

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ЛИВНЕЙ В НЕИДЕАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КАЛОРИМЕТРАХ

© 2011 г. А. А. Леднев

ГНЦ РФ “Институт физики высоких энергий”  
Россия, 142281, Протвино Московской обл., ул. Победы, 1  
Поступила в редакцию 06.05.2011 г.

Разработана система контроля качества экспериментальных данных, записанных при эксплуатации экспериментальных установок типа ГАМС. Наличие мертвых и шумящих ячеек осложняет реконструкцию ливней. Предложена и реализована процедура, позволяющая корректно обходить эти трудности. Программа испытана на данных с установки ГАМС-4л. Приводится сравнение с результатами реконструкции стандартной для этой установки программой.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Передняя часть спектрометра ГАМС-4л – это квадратная матрица размером  $48 \times 48$  ячеек с радиаторами из свинцового стекла ТФ-1. Поперечный размер ячейки 38 и длина 450 мм. Центральные  $4 \times 4$  ячейки заменены на 60 кристаллов из вольфрамата свинца  $PbWO_4$  с поперечным размером 19 и длиной 200 мм. Четыре кристалла в центре детектора отсутствуют и образуют отверстие для частиц пучка. Черенковский свет, образующийся в ячейках из свинцового стекла, регистрируется фотоумножителями ФЭУ-84/3, а свет из кристаллов  $PbWO_4$  – фотоумножителями ФЭУ-119. Для контроля за работой регистрирующей электроники используется свет от светодиодов, подведенный оптоволоконными кабелями к каждой из ячеек детектора.

Первые сеансы на спектрометрах ГАМС [1] в Протвино и ГАМС-4000 [2] в ЦЕРН были проведены в 1981 г. С тех пор эти установки с небольшими изменениями использовались и продолжают работать как в Протвино (ГАМС-2000, ГАМС-4л, ОКА), так и в ЦЕРН (NA-12, NA-12/2, WA-102, COMPASS). Естественно, что эксплуатация установок в течение 30 лет не проходит бесследно. И если изменение прозрачности свинцового стекла под влиянием радиации привело лишь к небольшому ухудшению энергетического разрешения, то старение контактов постепенно превращается в серьезную проблему.

Отсутствие контакта с центральной жилой сигнального кабеля или отсутствие высокого напряжения на фотоумножителе приводит к отсутствию сигнала от светодиода и легко определяется системой контроля. Плохой контакт с оплеткой сигнального кабеля приводит к дополнительному шуму ячейки, что тоже заметно, но требует более аккуратного контроля. Отсутствие напряжения питания на каком-либо из диодов фотоумножителя

кроме изменения коэффициента усиления часто приводит к нелинейности фотоумножителя. Это не определяется системой контроля и может быть частично скорректировано только программой реконструкции ливней.

Программа реконструкции ливней для спектрометров ГАМС была написана в 1981 г. [3] и модернизирована с целью ускорения работы в 1993 г. [4]. В первых сеансах на установках ГАМС было 2–3 мертвых и столько же шумящих ячеек где-то на периферии спектрометра, что не оказывало существенного влияния на характеристики детектора. Постепенно ситуация ухудшалась, и при реконструкции сеанса 2004 г. на установке ГАМС-4л возникли серьезные трудности, что и послужило толчком к существенной переработке программы реконструкции ливней.

Создана новая версия программы реконструкции, которая используется сейчас в эксперименте ОКА в ИФВЭ и в эксперименте COMPASS (NA-58) [5] в ЦЕРН.

### 2. АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ДАННЫХ

Координаты и энергии ливней находятся фитированием кластера с использованием формы электромагнитного ливня [6]. (О процедуре фита позже.) По результатам фита вычисляется ожидаемое энерговыделение в каждой из ячеек ( $E_{fit}$ ) и сравнивается с измеренной величиной ( $E_{exp}$ ). Накапливаются средние значения отношения  $E_{exp}/E_{fit}$  и их дисперсии.

В качестве примера на рис. 1а–1в показаны отношения  $E_{exp}/E_{fit}$  для ячеек в колонках соответственно 39, 21 и 19. Четко заметны неработающая ячейка  $X=39, Y=25$ , шумящая ячейка  $X=21, Y=24$  и ячейка с неправильным калибровочным коэффициентом  $X=19, Y=18$ .

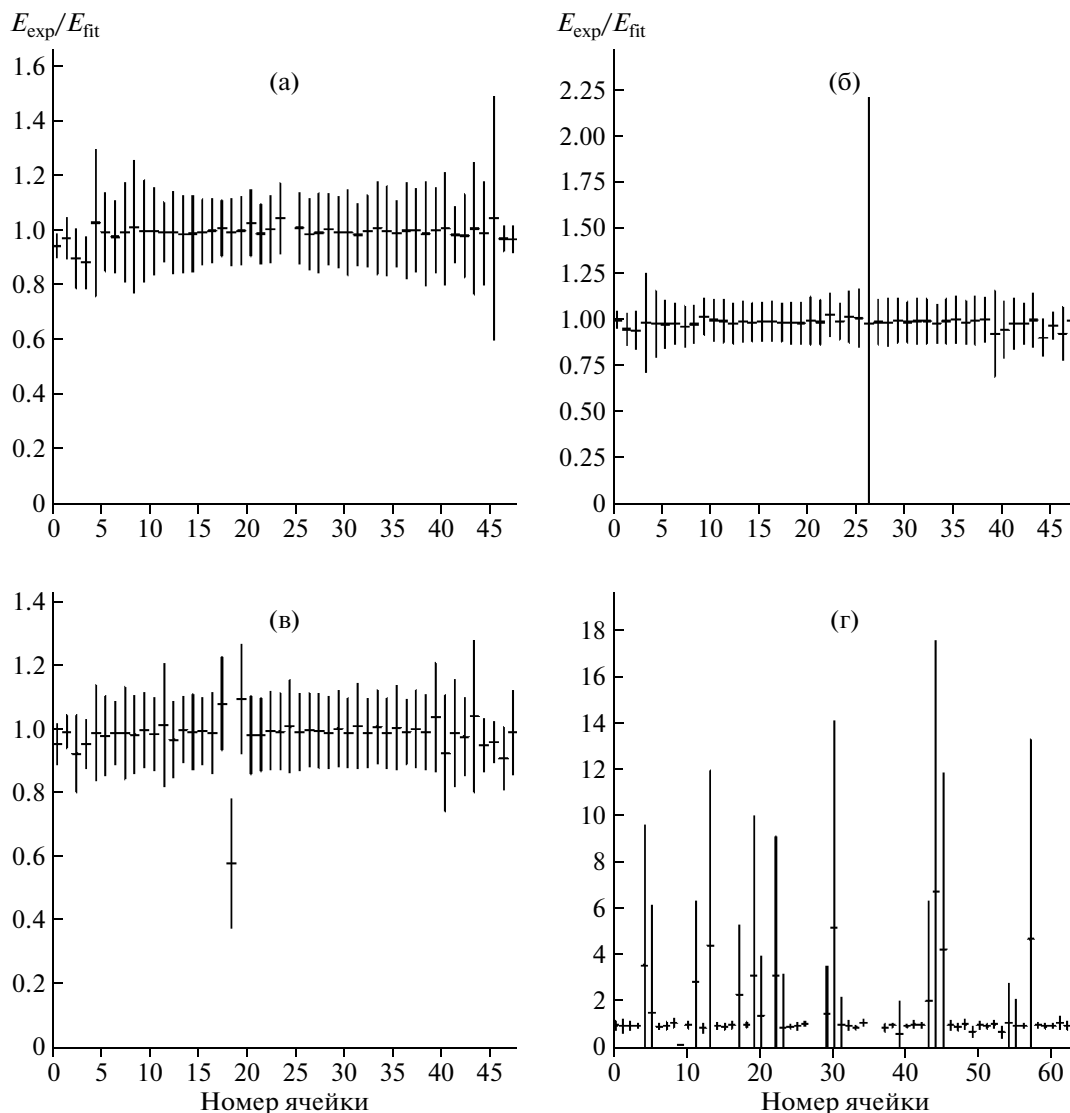


Рис. 1. Отношения  $E_{\text{exp}}/E_{\text{fit}}$  и их флуктуации для ячеек колонок 39 (а), 21 (б), 19 (в) и центральной зоны (г).

В центральной части детектора (кристаллы  $\text{PbWO}_4$ ) ситуация гораздо хуже (рис. 1г). Здесь, кроме естественного отверстия для пучка (ячейки 27, 28, 35 и 36), наблюдается много шумящих и две неработающих (9 и 21) ячейки.

### 3. РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЛИВНЕЙ

#### 3.1. Алгоритм программы реконструкции 1993 года

1. Поиск кластеров. Кластер — это множество соприкасающихся ячеек с энерговыделением выше порога. Далее кластеры обрабатываются независимо друг от друга.

2. Поиск пиков в кластере и определение зоны пика. Измеренные энергии в ячейках делятся между

пиками пропорционально ожидаемому энерговыделению. Это итерационная процедура.

3. Зона пика фитируется одним, а затем, если необходимо, то двумя ливнями. Суммарное энерговыделение в пике и координаты центра тяжести ливней фиксируются, поэтому пик с двумя ливнями фитируется в трехмерном пространстве. Спуск против градиента с переменным шагом.

Достоинства этой программы:

- 1) возможность разделения ливней с расстоянием между ними выше 2 см;
- 2) высокая скорость реконструкции; время реконструкции событий примерно совпадало с временем набора статистики.

Недостатки:

- 1) фиксирование измеренной энергии и центра тяжести пика приводит к невозможности кор-

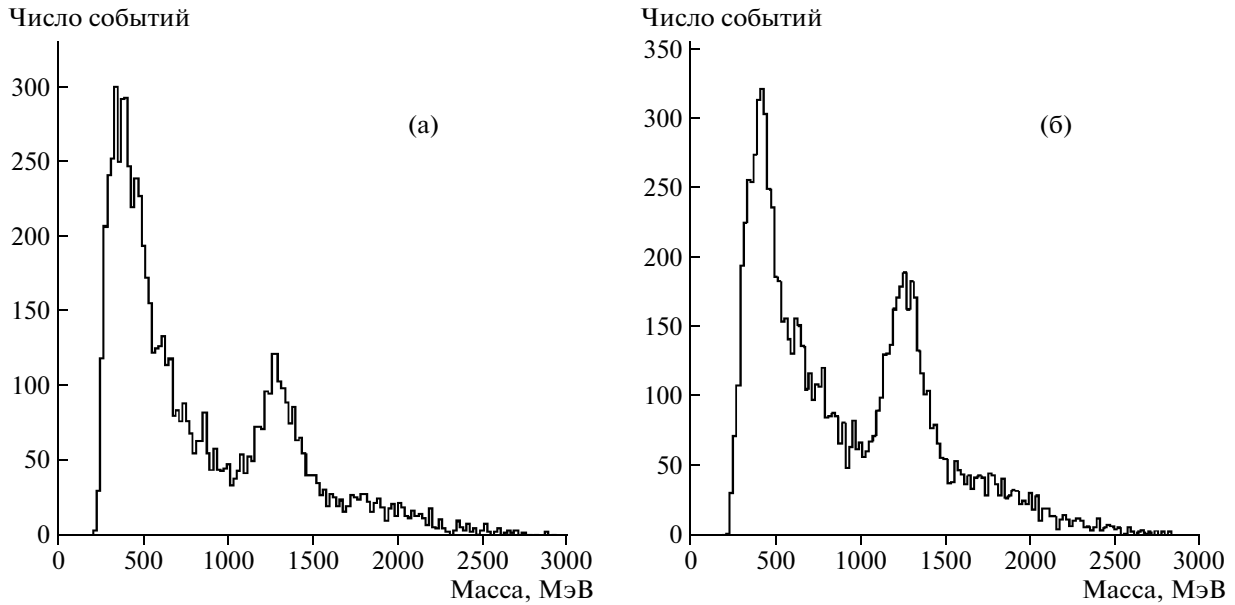


Рис. 2. Масса  $2\pi^0$ -событий: а – реконструкция 1993 года, б – новая реконструкция.

ректно учитывать наличие мертвых и шумящих ячеек;

2) ограничение количества ливней в одном пике (не более двух); на практике это ограничение не очень существенно, так как такие события встречаются крайне редко.

### 3.2. Алгоритм новой программы реконструкции

1. Поиск кластеров. Изменения в процедуре поиска кластеров чисто декоративные.

2. Каждый кластер окружается ячейками с малым энерговыделением. (Половина величины порога). Такое окружение препятствует выходу ливня при фитировании за пределы области кластера, а малая добавка компенсирует потерю энергии в ячейках с энерговыделением ниже порога.

3. Поиск пиков отсутствует. В каждом кластере может быть до 10 ливней. Число параметров фита равно числу ливней, умноженному на 3.

4. Шумящим и мертвым ячейкам приписывается большая ошибка.

5. Минимизируется значение функционала

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{cell}}} (E_i^{\text{exp}} - E_i^{\text{fit}})^2}{\sigma_i^2},$$

где  $E_i^{\text{fit}} = \sum_{k=1}^{N_\gamma} E_i(E_k, X_k, Y_k)$ ;  $N_\gamma$  – число ливней;  $k$  – номер ливня;  $N_{\text{cell}}$  – число ячеек;  $i$  – номер ячейки. Параметрами фита являются энергии и координаты ливней ( $E_k$ ,  $X_k$  и  $Y_k$ ).

Форма ливня [6] позволяет вычислить ожидаемое энерговыделение в любой из ячеек детектора. Поскольку форма ливня представлена в аналитическом виде, легко вычислить и производные этого функционала. Фит проводится комбинацией двух методов: сначала делается несколько итераций методом градиентного спуска, а потом методом Ньютона, т.е. обращением матрицы вторых производных (Гессе).

**3.2.1. Метод градиентного спуска.** Спуск осуществляется против направления градиента. Первоначально величина шага (step) определяется по формуле:

$$\text{Step} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{d(\chi^2)}{dx_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( \frac{d^2(\chi^2)}{dx_i dx_j} \frac{d(\chi^2)}{dx_i} \frac{d(\chi^2)}{dx_j} \right)}$$

Величина шага хорошо определяется, если функция близка к квадратичной форме, в противном случае формула может дать значительную ошибку. Поэтому если  $\text{Step} < 0$ , то берется  $\text{Step} = 1$ . Если  $\chi^2$  возрастает, то шаг уменьшается, и процедура повторяется. Градиент вычисляется в каждой удачной итерации, а величина шага изменяется в зависимости от результата итерации.

Процедура надежно ведет к минимуму (иногда локальному). Чтобы не попадать в локальный минимум, важно правильно выбрать стартовую точку. Выбор стартовой точки для близко лежащих ливней изучался при отладке реконструкции 1993 года [4] и в этой реконструкции не менялся.

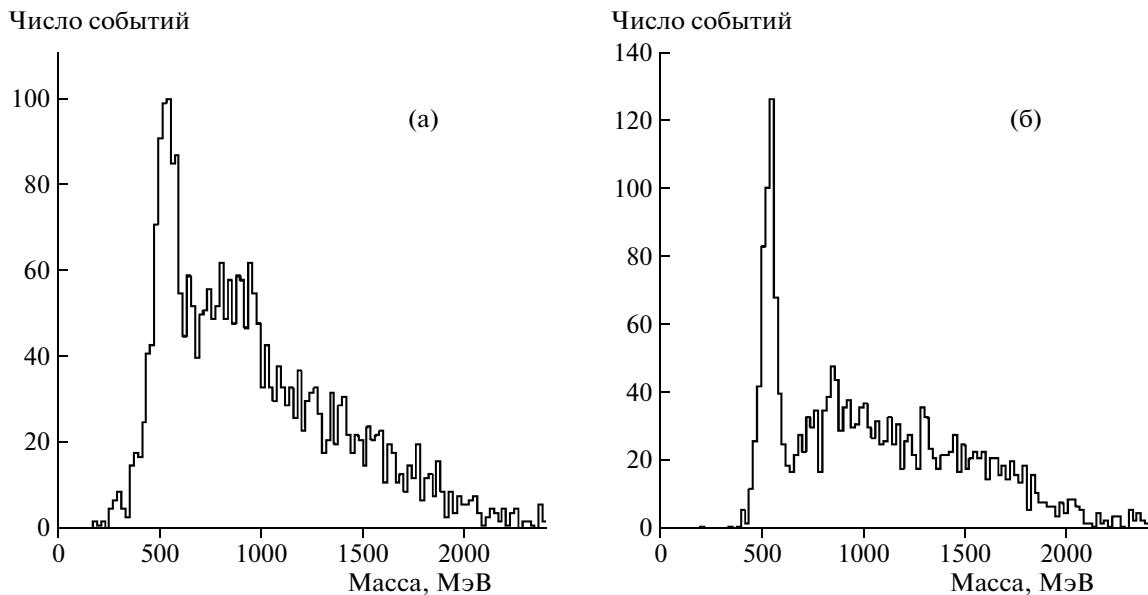


Рис. 3. Масса  $b\gamma$ -событий: а – реконструкция 1993 года, б – новая реконструкция.

### 3.2.2. Обращение матрицы вторых производных.

В методе Ньютона шаг итерации определяется как произведение матрицы, обратной к матрице Гессе, на градиент функции. При наличии корреляций, а в случае близко лежащих ливней корреляции существенны, этот метод сходится значительно быстрее, чем метод градиентного спуска. Так если функция является положительно определенной квадратичной формой, то решение находится за один шаг даже при наличии оврага. Но если начальная точка далека от минимума, то метод может расходиться. Поэтому в случае неудачного шага программа переключается на метод градиентного спуска, а затем попытка повторяется.

## 4. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ

Результаты реконструкции  $2\pi^0$ -событий приведены на рис. 2: рис. 2а получен с использованием варианта 1993 года, а рис. 2б – с новой реконструкцией. Заметно существенное увеличение эффективности при регистрации распада  $f_2(1270) \rightarrow 2\pi^0$ .

Еще большее различие наблюдается в области меньших масс, где существенно влияние центральной части детектора. На рис. 3 показана масса  $b\gamma$ -событий. Заметно улучшилось разрешение по массе  $\eta$ -мезона, а фон под ним упал в несколько раз.

## 5. ПРИМЕНЕНИЕ НОВОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ

Достоинство нового варианта программы реконструкции это его устойчивость к наличию

мертвых и шумящих ячеек. Недостаток – существенное замедление работы. Проверка скорости реконструкции на данных сеанса ГАМС-4п 2004 года показала замедление в 20 раз по сравнению с реконструкцией 1993 года.

Поэтому была принята следующая тактика. В ходе реконструкции контролировалась и сохранялась информация о мертвых и шумящих ячейках. После нахождения кластера проверялось наличие таких ячеек в зоне кластера. Если их нет, то использовался вариант 1993 года, а если они присутствуют, то новый вариант.

Удалось получить существенное улучшение качества реконструкции при незначительном увеличении времени.

Работа выполнена в рамках контракта 1061 (“Исследование структуры сильновзаимодействующих частиц и ядер на У-70”) с государственной корпорацией по атомной энергии “Росатом”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Binon F., Buyanov V.M., Donskov S.V. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1968. V. A248. P. 86.
2. Alde D., Binon F., Bricman C. et al. Preprint CERN-EP/87-28. Geneva, 1987.
3. Кулик А.В., Леднев А.А., Садовский С.А. и др. Препринт ИФВЭ 85-17. Серпухов, 1985.
4. Lednev A.A. Preprint IHEP 93-153. Protvino, 1993.
5. Abbon P., Albrecht E., Alexakhin V.Yu. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2007. V. A577. P. 455.
6. Lednev A.A. // Nucl. Instrum. and Methods. 1995. V. A366. P. 292.