

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. М.В.ЛОМОНОСОВА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

"УТВЕРЖДАЮ"
Директор НИИЯФ МГУ
Профессор
 /И.Б.Теплов/
"04" 10 1989г.

В.И.Рудь

ОТЧЕТ
по х/д I4I-88

"Изучение свойств черенковских и сцинтилляционных ливневых калориметров при высоких энергиях"

ЧАСТЬ II

Изучение свойств комбинированного черенковско-сцинтилляционного калориметра для регистрации γ -квантов высоких энергий.

Ответственный исполнитель
ст.н.с.  В.И.Рудь

Москва 1989г.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
1. Введение	I
2. Постановка задачи	2
3. Особенности моделирования фотонного детектора	7
4. Определение оптимальной толщины конверторов γ -квантов	II
5. Обсуждение результатов моделирования	I7
6. Итоги работы и выводы	20
Литература	2I
Таблицы	22

I. Введение

Эксперимент E-76I во ФНАЛ, в котором участвует ИТЭФ, ставит своей целью точные измерения вероятностей радиационных распадов гиперонов с изменением странности

$$\Sigma^+ \rightarrow p + \gamma, \quad 100 \text{ тыс. событий}, \quad (1)$$

$$\Xi^- \rightarrow \Sigma^- + \gamma, \quad 30 \text{ тыс. событий}, \quad (2)$$

и параметров асимметрии этих распадов. Поляризация начальных гиперонов будет составлять $\sim 20\%$, их импульсы — до 350 ГэВ/с.

В настоящее время существует противоречие между имеющимися экспериментальными данными и предсказаниями электрослабой теории для распадов (1) и (2).

Жесткие требования к гиперонному каналу и применение кремниевых стриповых детекторов позволят с высокой точностью измерять траектории начальных гиперонов и обеспечат измерение их импульсов с точностью $\sim 0,15\%$. Импульсы барионов распада будут определены трехмагнитным спектрометром с пропорциональными камерами.

Для регистрации γ -квантов предназначен фотонный детектор (ФД) (рис.1), представляющий собой систему из двух секций детектора переходного излучения (ДПИ) и электромагнитного калориметра (ЭМК) из свинцового стекла. Перед каждой секцией ДПИ стоит стальной конвертор γ -квантов и блок пропорциональных камер (рис.2).

Координаты γ -кванта будут измеряться после конверторов детекторами переходного излучения путем измерения координат быстрых $e^\pm$ от конверсии, летящих в направлении исходного γ -кванта. Точность измерения координат $\sim 0,5$ мм. С целью увеличения точности определения Z -координаты начала ливня ДПИ разбит на две секции.

Каждая секция ДПИ (рис.2) состоит из двух блоков (для измерения X - и Y - координат), состоящих из радиатора из 200 полипропиленовых фольг и ксеноновых пропорциональных камер ПК- X, Y с шагом

2 мм, регистрирующих фотоны переходного излучения от $e^{\pm}$ с энергиями $E > 2,5$ ГэВ.

Для уменьшения фона информация с относительно медленного ДПИ снимается в совпадении с пропкамерой ПК.

Расположенный за ДПИ электромагнитный калориметр (рис. I и 3) должен измерять только энергию γ -кванта (ливня). Т.о., для реакций (1) и (2) полностью будут измерены векторы импульсов начальных гиперонов и всех продуктов радиационных распадов, что должно привести к хорошей кинематической идентификации реакций.

ЭМК собирается из блоков свинцового стекла F-2 размером $10 \times 10 \times 38$ см³ по схеме, приведенной на рис. I и 3.

В центре фотонного детектора (в конверторах и ЭМК) сделаны отверстия размером $10 \times 3,5$ см² (рис. I и 3) для пропуска распадных барионов, летящих под малыми углами к направлению первичного гиперона.

2. Постановка задачи

Эксперимент предъявляет противоречивые требования к фотонному детектору.

Конверторы, необходимые для работы ДПИ в координатном режиме, снижают долю энергии, поглощаемой в ЭМК, и ухудшают его энергетическое разрешение.

Чтобы исключить попадание распадных барионов в ЭМК, центральное отверстие надо делать достаточно большим. Но это приводит к уменьшению аксептанса для γ -квантов.

Для регистрации распада $\Sigma^+ \rightarrow p + \gamma$ требуется высокое разрешение ЭМК, чтобы отделиться от в 500 раз более интенсивного фонового процесса $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$. Аксептанс от размеров отверстия зависит слабо.

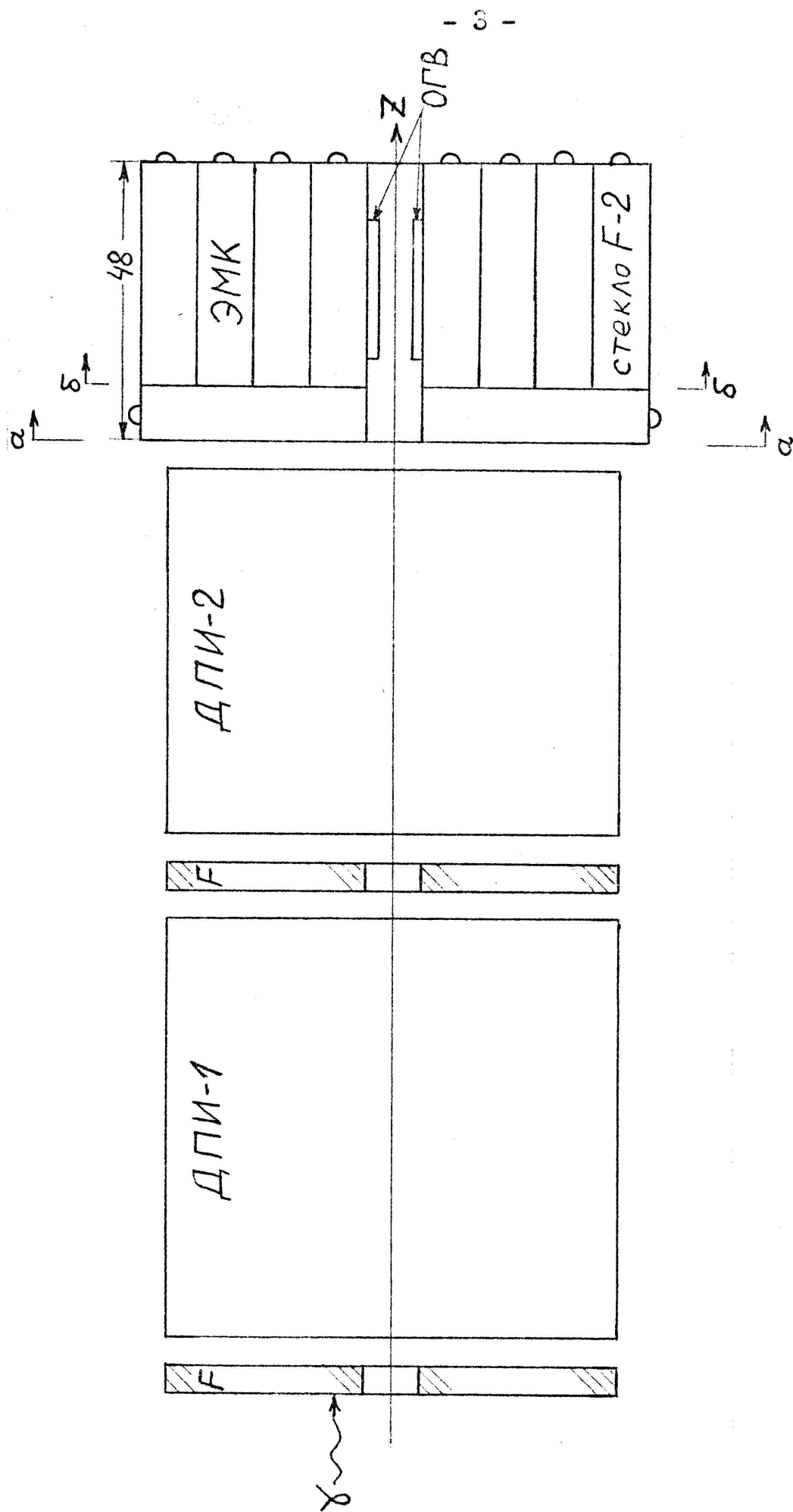


Рис. 1. Схема фотонного детектора:

F - стальные конверторы,

ДПИ - детекторы переходного излучения,

ЭМК - электромагнитный калориметр из стекла F-2 и ОГВ.

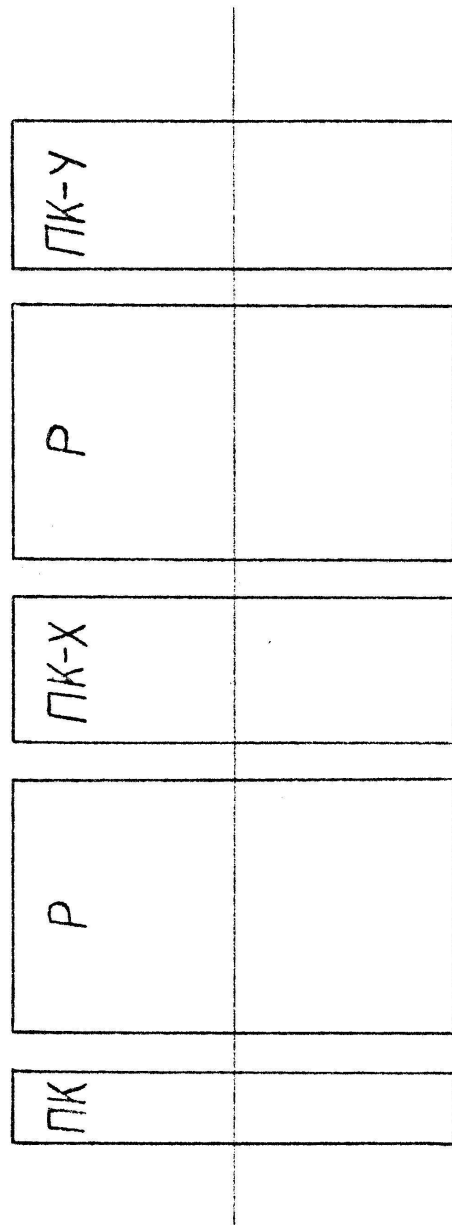
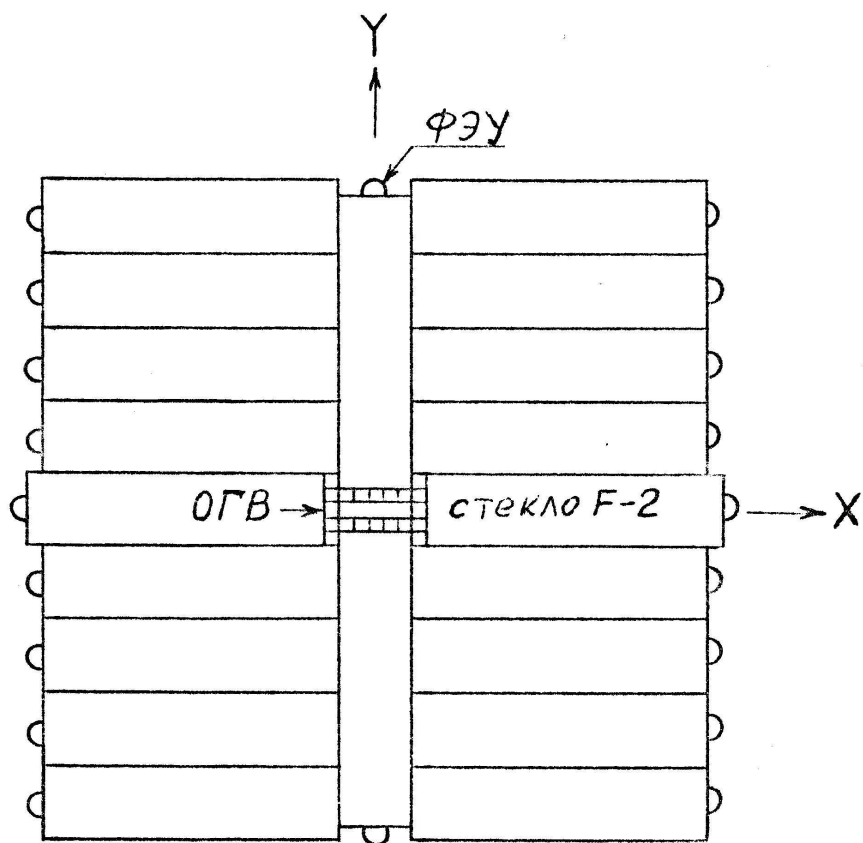
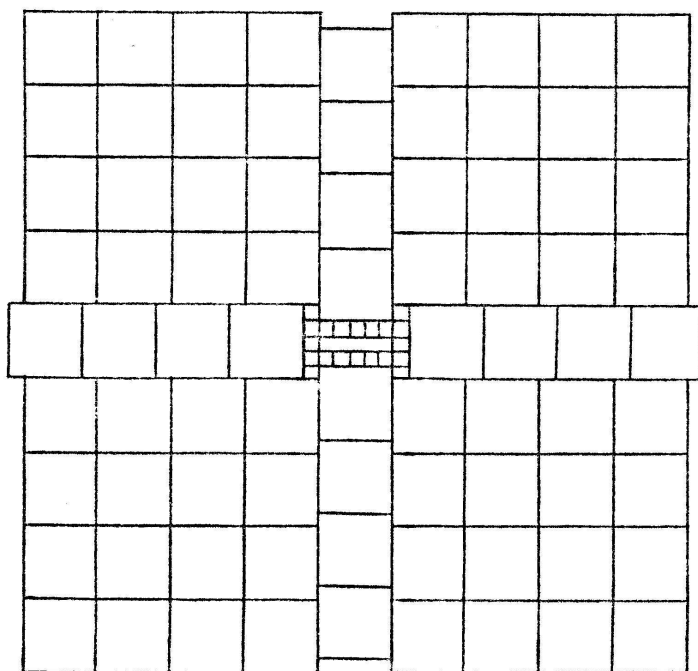


Рис.2. Схема ДПИ:

Р - радиаторы из полипропиленовых фольг,
ПК-Х(У) - Хе-пропорциональные камеры,
регистрирующие Х(У)-координату,
ПК - пропорциональная камера.



а)



б)

Рис.3. Схема ЭМК:

а) - вид по сечению аа рис.1,

б) - вид по сечению бб рис.1.

А для регистрации распада $\Xi^- \rightarrow \Sigma^+ \gamma$ можно несколько снизить разрешение, но зато требуется уменьшать центральное отверстие для сохранения аксептанса.

В силу заметных утечек через центральное отверстие от ливней, рожденных близко к краю отверстия, для улучшения разрешения приходится ограничиваться ливнями, отстоящими от края отверстия на расстоянии $\gtrsim R_m$, что приводит к эффективному увеличению размера отверстия и падению аксептанса.

Для ослабления этого эффекта ИТЭФ-ом было предложено выложить внутреннюю часть центрального отверстия ЭМК тонким слоем высокоплотного сцинтиллятора - ОГВ. На рис.1 и 3 приведена схема выкладки отверстия блоками ОГВ размером $2,4 \times 2,4 \times 20 \text{ см}^3$.

Перед нами были поставлены следующие задачи по моделированию фотонного детектора для регистрации γ -квантов высоких энергий.

1. Определить оптимальную толщину конверторов для ДПИ.
2. Изучить влияние слоя ОГВ на разрешение ЭМК, найдя предварительно оптимальное по оси Z положение ОГВ.
3. Смоделировать работу ЭМК со слоем ОГВ в центре и предшествующими конверторами, изучив зависимость его энергетического разрешения от координат падения γ -квантов во всем диапазоне энергий γ -квантов.

Из результатов моделирования кинематики распадов (1) и (2) известно, что для реакции (1) энергии γ -квантов лежат в пределах от 10 до 100 ГэВ. Для реакции (2) этот интервал уже: от ~ 1 ГэВ до 40 ГэВ с максимумом в области 5 ГэВ. Для перекрытия всего диапазона энергий γ -квантов были выбраны 4 точки по энергии: 5, 10, 50 и 100 ГэВ.

3. Особенности моделирования фотонного детектора

Общий подход к моделированию ЭМ каскадов и соответствующее математическое обеспечение были нами описаны в I части отчета [1].

Отметим особенности моделирования ливней в ЭМК из блоков оптического стекла с высоким содержанием свинца^{*}). Здесь сигнал возникает как вспышка черенковского света в стекле от быстрых электронов и позитронов ливня и регистрируется, например, ФЭУ. В силу направленности черенковского излучения светособирание здесь отличается от того, что имеет место в сцинтилляторах. Однако, учет светосбора не входил в нашу задачу.

Черенковские ливневые калориметры технологичны, относительно дешевы. Но они проигрывают тяжелым сцинтилляторам (типа ОГВ) в компактности и в пространственном разрешении в силу меньшей плотности вещества (и больших X_0):

	ρ (г/см ³)	n	X_0 (см)	R_M (см)	ε_c (МэВ)
Стекло F-2	3,61	1,62	3,2	3,9	17,3
ОГВ	7,13	2,15	1,12	2,4	9,8

Как и в [1], n - показатель преломления, ε_c - критическая энергия.

Так как нашей целью является изучение эффектов на границе центрального отверстия, то для моделирования фотонный детектор может быть представлен в виде набора бесконечных полуплоскостей, как это показано на рис.4, где также приведены некоторые обозначения.

Т.к. для конверторов предполагается сталь с содержанием железа ~99%, то в расчетах рассматривались конверторы из чистого железа.

Количество вещества в секциях ДШИ пренебрежимо мало по сравнению с количеством вещества в конверторах минимальной толщины, поэ-

^{*}) Стекло F-2 имеет следующий химический состав: PbO - 44%, SiO₂ - 50%, K₂O - 3,5%, Na₂O - 2,5%.

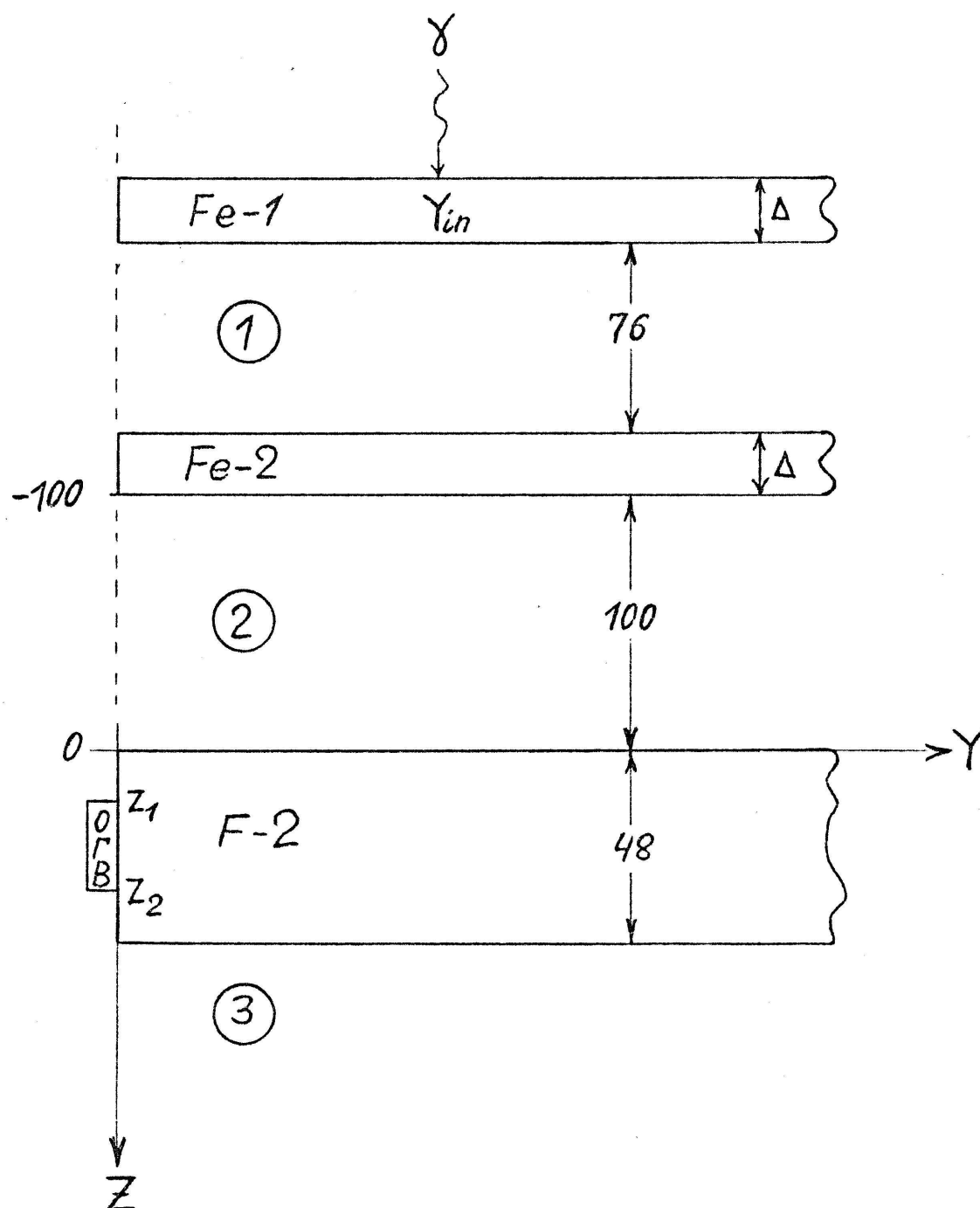


Рис. 4. Схематическое представление фотонного детектора для моделирования. Размеры - в см.

тому предполагалось, что среды 1,2 (и 3) - это вакуум.

Сборка из блоков стекла представлена сплошной полуплоскостью толщиной 48 см ($\sim 15X_0$). ОГВ задано слоем толщиной 2,4 см и глубиной 20 см ($Z_2 = Z_1 + 20$).

Чтобы ясно выявить эффект добавления ОГВ к черенковскому ЭМ калориметру и влияние конверторов, процесс моделирования был разделен на следующие этапы.

- 1) Определение оптимальной толщины конверторов.
- 2) Определение зависимости разрешения от координаты падения γ -кванта для калориметра только из стекла F-2.
- 3) То же самое для калориметра из F-2 с добавленным ОГВ, предварительно определив оптимальное Z_1 .
- 4) То же, что в п.2, но с предшествующими конверторами.
- 5) Фотонный детектор в целом - то же, что в п.3, но с предшествующими конверторами.

Все расчеты проводились на ЭВМ ЕС-1066 НИИЯФ.

При моделировании на ЭВМ ЭМ ливней при энергиях в десятки и сотни ГэВ серьезной проблемой становится время моделирования, которое при энергии $E_\gamma = 100$ ГэВ может составлять на ЕС-1066 величину ~ 220 сек для одного ливня, что для 300 событий даст $T_{300} = 18$ час.

Время генерации ливня существенно зависит от используемых в EGS в качестве параметров энергетических порогов E_{cut}^e и E_{cut}^δ , регулирующих процедуру прослеживания. При достижении электроном (фотоном) энергии меньше E_{cut}^e (E_{cut}^δ), трассировка для него прекращается, а его энергия полностью выделяется в последней точке траектории.

Интенсивность черенковского излучения на 1 см пробега определяется выражением $n_\phi = 490 \sin^2 \theta_c = 490 \left(1 - \frac{1}{(\beta n)^2}\right)$, нормированный график которого для стекла F-2 приведен на рис.5. Очевидно,

что обрезание E_{cut}^e должно быть больше энергетического порога черенковского излучения $E_{пор.} = 0,65$ МэВ.

Соответствующее обрезание для фотонов E_{cut}^γ можно определить как энергию E_K^γ , при которой энергия электрона отдачи при комптоновском рассеянии назад равна E_{cut}^e . Эти величины связаны выражением

$$E_K^\gamma = \frac{1}{2} [E_{cut}^e - m_e + p_{cut}^e] . \quad (3)$$

При обрезании $E_{cut}^e = 0,7$ МэВ получим $E_{cut}^\gamma = 0,3$ МэВ. Однако, эти пороги еще слишком малы с практической точки зрения, ибо при $E_\gamma = 5$ ГэВ время генерации на ЕС-1066 одного ливня составляет 11 сек, следовательно, для 300 событий (минимальная статистика для определения разрешения) - ~1 часа процессорного времени. Желательно уменьшить это время в 2-3 раза без ущерба для результатов.

Поэтому была изучена зависимость от обрезаний $E_{cut}^{e,\gamma}$ основных величин нашей задачи:

E_a - поглощенной энергии (в % к E_γ);

$\frac{N_\varphi}{E_\gamma}$ - суммарного числа черенковских фотонов, отнесенного ко входной энергии;

$\delta = \frac{\sigma_N}{N_\varphi}$ - энергетического разрешения калориметра;

τ - времени генерации одного ливня.

Моделирование проводилось для бесконечной полуплоскости из стекла F-2 толщиной 48 см. Гамма-квант с энергией 5 ГэВ падал на стекло на расстоянии 100 см от края, генерировалось по 300 ливней. При этом получены следующие результаты.

При фиксированном $E_{cut}^e = 1,0$ МэВ и изменении E_{cut}^γ от 0,1 до 1,0 МэВ величины E_a , $\frac{N_\varphi}{E_\gamma}$ и δ не менялись, оставаясь на уровне

$$E_a = (95,2 \pm 0,3)\%,$$

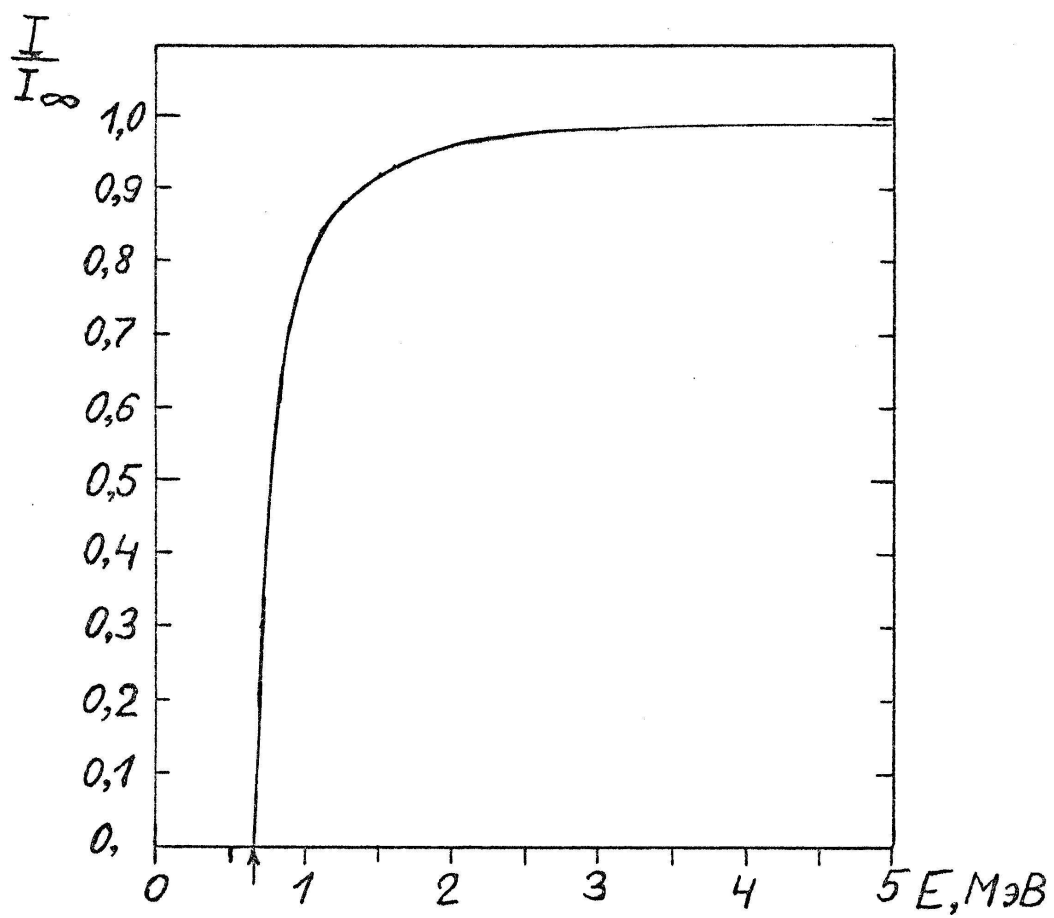


Рис.5. Нормированная зависимость интенсивности черенковского излучения в стекле F-2 от энергии электрона. Стрелкой указан порог в 0.65 МэВ.

$$\frac{N_{\varphi}}{E_{\gamma}} = (46,6 \pm 0,1) \text{ МэВ}^{-1},$$

$$\delta = (2,0 \pm 0,1)\%$$

При этом τ уменьшалось всего на 10%.

При фиксированном $E_{cut}^{\delta} = 0,3$ МэВ и изменении E_{cut}^e от 0,7 до 5,0 МэВ величины поглощенной энергии не менялись, оставаясь на уровне $E_a = (95,2 \pm 0,3)\%$. Изменение остальных величин представлено в табл. I. Видно монотонное убывание $\frac{N_{\varphi}}{E_{\gamma}}$. Разрешение не зависит от обрезаний при $E_{cut}^e \leq 2,5$ МэВ, а при $E_{cut}^e > 2,5$ МэВ ухудшается на $\sim 30\%$. Время генерации резко падает при переходе от $E_{cut}^e = 0,7$ к 1,5, а потом убывает более медленно.

При одновременном изменении E_{cut}^e и E_{cut}^{δ} в соответствии с соотношением (3) картина несколько меняется - см. табл. 2 и рис. 6. Поглощение E_a при $E_{cut}^e > 2,5$ МэВ слегка возрастает, ухудшается разрешение при $E_{cut}^e = 5,0$ МэВ. Из данных табл. I и 2 видно, что приемлемой является область $E_{cut}^e \leq 2,5$ МэВ, где стабильны разрешение и доля поглощенной энергии. Ограничив себя 20% потерей черенковского света (рис. 6а), выберем $E_{cut}^e = 1,5$ МэВ для $E_{\gamma} = 5$ ГэВ и 2,5 МэВ для $E_{\gamma} = 10$ ГэВ. При этом выигрыш во времени составит 2,5 раза (табл. 2). При $E_{\gamma} = 50$ и 100 ГэВ использовались $E_{cut}^e = 10^{-4} E_{\gamma}$, т.е. 5 и 10 МэВ соответственно, согласно рекомендациям работы [2].

Такие же значения E_{cut}^e использовались для железа и ОГВ.

4. Определение оптимальной толщины конверторов

γ -квантов

При выборе толщины Δ пластин конвертора надо найти оптимум, соответствующий достаточно высокой вероятности срабатывания ДПИ (вероятности конверсии γ -кванта в пару) при минимальной толщине Δ . Ибо, чем Δ больше, тем меньшая часть энергии ливня выделяется в ЭМ калориметре, что ухудшает его энергетическое разрешение.

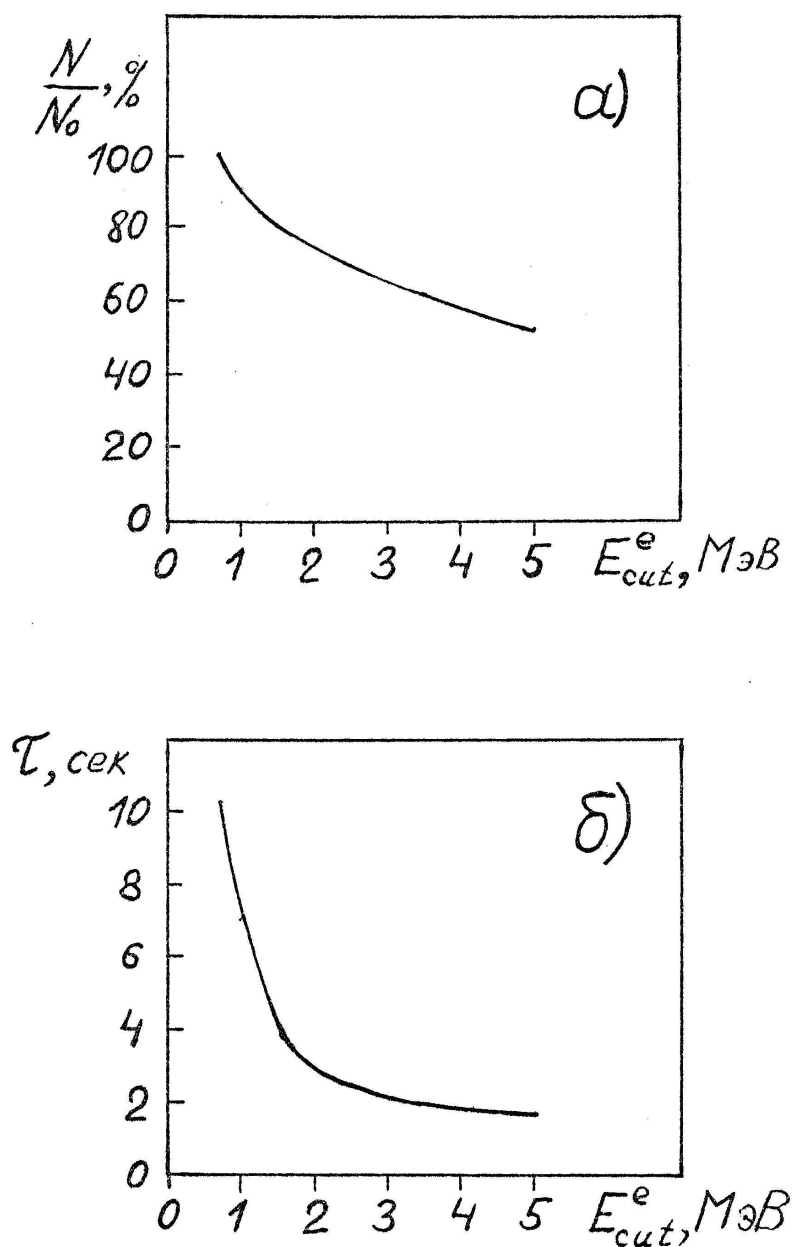


Рис.6. а)Зависимость суммарной интенсивности черенковского излучения ливня, вызываемого γ -квантом с энергией 5 ГэВ в стекле F-2, от энергии обрезания. Интенсивность нормирована на 100% при обрезании 0.7 МэВ, равном порогу черенковского излучения. б)Зависимость времени моделирования одного ливня на ЕС-1066 ($E_\gamma=5$ ГэВ) от энергии обрезания.

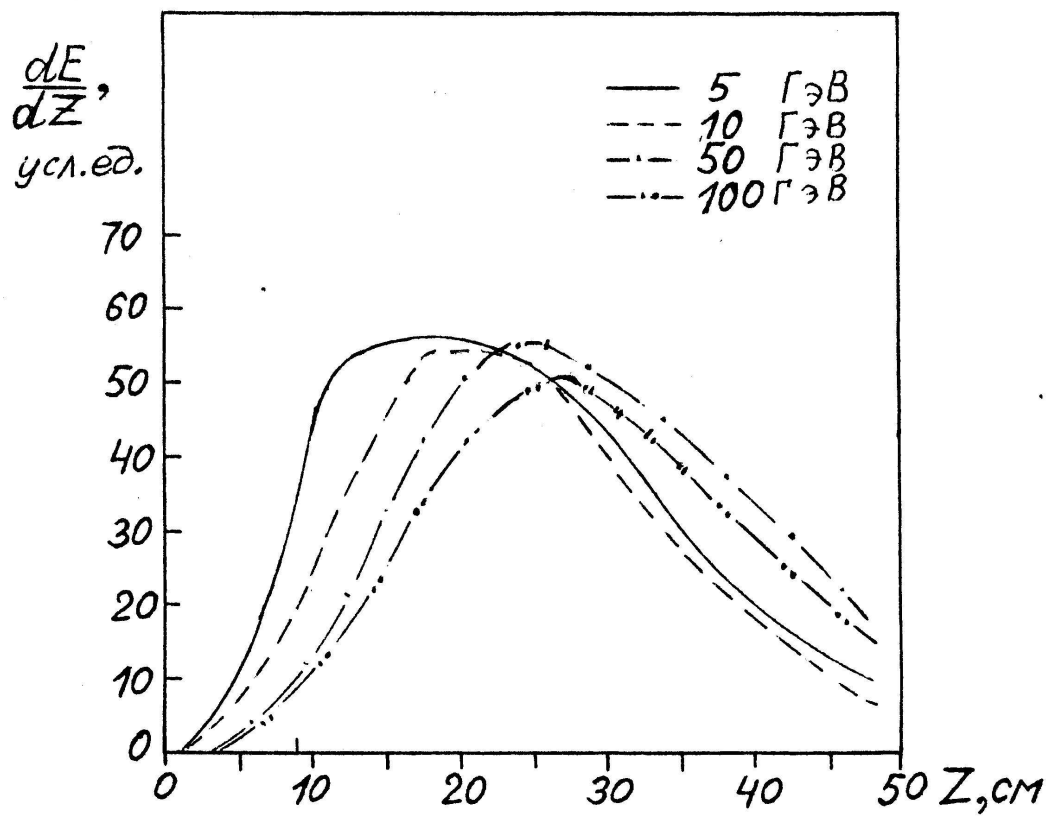


Рис.7. Продольные профили ливней в стекле F-2 толщиной 48 см при указанных энергиях γ -квантов.

Моделирование производилось по схеме, приведенной на рис.4 (с $Y_{in} = 2 R_M$), но прослеживание ливня прекращалось на границе стекла ($Z = 0$).

Из характера продольных профилей ливней, приведенных на рис.7, следует, что суммарная толщина конверторов 2Δ должна быть не более $3X_0$ (9 см стекла, ~5 см железа), чтобы максимум ливня при 5 ГэВ оставался в стекле. Поэтому при моделировании брались такие толщины конверторов: $\Delta = 0,9$; 1,8 и 2,5 см, что соответствовало $2\Delta = 1X_0$, $2X_0$ и $2,8X_0$ ($X_0 = 1,76$ см для железа). Поскольку ДШИ имеет порог 2,5 ГэВ для регистрации электронов, то при моделировании N_0 ливней подсчитывались числа таких событий:

N_i - число ливней с наличием $e^\pm$ с $E > 2,5$ ГэВ только в i -ом промежутке ($i = 1, 2$);

N_{1+2} - число ливней с наличием таких $e^\pm$ в обоих промежутках;

$N_{1/2} = N_1 + N_2 + N_{1+2}$ - число ливней с наличием таких $e^\pm$ хотя бы в одном промежутке (одной секции ДШИ).

В табл.3 и на рис.8-10 приведены в зависимости от Δ вероятности $P_j = \frac{N_j}{N_0}$ ($j = 1, 2, 1+2, 1/2$) и величина $\eta = \frac{P_{1+2}}{P_{1/2}}$. На основе представленных результатов можно сделать следующие выводы.

1) Эффективность срабатывания ДШИ - $P_{1/2}$ - для толщин $\Delta = 1,8$ и 2,5 см растет во всем диапазоне энергий от 5 до 100 ГэВ (рис.9). Для $\Delta = 0,9$ см $P_{1/2}$ практически постоянно на уровне $\sim 0,6$ в диапазоне 10-100 ГэВ, а для 5 ГэВ меньше всего на 1/3, т.е. за выигрыш в эффективности ДШИ на фактор 1,5 для $\Delta \geq 1,8$ см при $E_\gamma \geq 50$ ГэВ приходится расплачиваться неоднородностью эффективности ДШИ в диапазоне 5-100 ГэВ, выраженной фактором 2,5.

2) Доля одновременного срабатывания двух секций η при $E_\gamma = 5$ и 10 ГэВ выше для $\Delta = 0,9$ см (рис.10), уступая более толстым конверторам лишь при $E_\gamma = 100$ ГэВ - на хвосте спектра γ -квантов.

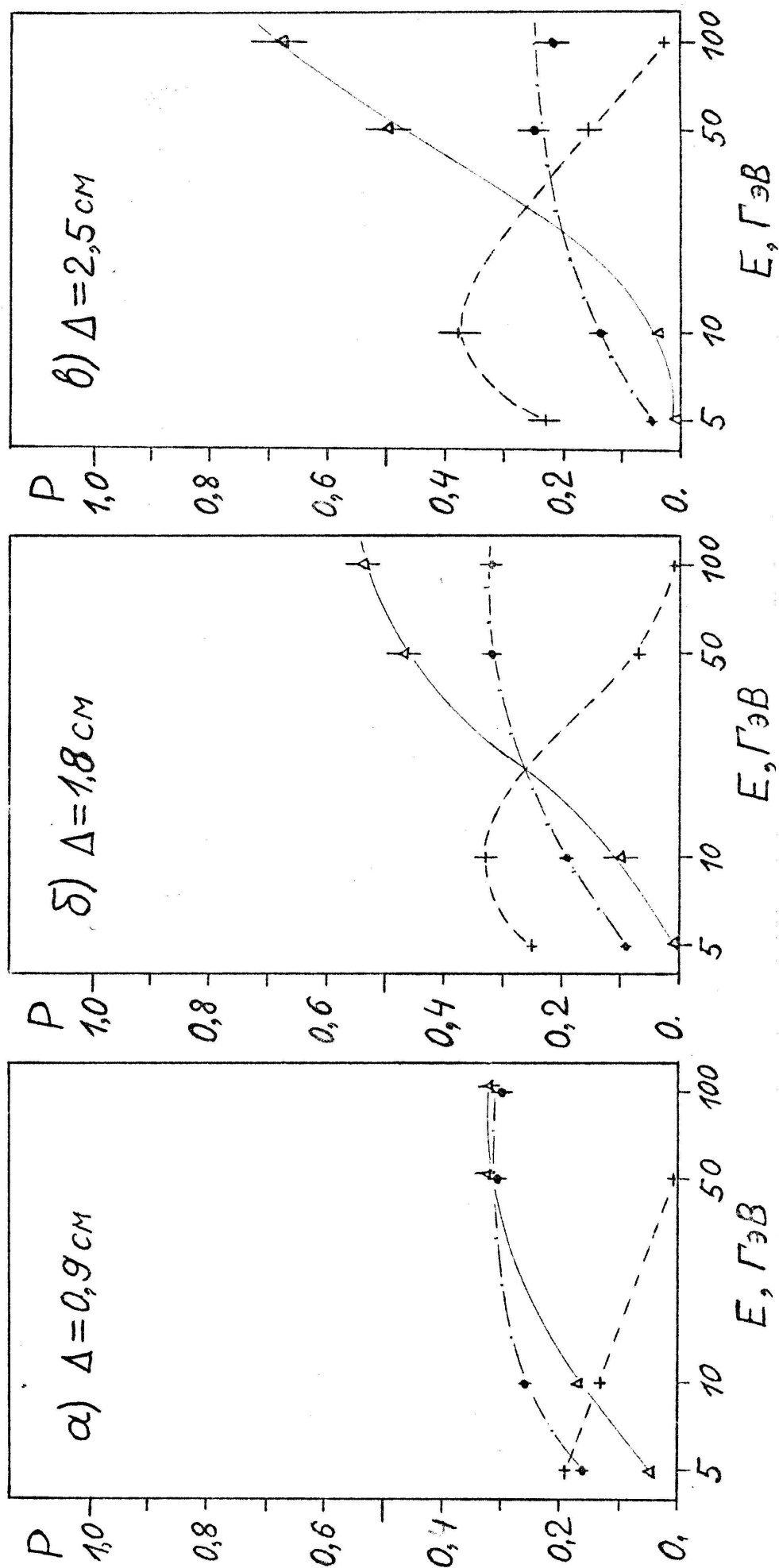


Рис.8. Зависимость вероятностей $P_I(+)$, $P_2(.)$ и $P_{I+2}(\Delta)$ от энергии γ -квантов E при различных толщинах конверторов Δ . Кривые проведены на глаз для удобства.

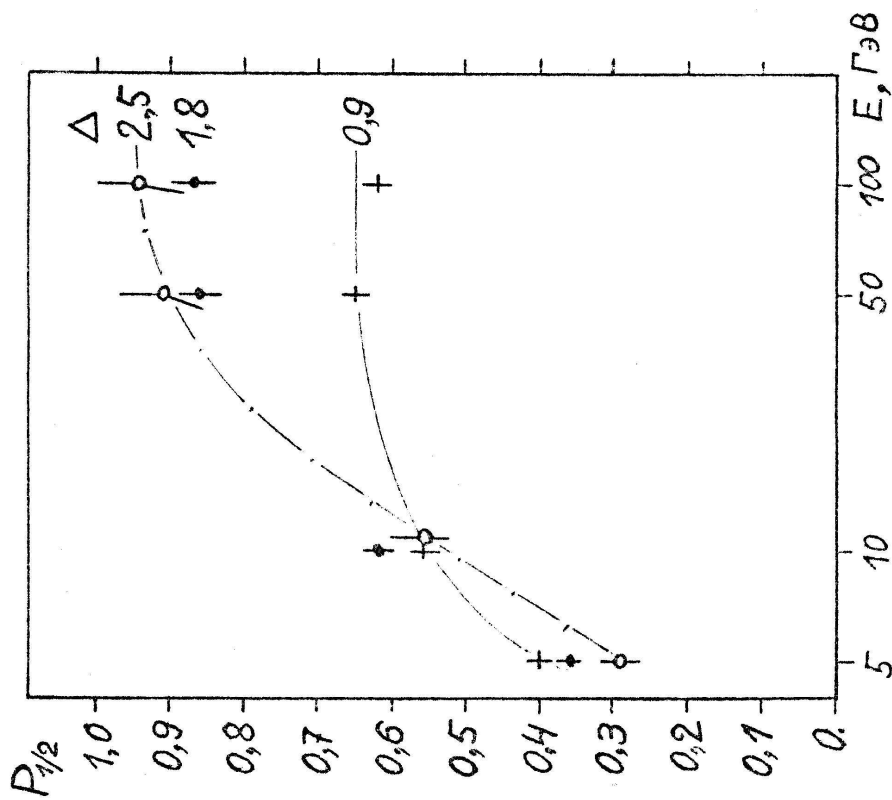


Рис.9. Зависимость от энергии γ -квантов вероятности срабатывания ДИ $P_{1/2}$ при разных толщинах конверторов :
 + $\Delta = 0.9$ см, $\cdot$ $\Delta = 1.8$ см,
 o $\Delta = 2.5$ см.

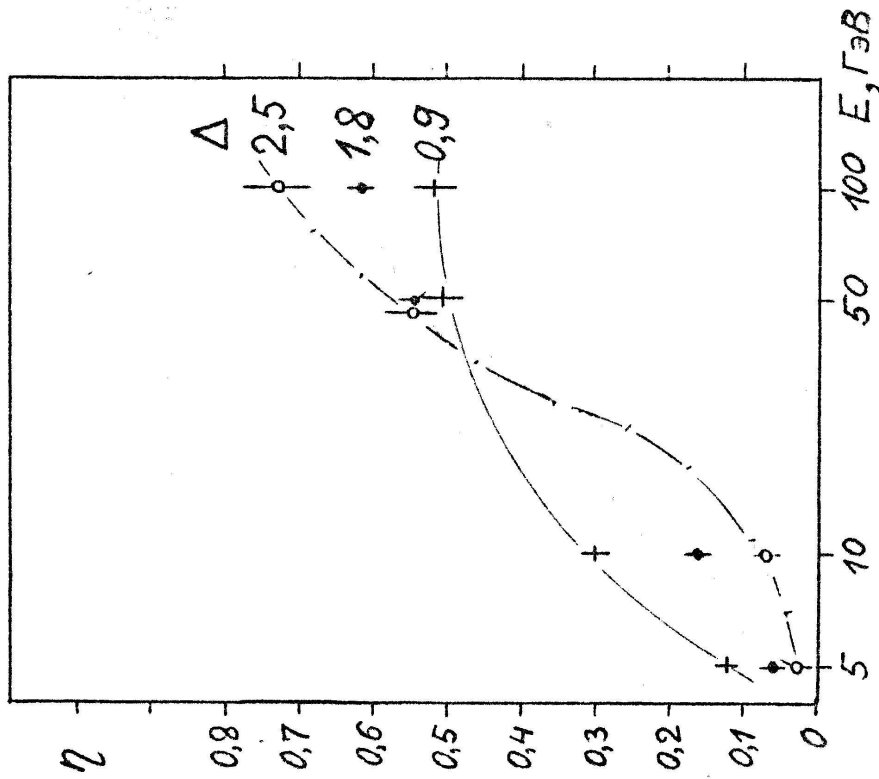


Рис.10. Зависимость от энергии γ -квантов относительной доли одновременного срабатывания двух секций ДИ при разных толщинах конверторов Δ .

3) Кроме того, расчеты ЭМК с конверторами показали, что при энергии $E_\gamma = 5$ ГэВ энергетическое разрешение составляет $(2,4 \pm 0,2)\%$ при $\Delta = 0,9$ см и $(19,7 \pm 1,3)\%$ при $\Delta = 2,5$ см (в обоих случаях $\gamma_{in} = 2 R_M$).

Все три приведенных аргумента свидетельствуют в пользу выбора толщины конвертора $\Delta = 0,9$ см. Эта величина и использовалась в дальнейших расчетах.

5. Обсуждение результатов моделирования

Было промоделировано четыре варианта ЭМ калориметра в порядке приближения по сложности к фотонному детектору. При моделировании изучалось поведение следующих величин: доли энергии ливня E_a (в процентах к E_γ), поглощенной в калориметре в целом; поглощенной отдельно в стекле - $E_a(F-2)$ и в ОГВ - $E_a(ОГВ)$; доли энергии, поглощенной конвертором (C) ; утечек-боковых (S) и вперед (F) ; энергетического разрешения $\delta = \sigma_N / \bar{N}_\varphi$.

Сигнал ЭМ калориметра определяется суммарным числом фотонов N_φ . Для сцинтиллятора $N_\varphi = E_a / \bar{w}$, где $\bar{w} = 250$ эв для ОГВ (см. [1]). В случае черенковского калориметра сигнал определяется суммарным черенковским светом $N_\varphi = 490 [1 - (\beta n)^{-2}] \cdot L$, где L - суммарный пробег всех $e^\pm$ ливня в стекле (с энергиями выше порога излучения). Т.к. световыход в ОГВ на 2 порядка выше, чем в стекле $F-2$, то суммарный сигнал с комбинированного калориметра нужно брать в виде

$$N_\varphi^\Sigma = N_\varphi^{ОГВ} + f \cdot N_\varphi^{F-2}, \quad (4)$$

где f - фактор, определенный нами из естественного условия $\frac{f \cdot N_\varphi^{F-2}}{N_\varphi^{ОГВ}} = \frac{E_a(F-2)}{E_a(ОГВ)}$ для ливней от γ -квантов, падающих на границу $F-2$ и ОГВ. Для величины f получено значение

$f = 100$, которое и использовалось в дальнейших расчетах. Использование выражения (4) с $f \neq 1 (\gg 1)$ существенно сказывается на разрешении комбинированного калориметра. Например, при $E_\gamma = 5$ ГэВ и $Y_{in} = 0,1$ см разрешение ухудшается в ~ 9 раз при использовании в (4) $f = 1$ вместо $f = 100$.

Так как распределение отклика калориметра N_φ^Σ (или N_φ^{F-2}) имеет несимметричную форму, то оно фитировалось, как и в [1], несимметричной гауссовой формой (2) из [1], а затем вычислялось $\sigma_N = FWHM / 2,355$. А собственно энергетическое разрешение определялось как $\delta = \sigma_N / N_\varphi$.

Результаты моделирования ЭМ калориметра из слоя стекла $F-2$ толщиной 48 см приведены в табл. 4 и точками (.) на рис. II-14 ж). Вплоть до $Y_{in} = 1$ см у него доминируют боковые утечки (полные утечки $\gtrsim 20\%$). На расстоянии $Y_{in} \gtrsim R_M = 3,9$ см доминируют утечки вперед, растущие с энергией. Это отражается в резком убывании поглощенной энергии E_a при приближении к краю при всех энергиях (рис. II и 12). Резкое убывание E_a приводит к соответствующему разному ухудшению разрешения на краю - рис. 13 и 14. Поскольку степень коллимации ливня растет с его энергией, то область низкого разрешения на краю плоскости сужается с ростом энергии. Но при энергиях 5 и 10 ГэВ эта область составляет ~ 1 см.

Введение перед стеклом конвертора (табл. 5) уменьшает поглощенную энергию и ухудшает разрешение. Но эффект проявляется в основном при низких энергиях (ибо при $E_\gamma = 50$ и 100 ГэВ конвертор поглощает меньше 0,1% энергии ливня), и на краю - за счет промаха мимо плоскости стекла части частиц ливня, зародившегося в конверторе.

ж) При совпадении данных приоритет на рисунках отдан (+), затем (•), При $Y_{in} < 0$ нет конвертора, поэтому отсутствуют данные (x), а данные (+) и (•) совпадают.

Для комбинированного калориметра из стекла и слоя ОГВ сначала находилась оптимальная Z_1 -координата слоя ОГВ - см. табл.6. Из представленных данных (хотя зависимости E_a и δ от Z_1 являются слабо выраженными) следует, что требованию максимальной поглощенной энергии и лучшего разрешения удовлетворяет выбор $Z_1 = 14$ см. С этим значением Z_1 были получены результаты, представленные в табл.7 и обозначенные (о) на рис.11-14.

Видно, что добавление слоя ОГВ к торцу стекла привело к резкому возрастанию E_a вблизи границы $Y_{in} = 0$ при всех энергиях γ -квантов и к соответствующему заметному улучшению разрешения. В точке $Y_{in} = 0,1$ см разрешение при 5 ГэВ меняется с $(19 \pm 2)\%$ на $(3,0 \pm 0,2)\%$, а при 10 ГэВ - с $(14 \pm 1)\%$ на $(2,7 \pm 0,3)\%$, т.е. улучшается соответственно в 6 и 5 раз.

При моделировании фотонного детектора (ФД) как целого (рис.4) было проведено уточнение оптимального положения слоя ОГВ (в силу поглощения части энергии в конверторе) - см. табл.8, и выбрано оптимальное значение $Z_1 = 14$ см. Результаты для ФД представлены в табл.9 и обозначены (+) на рис.11-14.

Поскольку ФД представляет собой вариант $F-2 + \text{ОГВ}$ с добавлением конвертора, то для него характерны все особенности варианта $F-2 + \text{ОГВ}$, проявляющиеся в резком улучшении разрешения при Y_{in} вблизи нуля.

Представленные на рис.13 и 14 и в табл.10 данные для ФД свидетельствуют, что он имеет высокое разрешение для расстояний $Y_{in} \geq -1,4$ см при энергиях 5 и 10 ГэВ и для расстояний $Y_{in} \geq -1,9$ см при энергиях 50 и 100 ГэВ (исключая область от 0. до 1 см).

На рис.15 и 16 сопоставляются зависимости поглощенной энергии и разрешения различных вариантов калориметров от расстояния падающего γ -кванта от края калориметра.

6. Итоги работы и выводы

Путем математического моделирования изучены свойства комбинированного черенковско-сцинтилляционного ЭМ калориметра для регистрации γ -квантов с энергиями от 5 до 100 ГэВ.

1. Исходя из оптимальности работы детектора переходного излучения определена оптимальная толщина пластин конвертора $\Delta = 0,9$ см. Конвертор такой толщины практически не сказывается на разрешении фотонного детектора.

2. Определено оптимальное положение слоя ОГВ, исходя из максимума разрешения и эффективности ЭМ калориметра.

3. Проведено моделирование четырех вариантов ЭМ калориметров, что позволило отдельно проследить влияние добавления к F-2-калориметру слоя ОГВ и конвертора.

4. Показана необходимость формирования сигнала с комбинированного калориметра согласно выражению (4) с фактором 100, усиливающим вклад черенковского калориметра.

5. Показано, что благодаря слою ОГВ фотонный детектор имеет высокое разрешение вплоть до самой границы стекла.

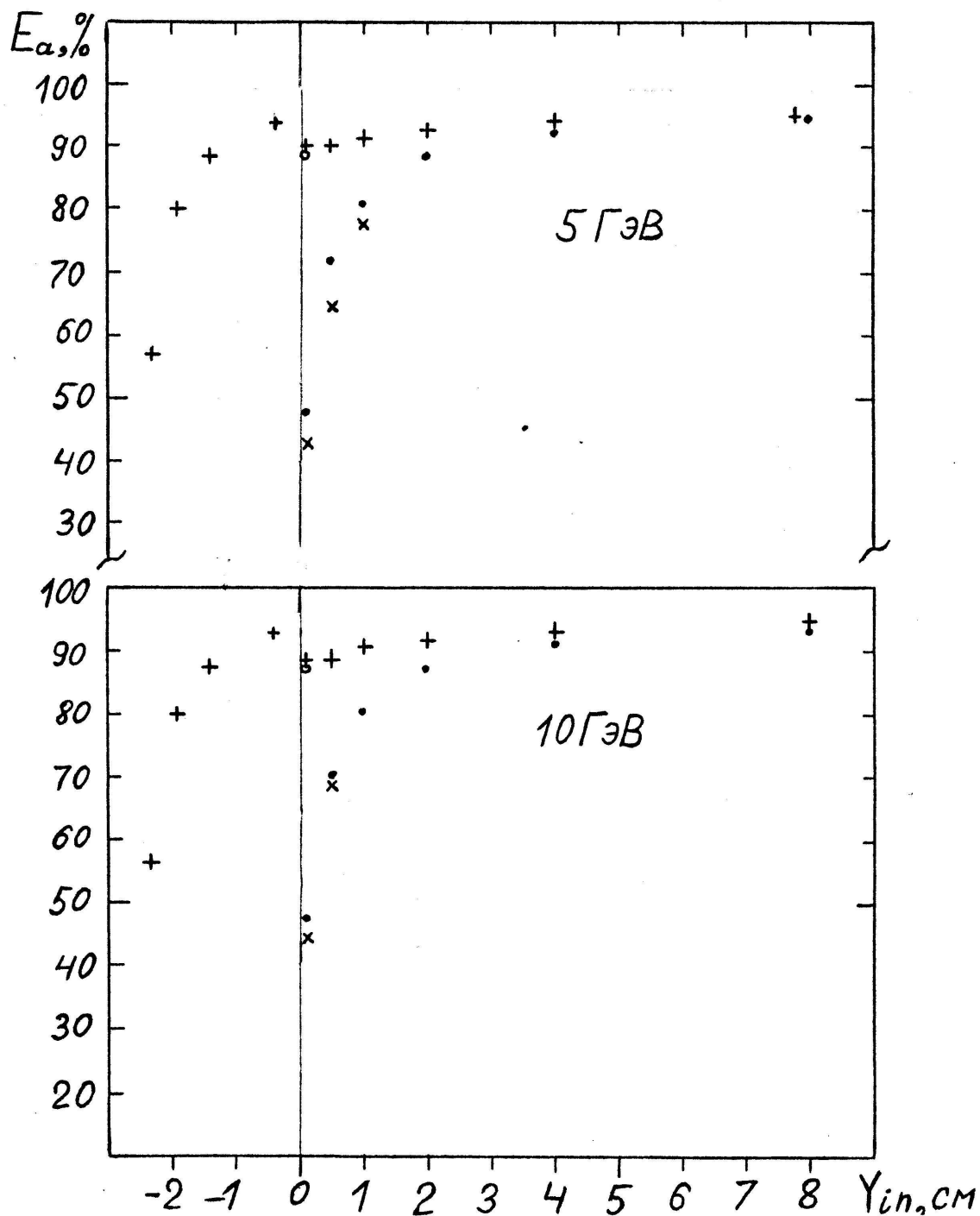


Рис. II. Зависимость поглощенной в ЭМ калориметрах энергии E_a (в % к E_γ) от координаты падения γ -квантов Y_{in} для энергий $E_\gamma = 5$ и 10 ГэВ.

Варианты калориметров:

- - из стекла F-2;
- x - из стекла F-2 с конверторами;
- ◐ - из стекла F-2, дополненного слоем ОГВ;
- + - фотонный детектор в целом (см. рис. 4).

Тонкой линией при $Y_{in} = 0$ обозначена граница между стеклом и ОГВ.

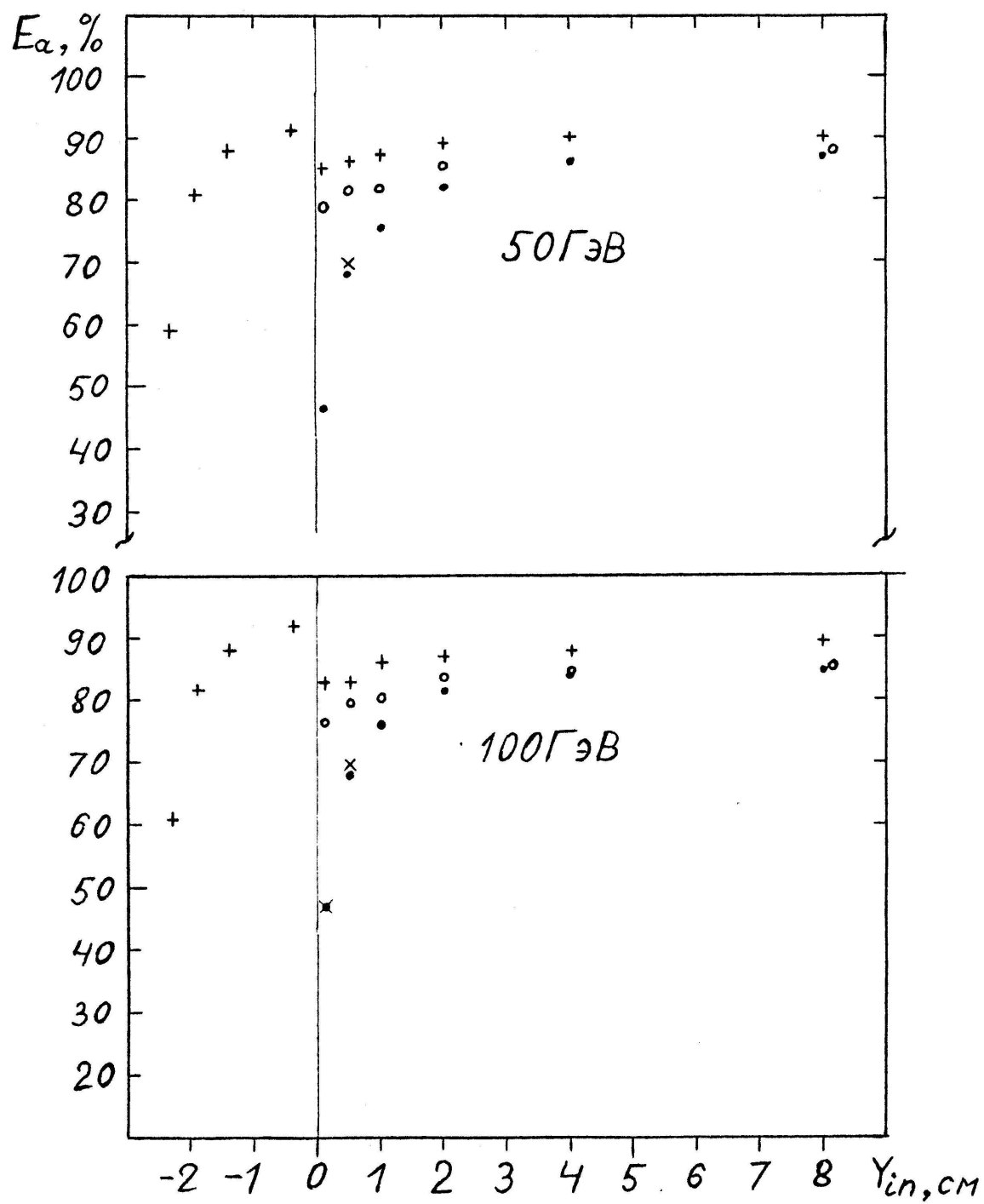


Рис.12. То же, что на рис.11, но для энергий $E_\gamma = 50$ и 100 ГэВ .

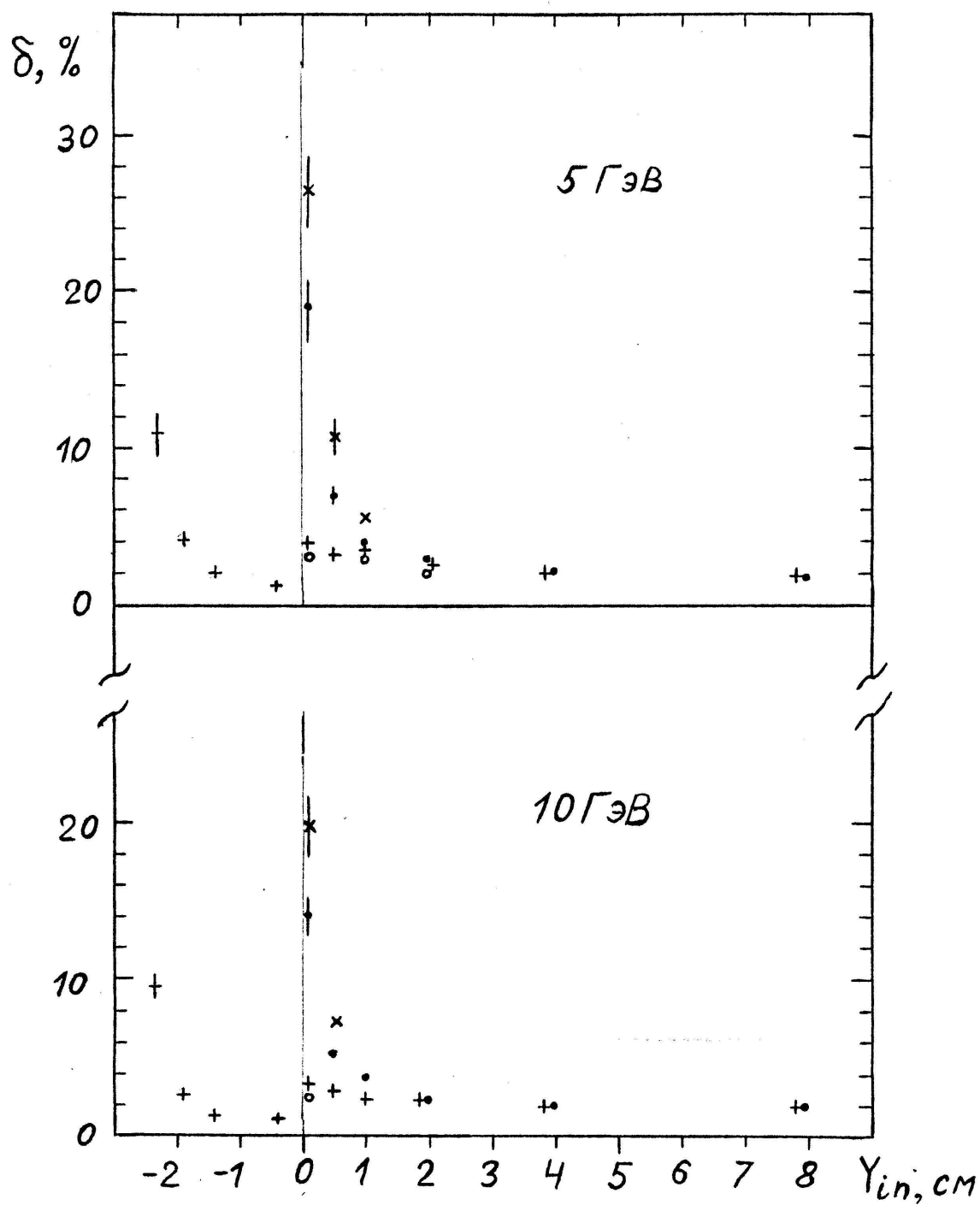


Рис.13. Зависимость энергетического разрешения δ ЭМ калориметров от координаты падения γ -квантов Y_{in} для энергий $E_\gamma=5$ и 10 ГэВ. Обозначения - как на рис.11.

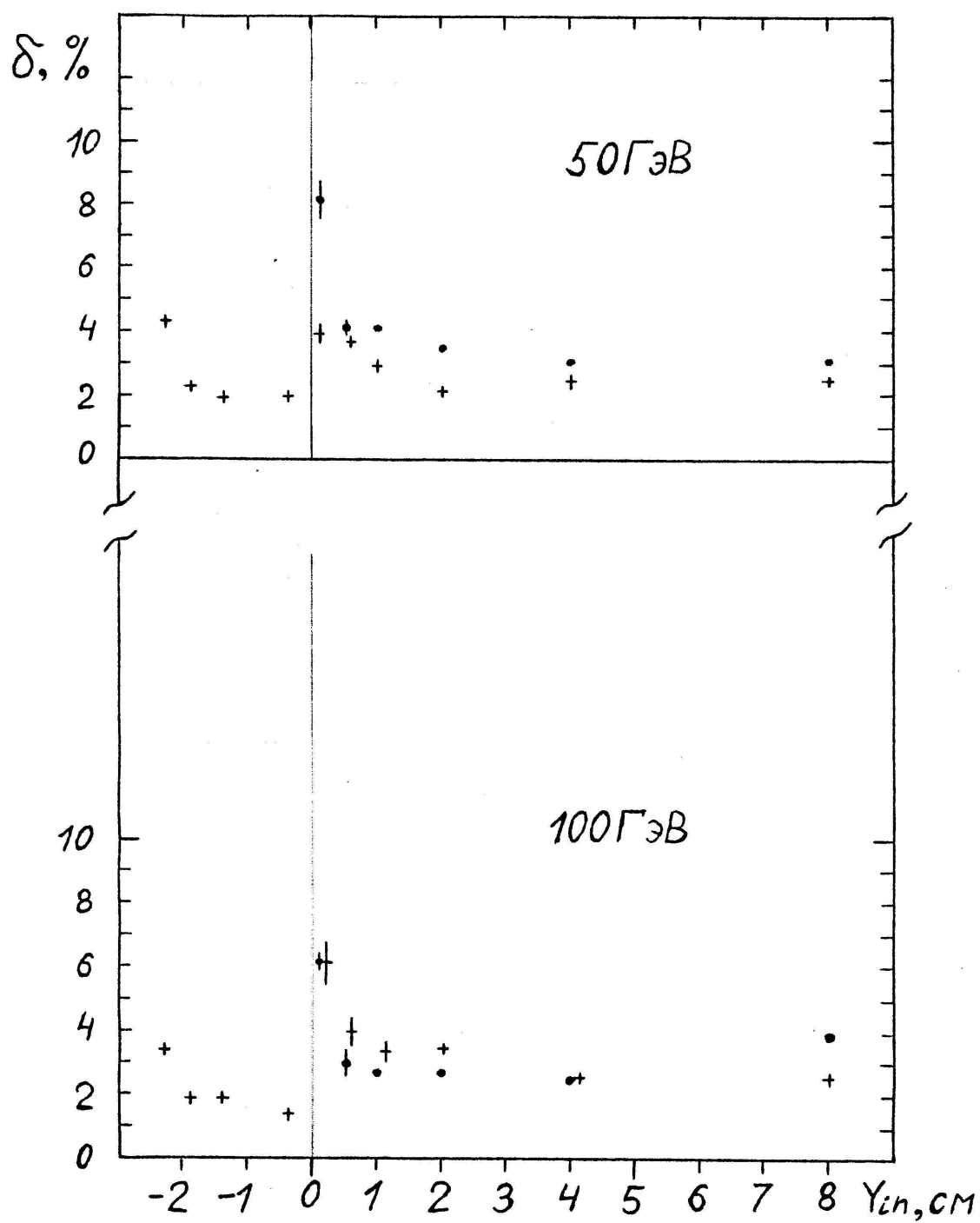


Рис.14. То же, что на рис.13, но для энергий $E_\gamma = 50$ и 100 ГэВ.

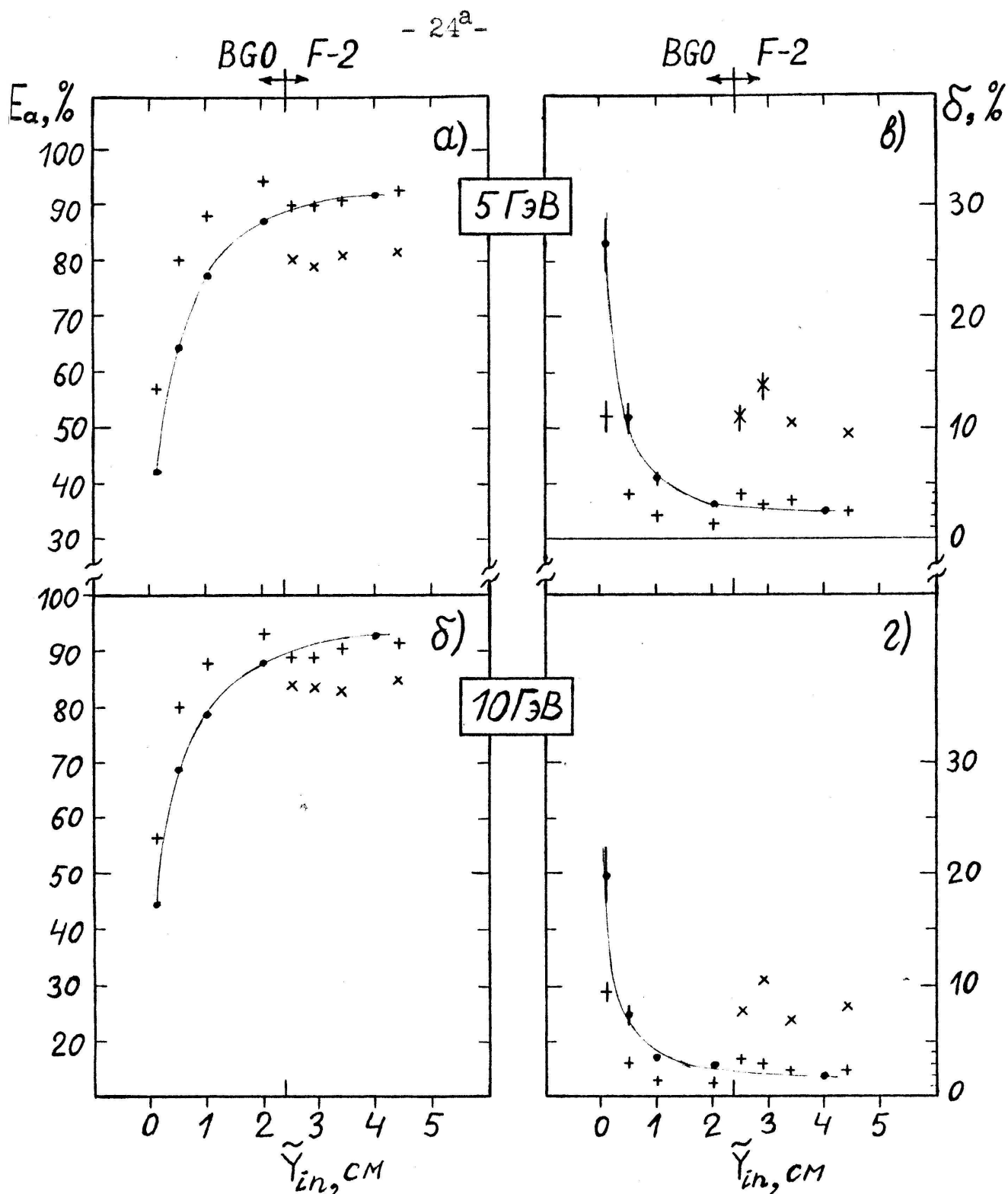


Рис. 15. Зависимость поглощенной энергии E_a (а) и б), в % к E_γ) и разрешения калориметров δ (в) и г)) от расстояния $\tilde{Y}_{in}$ от края калориметров:

$\tilde{Y}_{in} = Y_{in} + 2,4$ для калориметров с ОГВ,

$\tilde{Y}_{in} = Y_{in}$ в остальных случаях.

Обозначения: + - ФД с $\Delta = 0,9$ см,

x - ФД с $\Delta = 2,5$ см,

o - ФД с $\Delta = 0$,

- - F-2 плюс конвертор с $\Delta = 0,9$ см.

Данные + и o при этих энергиях совпадают, оставлены + .

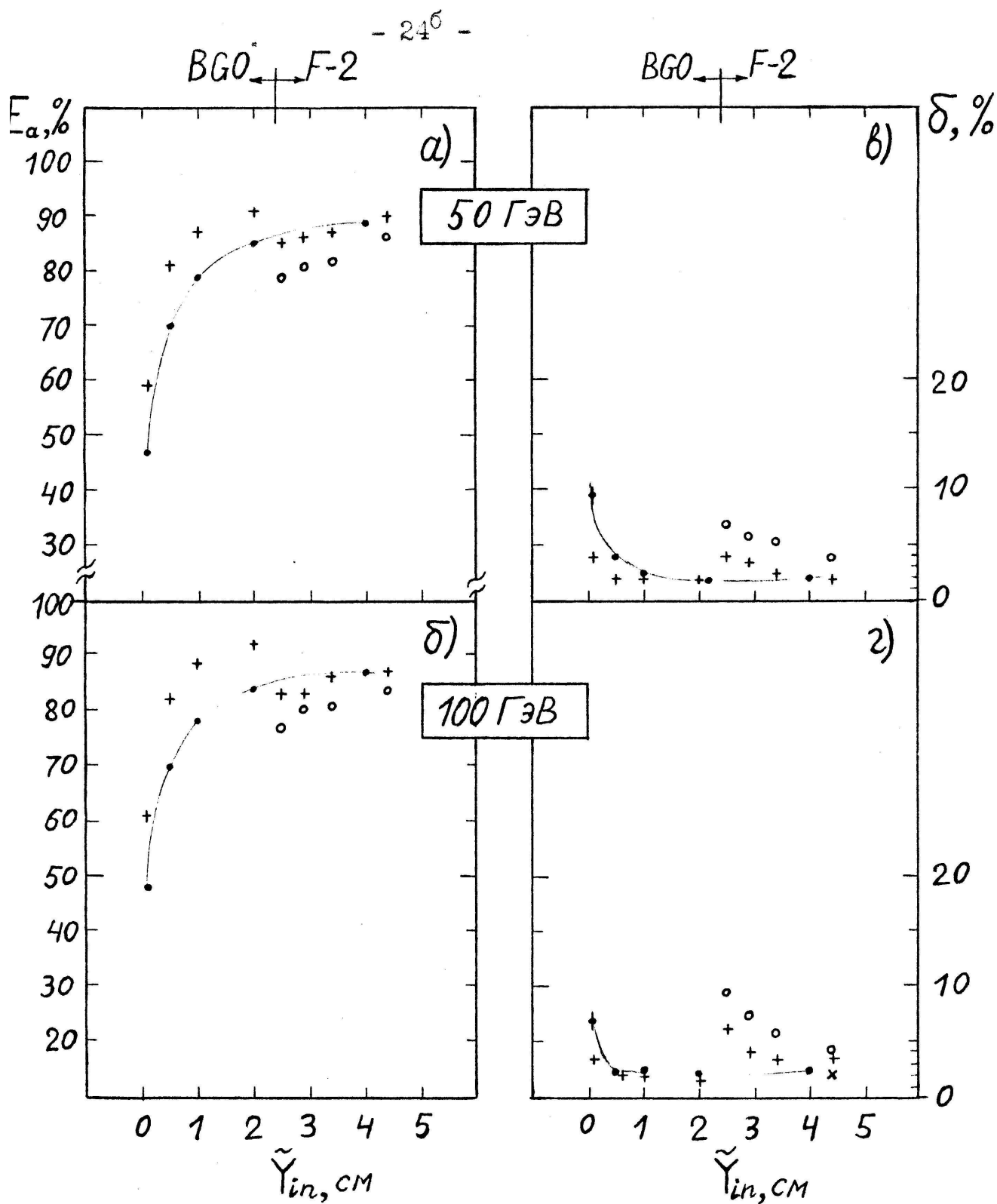


Рис. 16. То же, что и на рис.15, но для энергий $E_{\gamma} = 50$ и 100 ГэВ. Данные $\times$ и $+$ при этих энергиях совпадают, оставлены $+$.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Коржавина И.А., Рудь В.И. Отчет по хоздоговору № 141-88,
часть I. НИИЯФ МГУ, 1989г.
2. Амадуни Ц.А. Кандидатская диссертация. ИФВЭ, Серпухов, 1985г.

Таблица I

Зависимость параметров ливня (в стекле F-2 толщиной 48 см) от E_{cut}^e при фиксированном $E_{cut}^\gamma = 0,3$ МэВ.

E_{cut}^e , МэВ	$\frac{N_\varphi}{E_\gamma}$, МэВ ⁻¹	$\delta = \frac{\sigma_N}{N_\varphi}$, %	τ , сек
0,7	$53,5 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,1$	11,3
1,5	$42,9 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,2$	4,3
2,5	$37,5 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,1$	2,9
3,5	$33,5 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,1$	2,6
5,0	$28,1 \pm 0,2$	$2,6 \pm 0,1$	2,2

Таблица 2

Зависимость параметров ливня в стекле F-2 от E_{cut}^e и E_{cut}^γ .

E_{cut}^e , МэВ	E_{cut}^γ , МэВ	E_a , %	$\frac{N_\varphi}{E_\gamma}$, МэВ ⁻¹	$\delta = \frac{\sigma_N}{N_\varphi}$, %	τ , сек
0,7	0,3	$95,2 \pm 0,3$	$53,5 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,1$	11,3
1,0	0,7	$95,3 \pm 0,3$	$48,5 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,1$	7.
1,5	1,2	$95,3 \pm 0,3$	$43,5 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,1$	3,8
2,5	2,2	$95,5 \pm 0,3$	$37,5 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,1$	2,5
3,5	3,2	$96,1 \pm 0,3$	$33,2 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,6$	2,0
5,0	4,7	$96,3 \pm 0,3$	$27,9 \pm 0,2$	$3,0 \pm 0,2$	1,7

Таблица 3

Зависимость от энергии γ -квантов E_γ вероятностей регистрации ливней в разных секциях ДПИ при различной толщине конверторов.

E_γ , ГэВ	P_1	P_2	P_{1+2}	$P_{1/2}$	$\eta = \frac{P_{1+2}}{P_{1/2}}$
Толщина конвертора $\Delta = 0,9$ см, $N_0 = 1200$					
5.	$0,19 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,01$	$0,05 \pm 0,01$	$0,40 \pm 0,02$	$0,12 \pm 0,02$
10.	$0,13 \pm 0,01$	$0,26 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,01$	$0,56 \pm 0,02$	$0,30 \pm 0,02$
50.	$0,01 \pm 0,003$	$0,31 \pm 0,02$	$0,33 \pm 0,02$	$0,65 \pm 0,02$	$0,51 \pm 0,03$
100.	$0,003 \pm 0,002$	$0,30 \pm 0,02$	$0,32 \pm 0,02$	$0,62 \pm 0,02$	$0,52 \pm 0,03$
Толщина конвертора $\Delta = 1,8$ см, $N_0 = 1200$					
5.	$0,25 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,01$	$0,012 \pm 0,003$	$0,36 \pm 0,02$	$0,06 \pm 0,02$
10.	$0,33 \pm 0,02$	$0,19 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,03$	$0,62 \pm 0,02$	$0,16 \pm 0,02$
50.	$0,07 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,02$	$0,48 \pm 0,03$	$0,86 \pm 0,03$	$0,55 \pm 0,02$
100.	$0,008 \pm 0,002$	$0,32 \pm 0,02$	$0,54 \pm 0,03$	$0,87 \pm 0,03$	$0,62 \pm 0,02$
Толщина конвертора $\Delta = 2,5$ см, $N_0 = 300$					
5.	$0,23 \pm 0,03$	$0,05 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$	$0,29 \pm 0,03$	$0,03 \pm 0,02$
10.	$0,38 \pm 0,04$	$0,14 \pm 0,02$	$0,04 \pm 0,01$	$0,56 \pm 0,04$	$0,07 \pm 0,02$
50.	$0,16 \pm 0,02$	$0,25 \pm 0,03$	$0,51 \pm 0,04$	$0,91 \pm 0,06$	$0,55 \pm 0,04$
100.	$0,03 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,03$	$0,68 \pm 0,05$	$0,94 \pm 0,06$	$0,73 \pm 0,05$

Таблица 4

Зависимость параметров ливней в стекле F-2
от координаты падения γ -квантов Y_{in} .

$Y_{in}, \text{см}$	$E_a, \%$	$\delta, \%$	$S', \%$	$F, \%$
1	2	3	4	5
$E_\gamma = 5 \text{ ГэВ}, E_{cut}^e = 1.5 \text{ МэВ}$				
0,1	$48,2 \pm 0,6$	$19,0 \pm 2,0$	$50,0 \pm 0,6$	$1,8 \pm 0,2$
0,5	$71,8 \pm 0,3$	$6,8 \pm 0,6$	$25,5 \pm 0,4$	$2,7 \pm 0,2$
1,0	$81,0 \pm 0,4$	$4,1 \pm 0,2$	$15,2 \pm 0,2$	$3,8 \pm 0,4$
2,0	$88,5 \pm 0,2$	$3,0 \pm 0,2$	$8,0 \pm 0,1$	$3,4 \pm 0,2$
4,0	$92,3 \pm 0,3$	$2,2 \pm 0,1$	$3,3 \pm 0,1$	$4,4 \pm 0,3$
8,0	$94,6 \pm 0,3$	$1,7 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,03$	$4,4 \pm 0,3$
$E_\gamma = 10 \text{ ГэВ}, E_{cut}^e = 1,5 \text{ МэВ}$				
0,1	$48,6 \pm 0,5$	$14,3 \pm 1,3$	$48,6 \pm 0,5$	$2,8 \pm 0,4$
0,5	$70,5 \pm 0,3$	$5,6 \pm 0,4$	$25,3 \pm 0,4$	$4,1 \pm 0,3$
1,0	$80,5 \pm 0,3$	$3,8 \pm 0,3$	$15,2 \pm 0,2$	$4,3 \pm 0,3$
2,0	$87,0 \pm 0,2$	$2,6 \pm 0,2$	$7,8 \pm 0,1$	$5,2 \pm 0,3$
4,0	$91,0 \pm 0,3$	$2,3 \pm 0,2$	$3,4 \pm 0,1$	$5,7 \pm 0,4$
8,0	$92,7 \pm 0,3$	$2,3 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,02$	$6,2 \pm 0,4$
$E_\gamma = 50 \text{ ГэВ}, E_{cut}^e = 5 \text{ МэВ}$				
0,1	$46,5 \pm 0,3$	$8,0 \pm 0,7$	$46,9 \pm 0,7$	$6,5 \pm 0,4$
0,5	$68,0 \pm 0,3$	$4,1 \pm 0,3$	$23,2 \pm 0,2$	$8,8 \pm 0,4$
1,0	$75,5 \pm 0,5$	$4,0 \pm 0,3$	$13,4 \pm 0,2$	$11,2 \pm 0,6$
2,0	$82,0 \pm 0,5$	$3,4 \pm 0,2$	$6,7 \pm 0,1$	$11,3 \pm 0,5$
4,0	$85,9 \pm 0,5$	$2,9 \pm 0,2$	$2,8 \pm 0,03$	$11,3 \pm 0,5$
8,0	$87,0 \pm 0,6$	$2,9 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,01$	$12,1 \pm 0,6$

Таблица 4
(продолжение)

1	2	3	4	5
$E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}, E_{cut}^e = 10 \text{ МэВ}$				
0,1	$47,6 \pm 0,3$	$6,2 \pm 0,5$	$44,6 \pm 0,3$	$7,7 \pm 0,4$
0,5	$67,8 \pm 0,5$	$3,0 \pm 0,4$	$20,6 \pm 0,2$	$11,6 \pm 0,6$
1,0	$76,4 \pm 0,4$	$2,8 \pm 0,2$	$11,8 \pm 0,1$	$11,8 \pm 0,5$
2,0	$81,3 \pm 0,5$	$2,8 \pm 0,3$	$5,6 \pm 0,05$	$13,2 \pm 0,5$
4,0	$84,2 \pm 0,5$	$3,2 \pm 0,3$	$2,1 \pm 0,02$	$13,7 \pm 0,5$
8,0	$84,8 \pm 0,5$	$4,1 \pm 0,3$	$0,6 \pm 0,01$	$14,6 \pm 0,5$

Таблица 5

Зависимость параметров ливня в стекле F-2
с предшествующими конверторами (С) от координаты
падения γ -квантов Y_{in} .

$Y_{in, см}$	$E_a, \%$	$\delta, \%$	$S', \%$	$F, \%$	$C, \%$
$E_\gamma = 5 \text{ ГэВ}, E_{cut}^e = 1,5 \text{ МэВ}$					
0,1	$42,3 \pm 1,1$	$26,3 \pm 2,6$	$56,1 \pm 2,3$	$1,2 \pm 0,1$	$0,39 \pm 0,02$
0,5	$64,4 \pm 0,9$	$10,7 \pm 1,4$	$33,3 \pm 1,2$	$1,7 \pm 0,2$	$0,62 \pm 0,03$
1,0	$77,6 \pm 0,6$	$5,5 \pm 0,5$	$19,3 \pm 0,7$	$2,6 \pm 0,3$	$0,53 \pm 0,03$
2,0	$87,0 \pm 0,4$	$2,9 \pm 0,3$	$10,0 \pm 0,3$	$2,5 \pm 0,2$	$0,56 \pm 0,03$
4,0	$92,1 \pm 0,3$	$2,4 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,2$	$2,9 \pm 0,3$	$0,58 \pm 0,04$
8,0	$95,1 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,2$	$0,49 \pm 0,03$
$E_\gamma = 10 \text{ ГэВ}, E_{cut}^e = 1,5 \text{ МэВ}$					
0,1	$44,6 \pm 0,9$	$19,8 \pm 2,5$	$53,5 \pm 1,9$	$1,7 \pm 0,2$	$0,20 \pm 0,01$
0,5	$68,8 \pm 0,5$	$7,4 \pm 0,7$	$28,1 \pm 0,6$	$2,9 \pm 0,2$	$0,27 \pm 0,02$
1,0	$78,8 \pm 0,4$	$3,7 \pm 0,3$	$17,7 \pm 0,5$	$3,2 \pm 0,3$	$0,27 \pm 0,02$
2,0	$88,3 \pm 0,4$	$2,8 \pm 0,2$	$7,7 \pm 0,2$	$3,8 \pm 0,4$	$0,27 \pm 0,02$
4,0	$93,0 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,2$	$3,2 \pm 0,1$	$3,6 \pm 0,2$	$0,28 \pm 0,02$
8,0	$94,7 \pm 0,3$	$1,8 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,03$	$4,1 \pm 0,3$	$0,29 \pm 0,02$
$E_\gamma = 50 \text{ ГэВ}, E_{cut}^e = 5,0 \text{ МэВ}$					
0,1	$46,7 \pm 0,4$	$9,5 \pm 0,8$	$48,9 \pm 0,9$	$4,4 \pm 0,3$	$0,05 \pm 0,00$
0,5	$69,7 \pm 0,3$	$3,8 \pm 0,3$	$24,0 \pm 0,3$	$6,2 \pm 0,4$	$0,06 \pm 0,00$
1,0	$78,8 \pm 0,3$	$2,5 \pm 0,3$	$14,2 \pm 0,2$	$6,8 \pm 0,3$	$0,07 \pm 0,00$
2,0	$85,2 \pm 0,3$	$1,9 \pm 0,2$	$7,0 \pm 0,1$	$7,8 \pm 0,4$	$0,06 \pm 0,00$
$E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}, E_{cut}^e = 10 \text{ МэВ}$					
0,1	$48,0 \pm 0,3$	$7,1 \pm 0,8$	$46,4 \pm 0,6$	$5,5 \pm 0,3$	$0,04 \pm 0,00$
0,5	$70,1 \pm 0,3$	$2,5 \pm 0,1$	$21,5 \pm 0,1$	$8,4 \pm 0,4$	$0,03 \pm 0,00$
1,0	$78,5 \pm 0,4$	$2,5 \pm 0,2$	$12,1 \pm 0,2$	$9,3 \pm 0,5$	$0,03 \pm 0,00$
2,0	$84,0 \pm 0,4$	$2,2 \pm 0,2$	$5,8 \pm 0,1$	$10,2 \pm 0,5$	$0,04 \pm 0,00$

Таблица 6

Зависимость параметров ливней в ЭМК из стекла F-2
и слоя ОГВ от Z_1 -координаты слоя ОГВ (см. рис.4).

Энергия γ -квантов $E_\gamma = 5$ ГэВ, $Y_{in} = 0,1$ см.

$Z_1, \text{см}$	$E_a, \%$	$\delta, \%$	$E_a(\text{F-2}), \%$	$E_a(\text{ОГВ}), \%$
10	$87,9 \pm 0,7$	$3,4 \pm 0,3$	$60,0 \pm 0,5$	$27,9 \pm 0,5$
12	$88,9 \pm 0,7$	$2,8 \pm 0,2$	$59,1 \pm 0,5$	$29,8 \pm 0,5$
<u>14</u>	$89,4 \pm 0,6$	$3,0 \pm 0,3$	$57,9 \pm 0,4$	$31,5 \pm 0,5$
16	$88,3 \pm 0,6$	$3,0 \pm 0,2$	$57,5 \pm 0,5$	$30,8 \pm 0,5$
18	$88,2 \pm 0,7$	$3,3 \pm 0,3$	$56,7 \pm 0,5$	$31,5 \pm 0,5$
20	$87,4 \pm 0,6$	$3,5 \pm 0,4$	$56,8 \pm 0,4$	$30,6 \pm 0,4$
22	$86,1 \pm 0,7$	$3,9 \pm 0,3$	$55,9 \pm 0,5$	$30,2 \pm 0,5$
24	$84,2 \pm 0,6$	$4,5 \pm 0,5$	$54,8 \pm 0,5$	$29,4 \pm 0,5$

Таблица 7

Зависимость параметров ливней в калориметре из стекла F-2, сопряженного с ОГВ, от координаты падения γ -квантов Y_{in} .

$Y_{in}, \text{см}$	$E_a, \%$	$\delta, \%$	$E_a (F-2)\%$	$E_a (ОГВ)\%$	$S, \%$	$F, \%$
1	2	3	4	5	6	7
$E_\gamma = 5 \text{ ГэВ}, E_{cut}^\Theta = 1,5 \text{ МэВ}$						
-2,3	$57,0 \pm 0,4$	$10,9 \pm 1,4$	$3,2 \pm 0,1$	$53,8 \pm 0,4$	$42,1 \pm 0,4$	$0,94 \pm 0,08$
-1,9	$80,1 \pm 0,2$	$4,2 \pm 0,4$	$4,8 \pm 0,1$	$75,3 \pm 0,2$	$18,3 \pm 0,2$	$1,5 \pm 0,1$
-1,4	$88,3 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,2$	$7,0 \pm 0,1$	$81,4 \pm 0,1$	$10,1 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,1$
-0,4	$93,9 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,1$	$15,5 \pm 0,2$	$76,4 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,1$	$2,1 \pm 0,1$
0,1	$88,8 \pm 0,6$	$3,0 \pm 0,2$	$59,4 \pm 0,4$	$29,4 \pm 0,5$	$7,3 \pm 0,3$	$3,9 \pm 0,3$
0,5	$89,7 \pm 0,4$	$3,3 \pm 0,3$	$74,7 \pm 0,3$	$15,0 \pm 0,3$	$6,1 \pm 0,2$	$4,3 \pm 0,2$
1,0	$91,1 \pm 0,3$	$2,8 \pm 0,2$	$82,9 \pm 0,3$	$8,2 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,1$	$4,5 \pm 0,3$
2,0	$92,7 \pm 0,3$	$2,0 \pm 0,2$	$89,2 \pm 0,2$	$3,6 \pm 0,1$	$2,9 \pm 0,1$	$4,4 \pm 0,2$
4,0	$93,8 \pm 0,3$	$2,0 \pm 0,2$	$92,6 \pm 0,3$	$1,3 \pm 0,04$	$1,7 \pm 0,04$	$4,5 \pm 0,3$
8,0	$94,5 \pm 0,3$	$2,0 \pm 0,1$	$94,1 \pm 0,3$	$0,3 \pm 0,02$	$0,66 \pm 0,02$	$4,9 \pm 0,3$
$E_\gamma = 10 \text{ ГэВ}, E_{cut}^\Theta = 1,5 \text{ МэВ}$						
-2,3	$56,4 \pm 0,3$	$9,3 \pm 0,8$	$3,2 \pm 0,1$	$53,2 \pm 0,3$	$42,3 \pm 0,3$	$1,3 \pm 0,1$
-1,9	$80,0 \pm 0,2$	$3,0 \pm 0,3$	$4,9 \pm 0,04$	$75,1 \pm 0,2$	$17,9 \pm 0,1$	$2,1 \pm 0,1$
-1,4	$87,6 \pm 0,2$	$1,6 \pm 0,1$	$7,0 \pm 0,1$	$80,6 \pm 0,2$	$9,9 \pm 0,1$	$2,4 \pm 0,2$
-0,4	$93,2 \pm 0,2$	$1,3 \pm 0,1$	$17,3 \pm 0,1$	$75,9 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,1$	$2,9 \pm 0,2$
0,1	$87,2 \pm 0,5$	$2,7 \pm 0,3$	$58,3 \pm 0,3$	$29,0 \pm 0,4$	$7,5 \pm 0,3$	$5,2 \pm 0,2$
0,5	$88,6 \pm 0,4$	$2,7 \pm 0,2$	$73,5 \pm 0,3$	$15,0 \pm 0,2$	$6,0 \pm 0,2$	$5,5 \pm 0,3$
1,0	$90,0 \pm 0,3$	$3,0 \pm 0,2$	$81,7 \pm 0,2$	$8,3 \pm 0,1$	$4,6 \pm 0,1$	$5,5 \pm 0,2$
2,0	$90,8 \pm 0,4$	$2,6 \pm 0,2$	$87,2 \pm 0,4$	$3,5 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,1$	$6,2 \pm 0,5$
4,0	$91,5 \pm 0,4$	$2,3 \pm 0,2$	$90,3 \pm 0,4$	$1,2 \pm 0,03$	$1,7 \pm 0,03$	$6,8 \pm 0,5$
8,0	$93,2 \pm 0,3$	$2,1 \pm 0,1$	$92,9 \pm 0,3$	$0,3 \pm 0,01$	$0,68 \pm 0,02$	$6,1 \pm 0,3$

Таблица 7
(продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
$E_\gamma = 50 \text{ ГэВ}, E_{\text{cut}}^e = 5,0 \text{ МэВ}$						
-2,3	$58,7 \pm 0,2$	$4,2 \pm 0,3$	$2,6 \pm 0,02$	$56,1 \pm 0,2$	$38,7 \pm 0,2$	$2,6 \pm 0,1$
-1,9	$81,0 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,2$	$3,9 \pm 0,02$	$77,2 \pm 0,2$	$14,7 \pm 0,1$	$4,3 \pm 0,2$
-1,4	$87,7 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,1$	$5,5 \pm 0,02$	$82,3 \pm 0,2$	$7,6 \pm 0,1$	$4,7 \pm 0,2$
-0,4	$91,2 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,2$	$16,4 \pm 0,1$	$74,9 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,1$	$5,3 \pm 0,2$
0,1	$79,0 \pm 0,5$	$7,2 \pm 0,5$	$54,1 \pm 0,4$	$25,0 \pm 0,4$	$9,8 \pm 0,3$	$11,1 \pm 0,4$
0,5	$81,5 \pm 0,4$	$5,9 \pm 0,6$	$69,7 \pm 0,4$	$11,8 \pm 0,2$	$7,6 \pm 0,2$	$10,9 \pm 0,4$
1,0	$82,0 \pm 0,5$	$5,1 \pm 0,5$	$76,1 \pm 0,5$	$5,9 \pm 0,1$	$5,6 \pm 0,1$	$12,4 \pm 0,5$
2,0	$85,5 \pm 0,4$	$4,1 \pm 0,6$	$82,9 \pm 0,4$	$2,5 \pm 0,1$	$3,3 \pm 0,1$	$11,3 \pm 0,4$
4,0	$86,7 \pm 0,4$	$3,6 \pm 0,4$	$86,0 \pm 0,4$	$0,8 \pm 0,02$	$1,6 \pm 0,02$	$11,7 \pm 0,5$
8,0	$88,2 \pm 0,4$	$3,1 \pm 0,2$	$88,0 \pm 0,4$	$0,2 \pm 0,01$	$0,56 \pm 0,01$	$11,3 \pm 0,4$
$E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}, E_{\text{cut}}^e = 10 \text{ МэВ}$						
-2,3	$60,8 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,3$	$2,2 \pm 0,01$	$58,7 \pm 0,2$	$35,3 \pm 0,1$	$3,9 \pm 0,2$
-1,9	$82,0 \pm 0,3$	$2,1 \pm 0,3$	$3,2 \pm 0,02$	$78,8 \pm 0,3$	$14,4 \pm 0,1$	$5,6 \pm 0,3$
-1,4	$88,5 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,1$	$4,5 \pm 0,02$	$84,0 \pm 0,2$	$6,1 \pm 0,1$	$5,4 \pm 0,2$
-0,4	$91,8 \pm 0,3$	$1,5 \pm 0,2$	$14,5 \pm 0,1$	$77,3 \pm 0,3$	$2,6 \pm 0,1$	$5,6 \pm 0,3$
0,1	$77,1 \pm 0,5$	$9,4 \pm 0,8$	$53,8 \pm 0,4$	$23,3 \pm 0,4$	$10,5 \pm 0,3$	$12,4 \pm 0,4$
0,5	$79,7 \pm 0,5$	$7,6 \pm 0,6$	$69,5 \pm 0,4$	$10,2 \pm 0,2$	$7,4 \pm 0,1$	$12,9 \pm 0,5$
1,0	$81,1 \pm 0,4$	$6,0 \pm 0,5$	$76,2 \pm 0,4$	$5,0 \pm 0,1$	$5,2 \pm 0,1$	$13,7 \pm 0,5$
2,0	$84,0 \pm 0,4$	$4,4 \pm 0,4$	$82,1 \pm 0,4$	$1,9 \pm 0,1$	$2,9 \pm 0,1$	$13,1 \pm 0,4$
4,0	$85,0 \pm 0,4$	$3,5 \pm 0,3$	$84,5 \pm 0,4$	$0,6 \pm 0,01$	$1,3 \pm 0,01$	$13,7 \pm 0,4$
8,0	$86,0 \pm 0,4$	$4,1 \pm 0,3$	$85,9 \pm 0,4$	$0,1 \pm 0,00$	$0,41 \pm 0,00$	$13,6 \pm 0,4$

Таблица 8

Зависимость параметров ливней в фотонном
детекторе от Z_1 -координаты слоя ОГВ.

Толщина конверторов $\Delta=0,9$ см.

$Z_1, \text{см}$	$E_a, \%$	$\delta, \%$	$E_a(F-2), \%$	$E_a(\text{ОГВ}), \%$
$E_\gamma = 5 \text{ ГэВ}, Y_{in} = 0,5 \text{ см}$				
6	$88,3 \pm 0,9$	$4,0 \pm 0,4$	$70,9 \pm 0,6$	$17,4 \pm 0,6$
8	$90,0 \pm 1,0$	$4,1 \pm 0,3$	$70,4 \pm 0,7$	$19,6 \pm 0,7$
10	$90,1 \pm 1,0$	$4,0 \pm 0,3$	$70,4 \pm 0,7$	$19,7 \pm 0,7$
12	$90,2 \pm 1,0$	$4,0 \pm 0,4$	$70,0 \pm 0,7$	$20,3 \pm 0,7$
14	$90,1 \pm 1,1$	$4,0 \pm 0,3$	$69,4 \pm 0,8$	$20,7 \pm 0,7$
16	$89,9 \pm 1,0$	$4,0 \pm 0,3$	$69,9 \pm 0,7$	$20,0 \pm 0,7$
18	$88,9 \pm 0,9$	$4,0 \pm 0,3$	$69,8 \pm 0,7$	$19,1 \pm 0,6$
20	$88,3 \pm 0,7$	$4,3 \pm 0,3$	$70,2 \pm 0,7$	$18,1 \pm 0,6$
$E_\gamma = 5 \text{ ГэВ}, Y_{in} = 1,0 \text{ см}$				
6	$89,8 \pm 0,6$	$4,0 \pm 0,3$	$79,7 \pm 0,5$	$10,1 \pm 0,4$
8	$90,2 \pm 0,7$	$3,7 \pm 0,3$	$79,4 \pm 0,5$	$10,7 \pm 0,5$
10	$90,6 \pm 0,6$	$3,7 \pm 0,3$	$79,6 \pm 0,5$	$11,0 \pm 0,4$
12	$90,7 \pm 0,7$	$2,6 \pm 0,2$	$78,8 \pm 0,6$	$12,0 \pm 0,5$
14	$91,0 \pm 0,5$	$3,1 \pm 0,3$	$80,6 \pm 0,4$	$10,4 \pm 0,3$
16	$91,3 \pm 0,7$	$3,1 \pm 0,3$	$79,8 \pm 0,5$	$11,6 \pm 0,4$
18	$90,7 \pm 0,7$	$3,2 \pm 0,3$	$79,0 \pm 0,6$	$11,7 \pm 0,5$
20	$90,3 \pm 0,6$	$3,3 \pm 0,3$	$79,6 \pm 0,5$	$10,7 \pm 0,4$

Таблица 9

Зависимость параметров ливней в фотонном
детекторе от координаты падения γ -квантов Y_{in} .

$Y_{in}, \text{см}$	$E_a, \%$	$\delta, \%$	$E_a (F-2)\%$	$E_a (ОГВ)\%$	$S, \%$	$F, \%$
1	2	3	4	5	6	7
$E_\gamma = 5 \text{ ГэВ}, E_{cut}^\Theta = 1,0 \text{ МэВ}, C = (0,66 \pm 0,04)\%$						
0,1	$89,7 \pm 1,2$	$3,9 \pm 1,3$	$52,8 \pm 0,8$	$36,9 \pm 0,9$	$7,4 \pm 0,3$	$2,5 \pm 0,1$
0,5	$90,0 \pm 1,0$	$2,9 \pm 0,4$	$70,2 \pm 0,7$	$19,8 \pm 0,7$	$6,5 \pm 0,2$	$3,2 \pm 0,2$
1,0	$91,2 \pm 0,7$	$3,4 \pm 0,4$	$80,0 \pm 0,5$	$11,2 \pm 0,4$	$5,4 \pm 0,2$	$3,0 \pm 0,2$
2,0	$92,6 \pm 0,5$	$2,7 \pm 0,2$	$87,3 \pm 0,4$	$5,3 \pm 0,3$	$3,8 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,2$
4,0	$94,2 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,2$	$92,4 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,1$	$2,1 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,2$
8,0	$95,1 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,2$	$94,7 \pm 0,3$	$0,43 \pm 0,02$	$0,93 \pm 0,05$	$3,5 \pm 0,3$
$E_\gamma = 10 \text{ ГэВ}, E_{cut}^\Theta = 1,0 \text{ МэВ}, C = (0,31 \pm 0,02)\%$						
0,1	$88,9 \pm 0,8$	$3,6 \pm 0,3$	$55,0 \pm 0,5$	$33,9 \pm 0,6$	$7,2 \pm 0,3$	$3,7 \pm 0,2$
0,5	$89,2 \pm 0,6$	$3,0 \pm 0,2$	$72,3 \pm 0,4$	$16,9 \pm 0,4$	$6,5 \pm 0,2$	$4,1 \pm 0,2$
1,0	$90,5 \pm 0,4$	$2,4 \pm 0,2$	$81,2 \pm 0,3$	$9,3 \pm 0,2$	$5,1 \pm 0,2$	$4,2 \pm 0,3$
2,0	$91,6 \pm 0,3$	$2,3 \pm 0,2$	$87,2 \pm 0,3$	$4,4 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,1$	$4,7 \pm 0,3$
4,0	$93,4 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,2$	$91,9 \pm 0,2$	$1,6 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,1$	$4,4 \pm 0,2$
8,0	$94,7 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,1$	$94,4 \pm 0,2$	$0,39 \pm 0,02$	$0,78 \pm 0,02$	$4,2 \pm 0,2$
$E_\gamma = 50 \text{ ГэВ}, E_{cut}^\Theta = 5,0 \text{ МэВ}, C = (0,05 \pm 0,003)\%$						
0,1	$84,8 \pm 0,5$	$3,8 \pm 0,5$	$55,6 \pm 0,3$	$29,2 \pm 0,4$	$7,9 \pm 0,3$	$7,2 \pm 0,3$
0,5	$85,9 \pm 0,4$	$3,6 \pm 0,3$	$71,7 \pm 0,3$	$14,2 \pm 0,3$	$6,6 \pm 0,2$	$7,4 \pm 0,3$
1,0	$86,7 \pm 0,4$	$2,7 \pm 0,3$	$79,2 \pm 0,3$	$7,5 \pm 0,1$	$4,9 \pm 0,1$	$8,3 \pm 0,4$
2,0	$88,9 \pm 0,3$	$1,9 \pm 0,2$	$85,7 \pm 0,3$	$3,1 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,1$	$8,0 \pm 0,3$
4,0	$89,8 \pm 0,4$	$2,3 \pm 0,3$	$88,7 \pm 0,4$	$1,0 \pm 0,02$	$1,6 \pm 0,02$	$8,6 \pm 0,4$
8,0	$90,3 \pm 0,4$	$2,4 \pm 0,2$	$90,1 \pm 0,4$	$0,25 \pm 0,01$	$0,60 \pm 0,01$	$9,0 \pm 0,4$

Таблица 9

(продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
$E_\gamma = 100 \text{ ГэВ}, \quad E_{\text{cut}}^\Theta = 10 \text{ МэВ}, \quad C = (0,03 \pm 0,003)\%$						
0,1	$82,9 \pm 0,5$	$6,2 \pm 0,8$	$55,8 \pm 0,3$	$27,1 \pm 0,4$	$8,0 \pm 0,2$	$9,0 \pm 0,4$
0,5	$82,7 \pm 0,4$	$4,1 \pm 0,6$	$71,1 \pm 0,4$	$11,6 \pm 0,2$	$6,5 \pm 0,2$	$10,8 \pm 0,5$
1,0	$85,9 \pm 0,3$	$3,4 \pm 0,4$	$79,6 \pm 0,3$	$6,3 \pm 0,1$	$4,5 \pm 0,1$	$9,6 \pm 0,4$
2,0	$86,9 \pm 0,4$	$3,5 \pm 0,3$	$84,5 \pm 0,4$	$2,5 \pm 0,1$	$2,7 \pm 0,03$	$10,3 \pm 0,4$
4,0	$88,1 \pm 0,4$	$2,6 \pm 0,2$	$87,3 \pm 0,4$	$0,7 \pm 0,02$	$1,3 \pm 0,01$	$10,6 \pm 0,4$
8,0	$89,0 \pm 0,4$	$2,6 \pm 0,2$	$88,8 \pm 0,4$	$0,15 \pm 0,00$	$0,43 \pm 0,00$	$10,6 \pm 0,4$

Таблица 10

Зависимость энергетического разрешения δ фотонного детектора от координаты падения γ -квантов Y_{in} при разных энергиях γ -квантов.

$\Delta = 0,9 \text{ см}$							
E_γ , ГэВ	$\delta, \%$						
	$Y_{in} = -2,3$	$-1,9$	$-1,4$	$-0,4$	$0,1$	$0,5$	$8,0$
5	$10,9 \pm 1,4$	$4,2 \pm 0,4$	$2,1 \pm 0,2$	$1,2 \pm 0,1$	$3,9 \pm 1,3$	$2,9 \pm 0,4$	$2,0 \pm 0,2$
10	$9,3 \pm 0,8$	$3,0 \pm 0,3$	$1,6 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,1$	$3,6 \pm 0,3$	$3,0 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,1$
50	$4,2 \pm 0,3$	$2,2 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,2$	$3,8 \pm 0,5$	$3,6 \pm 0,3$	$2,4 \pm 0,2$
100	$3,5 \pm 0,3$	$2,1 \pm 0,3$	$1,9 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,2$	$6,2 \pm 0,8$	$4,1 \pm 0,6$	$2,6 \pm 0,2$
$\Delta = 2,5 \text{ см}$							
E_γ , ГэВ	$\delta, \%$						
	$Y_{in} = -2,3$	$-1,9$	$-1,4$	$-0,4$	$0,1$	$0,5$	$8,0$
5	$10,9 \pm 1,4$	$4,2 \pm 0,4$	$2,1 \pm 0,2$	$1,2 \pm 0,1$	$11,0 \pm 1,1$	$14,1 \pm 1,3$	$7,8 \pm 0,5$
10	$9,3 \pm 0,8$	$3,0 \pm 0,3$	$1,6 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,1$	$8,0 \pm 0,6$	$10,6 \pm 2,1$	$5,4 \pm 0,4$
50	$4,2 \pm 0,3$	$2,2 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,2$	$4,8 \pm 0,4$	$3,8 \pm 0,3$	$2,3 \pm 0,2$
100	$3,5 \pm 0,3$	$2,1 \pm 0,3$	$1,9 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,2$	$5,9 \pm 0,5$	$3,8 \pm 0,4$	$2,3 \pm 0,3$