

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ
РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. М.В.ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Иваненко И.П., Рапопорт И.Д., Шестоперов В.Я., Васина Ю.В.,
Вакулов П.В., Васильев Ю.Я., Гольнская Р.М., Гордеев Ю.П.,
Григорьева Л.В., Казакова А.Е., Козлов В.Д., Кумган И.П.,
Мищенко Л.Г., Ниманоров В.М., Папина Л.П., Платонов В.В.,
Подорожный Д.М., Самсонов Г.А., Смоленский Л.Г., Собиняков
В.А., Тамбовцев Г.Е., Тригубов Ю.В., Фатева И.М., Федоров А.Н.,
Хейн Л.А., Чикова Л.О., Ширяева В.Я., Яковлев В.М., Яшин И.В.

Препринт НИЯФ МГУ - 88 - 5/82.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВЫСОКОЙ
ЭНЕРГИИ НА ИСЗ "КОСМОС-1543" И "КОСМОС-1713" С АППАРАТУРОЙ
"СОКОЛ"

Часть I. Регистрация частиц и определение энергии

Москва 1988

Настоящая работа является первой из серии публикаций, посвященных методическим вопросам исследования первичных космических лучей высокой энергии на ИСЗ с созданной в НИИЯФ МГУ аппаратурой "Сокол". К этим вопросам, связанным с разработкой алгоритма обработки экспериментальных данных, относятся: определение энергии частиц, их зарядов, интенсивности, зарядовых и энергетических спектров.

Рассмотрение этих вопросов с необходимой количественной стороны потребовало параллельного изложения некоторых существенных особенностей аппаратуры и эксперимента, хотя описание аппаратуры в целом уже было опубликовано. В настоящей работе приводится описание структуры аппаратуры, условий регистрации частиц и телеизмерений в полете. Рассматриваются вопросы калибровки ионизационного калориметра и определения энергии частиц с его помощью.

© НИИ ядерной физики МГУ, 1988

Введение

Исследования, которые были предприняты на ИСЗ "Космос-1543" и "Космос-1713", посвящены, в основном, изучению зарядового состава первичных частиц космических лучей высокой энергии (до $\sim 10^{14}$ эВ).

Изучение зарядового состава первичных космических лучей (ПКЛ) при разных энергиях на эксперименте сводится к измерениям энергетических спектров различных групп ядер.

Малый поток частиц высокой энергии создает большие трудности при их регистрации и изучении. Именно поэтому прямые измерения энергетического спектра и зарядового состава ПКЛ до начала настоящих исследований проведены для ядер с $Z \geq 3$ в области 1-100 ГэВ на нуклон, где имеется достаточно однозначная информация /1/, (энергия 100 ГэВ/нуклон соответствует полной энергии 1200 ГэВ=1,2 ТэВ для ядер углерода; 1,6 ТэВ для ядер кислорода и 5,6 ТэВ для ядер железа). Существует единственная работа /2/, выполненная при больших энергиях на баллонах с калориметром толщиной $\sim 1,5 \lambda_p$ для протонов, где измерения энергетических спектров ядер углерода доведены до 0,6 ТэВ на нуклон, кислорода - до 1 ТэВ на нуклон и железа - до 0,25 ТэВ на нуклон. Однако при энергии $E \geq 0,1$ ТэВ/нуклон результаты имеют большие статистические ошибки и нуждаются в проверке или подтверждении. Указанные верхние пределы соответствуют полной энергии для ядер углерода ~ 7 ТэВ, кислорода ~ 16 ТэВ и железа ~ 14 ТэВ. Поэтому следует считать, что в области энергий свыше 100 ГэВ/нуклон задача измерения энергетических спектров различных ядер калориметрическими методами еще не решена /3/.

Для легких ядер (протонов, α -частиц) ситуация в области высоких энергий также остается неопределенной. Для α -частиц энергетический спектр измерен калориметрическими методами до энергии $\sim 1,0$ ТэВ/нуклон и с помощью тонкой толчковой рентгено-эмульсионной камеры (РЭК) - до энергий ~ 50 ТэВ/нуклон /4, 5/ (полная энергия ~ 200 ТэВ = $2 \cdot 10^{14}$ эВ). Вопрос о спектре протонов при энергии свыше 1 ТэВ до настоящего времени не получил

однозначного решения в измерениях на границе атмосферы. Случается несколько работ, результаты которых не согласуются друг с другом /5, 6, 7/. Так, по данным работы /5/ (ФЭК толщиной $7 t$ -единиц Pb) дифференциальный спектр протонов в интервале $10^{12}-10^{14}$ эВ (1-100 TeV) можно представить в виде единого степенного закона $F(E)dE = A \cdot E^{-1.7} dE$, с показателем интегрального спектра $\gamma \approx 1,7$. В работе /6/ (калориметр толщиной $\sim 3,2 \lambda$ св для протонов) в области энергий выше ~ 2 TeV показатель степени увеличивается до значения $\gamma \approx 2,3$, что приводит к быстрому уменьшению доли протонов среди частиц ПКИ высокой энергии. В работе /7/ (ФЭК толщиной $14,7 t$ -единиц Pb) наблюдается сходная картина, в той степени, что показатель степени в спектре прискладит при энергии, примерно, в три раза большей.

Помимо прямых экспериментальных методов известны также косвенные методы изучения энергетического состава ПКИ. В настоящее время имеется целый ряд различных косвенных компонент космических лучей на уровне гор, моря и над землей, на которых получают сведения о спектрах ПКИ при энергиях $\sim 10^{14} - 10^{16}$ эВ. К ним относятся измерения спектра мюонов на магнитных спектрометрах /8/, группы мюонов под землей /9/, измерения фотонно-адронных семейств, которые ведутся как в море (работа /10/), так и за рубежом /11/. Во всех этих работах делается вывод, что до энергии $\sim 10^{14} - 10^{15}$ эВ спектр протонов близок к степенному с показателем не более $\gamma \sim 1,8 - 1,9$ с погрешностью $\Delta \gamma \approx 0,15-0,2$. Спектры всех остальных ядер с погрешностью $\Delta \gamma \approx 0,15-0,2$ также не меняют своего наклона. Доля протонов в интервале $10^{12}-10^{14}$ эВ если и меняется (уменьшается), то не более, чем в 1,5-3,0 раза.

Изучение энергетических спектров различных групп ядер ПКИ в области высоких и сверхвысоких энергий является одной из актуальнейших задач физики и астрофизики космических лучей /12/. Знание спектра и зарядового состава ПКИ при высоких энергиях имеет большое научное значение для исследования свойств косми-

ческого пространства в масштабе Галактики. Надежные сведения об энергетическом спектре и зарядовом составе ПКИ в области до $\sim 10^{16}$ эВ необходимы для оптимального планирования и последующей интерпретации крупного международного (с участием СССР) проекта по изучению взаимодействий мюонов и нейтрино высоких и сверхвысоких энергий (проект "Деманд"). Исследования по проекту "Деманд", в свою очередь, должны привести к ряду научных и практических приложений (нейтринная астрономия, "просвечивание" ядра Земли, предостережение землетрясений, поиски полезных ископаемых, связь через большие толщи вещества). Наконец, прямые измерения свойств ПКИ высокой энергии позволят откалибровать известные методы, лежащие в основе исследований ШАЛ. После этого надежное изучение свойств ПКИ по ШАЛ может быть распространено вплоть до самых высоких энергий ($\sim 10^{20}$ эВ).

Для статистической обеспеченности результатов измерений необходим прибор большой светосилы и длительное время измерений. При этом аппаратура должна обеспечивать, в каждом индивидуальном случае, измерение заряда и энергии первичной частицы в диапазоне 1-1000 TeV. Этому требованию удовлетворяет методика ионизационного калориметра /13/. Широкое распространение у нас в стране и за рубежом получили исследования на высотных баллонах /15, 16, 2, 17, 18, 4, 7/. В Советском Союзе для этих исследований впервые были использованы тяжелые ИСЗ /19/, на которых в 1965-68 гг., в частности, были проведены прямые измерения суммарного спектра всех частиц ПКИ (без разделения на заряды в области $Z \geq 3$) в широком интервале энергии $10^{10}-10^{15}$ эВ /20/, а в 1972 г. были проведены исследования характеристик взаимодействия ядер с ядрами при энергии ~ 1 TeV /21/.

Практика исследований с ионизационными калориметрами на спутниках серии "Протон" показала, что для однозначной интерпретации индивидуальных событий и исследований характеристик взаимодействий первичных частиц с ядрами, а также флуктуационных характеристик, необходимо применение калориметра с секционированными детекторами ионизации, позволяющим реконструировать

направление прихода частицы. Оптимальное количество этих секций и размеры детекторов рассмотрены в /14/. Методика зарядовых измерений не должна быть при этом чувствительной к влиянию рассеянных вторичных частиц, генерированных в поглощающем веществе ионизационного калориметра.

Для получения экспериментальных данных об энергетических спектрах различных групп первичных ядер и исследования динамики поглощения энергии первичного ядра в веществе (что связано с механизмом ядерных взаимодействий при высоких энергиях) в НИИЯФ МГУ разработана специальная аппаратура "СОКОЛ" (аббревиатура слов "состав космических лучей"), с помощью которой весной 1984 г. был проведен эксперимент на ИСЗ "Космос-1543" /22-29/. Повторный эксперимент с модернизированной аппаратурой был осуществлен в конце 1985 - начале 1986 г. на ИСЗ "Космос-1713" /35/.

1. Аппаратура

1.1. Общая компоновка прибора

Основная задача эксперимента определила структуру прибора "Сокол": он должен содержать детектор энергии (E) и детектор заряда частицы (Z). В качестве детектора энергии был применен многосекционный ионизационный калориметр, в качестве детектора заряда - черенковские счетчики. Схема прибора "Сокол" изображена на рис. 1.

Ионизационный калориметр (ИК) содержит 10 металлических плит для поглощения энергии первичной частицы. В первом из приборов ("Сокол-1") в ИК были размещены 8 стальных плит толщиной по 10 см каждая и 2 свинцовых поглотителя толщиной 5 см и 2 см в верхней части ИК, служивших для лучшего выделения и изучения тех случаев, когда регистрируемая частица взаимодействовала с ядрами мишени из легкого вещества (алюминия толщиной 7,4 см), расположенной для этой цели непосредственно над ИК. В аппаратуре второго эксперимента ("Сокол-2") свинцовые поглотители были заменены стальными для уменьшения фона обратно идущих вторичных частиц, создающих более значительные помехи для зарядовых измерений в расположенных выше детекторах.

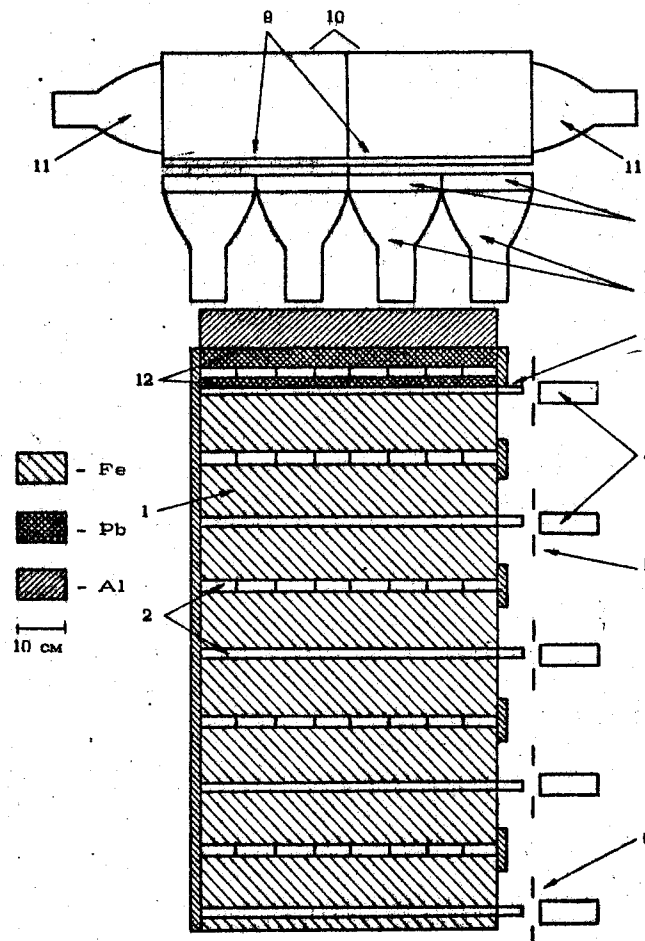


Рис.1. Схематическое изображение прибора "Сокол": 1 - поглотители из железа; 2 - синтилляторы; 3 - световоды; 4 - фотоумножители ФЭУ-84; 5 - шторка; 6 - светофильтр в "Соколе-1"; в приборе "Сокол-2" отсутствовал; 7, 9 - радиатор из плексигласа; 8, 11 - фотоумножитель ФЭУ-49; 10 - диффузор; 12 - поглотители из свинца в "Соколе-1"; в приборе "Сокол-2" - из железа.

Под каждой из плит расположен ряд из 8 сцинтилляторов 2 (на основе полиметилметакрилата), каждый длиной 520 ± 2 мм, шириной $62,0 \pm 0,5$ мм и толщиной $20 \pm 0,5$ мм. Сцинтилляторы соседних рядов расположены во взаимно перпендикулярных направлениях, образуя координатную систему ИК. С одного торца сцинтилляторы имеют короткий световод 3 и просматриваются фотоэлектронным умножителем типа ФЭУ-84 4. С другой стороны на сцинтиллаторе закреплена алюминированная органическая пленка, олузгаемая зеркалом, отражающим свет. В пленке сделано отверстие, напротив которого расположен светодиод. Стандартные световые импульсы от светодиодов служат для контроля чувствительности измерительного тракта. Между ФЭУ и световодом размещены непрозрачная шторка 5 и светофильтр 6 для плавного и быстрого изменения чувствительности измерительного тракта.

Общая толщина поглощающего вещества в ИК составила 5,5 пробы для ядерного взаимодействия протонов. Над ионизационным калориметром расположены черенковские детекторы (двух типов) заряда (ДЗ) первичной частицы. Детектор первого типа ДЗ-1 представляет собой черенковский счетчик направленного действия.

Каждый из 11 детекторов в ДЗ-1 состоит из плоскопараллельного радиатора толщиной 5 см 7, находящегося в оптическом контакте с ФЭУ-49 8. Вершина плоскости радиатора зачищена для подавления регистрации релативистских частиц, движущихся вперед (частицы "обратного тока"). Отдельные детекторы ДЗ-1 работают независимо и служат для измерения зарядов в интервале $1 \leq Z \leq 5+7$ ("Сокол-1"). В аппаратуре "Сокол-2" диапазон амплитудных измерений импульсов от детектора ДЗ-1 был расширен до $Z \sim 20$ для лучшего перекрытия рабочих диапазонов ДЗ-1 и ДЗ-2.

Черенковский детектор ДЗ-2, состоящий из четырех одинаковых секций, расположен над ДЗ-1. Он предназначен для измерения зарядов в диапазоне $2 \leq Z \leq 60$ ("Сокол-1"). В аппаратуре "Сокол-2" рабочий диапазон ДЗ-2 был смещен в область $1 \leq Z \leq 40$. Каждая секция состоит из плоскопараллельного радиатора толщиной 1 см 9, находящегося в диффузоре 10, внутренняя поверхность которого имеет покрытие с высоким коэффици-

ентом отражения и рассеяния света / 30 /. Каждая секция просматривается своим ФЭУ-49 11.

Расположение детекторов ДЗ-2, ДЗ-1 и ионизационного калориметра (вид сверху) показано на рис. 8. Видно, что детекторы ДЗ-1 перекрывают $\sim 70\%$ площади детекторов ДЗ-2. Дробное секционирование детектирующих устройств составило одну из особенностей аппаратуры, позволившей локализовать регистрацию первичной частицы в приборе и тем снизить роль рассеянных вторичных частиц в детектировании заряда. Вместе с тем возможность восстановления геометрии регистрируемого события оказалась осуществленной для дифференцирования случаев прохождения частиц в пределах рабочей апертуры, краевых событий и случаев прохождения между счетчиками ДЗ-1.

1.2. Характеристики основных элементов прибора

Во всем в приборе "Сокол" было использовано 95 ФЭУ с индивидуальным измерением амплитуд импульсов. Кроме того, измерялись амплитуды сумм импульсов от сцинтилляторов каждого ряда ионизационного калориметра. Сигналы от ИК и ДЗ-2 измерялись в широком диапазоне, поэтому для удобства регистрации сигналы от этих датчиков были разбиты на два поддиагона: чувствительный и грубый. Во всем в приборе было 199 амплитудных анализаторов, каждый с оперативной памятью в 8 двоичных разрядов.

Для уменьшения потребления энергии восемь ФЭУ каждого ряда ИК питались от одного высоковольтного преобразователя, работающего на один общий высокоомный делитель напряжения. В связи с этим ФЭУ в пределах ряда отличались по чувствительности, но не более, чем в 1,5 - 2 раза.

Для настройки датчиков в лабораторных условиях целесообразно было использовать мощные космические лучи. В то же время в процессе эксперимента минимальные рабочие сигналы от ФЭУ отсутствовали одновременно прохождению через сцинтиллятор $\sim 10^6$ релативистских частиц. Поэтому аппаратура имела два диапазона чувствительности - для малой наработки и для эксперимента на ИСЗ. На практике настройка каналов ИК осуществлялась следующим образом.

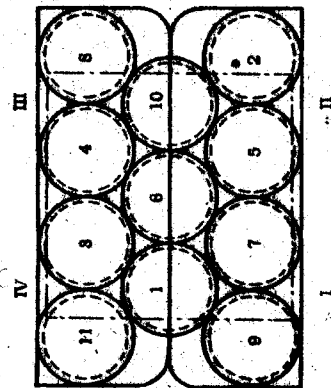


Рис. 2. Расположение детекторов заряда (вид сверху): арабские цифры - детекторы ДЗ-1, римские - ДЗ-2. Штрих-пунктир - контур конического calorimetра

Напряжение на ФЭУ выбиралось таким, чтобы получить коэффициент усиления, достаточный для регистрации одиночных мезонов. Все электронные усилительные тракты в ИК имели стандартные характеристики с отклонением от средней не более 2-3%. Настройка каждого измерительного тракта ИК велась по среднему значению импульсов от мезонов. Разброс в чувствительности ФЭУ компенсировался изменением освещенности фотокатода с помощью непрозрачной шторки. После настройки все каналы ИК имели практически одинаковую чувствительность с точностью в несколько процентов / 22 /. Контроль чувствительности канала велся по амплитуде импульса от светодиода. После завершения настройки всех каналов ИК перед фотокатодами ФЭУ устанавливались нейтральные светофильтры, ослабляющие свет в 680 раз (с точностью ~ 1%) / 31 /.

Описанная выше настройка датчиков ИК была реализована в аппаратуре "Сокол-1". Как показали летные испытания этого прибора, наличие поглощающего светофильтра перед ФЭУ ухудшало отношение рабочего сигнала к помехам, создаваемым интенсивным потоком вторичных частиц, попадающих в результате рассеяния непосредственно на фотокатод ФЭУ. Поэтому для увеличения точности энергетических измерений во втором эксперименте ("Сокол-2") настройка датчиков ИК на рабочий диапазон производилась эквивалентным снижением чувствительности самих ФЭУ, без помощи светофильтра.

Все сцинтилляторы в ИК имели практически одинаковую зависимость количества света, выходящего через световод от места возникновения сцинтилляций. Эта зависимость, полученная с источником C^{60} , приведена на рис. 3. Вертикальные черточки - величина среднеквадратичного отклонения индивидуальных характеристик от средней.

Для получения необходимого разрешения при измерении заряда первичных частиц счетчики ДЗ-1 и ДЗ-2 должны были обладать хорошей равномерностью чувствительности по всей площади детектора, и коэффициент усиления ФЭУ-49 не должен зависеть от ориентации ФЭУ относительно магнитного поля Земли. Для этого все ФЭУ были помещены в цилиндрические экраны из пермаллоя. Специ-

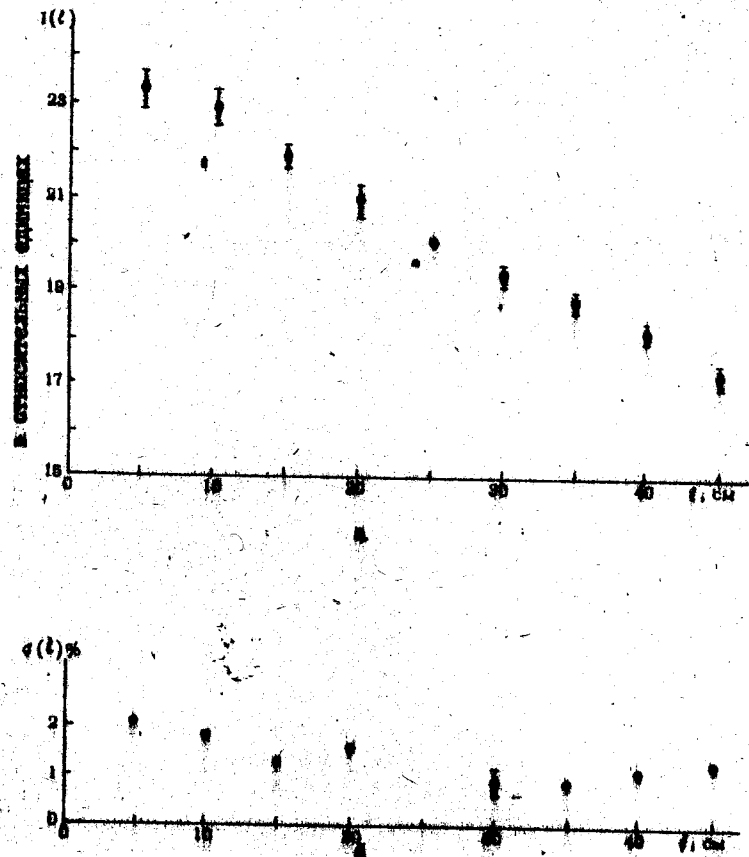


Рис. 2. Зависимость количества счета I , выходящего на сцинтиллятор, от расстояния l между местом возникновения сцинтилляций и торцом сцинтиллятора (а) и среднеквадратичное отклонение δ характеристика индивидуального сцинтиллятора от средней характеристики при разных расстояниях l (б)

альные эксперименты подтвердили эффективность этой меры.

Для ДЗ-1 отбирались ФЭУ, у которых среднеквадратичный разброс фотокатода при освещении постоянным источником света локальных участков фотокатода в 30-50 местах не превышал 15%. Кроме того, требовалось, чтобы спектр амплитуд импульсов от однозарядных частиц (мюонов) регистрировался с достаточным разрешением относительно имитируемого предположительного спектра для L -частиц при отношении потоков 1:0,65 (рис. 4).

Для детекторов ДЗ-2 измерения с источником постоянной интенсивности и импульсным источником света показали, что среднеквадратичное отклонение светового импульса от среднего значения в зависимости от местоположения источника $\sim 5\%$. Измерения на релятивистских ядрах углерода, проведенные в ОИЯИ, дали для этой величины значение $\sim 10\%$.

При измерениях с макетом детектора ДЗ-2 на ядрах углерода был откалиброван светодиод, который и служил для подбора чувствительности ФЭУ-49 в детекторах ДЗ-2. В области больших амплитуд при определении Z учитывалось, что амплитуда импульса от детектора пропорциональна Z^2 , и использовалась радиотехническая калибровка измерительных трактов.

Все детекторы в ИК, ДЗ-1 и ДЗ-2 были снабжены импульсными светодиодами. Во время эксперимента примерно один раз в 30 минут на все светодиоды подавался электрический импульс стандартной амплитуды и формы. При этом вырабатывался управляющий сигнал и проводилась регистрация амплитуд импульсов от светодиодов в каждом измерительном канале. Опыт длительных наблюдений показал, что сигналы от светодиодов достаточно стабильны, и они были использованы для контроля чувствительности аппаратуры.

1.3. Логика работы прибора

На околоземных орбитах частицы ПКИ высокой энергии имеют изотропное угловое распределение (в верхней полушере). Поэтому система управления работой прибора должна отбирать частицы, которые прошли через детекторы заряда и движутся в пределах угловой апертуры прибора ($\sim 2\%$ полного потока). Система управления должна допускать к регистрации только частицы с энергией

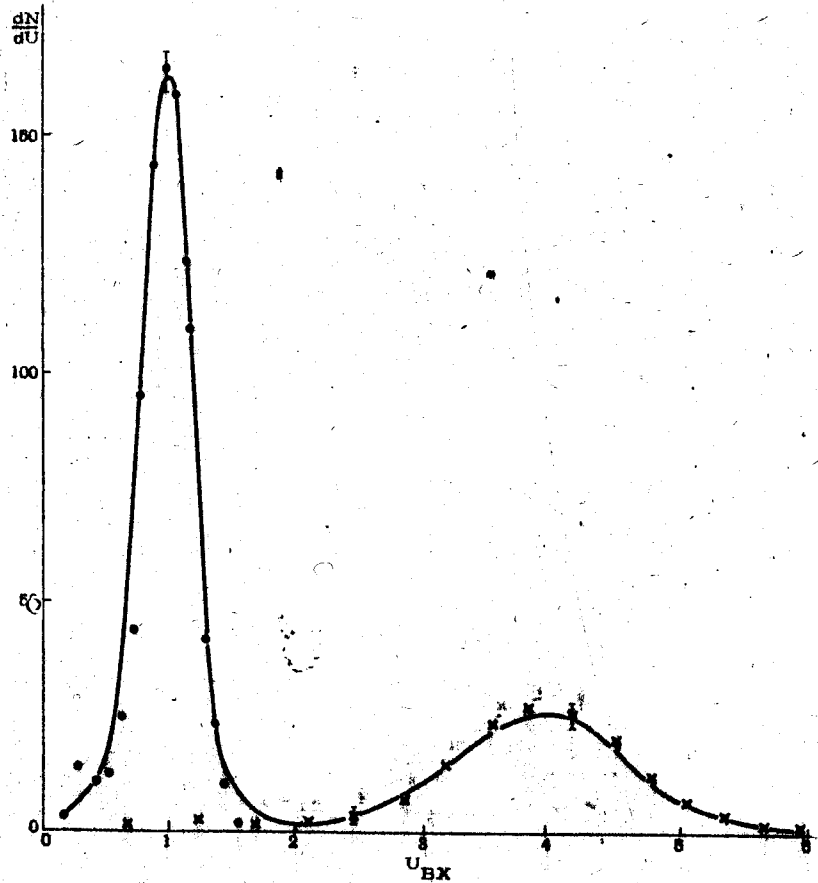


Рис. 4. Типичный амплитудный спектр импульсов от мюонов в детекторе ДЭ-1: точки - при нормальном усилении, крестики - при усилении, в 4 раза большем, имитирующем α -частицы

больше некоторой пороговой энергии $E_{пор}$. На время записи информации о зарегистрированной частице прибор должен быть защищен от регистрации следующих частиц.

Чтобы отбирать частицы, приходящие в пределах телесного угла прибора, надо потребовать, чтобы сигнал был в каждом ряду ИК. Однако столь "жесткое" требование может привести к значительной потере частиц из-за флуктуаций в энерговыделении по глубине поглотителя. При этом доля теряемых частиц может зависеть от их энергии и заряда. При менее "жестком" отборе появятся события, вызванные ливнями от частиц, взаимодействовавших в веществе, окружающем прибор, а также частицами, ствол ливни от которых не проходит всю толщу ионизационного calorиметра. Все эти события, которые назовем "фоном", будут уменьшать полезное время для регистрации частиц, представляющих интерес для эксперимента.

В связи с этим система управления работой прибора должна быть гибкой, чтобы в процессе эксперимента можно было изменять критерии отбора, найти оптимальные условия, при которых: а) система регистрации не будет перегружена большим количеством фоновых событий, и б) будет снижена до минимальных значений пороговая энергия регистрируемых частиц.

Логика отбора частиц для их регистрации строилась на выполнении следующих условий:

1. Частица должна пройти через один из счетчиков ДЭ-1. Для этого требовался импульс с амплитудой $\approx 0,3 \pm 0,4$ от вероятной амплитуды импульса, создаваемого однозарядной релятивистской частицей. Это так называемый сигнал Z_0 .

2. Должен осуществляться отбор по величине энергии, выделенной в приборе и, следовательно, варьироваться величина пороговой энергии $E_{пор}$.

3. Частица должна пройти, как минимум, заданную часть ИК.

Это возможно при наличии сигналов в заданном числе m рядов ИК. При этом, в зависимости от $E_{пор}$, должны быть наложены определенные требования на величину энерговыделения ξ в каждом из этих m рядов. Поэтому должны варь-

руются величины m и ϵ .

Эти условия выполнялись следующим образом. Импульсы от детекторов ДЗ-1 поступали на амплитудные анализаторы и параллельно - на дискриминаторы с указанным выше порогом. Срабатывание хотя бы одного из одиннадцати дискриминаторов означало выработку сигнала Z_0 , который поступал на схему совпадения основных управляющих сигналов (рис. 5).

От каждого ФДУ в ИК усиленные импульсы поступали на свой амплитудный анализатор и, параллельно, на схему суммирования, в которой все сигналы, возникшие одновременно в сцинтилляторах данного ряда, складывались. Этот суммарный сигнал A_k (k - номер ряда) поступал на свой амплитудный анализатор и одновременно воздействовал на три дискриминатора. Пороги срабатывания этих дискриминаторов соответствовали определенному энерговыделению в слое поглотителя над рядом. Величины ϵ были выбраны равными в первом эксперименте ("Сокол-1"): $\epsilon_0 \approx 280$ ГэВ, $\epsilon_1 \approx 125$ ГэВ и $\epsilon_2 \approx 35$ ГэВ. Во втором ("Сокол-2") эти требования были снижены до уровня $\epsilon_1 \approx 77$ ГэВ, $\epsilon_2 \approx 43$ ГэВ, $\epsilon_3 \approx 22$ ГэВ.

По соответствующей команде во время эксперимента можно было устанавливать номер дискриминатора i (т.е. величину ϵ_i), сигналы с которого поступали на схему отбора кратности m сработавших дискриминаторов. По команде число $m(\epsilon_i)$ одновременно сработавших дискриминаторов с порогом m могло принимать значения $m = 3, 5, 7, 9$ (во втором эксперименте $m = 5, 6, 7$). Сигналы, соответствующие числу сработавших рядов $\geq m(\epsilon_i)$, поступали на совпадение с сигналом Z_0 и сигналом полного энерговыделения E_j .

Сигнал E_j получался суммированием амплитуд сигналов от всех рядов. Сигнал $A = Z A_k$ воздействовал на три дискриминатора, пороги срабатывания которых E_j были эквивалентны суммарному энерговыделению в ИК, равному в первом эксперимента - $E_0 \approx 4 \cdot 10^{12}$ эВ, $E_1 \approx 1,5 \cdot 10^{12}$ эВ, $E_2 \approx 4 \cdot 10^{11}$ эВ, и соответственно во втором - $E_0 \approx 1 \cdot 10^{12}$ эВ, $E_1 \approx 5 \cdot 10^{11}$ эВ, $E_2 \approx 3 \cdot 10^{11}$ эВ. Значения E_j можно было изменять по команде.

Управляющий сигнал M вырабатывался при совпадении сигналов

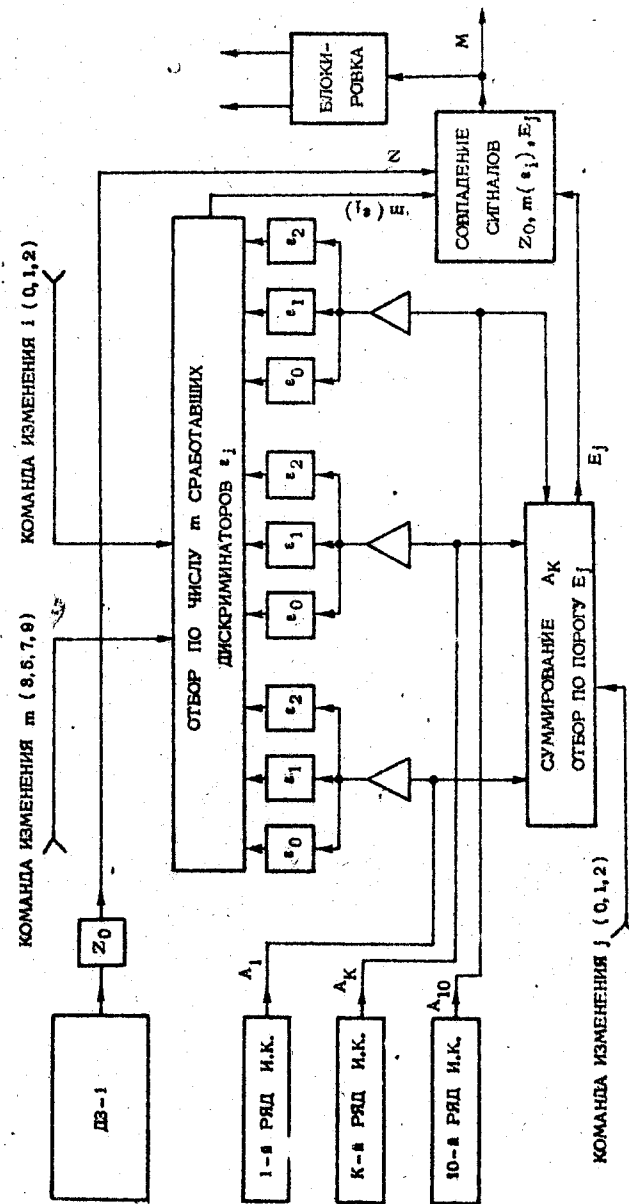


Рис. 5. Схема выработки управляющего сигнала "М"

Z_0 , $m(\epsilon_i)$ и E_j . Разрешающее время его выработки $\sim 0,5$ мксек. Сигнал M очищал оперативную память от информации о предыдущем событии, отпирали ключи всех амплитудных анализаторов на время ~ 1 мксек, пропускал имеющийся в данном канале импульс на измеритель амплитуды и запускал блокировку, которая запрещала выработку очередного сигнала M в течение времени записи всей информации о событии с дублированием показаний чувствительных и грубых каналов ~ 5 раз. Такая система записи обеспечила ее устойчивость от помех и позволяла иметь информацию от ~ 200 анализаторов.

Для оперативного выбора оптимального режима работы прибора в нем был предусмотрен блок "возможных управляющих сигналов". В этом блоке реализовались различные комбинации ϵ_i , $m(\epsilon_i)$ и E_j (в первом приборе при $i, j = 0, 1, 2$; $m = 3, 5, 7$; во втором приборе - $i = 1, 2, 3$; $j = 0, 1, 2$; $m = 5, 6, 7$). Темпы счета всех комбинаций определялись и были известны уже после получения первой информации о работе прибора.

1.4. Надежность работы прибора

Как видно из описания, прибор "Сокол" - достаточно сложное устройство. Поэтому важно было обеспечить высокую надежность его работы. Это достигалось дублированием основных элементов и цепей прибора: источников питания, цепей выработки управляющего сигнала, блокировки. Большое количество автономно работающих датчиков также повышали "живучесть" прибора. По командам практически все автономно работающие блоки аппаратуры могли быть отключены от питания, если их неправильное функционирование грозило выходу из строя всего прибора. Для защиты от короткого замыкания все электронные блоки были защищены плавкими предохранителями. За все время эксперимента, длившегося 25 суток, в первом эксперименте вышел из строя один измерительный канал ИК и один из детекторов ДЗ-1 изменил свою чувствительность. Во втором - все измерительные каналы функционировали нормально, чувствительность подавляющей части каналов во время полета сохранялась постоянной в пределах точности контроля $\pm 3\% \pm 5\%$; лишь в одной из секций детектора ДЗ-2 (ФЭУ-49) дрейф чувствительности достиг $\sim 13\%$

и в трех каналах ИК (ФЭУ-84) $\leq 20\%$. Наличие большого количества фотоумножителей в аппаратуре составило одну из технических сложностей эксперимента на ИСЗ, потребовавшей жесткого отбора ФЭУ по температурному уходу ($\leq 0,1\%$ /градус), дрейфу чувствительности при длительной работе, виброустойчивости для обеспечения необходимой надежности аппаратуры.

1.5. Телеизмерения выходных параметров аппаратуры "Сокол"

Каждое событие, регистрируемое аппаратурой (прохождение частицы ПИИ высокой энергии через детектор заряда ДЗ-1 и детектор энергии ИК), характеризуется 200-ми выходными параметрами, каждый из которых представляется в цифровой форме всемирнозрядным числом в двоичной системе (в аппаратуре "Сокол-2" для второго эксперимента число этих параметров было увеличено до 211 за счет расширения диапазона измерений в детекторе ДЗ-1). Телеизмерения этих параметров обеспечиваются 110 цифровыми каналами бортовой системы измерений. Для обеспечения телеизмерений параметров с помощью 110 цифровых каналов, часть каналов (90 каналов в первом приборе, 101 - во втором) обслуживала, путем переключения, два параметра. Это привело к удвоению времени блокировки, которое в итоге составило 40 сек при регистрации каждого события.

Каналы телеизмерений распределялись по выходным параметрам следующим образом. 11 каналов обеспечивали передачу информации от соответствующих детекторов заряда легких ядер (ДЗ-1). 8 каналов передавали информацию о работе четырех секций детектора тяжелых ядер (ДЗ-2) в двух диапазонах измерений. 90 каналов обслуживали датчики ИК (60 датчиков) и передавали информацию о суммарном сигнале в датчиках данного ряда (10 рядов). Каналы ИК (и каналы ДЗ-1 во втором приборе) опрашивались дважды, передавая информацию сначала в чувствительном, а затем в грубом диапазоне измерений. По отдельному телеметрическому каналу передавалась информация о прохождении через прибор регистрируемой частицы и выработка соответствующих импульсов управления регистрацией (управляющего сигнала "М" и импульса "П", производившего переключение поддиапазонов измерений). На основании показаний этого канала при последующей обработке проводилась приемка

ка информации к отдельным регистрируемым событиям.

Опрос и передача по телеметрическим каналам, наземный прием и запись информации осуществлялись в определенной последовательности. Это позволило в дальнейшем, пользуясь кодовыми признаками начала телеметрического кадра, произвести на ЭВМ выборку научных параметров из общего массива информации и восстановить картину прохождения частицы высокой энергии через прибор в каждом отдельном случае.

1.6. Оперативный контроль за работой аппаратуры.

Для оперативного контроля за рабочим режимом и функционированием аппаратуры в целом и по отдельным узлам, а также для контроля исполнения подаваемых команд были предусмотрены 25 аналоговых телеметрических выходов.

Один из аналоговых каналов использовался для контроля аппаратуры в целом. В нем регистрировалась выработка импульсов управления "М" и переключения "П".

По четырем каналам производился контроль функционирования детектора энергии (ИК). По отдельному каналу производился контроль работы детектора заряда ДЗ-1, использовавшегося вместе с детектором энергии в управлении регистрацией частиц.

По 12 телеметрическим каналам производилась регистрация работы аппаратуры в различных возможных режимах ("возможные управляющие сигналы"). Эта информация позволила на первом этапе проведения эксперимента произвести выбор оптимального режима работы аппаратуры и установить его с помощью команд системы управления.

Контроль исполнения команд проводился по пяти телеметрическим каналам.

По двум каналам в режиме непосредственной передачи информации контролировались стабильность напряжения вторичного источника питания аппаратуры и функционирование аппаратуры в целом.

1.7. Управление аппаратурой во время проведения эксперимента.

В аппаратуре были предусмотрены 15 каналов телеуправления для изменения режима работы. Подача команд осуществлялась по

соответствующим каналам бортовой системы управления.

Две команды - для включения и выключения аппаратуры.

Была предусмотрена возможность с помощью специальной команды перейти на питание аппаратуры от резервного вторичного источника питания (преобразователя напряжения бортового питания).

Семь команд служили для изменения режима работы аппаратуры в целях установления оптимальных условий для регистрации частиц высокой энергии - выбора энергетических порогов E_1 и E_2 , а также M - числа рядов ИК, необходимых для выработки импульса управления регистрацией. Эти команды позволяли сделать каждый из "возможных управляющих сигналов" основным рабочим.

Особенные команды позволяли осуществлять аварийное выключение отдельных блоков аппаратуры в случае их неисправности: 4 команды - набор кода (адреса) соответствующего блока, с помощью пятой команды - его отключения.

Основной режим работы аппаратуры "Сокол-1" в первом эксперименте (ИЭВ "Космос-1543", 10 марта - 5 апреля 1984 г.) соответствовал пороговым значениям энергии E_1 и E_2 . Ограничение на число обрабатываемых рядов было налажено $M = 7$. Однако, как показал проведенный анализ, в действительности выполнялось условие $M = 6$. Общее время работы в этом режиме составило 517 часов со средним темпом регистрации $\sim 0,44$ мин⁻¹. "Чистое" время работы аппаратуры в данном режиме, за вычетом дефектной информации и "мертвого" времени, соответствовало 245 часам, в течение которых было зарегистрировано около 10000 событий /27 /.

Основным режимом работы аппаратуры "Сокол-2" во втором эксперименте (ИЭВ "Космос-1713", 27 декабря 1986 г. - 22 января 1987 г.) были пороговые условия $E_1, E_2, M = 6$ (см. выше) с темпом регистрации частиц $\sim 0,4$ мин⁻¹. Время работы в этом режиме составило 460 часов, "чистое" время - 254 часа, в течение которых зарегистрировано также около 10000 событий. Некоторое время (80 часов) было отведено для работы в режиме $M = 7$, близком к режиму работы прибора "Сокол-1". При этом 39 часов прибор работал в режиме $E_1, E_2, M = 7$ и 41 час - режим $E_1, E_2, M = 7$.

В обоих экспериментах приборы экспонировались на орбите, близкой к круговой, со средней высотой 330 км и углом наклона к плоскости экватора $62,8^\circ$. Прибор был ориентирован по трем осям, с продольной осью (вдоль ИК) по вертикали, детекторами ДЗ-1, ДЗ-2 вверх. Количество вещества над прибором не превышало $1,5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$.

Геометрический фактор прибора составлял $\sim 325 \text{ см}^2 \cdot \text{стер}$, вес - 2400 кг; энергопотребление от автономного бортового источника напряжением 27 В - не более 15 Вт.

2. Калибровка каналов ионизационного calorиметра

В приборе "Сокол-1" настройка каналов ионизационного calorиметра проводилась непосредственно в установке с выдвинутыми светофильтрами. Для этого использовались мюоны космических лучей. В качестве телескопа использовались 3-й и 9-й ряды ИК. Управляющий сигнал вырабатывался при совпадении импульсов от этих рядов с импульсом от настраиваемого канала. Отбирались одиночные мюоны, приходящие практически по вертикали (отличие пути, проходимого в пластике, от пути по вертикали не превышало 0,7%). Они выделяют в сцинтилляторе толщиной 20 мм энергию 4,55 МэВ. В этих условиях сигнал от мюона существенно превосходит шумы ФЭУ, и распределение импульсов имеет характерную форму с полушириной, обусловленной зависимостью сигнала от места прохождения вдоль длины сцинтиллятора, а также флуктуациями ионизационных потерь мюона в сцинтилляторе. Распределение импульсов от мюонов приведено на рис. 6. Среднее значение, равное 10 мВ, приходится на 40-й канал анализатора. Настройка каналов ИК контролировалась затем регистрацией мюонов непосредственно прибором в режиме $E_2, E_2, m = 7$ при выдвинутых светофильтрах с эффективностью регистрации мюонов $\sim 0,97$ в этих условиях. С учетом поглощения света сцинтилляций было определено также, что среднее значение амплитуды от мюона, проходящего в любом месте пластика, соответствует средней амплитуде от мюона, проходящего на расстоянии $\sim 23 \text{ см}$ от края calorиметра со стороны контролирующего ФЭУ.

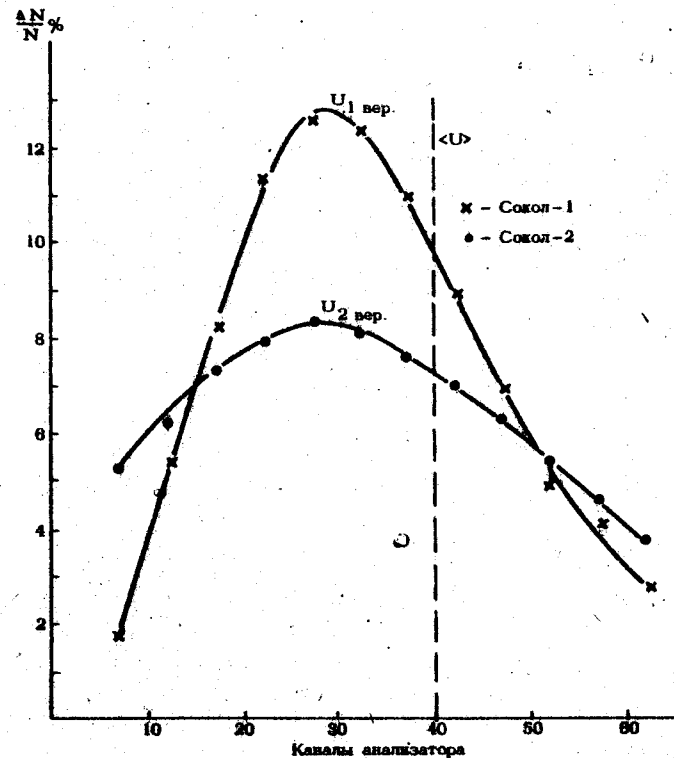


Рис. 6. Типичное распределение импульсов от мюонов в сцинтилляторе ионизационного calorиметра при настройке

После установки нейтральных светофильтров с коэффициентом поглощения света $K = 671 \pm 7$, средняя амплитуда сигналов A_1 от мюона в индивидуальном i -м канале находилась в пределах 15 ± 2 мкВ. Сигналу с амплитудой U мкВ соответствовало энерговыделение в сцинтилляторе $(U/A_1) \cdot 4,55$ МэВ.

Чувствительность каналов ИК прибора "Сокол-2" была увеличена вдвое. Среднее значение импульса от однозарядной частицы было близко к 30 мкВ. При настройке каналов ИК в приборе "Сокол-2", в котором светофильтры отсутствовали, сигнал от мюонов был в ~ 300 раз меньше, в такое же число раз ухудшилось соотношение сигнал-шум. Поэтому метод калибровки каналов ИК был изменен. Калибровка проводилась на специальном стенде. Мюоны отбирались при помощи телескопа, который образовывали два сцинтилляционных детектора, расположенных на расстоянии 10 см над и под настраиваемым. Сигнал с анода ФЭУ настраиваемого канала усиливался малошумящим усилителем ($K_{ус} = 460$) и поступал на вход амплитудного анализатора. Каналы настраивались так, чтобы среднее значение амплитуды импульса было близко к 30 мкВ и попадало в 40-й канал анализатора. Усредненное по 40 каналам распределение амплитуд импульсов приведено на рис.6. Реальное среднее значение оказалось равным $29,0 \pm 3$ мкВ. В приборе "Сокол-2" средняя толщина сцинтилляторов составила 19 мм. При вертикальном прохождении мюон выделяет в нем $4,30$ МэВ.

Дальнейшая экспериментальная проверка и уточнение условий настройки каналов ионизационного калориметра в приборе "Сокол-2" привели к необходимости введения следующих поправок.

1. Настройка каналов ИК проводилась по сигналам от мюонов при соотношении сигнала и шумам усилительных цепей $\sim 1,5$. Это привело к расширению амплитудного спектра. Часть импульсов от мюонов переходит в область ниже порога регистрации амплитудным анализатором. "Выбрасывание" малых импульсов приводит к завышению среднего значения. Наиболее вероятное значение в распределении амплитуд менее чувствительно к шумам. Как видно на рис.6, при одинаковых средних значениях эта величина при калибровке ИК "Сокол-2" в $(1,07 \pm 0,03)$ раза меньше, чем в "Соколе-1".

Поэтому и эталонное значение средней амплитуды импульса от ионизационных потерь мюонов было уменьшено на эту величину.

2. Настройка каналов ИК проводилась на стенде, где в соответствии с апертурой телескопа средний путь мюонов в сцинтилляторе на 4% превышал толщину детектора. За счет этого эталонное значение следовало уменьшить в $1,04$ раза.

3. При настройке часть регистрируемых событий вызывалась одновременным прохождением через сцинтиллятор настраиваемого канала нескольких частиц. Регистрация спектра с линейным анти-коинцидентным управлением привела к уменьшению среднего значения еще в $(1,03 \pm 0,03)$ раза.

4. Между пластиковыми сцинтилляторами в рядах ИК находятся перегородки шириной 2 мм. Это приводит к потере $\sim 4\%$ энергии при регистрации лямбы в калориметре. Этот эффект можно учесть уменьшением в $1,04$ раза эталонного значения средней амплитуды импульса, полученного при калибровке на стенде. Заметим, что при настройке прибора "Сокол-1" этот эффект был учтен в самом процессе калибровки при непосредственной регистрации частиц прибором.

Все указанные поправки привели в итоге к снижению принятого ранее сигнала на аноде ФЭУ от ионизационных потерь мюонов в сцинтилляторах ИК в $(1,19 \pm 0,06)$ раза. Средний сигнал в индивидуальном канале A_1 после введения всех выше перечисленных поправок находился в пределах (24 ± 4) мкВ от одной релятивистской однозарядной частицы. При этом сигналу U соответствовало энерговыделение в сцинтилляторе $(U/24$ мкВ) $\cdot 4,3$ МэВ.

Настройка ионизационных каналов ИК была ориентирована на амплитудный анализ импульсов от 1 мВ до 3 В, соответствующих диапазону регистрируемых в каждом сцинтилляторе их периферических энерговыделений от 0,2 ГэВ до 0,5 ТэВ, что соответствует энерговыделению в поглотителе от 5,2 ГэВ до 16 ТэВ.

3. Определения энергии частиц

Энергия частиц определялась по обычным формулам ионизационного калориметра, с учетом вложенной выше калибровки каналов ИК, путем линейной интерполяции, т.е. считалось, что энерговы-

деление в I г/см² в слое поглотителя над сцинтилляторами энергоделиению в I г/см² полиметилметакрилата с учетом переходного эффекта. Коэффициент переходного эффекта железо-сцинтиллятор и свинец-сцинтиллятор был получен для электронно-фотонного ливня расчетом по методу Монте-Карло, описанном в /32/ и составил после усреднения по возрасту ливня величину $1,40 \pm 0,07$ для перехода железо-сцинтиллятор и $2,0 \pm 0,1$ для перехода свинец-сцинтиллятор.

В первичные результаты эксперимента "Сокол-2" для каждого индивидуального события вводились следующие поправки.

1. Учитывалось поглощение света в сцинтилляторе. Эта поправка зависит от расстояния от оси каскада до ФЭУ и различна для разных сцинтилляторов. Процедура проведения оси каскада изложена в следующей работе. Поправка вводилась на основе лабораторных измерений, когда для каждого сцинтиллятора была исследована зависимость величины сигнала ФЭУ от места прохождения частицы через сцинтиллятор. Она может составлять от нескольких до 35% (см. рис. 3). Введение этой поправки облегчалось тем обстоятельством, что сцинтилляторы в пределах одного ряда ИК обладали одинаковым коэффициентом поглощения света. Введением поправки измеренная амплитуда сигнала приводилась к условиям "среднего" прохождения ливневой оси через сцинтиллятор (на расстоянии ~ 23 см от края ИК со стороны ФЭУ).

2. Учитывалась энергия, пронесимая через основание калориметра. При этом полагалось, что за максимумом поток энергии в каскаде поглощается по закону $E(t) \sim e^{-t/L(E)}$. Зависимость пробега поглощения $L(E)$ от энергии первичной частицы принималась (в t -единицах) в виде $L(E) = 21,4 + 6,6 \lg(E \text{ ТэВ}/A)$ для компоненты в атомном весе A , в соответствии с эмпирической формулой, полученной для протонов в экспериментах на ускорителях и в космических лучах /33/. Каскад в калориметре экстраполировался по указанному закону от последнего по ходу развития каскада ряда, в котором ливневая ось содержалась внутри калориметра. Последующее сравнение с кривыми поглощения, полученными для разных ядерных компонент непосредственно в самом экс-

перимента "Сокол-2", показало, что отклонения в оценке энергии первичной частицы, связанные с использованием указанной формулы для $L(E)$, не превышают $\sim 2\%$ во всем диапазоне измерений для всех ядерных компонент до ядер железа включительно.

Величина этой поправки составляла для событий с началом развития каскада в I-3 рядах ИК от $\sim 20\%$ для частиц с энергией $E \sim 2-5$ ТэВ до $\sim 30\%$ для $E > 5$ ТэВ.

3. Учитывалась энергия, вышедшая через боковые поверхности калориметра. Суть этой операции сводится к тому, что при прокождении оси каскада в данном ряду ИК вблизи края калориметра, когда распределение сигналов по секциям из-за геометрических ограничений "срезано" с одной стороны, оно может быть восстановлено симметрично относительно осевой секции. Эта поправка составляет для протонов 4%, для тяжелых ядер 10%.

4. Учитывалась не регистрируемая прибором энергия, идущая на ядерные расщепления. Поправка вводилась на основе экспериментальных данных, полученных на ускорителях при энергии протонов сотни ГэВ на калориметрах, сходных с примененными в настоящем эксперименте /34/. Она учитывалась делением энергии, полученной после введения перечисленных выше поправок на коэффициент $K = 1 - 0,5 [A/E(\text{ГэВ})]^{0,3}$. Эта поправка составила до $\sim 5\%$ для протонов и $\sim 10\%$ для тяжелых ядер.

Литература

1. Juliusson E. Proc. IB ICRU, 1983, v.12, p.117.
2. Simon M., Spiegelhauer H., Schmidt W.K.H. et al. Astrophys. J., 1980, 239, 2, part I, p.712.
3. Idnsley J. Proc. IB ICRU, 1983, v.12, p.135.
4. Burnett T.H., Dake S., Fuku M. et al. Phys. Rev. Lett., 1983, 51, p.1010.
5. JACEE collaboration. Int. Simp. on GR and PPh. 19-23 March, 1984, Токуо.
6. Григоров Н.Л., Нестеров В.В., Рапопорт И.Д. и др. Ядерная физика, 1970, 11, с.1058.
7. Абулова В.Т., Варковичкая А.Я., Самчалова Е.А. и др. Изв. АН СССР, 1984, 48, 2083.
8. Matsuo S., Kajino F., Kamashina Y. et al. Phys. Rev. D, third series, 1984, v.29, p.1.
9. Бакатанов В.Н., Вознов С.Н., Возводский А.В. и др. Изв. АН СССР, 1986, т.50, VII, с.2236.
10. Denisova V.G., Dimaevsky A.M., Slavatskiy S.A. et al. Proc. 20 ICRU, 1987, v.1, p.390, Moscow.
11. Ren I.R. et al. ICR-Report - 153-87-7.
12. Верезинский В.С., Буланов С.В., Гинзбург В.Л. и др. Астрофизика космических лучей. - М.: Наука, 1984.
13. Григоров Н.Л., Мурзин В.С., Рапопорт И.Д. ИЖФ, 1969, 24, №2, с.506.
14. Григоров Н.Л., Рапопорт И.Д., Шестоперов В.Я. Частицы высоких энергий в космических лучах. - М.: Наука, 1973.
15. Schmidt W.K.H., Pinkau K., Bollvogt U., Hugert R.W. Phys. Rev., 1969, 181, 5, p.1279.
16. Ryan M.J., Omer J.T., Balasubramanyam V.K. Phys. Rev. Lett., 1972, 28, 15, p.985.
17. Caldwell J.N. Astrophys. J., 1977, 216, I, part I, p.269.
18. Juliusson E., Astrophys. J., 1974, 191, p.331.
19. Grigorov N.L., Nesterov V.V., Rapoport I.D. et al. Proc. 9 ICRU, 1966, v.1, p.50.

20. Grigorov N.L., Nesterov V.V., Rapoport I.D., Savenko I.A. Space Research III, 1972, p.1617.
21. Шомоди А., Сугар С., Чандра В. и др. Ядерная физика, 1978, 29, с.445.
22. Вернов С.Н., Вакулов П.В., Григоров Н.Л. и др. Сб. "Научное космическое приборостроение". Вып.1, с.73. - М.: Металлургия, 1983 г.
23. Вернов С.Н., Вакулов П.В., Григоров Н.Л., Журавлев Д.А., Зацепин В.И., Иваненко И.П., Кумпан И.П., Мищенко Л.Г., Палица И.П., Платонов В.В., Рапопорт И.Д., Самсонов Г.А., Смоленский Л.Г., Собиняков В.А., Соколов В.К., Третьякова Ч.А., Тригубов Д.В., Чикова Л.О., Шестоперов В.Я., Ширлева В.Я., Яковлев В.М., Яшин И.В. Изв. АН СССР, 1985, 49, с.1399.
24. Verhov S.N., Ivanenko I.P., Grigorov N.L., Basina Yu.V., Vainilov P.V., Vaidlyev Yu.Ya., Golinskaya R.M., Grigoryeva L.B., Zhuravlev D.A., Zatsarin V.I., Plyuchev D.I., Kasakova A.E., Koslov V.D. Kumpen I.P., Laputin Ya.A., Mitchenko L.G., Mikanov V.M., Papina L.P., Platonov V.V., Podorozhny D.M., Rapoport I.D., Samsonov G.A., Smolenskiy L.G., Sobinyakov V.A., Sokolov V.K., Tambovtsev G.E., Tret'yakova Ch.A., Trigubov Yu.V., Pateyeva I.M., Khain L.A., Chikova L.O., Shestoparov V.Ya., Shiryayeva V.Ya., Yakovlev V.M., Yashin I.V. Proc. 19 ICRU, 1985, 2, p.52.
25. Иваненко И.П., Григоров Н.Л., Шестоперов В.Я., Васина В.В., Вакулов П.В., Васильев Д.Я., Голышкая Р.М., Григорьева Л.В., Журавлев Д.А., Зацепин В.И., Казакова А.Е., Кошлов В.Д., Кумпан И.П., Лапутин Д.А., Мищенко Л.Г., Никаноров В.М., Палица И.П., Платонов В.В., Подорожный Д.М., Рапопорт И.Д., Самсонов Г.А., Смоленский Л.Г., Собиняков В.А., Соколов В.К., Тамбовцев Г.Е., Третьякова Ч.А., Тригубов Д.В., Фатеева И.М., Хайн Л.А., Чикова Л.О., Ширлева В.Я., Яковлев В.М., Яшин И.В. Ядерная физика, 1987, т.45, вып.4, с.1069.
26. Иваненко И.П., Григоров Н.Л., Шестоперов В.Я. и др. Вестник МГУ, серия 3, физика. Астрономия, 1987, т.28, №1, с.82.

27. Иваненко И.П., Григоров Н.Л., Васина Д.В. и др. Изв. АН СССР, сер. физ. 1987, т.51, №10, с.1781.
28. Иваненко И.П., Григоров Н.Л., Шестоперов В.Я. и др. Письма в ЖЭТФ, 1986, т.44, вып.4, с.200.
29. Иваненко И.П., Григоров Н.Л., Шестоперов В.Я. и др. Космические исследования, 1987, т.25, вып.3, с.471.
30. Папина Л.П., Самсонов Г.А., Шестоперов В.Я. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента, 1986, 3/29, с.87.
31. Третьякова Ч.А. 1986. ПТЭ №6, с.188.
32. Kolchuzkin A.M., Vespalov V.I. Proc. 16 ICRD, 1979, v.6, p.227. Kyoto.
33. Sloan F., Ellsworth R.W. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1979, v.167, no.3, p.371.
34. Iwata S. IPRV-3-79, preprint Nagoya University, Nagoya, Japan, 1979.
35. Григоров Н.Л., Иваненко И.П., Рапопорт И.Д. и др. Вестник МГУ, серия 3, Физика. Астрономия, 1988, 29, №6, с.44.