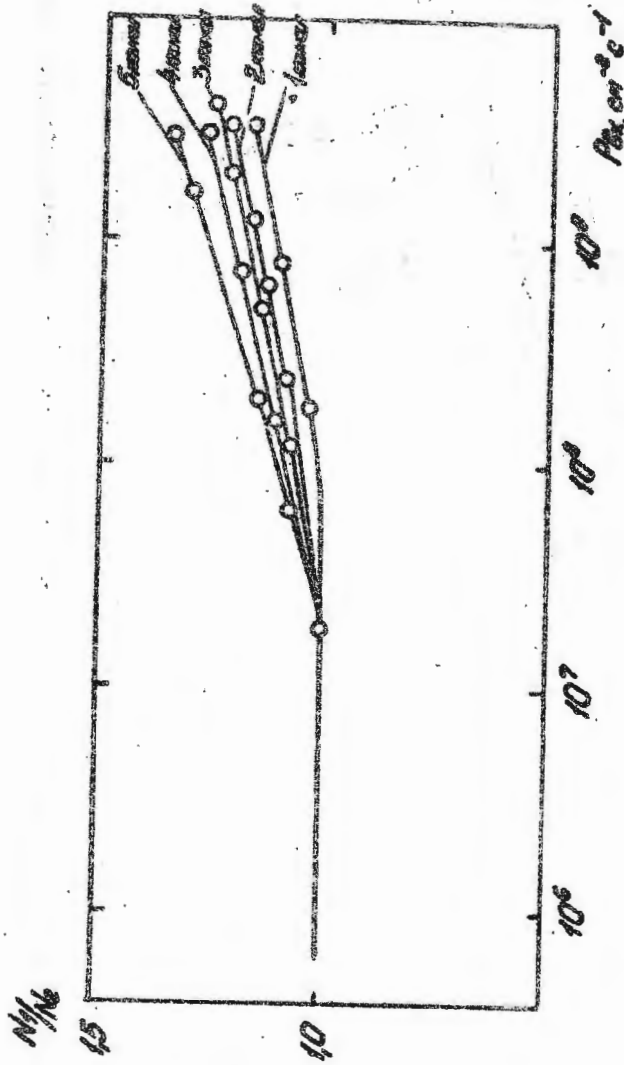


Рис. 21. Изменение выходной скорости счета на разных уровнях дозиметризации ( $N_1$  и  $N_2$ ) в зависимости от величины входного потока.

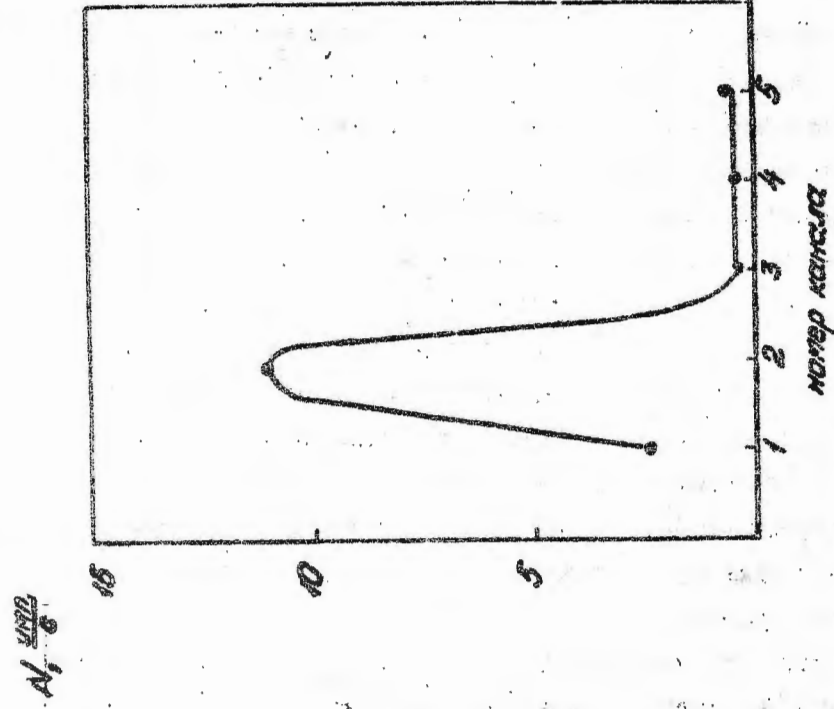


Рис. 22а. Чувствительность каналов спектрометра к солнечному излучению.

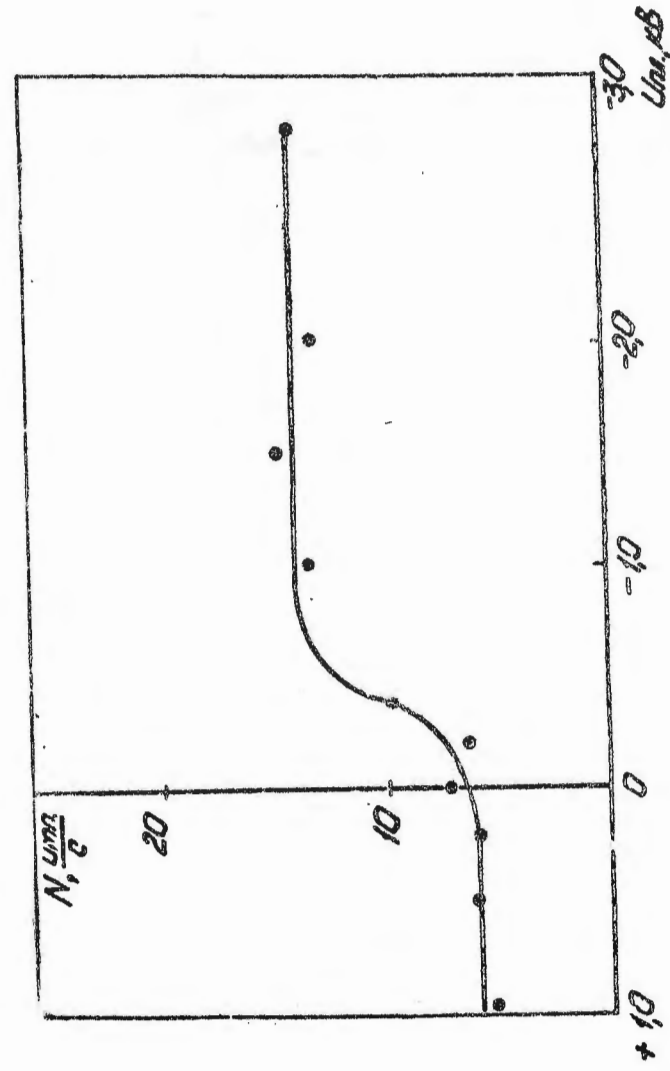


Рис. 22б. Чувствительность 2-го канала спектрометра к солнечному излучению в зависимости от наклонения на отклоняющей пластине.

Значения энергogeометрического фактора  $\bar{F}_{\beta}$  ( $\text{см}^2 \text{стер.эВ})^{-1}$  для всех пяти каналов в зависимости от напряжения на анализирующей пластине и рода частиц приведены в табл. I. Соответственно, пороговая чувствительность прибора в зависимости от энергии регистрируемого потока показана на рис. 24, из которого видно, что все каналы спектрометра, кроме первого, имели практически одинаковую чувствительность к протонам. Для электронов различие в чувствительностях имело место для первого и второго каналов.

С нашей точки зрения одинаковая абсолютная чувствительность разных и независимых каналов одного прибора, дающих одновременную информацию о потоках различных энергий и, кроме того, взаимно дублирующих ряд энергетических интервалов во времени позволяет существенно повысить не только точность измерений в целом, но и временное и пространственное разрешение этих измерений.

#### 6. УСЛОВИЯ РАБОТЫ И ПРИМЕРЫ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Для исследований дифференциальных энергетических спектров положительных и отрицательных частиц (протонов и электронов) в диапазоне энергий  $100 \text{ эВ} \leq E \leq 20 \text{ кэВ}$  на спутнике "Космос-900" были установлены два описанных выше спектрометра.

Спутник "Космос-900" был запущен на полярную геоцентрическую орбиту 30 марта 1977 г. с апогеем 522,9 км, перигеем 460,4 км, наклонением  $82,93^\circ$ . Объект имел жесткую трехосную ориентацию, его продольная ось была всегда перпендикулярна к земной поверхности.

Анализаторы были расположены вдоль продольной оси объекта таким образом, что нормали к их входным окнам были направлены в противоположные стороны. Угол входа заряженных частиц в при-

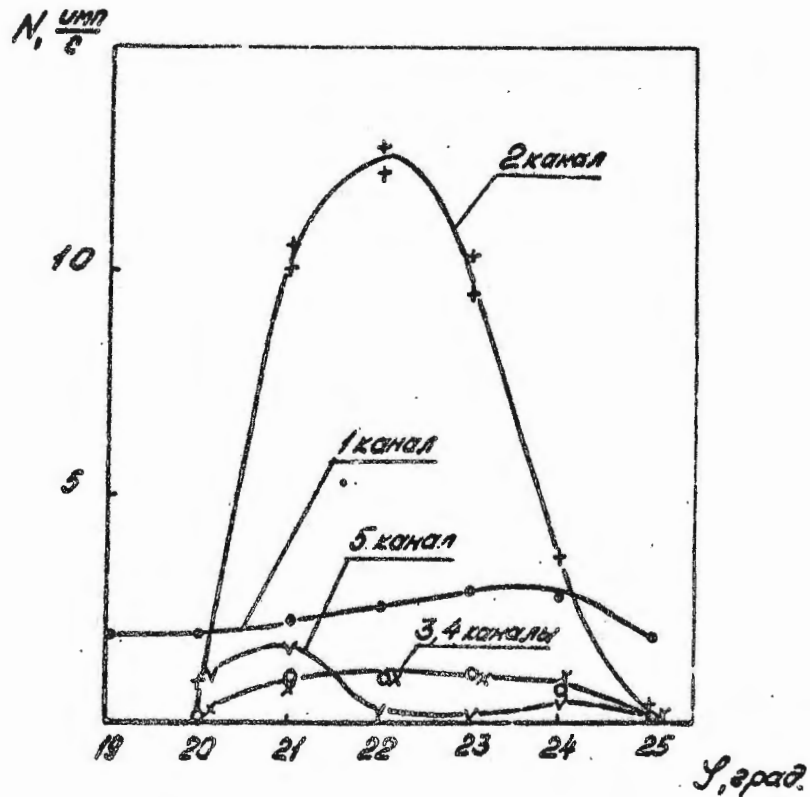


Рис. 23. Угловая диаграмма чувствительности каналов спектрометра к солнечному излучению.

Таблица I.

		Протоны							
Номер ступени ОП		I	2	3	4	5	6	7	8
Номер канала									
1.	$5 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$
2.	$2 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
3.	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
4.	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
5.	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
Электрон И									
Номер ступени ОП									
Номер канала	9	10	11	12	13	14	15	16	
1.	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	
2.	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	
3.	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	
4.	$9 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	
5.	$4 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	

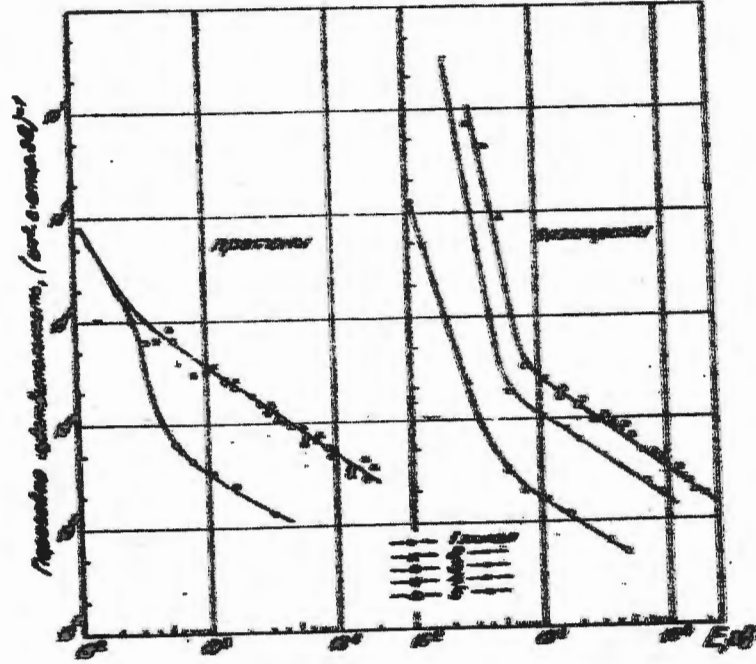


Рис. 21. Пороговая чувствительность канала ОП.

борн составлял, таким образом, с продольной осью угол  $22^\circ$ .

Спектральные распределения фиксировались последовательно, время снятия каждого 40-точечного спектра - 20 с для частиц каждого знака. На некоторых участках спектра информация о потоках была получена с разрешением по энергии  $\sim 10 + 20$  В.

На рис. 25 приведены примеры электронных дифференциальных спектров для 1 апреля 1977 г. в области инвариантных широт  $L_p = 73 - 77^\circ$ . Видно, что на фоне почас довольно изрезанной структуры, свидетельствующей о больших временных вариациях, максимумы интенсивностей  $\sim 10^5 + 10^6$  эл./см<sup>2</sup>с.ст.эВ имели место при  $E = 1,5 + 2$  кэВ, а при  $E = 5 + 6$  кэВ спектры высших частот частиц довольно круто обрываются. В целом на этих широтах обобщая спектров имела вид "перевернутой буквы V", аналогично описанным в работах [26-28]. Характерно также, что на широтах  $L_p = 73 - 77^\circ$  наблюдались спектры электронов, движущихся вверх от Земли (см. рис. 25).

Сопоставление потоков частиц, движущихся одновременно вдоль одного и того же направления от Земли и к Земле (сверху и снизу) показывает, что в основном потоки частиц снизу были существенно меньше, чем высших сверху, хотя в ряде случаев они оказывались и несколько большими. На рис. 26 представлены в зависимости от энергии  $E$  значения "эффективного" альбеда  $\bar{a}(E)$  ( $L_p = 72 + 77^\circ$ ).

Под эффективным альбедо при этом понимается отношение потока снизу ( $dJ/dE \downarrow$ ) к потоку сверху ( $dJ/dE \uparrow$ ), измеренному при той же энергии. Приведенные величины усреднены по данным восьми спектров. Из рис. 26 видно заметное возрастание доли "отраженных" электронов с  $E < 1$  кэВ, которое затруднительно объяснить простым "смягчением" спектра первичных электронов в результате кулоновского рассеяния.

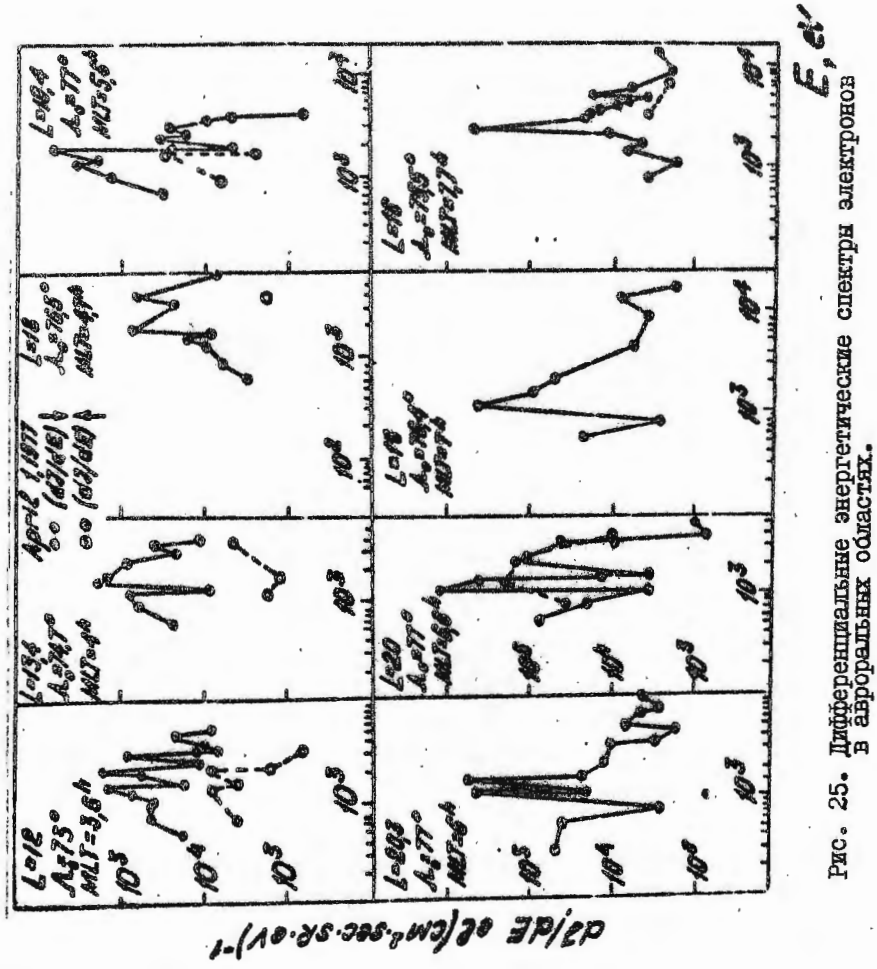


Рис. 25. Дифференциальные энергетические спектры электронов в авроральных областях.

В этой связи отсутствие в спектре отраженных электронов, сопоставимых по интенсивности потоков с  $E < 770$  эВ, позволяет предполагать локальный механизм ускорения. Более того, отсутствие заметных потоков "отраженных" электронов при отсутствии электронов высыпавшихся, зафиксированное в ходе измерений на "Космос-900", со своей стороны, может свидетельствовать, что механизм локального ускорения формируется лишь при наличии высыпавшихся частиц.

Особого внимания, по нашему мнению, заслуживают также потоки частиц, зарегистрированные на "Космос-900" в экваториальной области, спектры которых приведены на рис. 27. Следует отметить, что потоки электронов и протонов на малых высотах наблюдались для низких широт неоднократно и ранее [29,30]. Однако неоднозначная природа этих потоков не привлекла к ним достаточное внимание. Наиболее информативные данные об интенсивностях потоков электронов и протонов вблизи экватора в вечернем секторе на высотах 600-800 км были получены Хейкилкой с помощью электростатического спектрометра на спутнике 'ISIS - I' [31], когда потоки электронов достигали  $\sim 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ ст}^{-1} \text{ эВ}^{-1}$  на широтах  $\lambda_p = 23^\circ + 21^\circ$ .

В нашем случае одновременная регистрация потоков протонов и электронов с энергиями от  $\sim 100$  эВ до  $\sim 20$ кэВ и интенсивностью  $\sim 10^{10} + 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ ст}^{-1} \text{ эВ}^{-1}$  наблюдались в течение сравнительно длительного периода в диапазоне  $\lambda_p = 38 - 15^\circ$  вблизи полуденного меридиана. Удивительно четкая повторяемость вида спектральных распределений свидетельствует о высокой стационарности этих потоков, а также о их анизотропии, поскольку при регистрации интегральных потоков  $10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ ст}^{-1} \text{ эВ}^{-1}$  прибором, смотрящим вверх, не наблюдались потоки противоположного направления. Характерно, что спектры при  $E \sim 500$  эВ имели ярко выра-

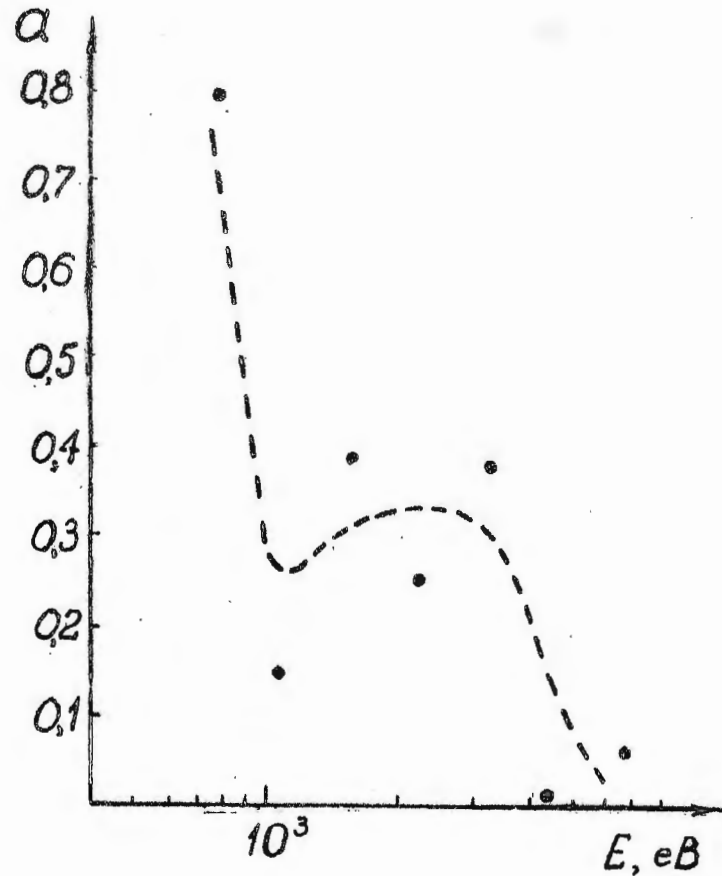


Рис. 26. Зависимость "эффективного" альбедо" от энергии

женное "колени" с перепадом интенсивностей  $\sim 1,5 - 2$  порядка.

Пока трудно однозначно определить источник этих потоков. Можно предполагать, что существенная их часть представляет собой захваченные и вторичные частицы. Возможным источником таких частиц могут быть, по-видимому, электрические поля, имеющие природу ионосферного динамо и достигающие существенных величин на небольших  $L$  [32]. Дальнейший анализ этих данных и сопоставление их с результатами других ионосферных-магнитосферных экспериментов на спутнике "Космос-900" позволит более определенно ответить на поставленный вопрос.

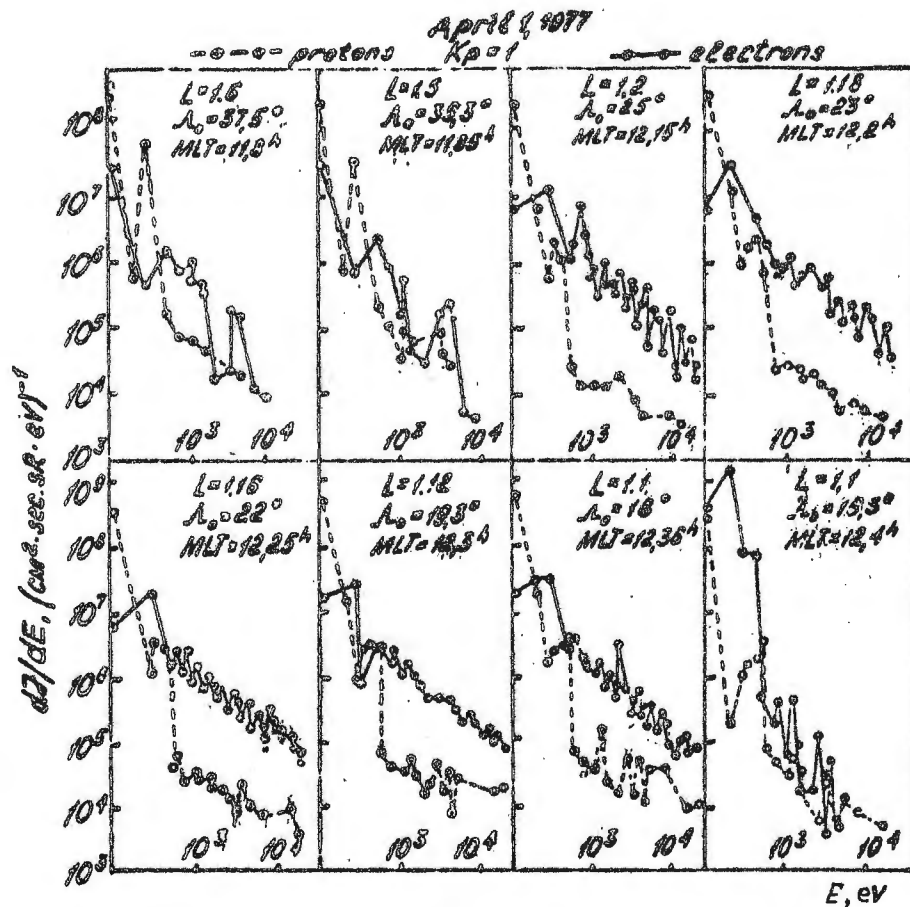


Рис. 27. Энергетические спектры приэкваториальных широт.



## ЛИТЕРАТУРА

- I. W.Riedler, B.Hultqvist, S.Olsen Arkiv för Geofysik., Bd.5, 619, 1974.
2. W.Reidler, Arkiv för Geofysik, Bd.5, 637, 1974.
3. P.Christophersen, Arkiv för Geofysik, Bd.5, 659, 1974.
4. R.L.Arnoldy, P.O.Isaacson, D.F.Gats, L.W.Choy, Rev. Sci. Instrum., 44, 172, 1973.
5. M.F.Shea, G.B.Shook, J.B.Reagan, L.F.Smith, IEEE Trans. Nucl. Sci., N5-14, 96, 1967.
6. B.J.O'Brien, F.Abney, J.Burch et al. Rev. Sci. Instrum., 38, 1058, 1967.
7. J.R.Sharber, J.D.Winningham, E.W.R.Sheldon, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-15, 536, 1968.
8. R.D.Reed, E.C.Shelley, J.C.Bakke, T.C.Sanders, J.D.McDaniel IEEE Trans. Nucl. Sci., N5-16, 359, 1969.
9. R.A.Hoffman, J.L.Burch, K.W.Janetzke, J.F.McChesney, S.H.Way, D.S.Evans, Radio Sci., 8, 393, 1973.
10. B.H.Mank, C.E.McIlwain, IEEE Trans. Aerospace. Electr. Syst. 11, 1125, 1975.
11. М.Р.Айнбунд, А.В.Богданов, О.Л.Вайсберг и др. Косм. исслед. XI, 738, 1973.
12. А.П.Бабаев, Ю.М.Жученко, В.И.Лазарев, В.А.Липовецкий, Б.В.Марьян, М.А.Савельев, М.В.Тельцов, В.Ф.Тулинов, В.М.Фейгин. Сб. "Эффекты солн. активн. в нижн. атмосф." Гидрометеоздат, 106, 1977.
13. R.Wales, W.King, J. Environ. Sci., 15, 20, 1972.
14. G.Bonifazi, P.Cerulli-Irelli, A.Egidi, G.Marangoni, G.Moreno, G.V.Pallottino, R.Terenzi, ELDO/ESRO Sci. and Techn. Rev., 6, 209, 1974.

15. B.H.Mank, A.Korth, E.Keppler, Z.Flug, Weltraum, 1, 297, 1977.
16. Л.П.Смирнова, кандидатская диссертация, Москва, 1975 г.
17. Н.М.Шютте, Л.П.Смирнова, Л.А.Гречаник, Ю.Н.Улько, В.И.Пановкина, Тр. конф. по электр. техн. IV Всесоюз. конф. по ЭЭП и ФЭП, в. 5 (31), т. IV, 1971.
18. J.P.Rager, J.F.Reaud, V.T.Du Montcel, Rev. Sci. Instrum., 45, 927, 1974.
19. D.E.Bedo, Rev. Sci. Instrum., 43, 130, 1972.
20. B.D.Klettke, L.D.Krum, W.G.Wolber, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-17, 72, 1970.
21. Н.М.Шютте, А.И.Пуолокайнен, Препринт ИКИ АН СССР Пр-456, Москва, 1979.
22. В.Ф.Тулинов, В.Н.Фейгин и др., Косм. иссл. XIII, 361, 1975.
23. В.И.Лазарев, Б.В.Марьян и др., Геом. и аэрон. XIII, 807, 1973.
24. J.F.Grifo, R.Frange et al., Rev. Sci. Instrum., 47, 6, 1976.
25. R.N.Lewis, Z.S.Van Zoon, T.A.Mayer, I. Berkowitz, Rev. Sci. Instrum. 39, 1386, 1968.
26. W.J.Heikkila, J.D.Winningham, J.Geophys. Res., 76, 883, 1971.
27. L.A.Frank, K.L.Ackerson, J.Geophys. Res. 77, 4116, 1972.
28. L.A.Frank, K.L.Ackerson, J.Geophys. Res., 76, 3612, 1971.
29. H.H.Hilton, J.R.Stevens, A.L.Vampola, Trans. AGU, 450(4), 602, 1964.
30. W.G.Knudseen, J.Geophys. Res., 73, 841, 1968.
31. W.J.Heikkila, J.Geophys. Res., 76, 1076, 1971.
32. A.D.Richmond, J.Geophys. Res., 81, 1447, 1976.