

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРШИНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРИНО С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ OPERA

Ю. А. Горнушкин<sup>1</sup>, С. Г. Дмитриевский<sup>2</sup>, А. В. Чуканов<sup>3</sup>

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В эксперименте OPERA ведется поиск нейтринных осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в режиме прямого наблюдения появления тау-нейтрино в пучке мюонных нейтрино. В статье описана методика поиска вершины взаимодействия нейтрино (Brick Finding) с помощью электронных детекторов гибридной установки OPERA. Процедура локализации вершины включает реконструкцию мюонных треков, восстановление оси адронного ливня и определение блоков мишени, с наибольшей вероятностью содержащих вершину взаимодействия.

OPERA experiment is designed for the direct observation of  $\nu_\tau$  appearance from  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  oscillation in a  $\nu_\mu$  beam. Description of the procedure of neutrino interaction vertex localization (Brick Finding) by the electronic detectors of a hybrid OPERA setup is presented. The procedure includes muon track and hadronic shower axis reconstruction and determination of the target bricks with the highest probability to contain the vertex.

PACS: 07.05.Kf; 13.15.+g; 29.40.Gx; 29.40.Mk

### ВВЕДЕНИЕ

В эксперименте OPERA [1, 2] проводится поиск нейтринных осцилляций  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  в режиме прямого наблюдения появления  $\nu_\tau$  в изначально чистом пучке мюонных нейтрино из ЦЕРН. Детектор OPERA [3] установлен в подземной лаборатории Гран-Сассо (Италия) на расстоянии 730 км от ускорителя в Женеве (Швейцария) и позволяет регистрировать взаимодействия тау-нейтрино с высоким отношением «сигнал/фон». Осцилляции  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  принято считать ответственными за дефицит мюонных нейтрино в атмосферных каскадах [4], и экспериментальное подтверждение этого перехода является необходимым элементом модели смешивания трехкомпонентных нейтрино. В эксперименте OPERA тау-нейтрино регистрируются через канал заряженного тока путем прямого наблюдения рождения короткоживущего тау-лептона в первичной вершине нейтринного взаимодействия. Таким образом, к детектору предъявляются требования, которые трудно совместить: он должен иметь большую массу для увеличения статистики нейтринных событий

---

<sup>1</sup>E-mail: gornushk@yandex.ru

<sup>2</sup>E-mail: dmitr@jinr.ru

<sup>3</sup>E-mail: chukanov@jinr.ru

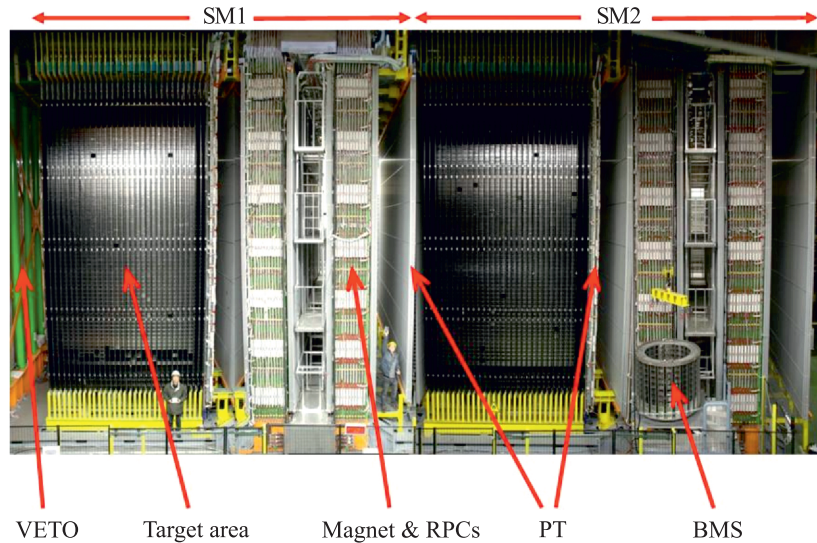


Рис. 1. Общий вид детектора OPERA: два одинаковых супермодуля (SM1 и SM2), каждый из которых включает в себя мишенную часть (target area), магнит (magnet), а также систему резистивных плоских камер (RPC) и дрейфовых трубок (PT). Мишенная часть содержит  $\sim 75\,000$  блоков, расположенных между плоскостями трековой системы целеуказания. Вето-система (VETO) используется для отбора нейтринных событий, имеющих начало внутри мишенной части. Для извлечения блоков из детектора служит робот BMS

и одновременно обладать очень хорошим пространственным разрешением для распознавания тау-лептона. Для решения этой задачи в эксперименте OPERA используется гибридный детектор (рис. 1), включающий в себя электронные детекторы (трековую систему целеуказания (ТСЦ), магнитные спектрометры) и мишенную часть, которая имеет модульную структуру и состоит из 150 000 блоков, объединенных в стенки, общей массой 1250 т. Каждый блок размером  $12 \times 10 \times 7,5$  см представляет собой набор из 56 свинцовых пластинок толщиной 1 мм (мишень), чередующихся с 57 пластинками ядерной фотоэмульсии, благодаря которой достигается микронное пространственное разрешение, необходимое для наблюдения тау-лептона.

Анализ данных в эксперименте происходит в два этапа: по информации от электронных детекторов определяется блок мишени, в котором произошло нейтринное взаимодействие, затем этот блок извлекается для поиска в нем треков и вершины события, а также детального изучения характеристик взаимодействия. При этом подавляющее большинство регистрируемых нейтринных событий происходят от взаимодействия мюонных нейтрино с веществом детектора по каналам заряженного ( $\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + X$ ) и нейтрального ( $\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + X$ ) токов (ЗТ и НТ). С помощью электронных детекторов определяется блок мишени, где произошло такое нейтринное событие, после чего подробный анализ топологии события в эмульсии позволяет выделить взаимодействия тау-нейтрино, появляющиеся в пучке в виде небольшой примеси в результате осцилляций. Поиск вершины, т. е. идентификация блока мишени, содержащего вершину взаимодействия нейтрино, путем анализа данных электронных детекторов является одной из важных задач обработки

данных эксперимента [5–10]. Более точная и эффективная локализация позволяет сократить объем анализируемой информации в фотоэмульсии (наиболее трудоемкая часть обработки данных в эксперименте) и замедлить сокращение массы мишени в детекторе с течением времени (после извлечения и анализа блоки мишени не заменяются).

В данной статье подробно рассмотрены методы, используемые для анализа событий, представлены результаты оценки эффективности поиска вершины, а также приведено описание графической оболочки EventViewer, служащей для отображения информации с электронных детекторов и визуального контроля обработки событий.

## 1. АНАЛИЗ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ПОИСКА ВЕРШИНЫ НЕЙТРИННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Основной задачей анализа данных электронных детекторов в эксперименте OPERA является определение положения вершины взаимодействия нейтрино. Ввиду модульной структуры мишенной части установки OPERA, состоящей из свинцово-эмульсионных блоков, а также относительно невысокого пространственного разрешения электронных трековых детекторов первоначальной целью поиска вершины является идентификация блока, где произошло взаимодействие нейтрино. После успешного обнаружения блока дальнейший поиск вершины взаимодействия производится методами эмульсионного анализа. Обработка данных электронных детекторов для определения вершины включает следующие этапы:

- первичную обработку сигналов электронных детекторов, полученных при регистрации нейтринного события, включающую подавление фоновых отсчетов и вычисление выделенной энергии по калибровкам детекторов (см. пп. 1.1 и 1.2);
- реконструкцию мюонного трека и оси адронного ливня (см. пп. 1.3 и 1.4);
- определение стенок мишени, с наибольшей вероятностью содержащих вершину взаимодействия (см. п. 1.5);
- расчет вероятности нахождения вершины в блоках из выбранных стенок (см. п. 1.6).

**1.1. Вычисление энергосделения в ТСЦ.** Трековая система целеуказания [11] состоит из 62 плоскостей и имеет модульную структуру. Каждая плоскость состоит из восьми модулей, измеряющих координаты  $X$  и  $Y$ . Отдельный модуль ТСЦ состоит из 64 сцинтилляционных стрипов размером  $26 \times 10 \times 6860$  мм. Перед сборкой ТСЦ все ее стрипы были прокалиброваны электронами с энергией около 2 МэВ от  $\beta$ -радиоактивного источника  $^{90}\text{Sr}$  с имитацией прохождения минимально ионизирующей частицы (MIP), которая при пересечении 1-см пластического сцинтиллятора оставляет в среднем энергию  $E_{\text{MIP}} = 2,15$  МэВ. Облучение производилось в девяти точках, равномерно распределенных вдоль каждого стрипа, при этом регистрировалась амплитуда сигнала ( $E_{\text{left}}$ ,  $E_{\text{right}}$ ) с обеих сторон спектросмещающего волокна, с помощью которого свет сцинтилляционной вспышки захватывается и переносится в расположенные с двух сторон модуля многоканальные фотомножители. Распространяющийся по волокну свет частично поглощается, поэтому амплитуды слева и справа зависят от положения источника вдоль стрипа. Полученные таким образом для каждого стрипа зависимости были аппроксимированы функ-

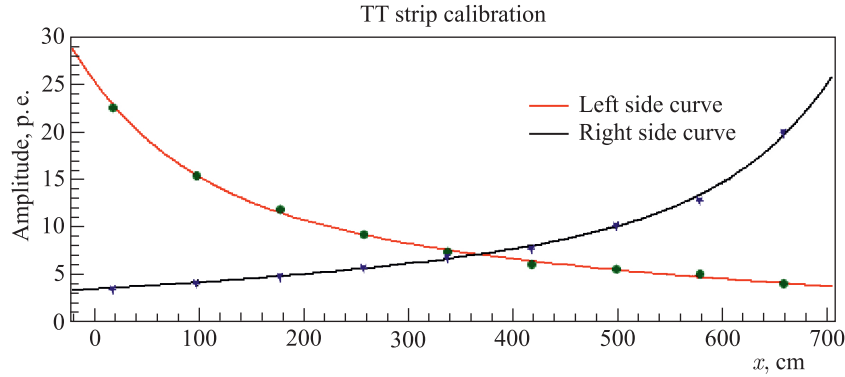


Рис. 2. Амплитуда сигнала в стрипе ТСЦ в зависимости от расстояния от места прохождения частицы до фотоумножителей, расположенных с двух разных концов

цией затухания сигнала (рис. 2), которая имеет следующий аналитический вид:

$$E_{\text{left}} = E_0 \left[ \alpha \exp\left(-\frac{x}{\lambda_s}\right) + (1 - \alpha) \exp\left(-\frac{x}{\lambda_l}\right) \right],$$

$$E_{\text{right}} = \beta E_0 \left[ \alpha \exp\left(-\frac{L_0 - x}{\lambda_s}\right) + (1 - \alpha) \exp\left(-\frac{L_0 - x}{\lambda_l}\right) \right];$$

здесь  $x$  — расстояние от места облучения до левого фотоумножителя, где находится начало координат;  $E_0$  — количество фотоэлектронов ФЭУ при  $x = 0$ ;  $\lambda_s, \lambda_l$  — характерная длина быстрого и медленного затухания соответственно;  $\alpha \in (0, 1)$  — коэффициент, характеризующий вклад каждой из экспонент в затухание сигнала;  $\beta$  — коэффициент качества, учитывающий возможную разницу оптических контактов на левом и правом ФЭУ;  $L_0$  — длина стрипа.

Используя эту калибровку, энергию, выделенную в стрипе при прохождении через него минимально ионизирующей частицы, можно оценить как

$$E^{\text{rec}} = \frac{E_{\text{MIP}}(E_{\text{left}}^{\text{rec}} + E_{\text{right}}^{\text{rec}})}{2E_0},$$

где

$$E_{\text{left}}^{\text{rec}} = \frac{E_{\text{left}}}{\left[ \alpha \exp\left(-\frac{x}{\lambda_s}\right) + (1 - \alpha) \exp\left(-\frac{x}{\lambda_l}\right) \right]}$$

и

$$E_{\text{right}}^{\text{rec}} = \frac{E_{\text{right}}}{\beta \left[ \alpha \exp\left(-\frac{L_0 - x}{\lambda_s}\right) + (1 - \alpha) \exp\left(-\frac{L_0 - x}{\lambda_l}\right) \right]}.$$

Реконструированное энергвыделение используется в дальнейшем в процедурах восстановления оси адронного ливня (см. п. 1.4) и определения стенки мишени, содержащей вершину взаимодействия (см. п. 1.5).

**1.2. Фильтрация события.** Для поиска вершины взаимодействия наиболее существенной является трековая информация. Однако в событии могут присутствовать изолированные сигналы (или изолированные группы сигналов), появившиеся в результате взаи-

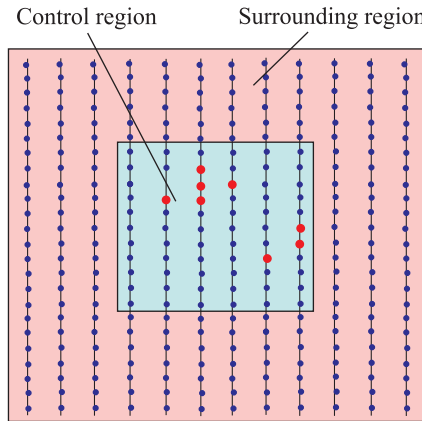


Рис. 3. Принцип фильтрации изолированных отсчетов (или групп отсчетов) в ТСЦ

Постепенное варьирование размеров прямоугольников и соответствующих им критических значений позволяет добиться сокращения количества изолированных отсчетов (или небольших групп отсчетов), которые могут исказить топологию событий.

модействия нейтральных частиц (нейтронов и  $\gamma$ -квантов) с веществом в детекторе, шума и перекрестных наводок (cross-talks) в соседних каналах фотоумножителя. Чтобы облегчить восстановление треков, производится предварительная фильтрация события, основанная на принципах *клеточного автомата* [12], для подавления изолированных отсчетов ТСЦ. Для этого по всей области события в каждой проекции пошагово перемещаются два вложенных друг в друга прямоугольника, образующих внутреннюю («Control region») и внешнюю («Surrounding region») зоны, в которых подсчитывается количество отсчетов (рис. 3). Если на определенной итерации во внешнюю зону не попало ни одного отсчета и в то же время количество отсчетов во внутренней зоне оказалось меньше критического значения, то такая группа отсчетов считается изолированной и удаляется (при условии, что эта группа не составляет большую часть события).

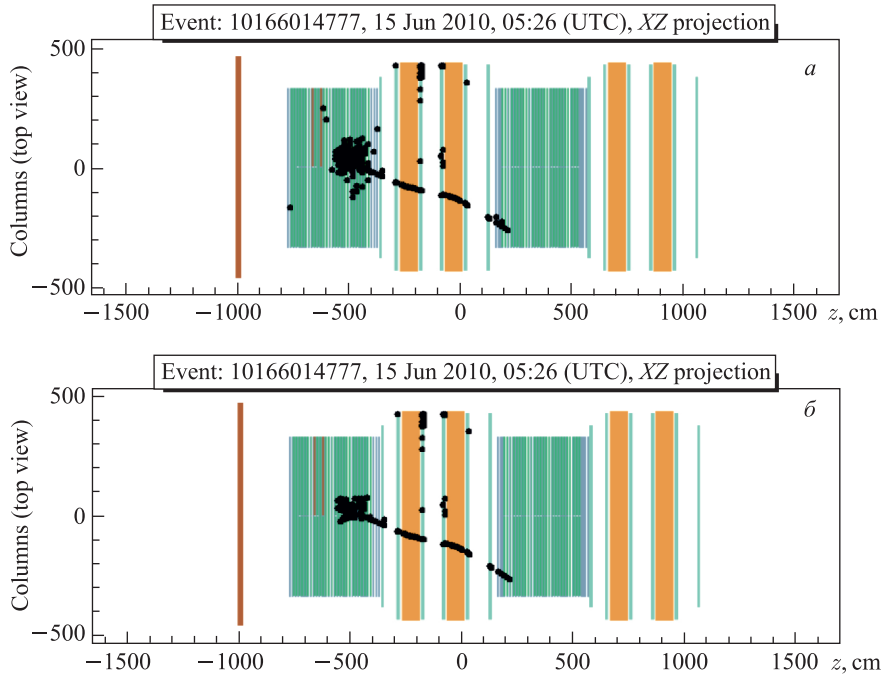


Рис. 4. Вид события в детекторе OPERA до фильтрации (а) и после фильтрации (б)

На рис. 4 приведен пример одного из событий OPERA, соответственно, до и после фильтрации. Исследования методом Монте-Карло с помощью программы Geant3 [13], где учитывались факторы, приводящие к появлению одиночных сигналов (включая наводки в каналах ФЭУ), показали, что применение описанной процедуры фильтрации не изменяет эффективность нахождения мюонных треков, ускоряя при этом процесс их восстановления. Кроме того, фильтрация помогает лучше локализовать стенку мишени, содержащую вершину взаимодействия нейтрино (см. п. 1.5).

**1.3. Реконструкция мюонного трека.** Реконструкция мюонного трека в нейтринных событиях, происходящих по каналу  $ZT$  и  $\tau \rightarrow \mu$ , является важным этапом при поиске блока мишени, в котором произошло взаимодействие нейтрино, поскольку мюон обычно проходит большое расстояние в детекторе, его трек хорошо выделяется и указывает направление на вершину события.

Восстановление в событии треков других частиц почти всегда оказывается затруднительным, особенно в районе развития адронного ливня, поскольку пространственное разрешение ТСЦ детектора OPERA (около 7,5 мм) в общем случае не позволяет различать отдельные треки вблизи вершины взаимодействия.

Для восстановления треков в электронных детекторах используется несколько алгоритмов. Рассмотрим их.

1) Преобразование Хафа для восстановления прямолинейных треков. *Преобразование Хафа (Hough transform)* [14] является эффективным методом распознавания образов, который широко применяется в экспериментальной физике для восстановления треков.

Линейное преобразование Хафа использует представление прямой на плоскости в форме  $x \cos \theta + y \sin \theta = \rho$ .

Это уравнение определяет линию, проходящую через точку  $(x, y)$  и перпендикулярную к отрезку, проведенному из точки  $(0, 0)$  к точке  $(\rho, \theta)$  в полярных координатах (рис. 5).

Для каждой имеющейся точки  $(x_i, y_i)$  с заданным шагом перебираются значения угла  $\theta_j$  в интервале от 0 до  $2\pi$  и по формуле рассчитываются соответствующие значения  $\rho_{ij}$ . Точки  $(\rho_{ij}, \theta_j)$  сохраняются в двумерной гистограмме. Если в событии присутствуют прямолинейные треки, то эта гистограмма будет содержать отчетливые пики, поскольку для точек, лежащих на одной и той же прямой,  $\rho$  и  $\theta$  являются константами. Параметры  $k$ -го трека, лежащего на прямой  $y = A_k x + B_k$ , определяются по центру тяжести соответствующего пика  $(\rho_k, \theta_k)$  как

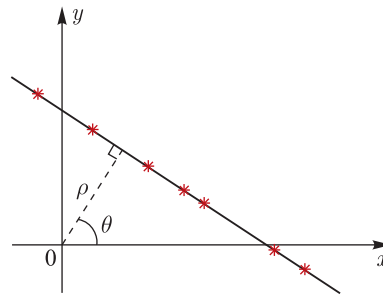


Рис. 5. Прямая линия  $x \cos \theta + y \sin \theta = \rho$

$$A_k = -\frac{1}{\operatorname{tg} \theta_k}, \quad B_k = \frac{\rho_k}{\sin \theta_k}.$$

Пример использования преобразования Хафа для восстановления мюонного трека в  $\nu_\mu$ -событии  $ZT$  приведен на рис. 6. Параметры трека были определены по главному пику в двумерной гистограмме, изображенной на рис. 7.

2) Метод прослеживания треков. Из-за многократного рассеяния не все мюонные треки являются прямолинейными. К тому же присутствие сильного адронного ливня в районе вершины взаимодействия может существенно усложнить выделение четких пиков

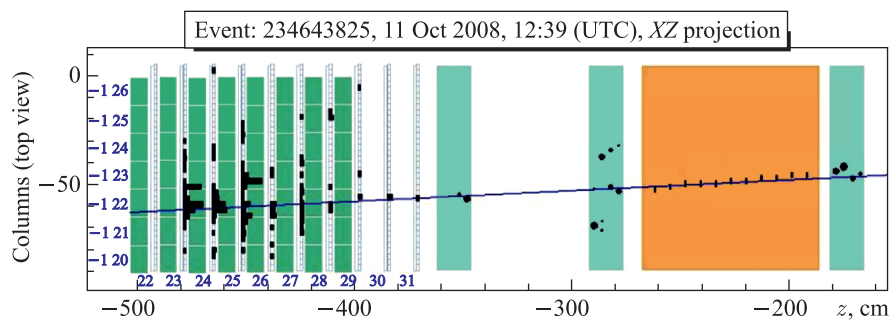


Рис. 6. Мюонный трек, найденный с помощью преобразования Хафа

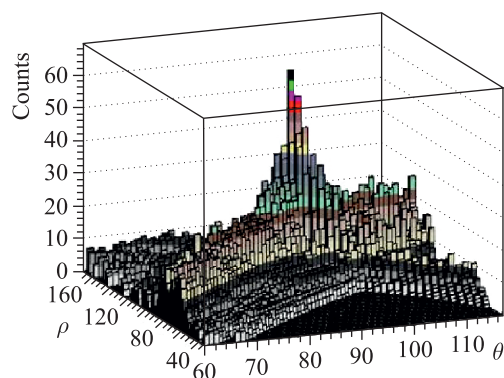


Рис. 7. Гистограмма события в пространстве параметров  $\rho$  и  $\theta$

в пространстве параметров  $(\rho, \theta)$ . В этих случаях распознавание мюонного трека наиболее эффективно начинать с конца события (где отсутствуют сигналы от частиц ливня). Для этого применяется *метод прослеживания*, работающий по следующей итеративной схеме:

а) выбор направления поиска на данном шаге. Обычно это линейная аппроксимация семи последних найденных отсчетов на треке;

б) поиск отсчетов в последующих плоскостях детектора в заданном угловом диапазоне. Угловой диапазон поиска выбирается в зависимости от пространственного разрешения электронных детекторов (ТСЦ, резистивных плоских камер или дрейфовых трубок). При этом учитывается эффективность срабатывания конкретного детектора и взаимное расположение различных типов детекторов (геометрия установки). В том случае, когда в пределах выбранного углового диапазона оказывается несколько отсчетов, выбирается тот, который является ближайшим к предсказанной траектории частицы;

в) включение найденного отсчета в трек и продолжение итеративной процедуры поиска с шага а) или прекращение дальнейшего поиска, если в нескольких плоскостях детектора подряд не было найдено ни одного отсчета.

Отметим, что в описанной процедуре распознавания трека методом прослеживания в качестве допустимого отклонения трека от прямой линии в последовательных координатных плоскостях используется не оценка многократного рассеяния, а шаг измерения координаты в трековом детекторе как заведомо большая величина.

После распознавания трека и выделения принадлежащих ему отсчетов осуществляется уточнение направления трека вблизи вершины события. Для этого производится аппроксимация прямой линией 14 точек на треке в тех плоскостях ТСЦ, где плотность отсчетов вблизи трека является достаточно небольшой, так как при срабатывании подряд нескольких стрипов ТСЦ (например, в области регистрации адронного ливня) эти отсчеты не могут быть использованы для аппроксимации трека. Если событие произошло в конце супермодуля, то в аппроксимацию включаются также сигналы детекторов, входящих в состав магнитных спектрометров.

Все блоки мишени OPERA снабжены внешним интерфейсом — двумя пластинами эмульсии в независимой кассете, которые служат для подтверждения предсказаний электронных детекторов. Полный анализ каждого извлеченного блока производится только в том случае, если в его внешних слоях найдены сходящиеся треки либо по крайней мере один из треков имеет продолжение в электронных детекторах. При этом учитывается реальное взаимное положение стенок мишени и плоскостей ТСЦ.

На рис. 8 приведены результаты сравнения параметров (положения и наклона) мюонных треков, реконструированных в электронных детекторах, с параметрами треков, обнаруженных в эмульсии внешнего интерфейса.

Среднеквадратичное отклонение положения трека от предсказанного значения близко к теоретическому пределу разрешения ТСЦ ( $\sim 7,5$  мм), что говорит о хорошей геометрической калибровке детекторов и качественной реконструкции треков.

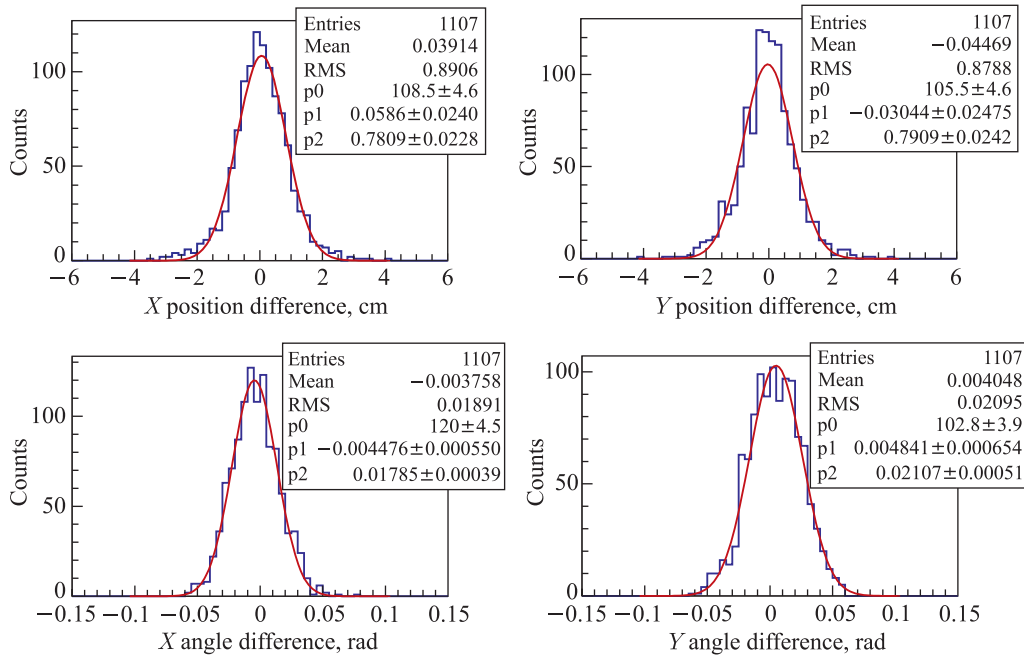


Рис. 8. Сравнение параметров треков, реконструированных в электронных детекторах и обнаруженных в эмульсии внешнего интерфейса



**1.4. Восстановление оси адронного ливня.** Восстановление мюонного трека наиболее эффективно помогает найти вершину события, но во многих случаях, таких как, например, взаимодействия по каналу НТ, в событии может вообще не оказаться четких треков. В этих случаях производится реконструкция оси адронного ливня, которая должна указывать на вершину в предположении, что ливень развивается симметрично относительно оси.

Для восстановления оси адронного ливня используется метод устойчивой аппроксимации прямой линией [15]. Идея этого метода заключается в модификации функционала, который минимизируется в *методе наименьших квадратов (МНК)* таким образом, чтобы минимизация давала устойчивую (эффективную) оценку в условиях негауссовых погрешностей и наличия точек, далеко отстоящих от аппроксимирующей линии:

$$L_{\text{МНК}}(p) = \sum_i \varepsilon_i^2 \rightarrow L_{\text{роб}}(p) = \sum_i \rho(\varepsilon_i).$$

Здесь  $p$  — вектор свободных параметров;  $\varepsilon_i$  — расстояние от  $i$ -й точки до аппроксимирующей линии и  $\rho(\varepsilon)$  — быстро сходящаяся функция.

Значения свободных параметров определяются из уравнения

$$\frac{\partial L(p)}{\partial p} = \sum_i w(\varepsilon_i) \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial p} \varepsilon_i = 0,$$

которое похоже на обычное уравнение МНК, но вместо числового множителя содержит весовую функцию

$$w(\varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \rho(\varepsilon)}{\partial \varepsilon}.$$

Таким образом, каждая измеренная точка приобретает свой вес. Вначале веса всех точек приравниваются к единице, а затем пересчитываются перед каждой последующей итерацией до тех пор, пока значения свободных параметров не перестанут изменяться

(т. е. процедура сходится за счет игнорирования точек, вес которых становится пренебрежимо малым).

В нашем случае после тестирования на выборке смоделированных событий в качестве весовой была выбрана функция

$$w(E, \varepsilon, \sigma) = \sqrt{E} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{\sigma^2}\right),$$

которая зависит от энергии отсчета  $E$  и расстояния отсчета до текущего положения оси. На рис. 9 приведен типичный вид такой функции. Параметр  $\sigma$  постепенно уменьшался в процессе итерационной процедуры.

Для поиска оси адронного ливня использовались отсчеты в первых пяти

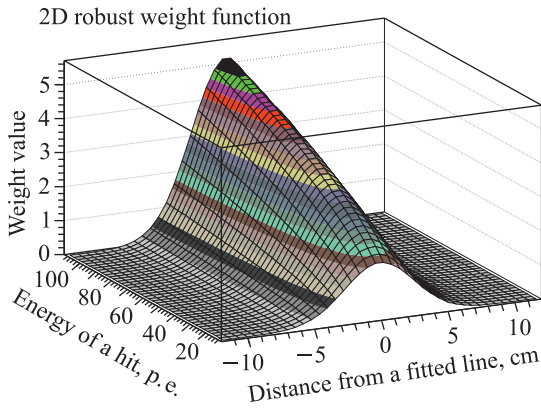


Рис. 9. Вид весовой функции, используемой для восстановления оси адронного ливня

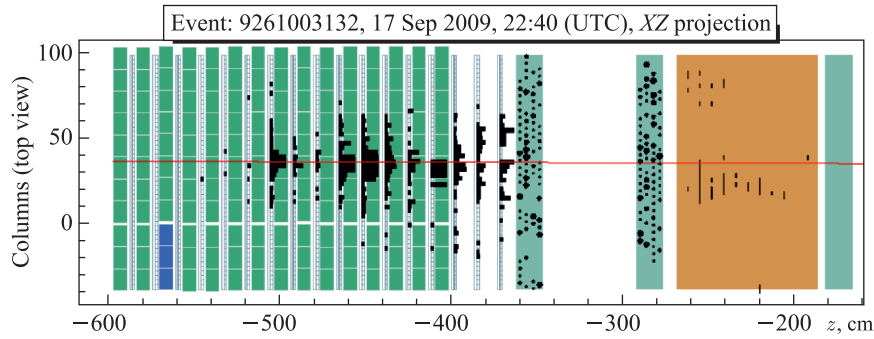


Рис. 10. Пример восстановления оси адронного ливня

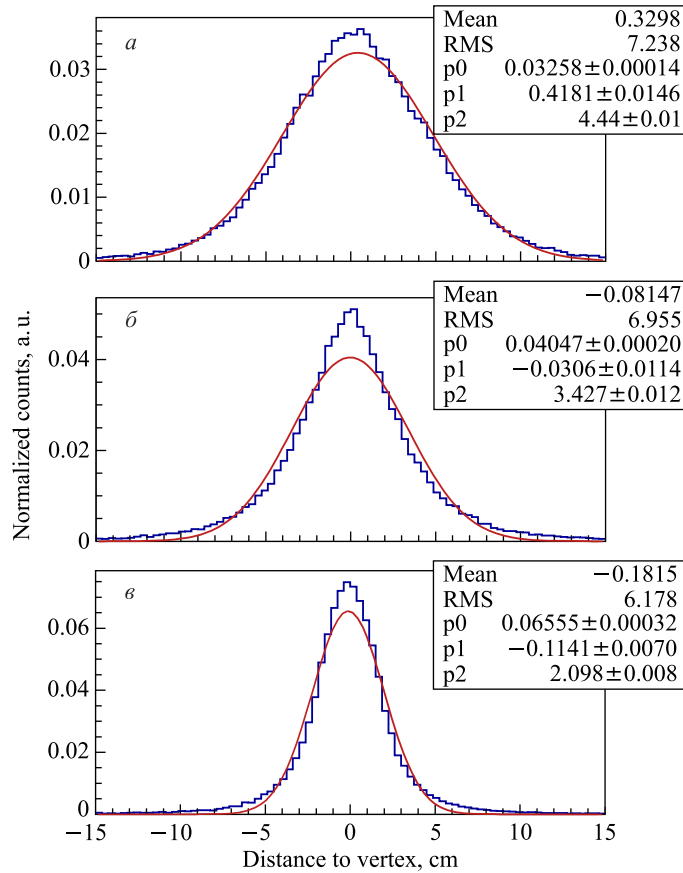


Рис. 11. Отклонение восстановленной оси адронного ливня от вершины события: а) для МНК; б) для аппроксимации по центрам энергосвечения в плоскостях ТСЦ; в) для устойчивой аппроксимации

плоскостях ТСЦ события, за исключением тех из них, которые принадлежат мюонному треку. За начальное приближение выбиралась прямая линия, параллельная оси  $Z$  и проходящая через центр тяжести события.

Пример восстановления оси адронного ливня приведен на рис. 10.

Были протестированы и другие методы восстановления оси ливня, в частности, метод аппроксимации прямой линией по центрам тяжести выделенной энергии в каждой плоскости ТСЦ, но все эти методы показали меньшую эффективность восстановления направления на вершину взаимодействия по сравнению с описанным методом устойчивой аппроксимации. На рис. 11 для сравнения приведены распределения отклонения восстановленной оси ливня от вершины события для трех способов реконструкции: 1) с использованием МНК, 2) при аппроксимации по центрам тяжести в плоскостях ТСЦ и 3) при устойчивой аппроксимации.

**1.5. Определение стенки, содержащей вершину взаимодействия.** Трудность в определении стенки мишени, содержащей блок, в котором произошло взаимодействие нейтрино, связана, главным образом, с наличием частиц, вылетающих в заднюю полусферу (против направления пучка). Эти частицы оставляют сигналы в плоскостях трековой системы целеуказания, расположенных перед искомым блоком мишени, существенно размывая область поиска. В качестве примера в табл. 1 приведены смоделированные распределения вероятности расположения вершины в  $k$ -й стенке по отношению к 1-й (по пучку) плоскости ТСЦ, имеющей отсчеты, относящиеся к данному событию.

Таблица 1. Положение стенки с вершиной относительно начальной стенки события (для смоделированных данных)

Вариант определения положения	$k < 1$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k > 3$
Для канала ЗТ, %	0,0	40,7	27,5	12,3	19,4
Для канала НТ, %	1,0	38,7	27,6	12,7	20,0

При анализе данных в эксперименте OPERA определение стенки производится в два этапа:

1) Предварительный отбор плоскостей ТСЦ. Наряду с описанной выше процедурой фильтрации события на этом этапе для последующего анализа выбираются три плоскости ТСЦ, начиная с номера  $s$  (так же, как и выше, здесь считается, что событие начинается в стенке с номером 1, а вершина расположена в стенке с номером  $k$  исходя из следующих условий:

- плоскости с номерами  $s$  и  $s + 1$  содержат отсчеты в обеих проекциях;
- общее энерговыделение, зарегистрированное в каждой из плоскостей с номерами  $s$  и  $s + 1$ , превышает 2 фотоэлектрона.

В табл. 2 показано, что после этого этапа номер  $k$  стенки с вершиной в подавляющем большинстве событий (99,0% — для канала ЗТ и 94,6% — для канала НТ) оказывается в интервале  $[s; s + 2]$ . Поэтому три плоскости ТСЦ с этими номерами отбираются для второго этапа.

2) Оценка вероятностей нахождения вершины в каждой из трех стенок мишени. Анализ информации из трех предварительно выбранных плоскостей ТСЦ производится

Таблица 2. Положение стенки с вершиной по отношению к выбранной стенке (для смоделированных данных)

Вариант определения положения	$k < 1$	$k = s$	$k = s + 1$	$k = s + 2$	$k > s + 2$
Для канала ЗТ, %	0,6	80,5	17,3	1,2	0,4
Для канала НТ, %	5,0	76,0	17,5	1,0	0,4

при помощи *искусственной нейронной сети (ИНС)*, а именно *многослойного перцептрона (МСП)* [16]. В физике высоких энергий МСП часто используются в многопараметрических задачах классификации благодаря возможности обучения этих ИНС на больших массивах событий, смоделированных методом Монте-Карло.

Типичная структура МСП, представленная на рис. 12, включает в себя три слоя элементарных вычислительных ячеек (искусственных нейронов): входной, скрытый и выходной. Каждый последующий слой осуществляет взаимодействие с предыдущим посредством весовых связей между нейронами. Подаваемый на вход МСП вектор признаков исследуемого объекта, проходя через сеть, преобразуется в вектор, характеризующий степень принадлежности данного объекта к тому или иному классу. Настройка МСП производится методом обратного распространения ошибки на большой выборке обучающих данных, где класс каждого объекта заранее известен из модели или определен каким-либо иным способом.

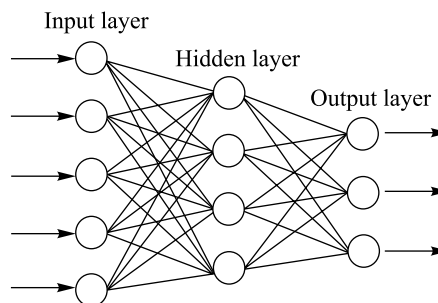


Рис. 12. Структура МСП с одним скрытым слоем

В качестве входных параметров для ИНС используются 19 переменных, характеризующих геометрическое распределение и амплитуды сигналов электронных детекторов в данном событии (их суммарное количество, расстояние до оси адронного ливня, разброс относительно взвешенного по энергии среднего значения), а также отношение энергосвечения в первых трех выбранных плоскостях ТСЦ.

Обучение МСП производилось на выборке из  $\sim 100\,000$  смоделированных  $\nu_\mu$ -событий ЗТ и НТ (отношение ЗТ/НТ = 3/1). При этом минимизация энергетического функционала осуществлялась методом сопряженных градиентов [17]. На выходе нейронная сеть выдает три вероятности для выбранных на первом этапе стенок мишени содержать вершину взаимодействия нейтрино.

Для проверки качества ИНС, используемой в задаче поиска вершины, было произведено сравнение ее эффективности с эффективностью двух других классификаторов, а именно ИНС аналогичной структуры из стуттгартского симулятора (Stuttgart Neural Network Simulator, SNNS) [18] и алгоритма, основанного на дереве принятия решений (Boosted Decision Tree, BDT) [19]. Результаты сравнения [9] показали, что используемая нейронная сеть больше подходит для решения выбранной задачи, чем алгоритм BDT, и при этом ее эффективность практически совпадает с эффективностью МСП из пакета SNNS.

**1.6. Предсказание блока, содержащего вершину взаимодействия.** После реконструкции мюонного трека или оси адронного ливня их параметры используются для определения блоков мишени, с наибольшей вероятностью содержащих вершину события. При этом также используются результаты применения ИНС для определения относительной вероятности нахождения вершины в стенке мишени. Относительная вероятность нахождения вершины в блоке мишени рассчитывается по формуле  $P_{\text{brick}} = P_{\text{wall}} P_x P_y$ , где

$$P_t = \int_{t_1}^{t_2} \int_{z_1}^{z_2} \rho_t(t, z) dt dz \quad (t = x, y).$$

Здесь координаты  $x_1, y_1, z_1$  и  $x_2, y_2, z_2$  определяют объем, занимаемый блоком в пространстве;  $\rho_x$  — плотность вероятности прохождения трека через точку  $(x, z)$ , определяемая из погрешности измерения параметров трека и расстояния от него до этой точки.  $\rho_x$ , так же, как и аналогичная плотность вероятности  $\rho_y$ , была получена путем моделирования регистрации нейтринных событий в детекторе для разных импульсов мюона и энергии адронного ливня (рис. 13).

Эффективность поиска вершины взаимодействия  $\varepsilon_{\text{BF}}$  в зависимости от максимального количества извлекаемых блоков мишени оценивалась путем моделирования. В табл. 3 приведены результаты этой оценки для различных выборок: 5000 событий  $\nu_\mu$  ЗТ,

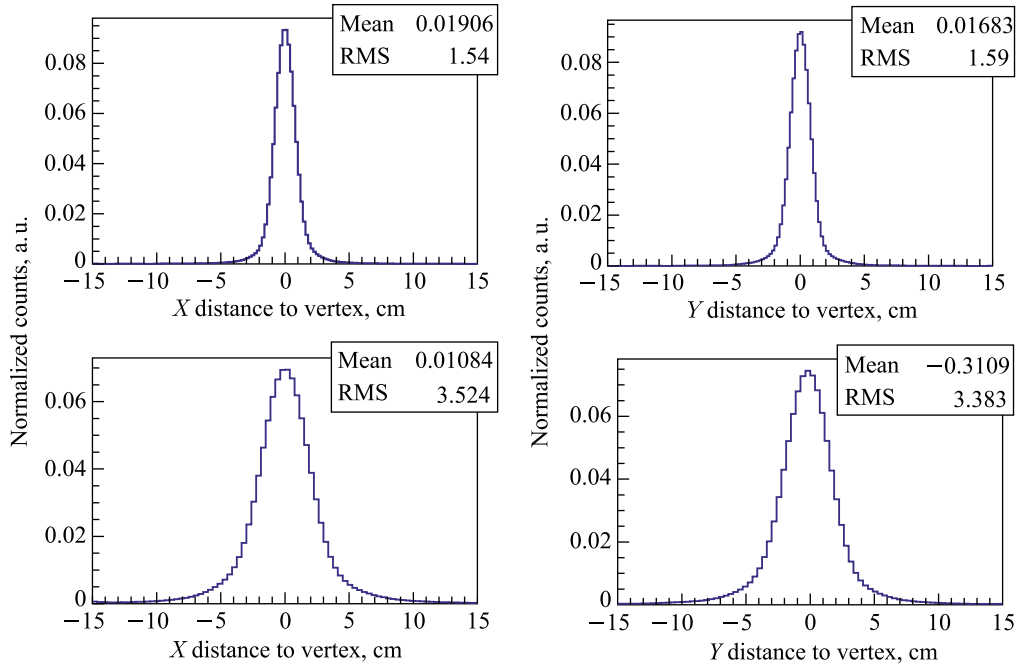


Рис. 13. Усредненные по импульсу мюона и энергии ливня распределения расстояния от вершины нейтринного события до мюонного трека (вверху) и оси адронного ливня (внизу) в проекции  $XZ$  (слева) и  $YZ$  (справа)

Таблица 3. Эффективность поиска вершины для смоделированных событий

Количество извлекаемых блоков	$\epsilon_{BF}$ , ЗТ, %	$\epsilon_{BF}$ , НТ, %	$\epsilon_{BF}$ , ЗТ/НТ/КУ, %
1	77,5	58,5	74,1
2	91,3	75,4	88,0
3	94,8	82,3	92,2
4	96,7	86,1	94,4

5000 событий  $\nu_\mu$  НТ, а также для смешанной выборки из 13800 событий ЗТ, НТ и событий квазиупругого (КУ) взаимодействия ( $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$ ).

## 2. ГРАФИЧЕСКАЯ ОБОЛОЧКА EventViewer

Для визуального контроля обработки данных была разработана графическая оболочка EventViewer, которая представляет собой удобный и легко настраиваемый интерфейс с набором необходимых функций, настроек и инструментов для просмотра и анализа как реальных, так и смоделированных событий. На рис. 14 приведено главное окно программы с изображением одного из событий OPERA, зарегистрированного в 2010 г.

К основным полезным возможностям программы относятся графическое представление заданного события, масштабирование области события в широком диапазоне (в пределах от нескольких см<sup>2</sup> до размеров всего детектора), сохранение изображения события в файле выбранного формата. Также EventViewer позволяет в интерактивном режиме включать и отключать различные варианты реконструкции события (фильтрацию, восстановление мюонного трека или оси ливня, установку начальной плоскости ТСЦ для предъявления ИНС и т. д.), производить аппроксимацию треков прямыми линиями по от-

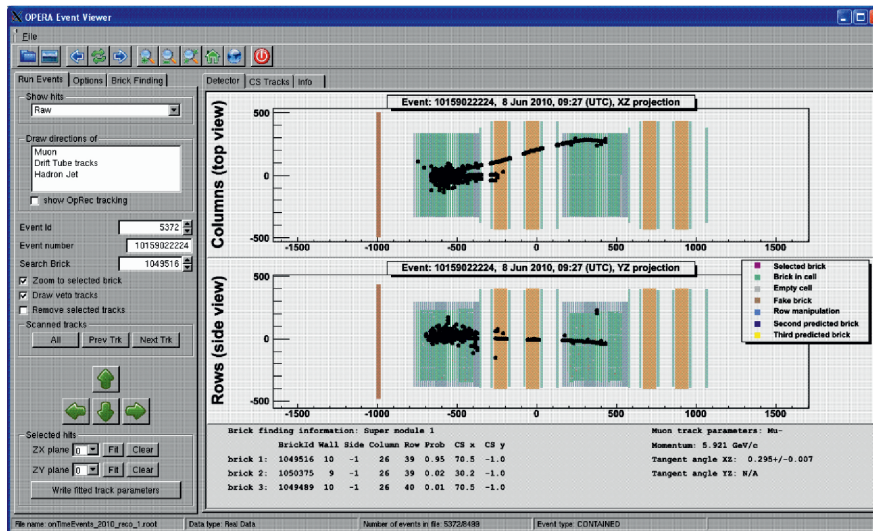


Рис. 14. Вид события OPERA в главном окне программы EventViewer

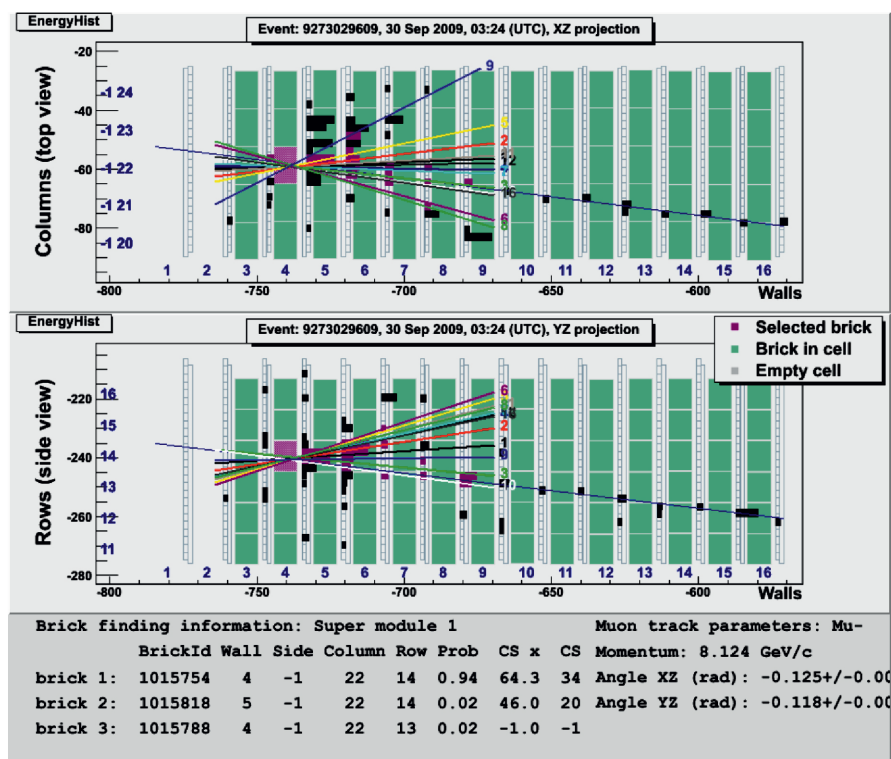


Рис. 15. Проекция треков, найденных в фотоэмульсии, в область ТЦЦ

счетам, выбранным пользователем, проецировать треки, найденные в эмульсии, в область электронных детекторов (рис. 15) и т. д.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана процедура определения блока мишени, содержащего вершину взаимодействия, по данным электронных детекторов установки OPERA. Современные методы анализа данных, примененные для обработки нейтринных событий, позволяют достичь 65 %-й эффективности обнаружения вершины взаимодействия в наиболее вероятном блоке. Дальнейшее увеличение эффективности достигается за счет поиска вершины в следующих по вероятности блоках. Все используемые алгоритмы реализованы в программе C++ с открытым исходным кодом OpBrickFinder, которая интегрирована в программное обеспечение эксперимента OPERA. В 2009 г. эта программа была использована для анализа 40 % событий OPERA и продемонстрировала высокую эффективность и скорость обработки данных. С 2010 г. по настоящее время OpBrickFinder применяется для анализа всех событий эксперимента. Программа состоит из нескольких автономных модулей, которые после соответствующей адаптации и перенастройки могут быть использованы для обработки данных других экспериментов.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность за поддержку А. Красноперову, Г. Ососкову и А. Стаднику, а также благодарят за полезный вклад и замечания А. Ariga,

F. Di Capua, A. Cazes, D. Duchesneau, T. Ferber, T. Le Fleur, I. Kreslo, G. De Lellis, P. Migliozzi, Y. Nonoyama, O. Sato, B. Wonsak.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 12-02-12142-офи.м), а также грантами для молодых ученых и специалистов ОИЯИ (13-201-02 и 14-202-04).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Guler M. et al. (OPERA Collab.).* An Appearance Experiment to Search for  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  Oscillations in the CNGS Beam. Experimental Proposal. CERN-SPSC-2000-028 [LNGS-P25-00]. Geneva: CERN, 2000.
2. *Agafonova N. et al. (OPERA Collab.).* Search for the  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  Oscillation with the OPERA Hybrid Detector // *Phys. Part. Nucl.* 2013. V. 44. P. 703–727.
3. *Acquafredda R. et al. (OPERA Collab.).* The OPERA Experiment in the CERN to Gran Sasso Neutrino Beam // *JINST.* 2009. V. 4. P. 04018.
4. *Fukuda Y. et al. (Super-Kamiokande Collab.).* Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos // *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 81. P. 1562.
5. *Chaussard L., Moret G.* Vertex Resolution and Brick Finding Efficiency Using Scintillators Information: Single Charged Particles Simulation. OPERA Internal Note. 2000.
6. *Chaussard L. et al.* Brick Finding Efficiency: Monte Carlo Comparisons between Several Scintillating Tracker Options. OPERA Internal Note. 2001.
7. *Laktineh I.* Brick Finding Efficiency in Muonic Decay Tau Neutrino Events. OPERA Internal Note. 2002.
8. *Laktineh I.* Brick Finding Efficiency of No-Muon Tau Neutrino Events in OPERA. OPERA Internal Note. 2002.
9. *Dmitrievsky S., Gornushkin Yu., Ososkov G.* Neural Networks, Cellular Automata, and Robust Approach Applications for Vertex Localization in the OPERA Target Tracker Detector. JINR Preprint E10-2005-216. Dubna, 2005.
10. *Chukanov A., Dmitrievsky S., Gornushkin Yu.* Neutrino Interaction Vertex Location with the OPERA Electronic Detectors. OPERA Public Note. 2013. No. 162.
11. *Adam T. et al. (OPERA Collab.).* The OPERA Experiment Target Tracker // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2007. V. 577. P. 523.
12. *Glazov A. et al.* Filtering Tracks in Discrete Detectors Using a Cellular Automaton // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1993. V. 329. P. 262–268.
13. *Brun R. et al.* GEANT3. CERN-DD/EE/84-1. 1986.
14. *Hough P. V. C.* A Method and Means for Recognizing Complex Patterns // US Patent: 3. 1962. V. 069. P. 654.
15. *Ososkov G. A.* Elastic Arm Methods of Data Analysis as a Robust Approach // *Tatra Mount. Math. Publ.* 2003. V. 26. P. 291–306.
16. *Khanna T.* Foundation of Neural Networks. N. Y.: Addison-Wesley, 1989.
17. *Branch M. A., Coleman T. F., Li Y.* A Subspace, Interior, and Conjugate Gradient Method for Large-Scale Bound-Constrained Minimization Problems // *SIAM J. Sci. Comp.* 1999. V. 21, No. 1. P. 1–23.
18. *Zell A. et al.* SNNS — Stuttgart Neural Network Simulator. User manual, Version 4.2. Univ. of Stuttgart, Inst. for Parallel and Distributed High Performance Systems (IPVR); University of Tübingen, Wilhelm-Schickard-Institute for Comp. Science. <http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/SNNS/>. 1998.
19. *Quinlan Y. R.* Simplifying Decision Trees // *Intern. J. Man-Machine Studies.* 1987. V. 28. P. 221.

Получено 21 апреля 2014 г.