

Усовершенствование реконструкции и подавления фонов для трековых событий в Baikal-GVD на основе оценки зенитного угла по данным отдельных гирлянд

Куликов А. А.

Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Дубна

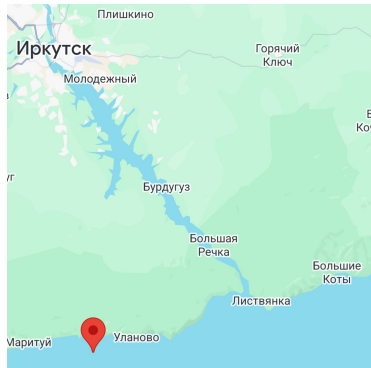
Научный руководитель: к.ф.-м.н. Сафронов Григорий Борисович

18 июня 2026 г.

- 1 Обзор установки Baikal-GVD
- 2 Выборки Монте-Карло данных
- 3 Алгоритм отбора срабатываний оптических модулей
- 4 Реконструкция по одной гирлянде
- 5 Качество реконструкции и подавление фона
- 6 Характеристики метода
- 7 Интеграция алгоритма реконструкции в программное обеспечение Baikal-GVD
- 8 Заключение

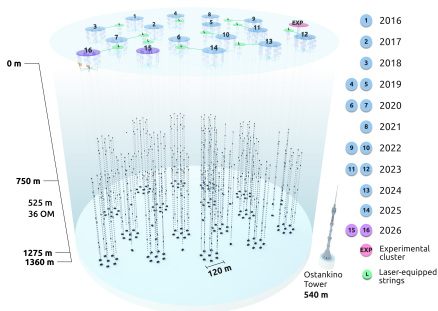
Нейтринный телескоп Baikal-GVD

- **GVD** — Gigaton Volume Detector (гигатонный нейтринный телескоп).
- Расположен в 3.6 км от берега озера Байкал.
- Установлен на глубине 1360 м.
- **Радиатор и мишень:** вода озера Байкал.
- **Регистрируемое излучение:** черенковский свет от заряженных частиц.
- Длина поглощения света на $\lambda = 488$ нм достигает ~ 22 м.



Расположение детектора

Структура детектора



Модульная структура детектора

Иерархия системы

- **Кластер:** Независимая единица детектора из 9 (в некоторых случаях 8) гирлянд.
- **Гирлянда:** Вертикальный трос, несущий 36 оптических модулей с шагом 15 м.
- **Оптический модуль (ОМ):** Стеклоянная сфера с ФЭУ и электроникой.

Цепочка обработки данных

Триггер → Восстановление импульсов
ФЭУ → Калибровка → **Отбор импульсов ФЭУ** → **Реконструкция** → **Критерии качества** → Анализ

Существующий подход к реконструкции

- Стандартные алгоритмы требуют срабатывания **не менее двух гирлянд** (не менее 8 ОМ).
- События с срабатываниями только на одной гирлянде **отбрасываются**.

Задачи данной работы

- 1 **Восстановление одно-гирляндных событий:** вернуть в анализ события, видимые только на одной гирлянде.
- 2 **Улучшение подавления мюонного фона:** выработать дополнительные критерии разделения нейтрино и мюонов.

Ключевой параметр

Зенитный угол θ : **восходящие треки** ($\theta \geq 90^\circ$) — кандидаты в нейтринные события, **нисходящие** ($\theta < 90^\circ$) — атмосферные мюоны.

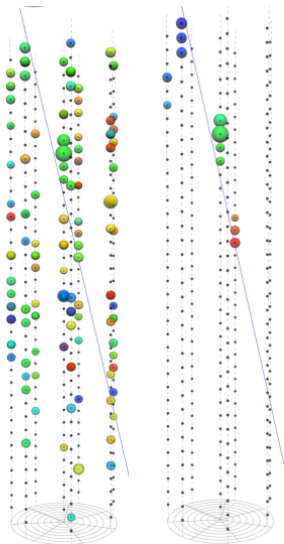
Атмосферные мюоны как основной фон

- Возникают в составе широких атмосферных ливней.
- Поток на 5–7 порядков превышает поток атмосферных нейтрино.
- Интенсивность максимальна вблизи вертикали и минимальна у горизонта.

Проблема

- Из-за хвостов углового разрешения часть нисходящих мюонов ошибочно восстанавливается как восходящие.
- Такие события загрязняют выборку нейтринных кандидатов.
- Требуются дополнительные критерии для подавления фона.

Регистрируемые данные и задача реконструкции



До выделения импульсов

После выделения
импульсов

Данные срабатываний

- Время t_i : регистрации фотона (нс).
- Заряд q_i : амплитуда сигнала (ф.э.).
- Координаты (x_i, y_i, z_i) : положение ОМ.

Задача реконструкции

1. Отфильтровать фоновые срабатывания.
2. Восстановить параметры трека мюона.

Используемые семплы

- **Нейтринная выборка:** моделирование астрофизического сигнала со степенным спектром по энергии с показателем -2 (E^{-2}), направления равномерно по 4π ср, энергии 20 ГэВ – 100 ПэВ.
- **Мюонные выборки:** моделирование атмосферных ливней:
 - низкоэнергичные — естественный спектр первичных космических лучей;
 - высокоэнергичные — отобранные события с лидирующим мюоном в районе установки с энергией не ниже 100 ТэВ.

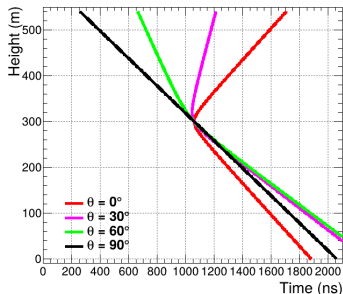
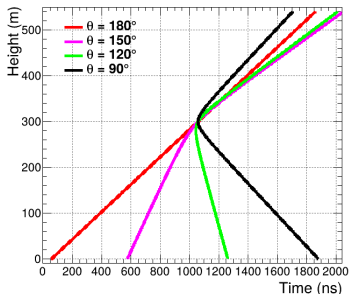
Ключевое различие семплов

- Нейтрино — одиночные треки, хорошо описываются моделью.
- Атмосферные мюоны приходят группами (бандлами) — сложная топология, затрудняющая реконструкцию.

Отбор срабатываний на гирлянде

Физическая картина

- Черенковский конус мюона освещает группу ОМ на гирлянде.
- В плоскости (z, t) срабатывания группируются вдоль гиперболы.
- **Ключевое различие:** ориентация гиперболы определяет направление трека.



Характерные паттерны для восходящего (слева) и нисходящего (справа) треков

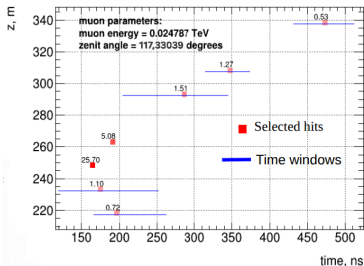
Концепция «яркой точки» и отбор срабатываний

Яркая точка

Пара срабатываний на соседних каналах с зарядами ≥ 2.0 и ≥ 1.5 ф.э., совпадающих по времени в узком окне.

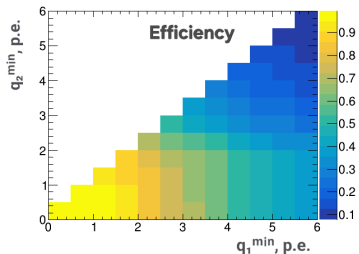
Алгоритм отбора

- 1 Поиск ярких точек на каждой гирлянде.
- 2 Геометрическая оценка направления ($f_{\text{ZenithGeom}}$) при ≥ 2 гирляндах.
- 3 Предварительный отбор: связная группа ≥ 5 срабатываний вокруг яркой точки.
- 4 Расширение группы методом временных окон (рекурсивно).

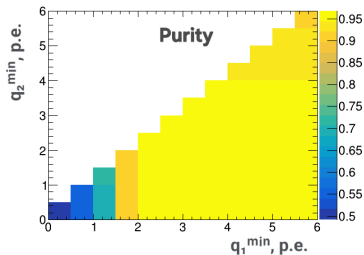


Построение временных окон для расширения группы

Выбор зарядовых порогов



Эффективность



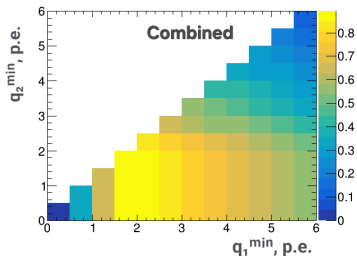
Чистота

Метрики отбора

Для каждого набора порогов оценивалась эффективность и чистота с использованием МС-информации о том, является ли срабатывание сигнальным (MCTruth mask $\neq 0$) или шумовым:

Оптимизация порогов

- Пороги для яркой точки: 2.0 и 1.5 ф.э.
- Выбраны как обеспечивающие одновременно высокие эффективность и чистоту.
- Мягче аппаратного триггера (4.5 и 1.5 ф.э.).

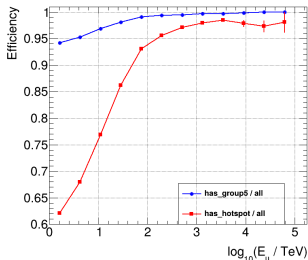


Совмещённый график

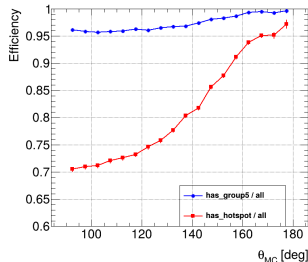
Доля событий, пригодных для реконструкции

Критерий пригодности

Событие пригодно, если хотя бы на одной гирлянде выделена связанная группа ≥ 5 срабатываний (включая яркую точку).



Нейтринная выборка: доля vs. энергия



Нейтринная выборка: доля vs. зенитный угол

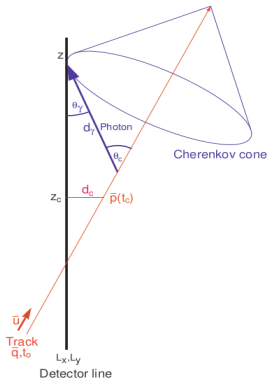
Наблюдения

- Для нейтрино доля растёт с энергией, достигая высоких значений в области астрофизических энергий.
- Для мюонов эффективность ниже из-за влияния множественности мюонов.
- Для околоразвертикальных треков (150° – 180°) условия выполняются уже при низких энергиях.

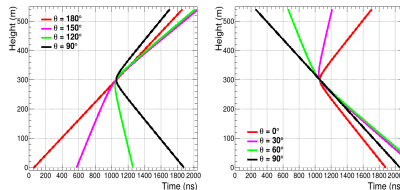
Параметризация трека

Реконструкция по одной гирлянде

- Лучше всего подходит для околовертикальных треков;
- Использует только срабатывания на одной гирлянде в плоскости (t, z) ;
- Теряется информация об азимутальном угле φ .



Параметризация трека



Поведение функции при разных углах ($d_c = 20$): восходящий трек (слева), нисходящий (справа)

Параметры трека

- d_c – кратчайшее расстояние от трека до гирлянды;
- z_c – координата на гирлянде точки максимального сближения;
- t_c – время достижения точки максимального сближения;
- $u_z = \cos \theta$ – косинус зенитного угла;

Физическая модель реконструкции

Время прихода черенковского фотона

$$t_\gamma(z) = t_c + \frac{1}{c} \left[(z - z_c) \cos \theta + \frac{n^2 - 1}{n} d_\gamma(z) \right]$$
$$d_\gamma(z) = \frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}} \sqrt{d_c^2 + (z - z_c)^2 (1 - \cos^2 \theta)}$$

Функция потерь (минимизация Minuit2)

$$Q = \sum_{\text{hits}} \left[\frac{(t_\gamma(z_i) - t_i)^2}{\sigma_i^2} + \frac{A(q_i) \cdot D(d_\gamma)}{\langle q \rangle d_0} \right]$$

- Первое слагаемое — временная часть (χ^2).
- Второе — зарядовая (штраф за большие расстояния).

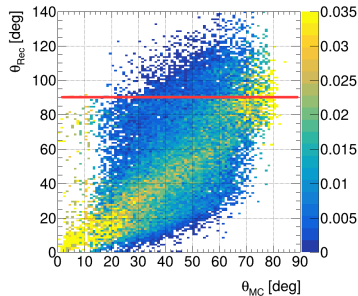
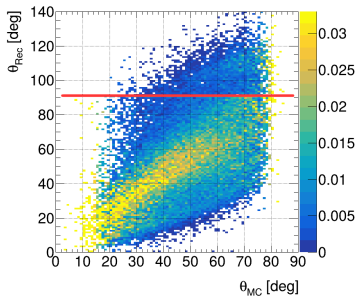
Двухстадийная оптимизация

Первый фит (широкие границы) → классификация направления → второй фит (суженные границы) при $\theta \geq 90^\circ$.

Проблема ошибочной реконструкции направления

Причина

- Часть нисходящих мюонов ошибочно восстанавливается как восходящие.
- Такие события проходят отбор по зенитному углу и загрязняют выборку.



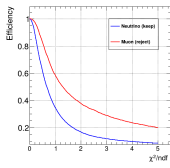
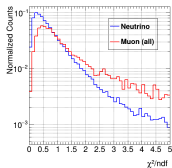
Сравнение истинного и восстановленного угла для мюонов

Необходимость дополнительных критериев

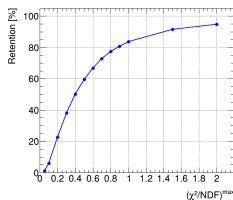
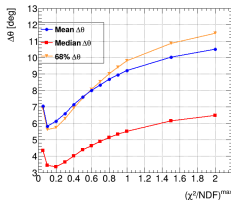
Простого отбора по $\theta_{rec} \geq 90^\circ$ недостаточно.

Качество фита

- После отбора $\theta_{\text{rec}} \geq 90^\circ$ распределения перекрываются.
- Одного критерия недостаточно для разделения выборок.



Сравнение распределений χ^2/NDF для нейтринной и мюонной выборок (слева) и зависимость доли отобранных событий от порога (справа)



Влияние порога $(\chi^2/NDF)^{\text{max}}$ на ошибку восстановления (слева) и на долю сохраняющихся нейтринных событий (справа)

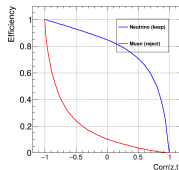
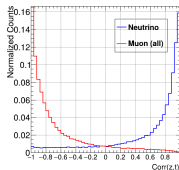
Вывод

χ^2/NDF не разделяет нейтрино и мюоны, но позволяет отобрать качественно восстановленные нейтринные события.

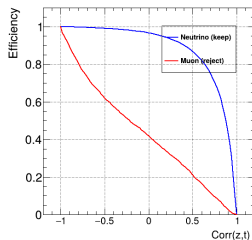
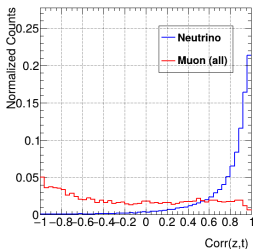
Критерий Z-T корреляции

Параметр

- Коэффициент корреляции Пирсона между z и t ;
- Показывает отличное разделение между мюонной и нейтринной выборками.



До отбора по θ



После отбора $\theta_{\text{rec}} \geq 90^\circ$

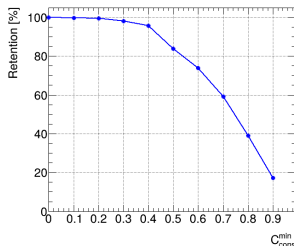
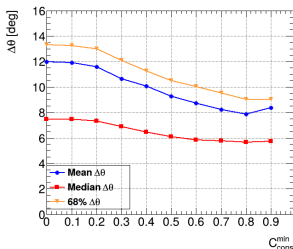
Коэффициент согласованности

Дополнительные оценки зенитного угла

- **fZenithGeom**: геометрическая оценка по двум самым ярким срабатываниям на разных гирляндах.
- **fZenithAvg**: усреднённая оценка по восстановленным (z_c, t_c) на ≥ 2 гирляндах.

Коэффициент согласованности

$$\text{score}_i = 1 - \min\left(1, \frac{\text{diff}_i}{30^\circ}\right), \quad C_{\text{cons}} = \frac{\text{score}_{\text{avg}} + \text{score}_{\text{geom}} + \text{score}_{\text{best}} + \text{score}_{\text{avg,geom}}}{4}$$



Влияние порога C_{cons} на ошибку и долю событий

Эффективность реконструкции и отбора событий

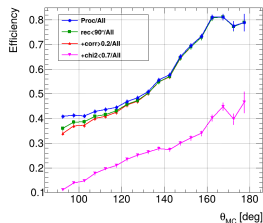
Критерии последовательного отбора

- 1 Отбор по зенитному углу: $\theta_{\text{rec}} \geq 90^\circ$.
- 2 Z-T корреляция: > 0.2 .
- 3 χ^2/NDF : < 0.7 .

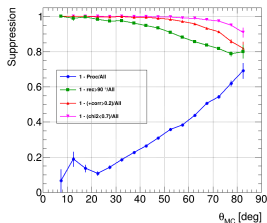
Эффективность последовательных отборов

Семпл	Proc/MC	rec ≥ 90 /MC	+corr/MC	+chi2/MC
Нейтрино	0.515	0.499	0.493	0.232
Мюоны (выс. эн.)	0.64	0.1	0.031	0.009
Мюоны (низк. эн.)	0.251	0.028	0.011	0.004

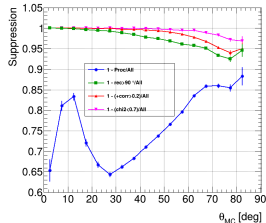
Угловое распределение эффективности отбора/подавления



Нейтрино



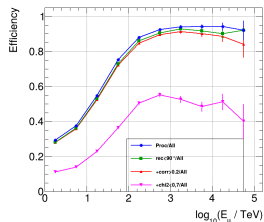
Мюоны (выс. эн.)



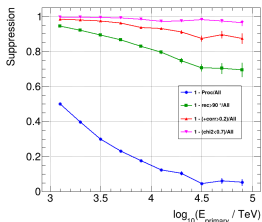
Мюоны (низк. эн.)

Эффективность реконструкции: энергетическое распределение

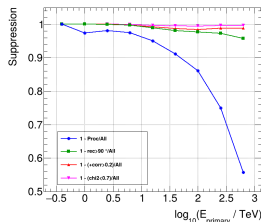
Энергетическое распределение эффективности отбора/подавления



Нейтрино



Мюоны (выс. эн.)



Мюоны (низк. эн.)

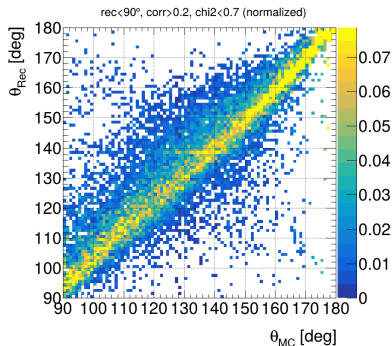
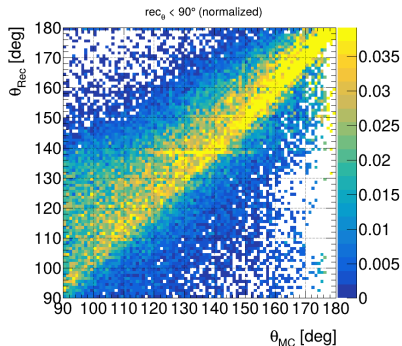
Угловое распределение

- Подавлены практически все мюоны, за исключением малой доли в области около 90° , что не критично при формальном разделении на восходящие ($\geq 90^\circ$) и нисходящие ($< 90^\circ$).
- Для нейтрино эффективность повышается для околоразвертикальных треков, достигая пика в наиболее интересной области 150° – 180° .

Энергетическое распределение

- Мюоны подавляются равномерно во всём диапазоне энергий; заметно лишь небольшое снижение эффективности подавления с ростом энергии.
- Для нейтринных событий эффективность отбора растёт с энергией.

Результат восстановления зенитного угла



Двумерная гистограмма истинный vs. восстановленный угол для нейтринных событий: без отбора (слева) и после комбинированного отбора (справа)

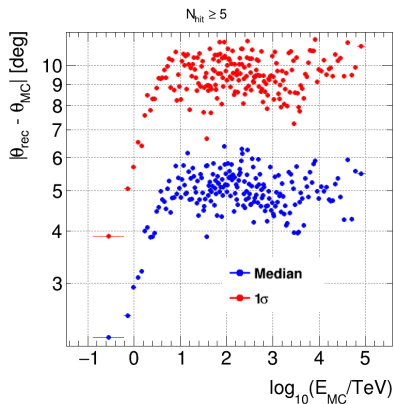
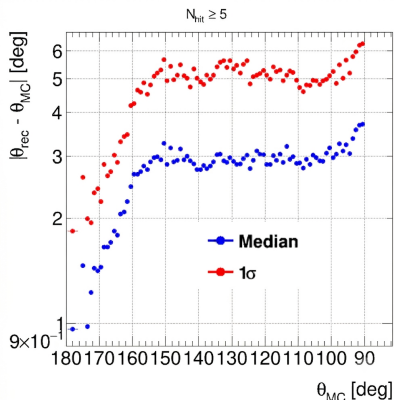
Эффект отбора

Ограничение на χ^2/NDF позволяет отсеять весомую часть событий с большой угловой ошибкой, повышая средние показатели.

Характеристики метода

Угловое разрешение для нейтринной выборки

- $170^\circ\text{--}180^\circ$: $\Psi_{50} \sim 1^\circ$, $\Psi_{68} \sim 2^\circ$.
- $150^\circ\text{--}170^\circ$: $\Psi_{50} \sim 1.5^\circ\text{--}3^\circ$, $\Psi_{68} \sim 2^\circ\text{--}5^\circ$.
- $90^\circ\text{--}150^\circ$: $\Psi_{50} \sim 3^\circ\text{--}4^\circ$, $\Psi_{68} \sim 5^\circ\text{--}6^\circ$.



Зависимость ошибки от θ_{MC} и энергии мюона

Интеграция алгоритма реконструкции в программное обеспечение Baikal-GVD

Реализация модуля

- Разработанный алгоритм реализован в виде модуля на языке C++.
- Проведена валидация работы модуля на Монте-Карло данных.
- Модуль будет использован в ближайшей переобработке данных и Монте-Карло в Baikal-GVD.

BARS (Baikal Analysis and Reconstruction Software)

- Штатная среда обработки данных Baikal-GVD.
- Модули работают последовательно.

Задачи модуля

- 1 Формирует отдельный сэмпл одно-гирляндных событий, пропущенных стандартной реконструкцией.
- 2 Выдаёт значения восстановленного зенитного угла для каждой гирлянды.
- 3 Предоставляет дополнительные переменные (χ^2/NDF , Z-T корреляция) для фильтрации.

Практическая значимость

- Возврат в анализ событий, видимых только на одной гирлянде.
- Улучшенное подавление мюонного фона.
- Повышение чувствительности к астрофизическим нейтрино.

Основные результаты

- 1 Реализована процедура отбора сигнальных срабатываний на отдельной гирлянде с многоэтапной фильтрацией.
- 2 Реализован алгоритм реконструкции трековых событий по данным отдельных гирлянд, адаптированный к условиям Baikal-GVD.
- 3 Исследованы критерии качества:
 - Z-T корреляция — хорошее разделение нейтринных и мюонных выборок.
 - χ^2/NDF — позволяет выделить качественно восстановленные события.
 - Коэффициент согласованности — интегральный критерий качества.
- 4 Определены итоговые характеристики: угловое разрешение, эффективность отбора.
- 5 Алгоритм интегрирован в BARS как модуль, работающий перед основной реконструкцией.

Перспективы

- Сравнение с существующими методами реконструкции.
- Комбинированная работа с стандартным алгоритмом.
- Запуск на реальных экспериментальных данных.

Спасибо за внимание!

Ваши вопросы?