

Процедуры анализа трековых событий на нейтринном телескопе Baikal-GVD

Григорий Сафронов (ИЯИ РАН)
от имени коллаборации Baikal-GVD



Детектор Baikal-GVD

Трехмерный массив ФЭУ
расположенный в глубинах озера Байкал

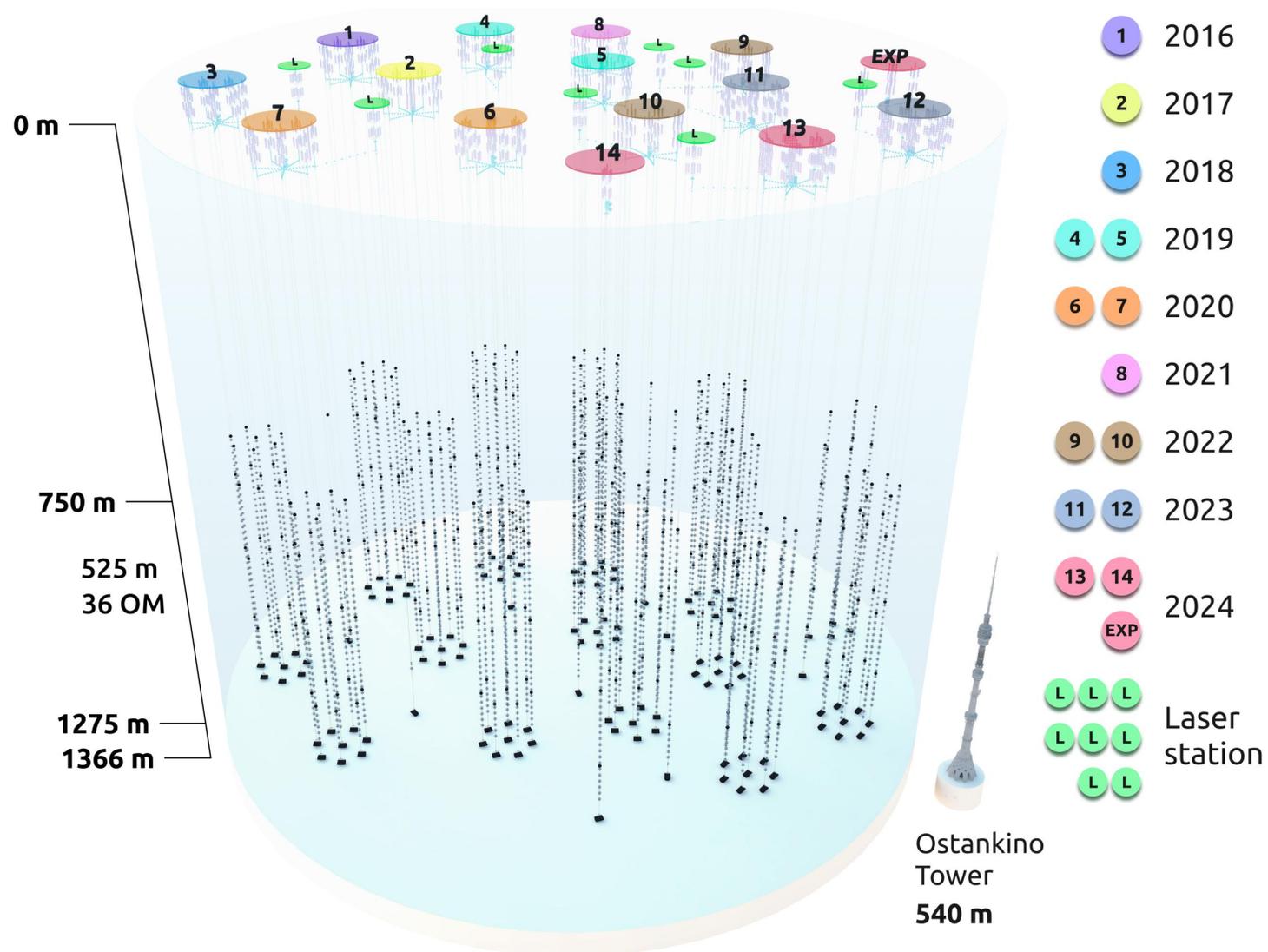
- Состоит из “кластеров”

Каждый кластер функционирует как
независимый детектор

- Состоит из 8-ми гирлянд
- Каждая гирлянда содержит 36
оптических модулей (ОМ) с ФЭУ

После зимней экспедиции 2024 года
детектор включает

- 13 полномасштабных кластеров
- Центральная гирлянда кластера 14
- Экспериментальный кластер с
перспективной DAQ (EXP)





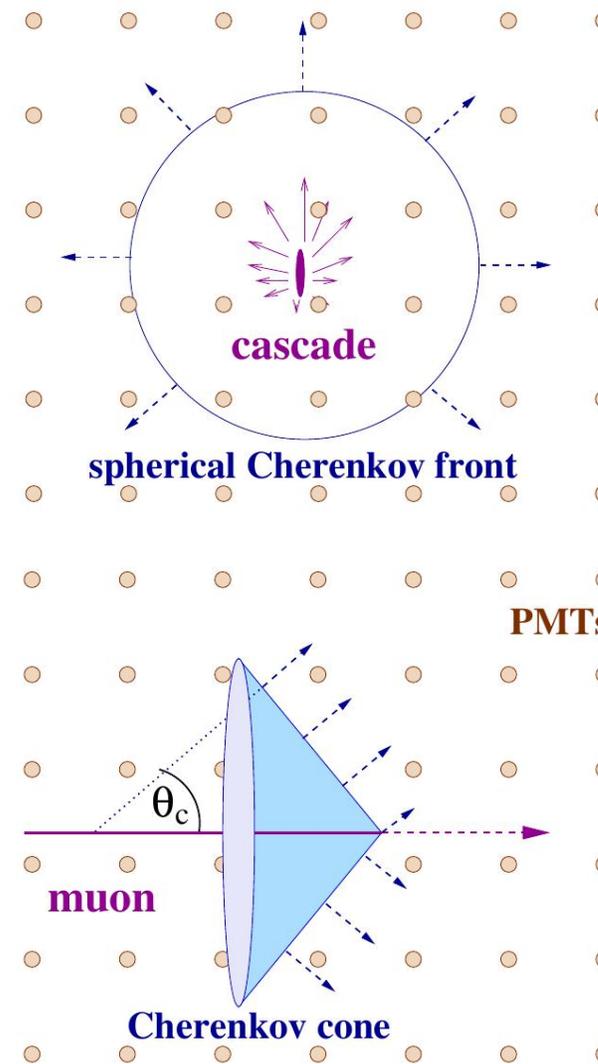
Типы событий от нейтрино регистрируемых телескопом

Каскадные события ($\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$)

- Взаимодействия нейтрино высоких энергий сопровождаются адронным или электромагнитным каскадом
- Черенковский свет от заряженных частиц в каскаде регистрируется ОМ
- Ограниченная область световыделения от каскада $R < \sim 100\text{м}$
- Умеренное угловое разрешение: $3^\circ - 10^\circ$
- Хорошее энергетическое разрешение: 5 - 30%

Трековые события ($\nu_\mu \nu_\tau$)

- Мюоны, образующиеся в СС взаимодействиях ν
- Черенковский свет сопровождает распространение мюона
- Протяженный сигнал в детекторе масштаб $\sim 1\text{ км}$
- Хорошее угловое разрешение: $\sim 0.3^\circ - 0.5^\circ$
- Низкое энергетическое разрешение: 200 - 300%
- Большой эффективный объем детектора





Происхождение трековых событий

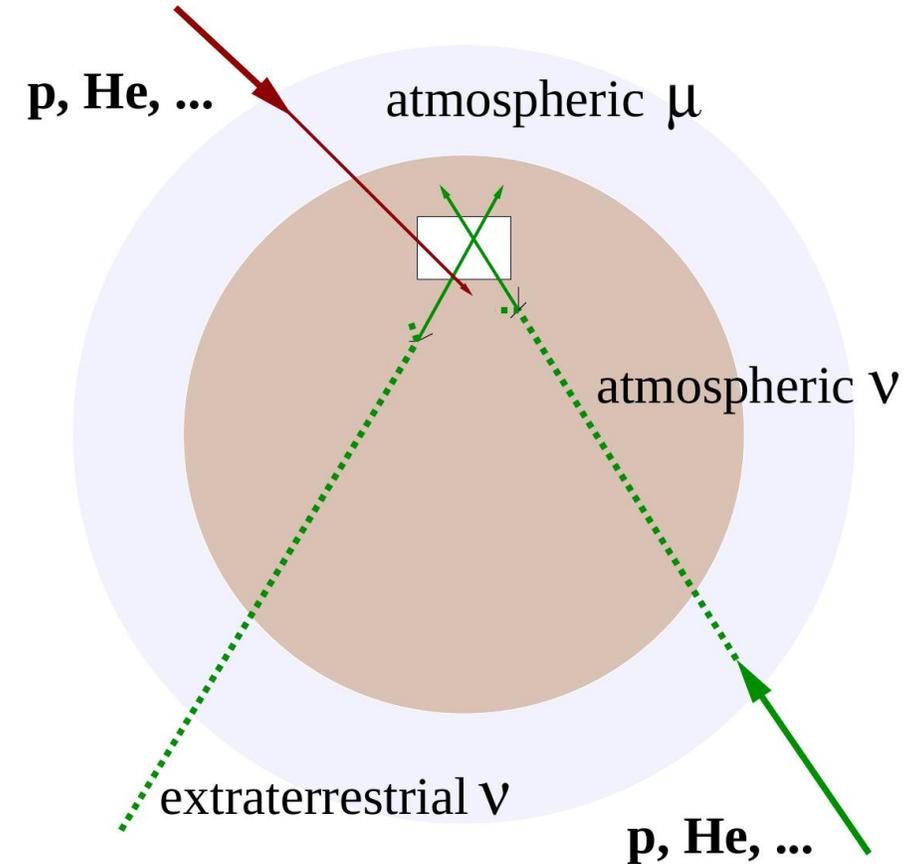
Атмосферные мюоны: Группы атмосферных мюонов от взаимодействий КЛ

- Фон к событиям от нейтрино

Атмосферные нейтрино: нейтрино от взаимодействий КЛ

- Быстро падающий спектр
- Фон для нейтрино от астрофизических источников
- Верификация чувствительности телескопа

Астрофизические нейтрино: TeV - ~PeV
нейтрино от астрономических объектов



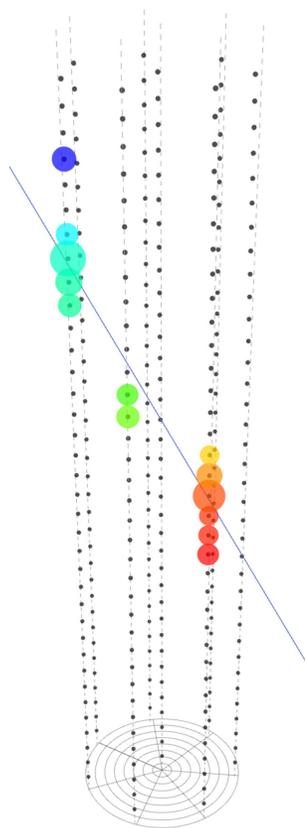


Виды трекового анализа

Два режима трекового анализа

- **Однокластерный:** каждый кластер используется как независимый детектор
- **Мультикластерный:** используются события с согласованными срабатываниями триггера в разных кластерах

Однокластерное
восходящее
событие:

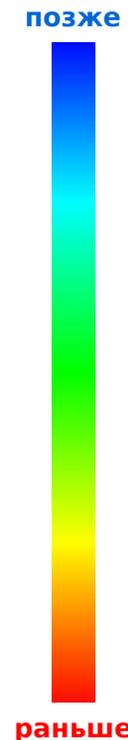
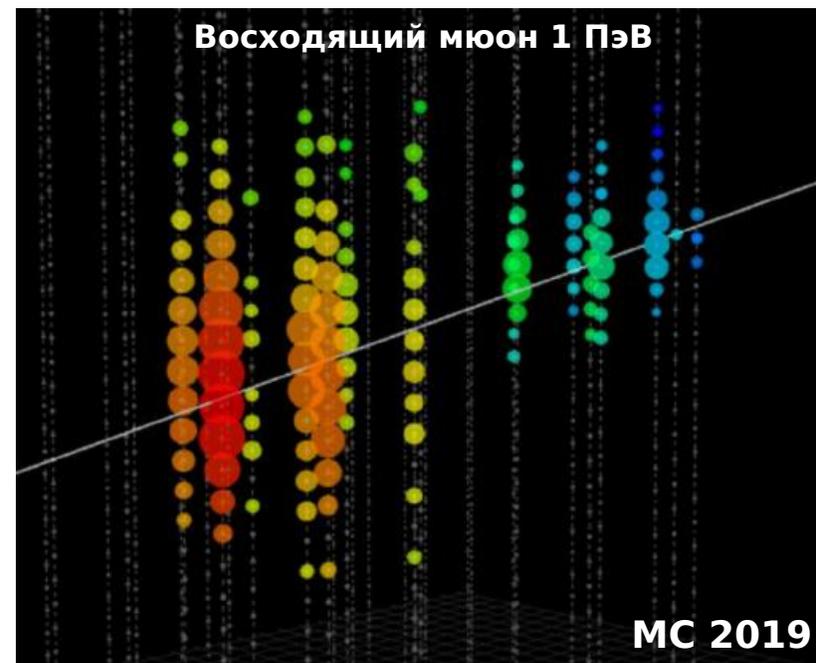


data 2019

Мультикластерные события:



Шумы озера и ФЭУ





Наблюдение атмосферных нейтрино в треках

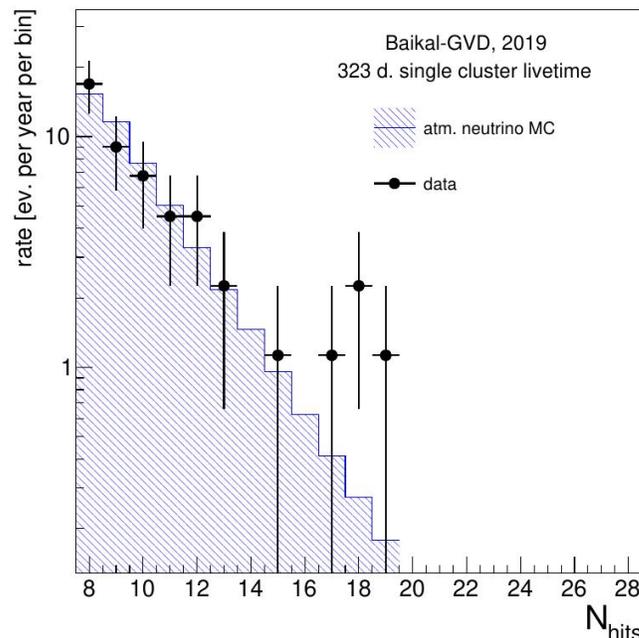
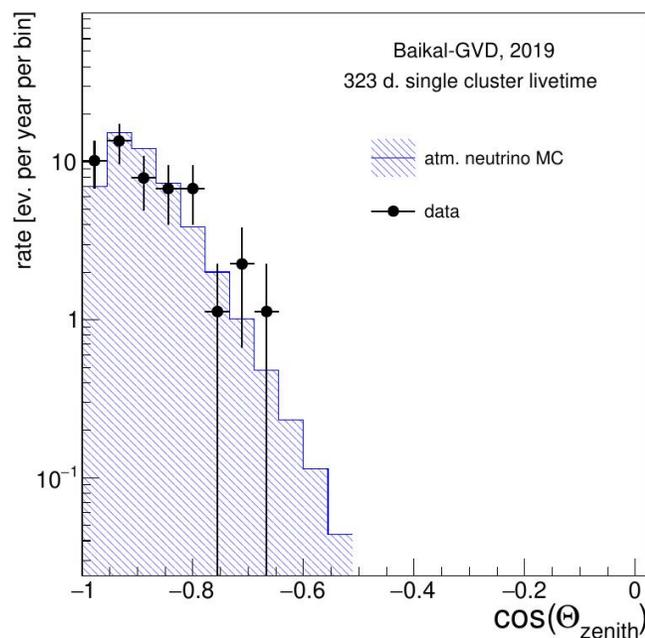
Первый набор кандидатов в нейтрино получен по данным Апреля-Июня 2019г

- Однокластерный анализ на основе реконструкции и отбора оптимизированных для низких энергий нейтрино, $\langle E_\nu \rangle \sim 500$ ГэВ
- Использованы сеансы с 1 Апреля по 30 Июня 2019, полная экспозиция составила 323 дня

МК ожидание: 43.6

- атм. нейтрино :43.6
- атм. мюоны: 0

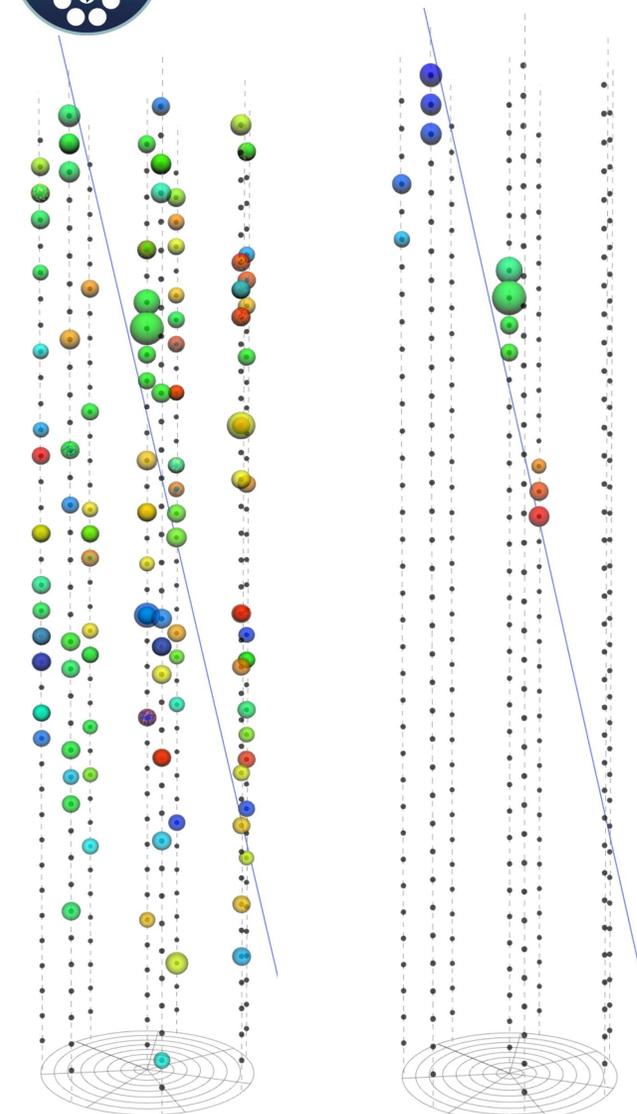
Наблюдено: 44



Хорошее согласие
данных и МК

Анализ опубликован в
**Eur. Phys. J. C 81, 1025
(2021)**

Процедура восстановления трековых событий



Направление и положение трека восстанавливаются с использованием информации о времени и заряде импульсов ФЭУ и координатах сработавших ОМ

Восстановление оптимизировано для восходящих одиночных мюонов; группы атмосферных мюонов - фон

Алгоритмы отбора срабатываний ФЭУ (хитов): нужно подавить импульсы ФЭУ от свечения воды и темнового тока ФЭУ

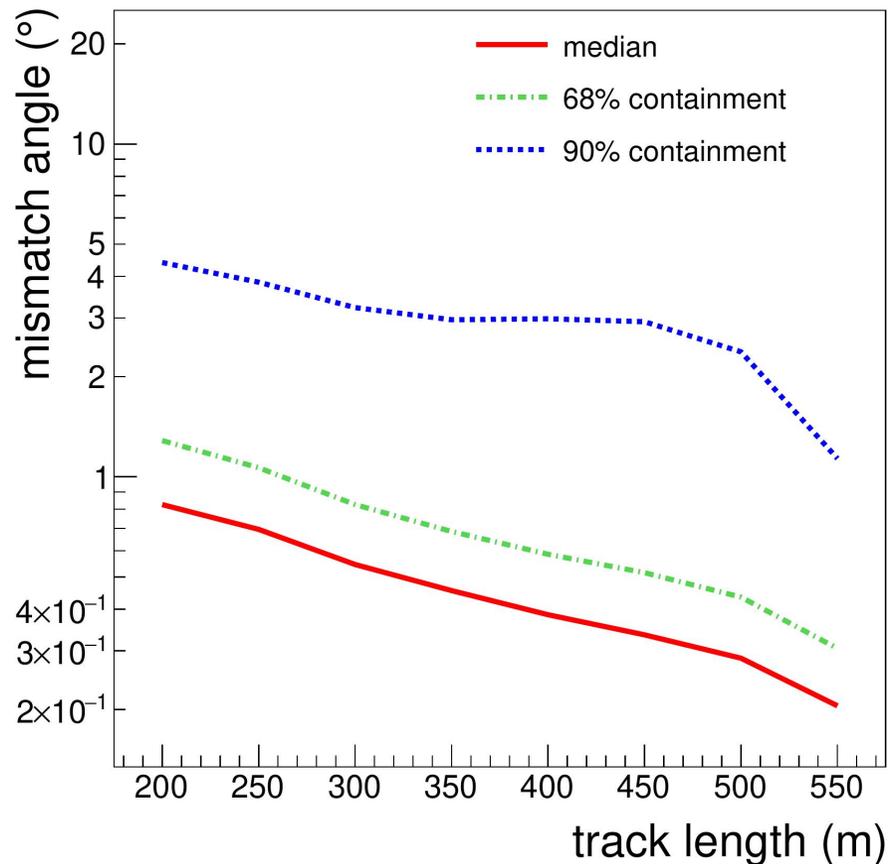
- Однокластерный анализ: сканирующий алгоритм [\[PoS\(ICRC2021\)1063\]](#)
- Мультикластерное восстановление: затравочный трек на триггерных импульсах ОМ
- Алгоритмы на основе машинного обучения в разработке [\[I. Kharuk et al 2023 JINST 18 P09026\]](#)

трековое событие до выделения импульсов, данные

после выделения импульсов



Процедура восстановления трековых событий



Восстановление параметров трека

- Производится в несколько итераций с постепенным уточнением используемого набора хитов
- Минимизация функции потерь с временной и зарядовой частями

Угловое разрешение

- Для событий с длиной треков от 500м медианное угловое разрешение составляет 0.2° - 0.3°
- Медианное разрешение для коротких треков ~ 100 - 150 м около 1°



Отбор трековых нейтринных событий

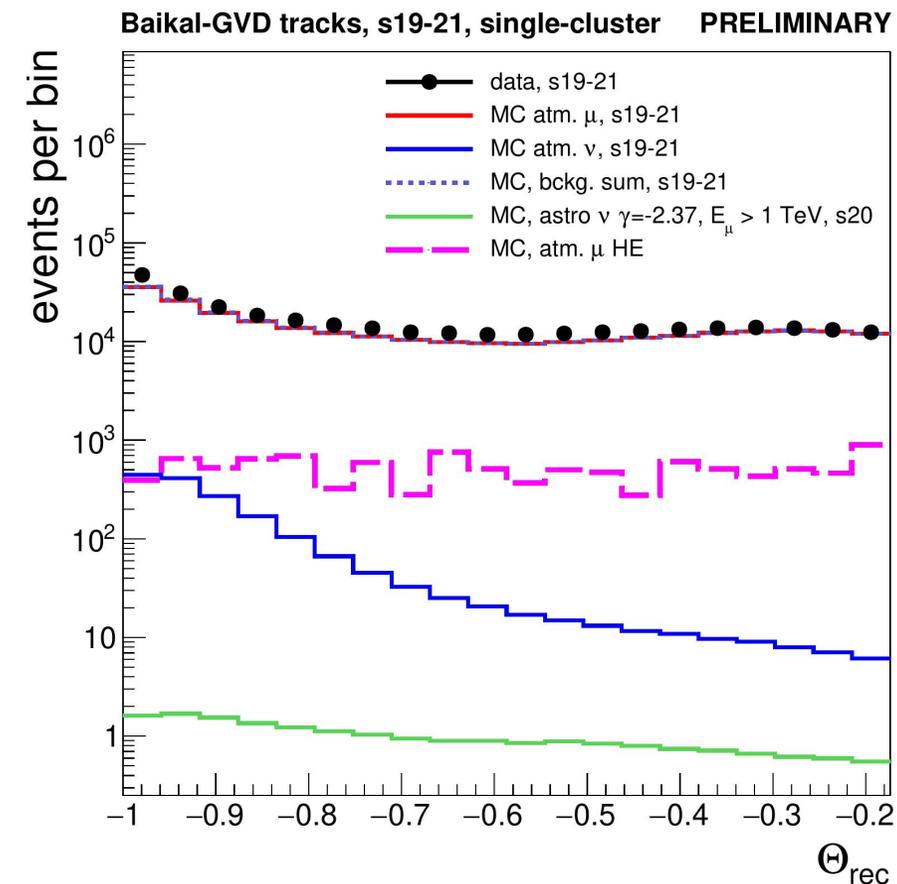
В восстановленных трековых событиях доминируют мюонные группы

Наиболее удобная область для работы с трековыми событиями

- Восходящие и околоразомные треки
- В представленном анализе: $\theta > 100^\circ$

Фон от неверно восстановленных мюонных групп в этой области превосходит сигнал от потока атмосферных нейтрино в $10^2 - 10^3$ раз

Восходящие события ($\theta > 100^\circ$)
перед применением отбора
нейтрино





Отбор трековых нейтринных событий

Для подавления фона от мюонных групп используются деревья принятия решений с бустом (BDT)

Для классификации событий используются около 20 слабо связанных переменных

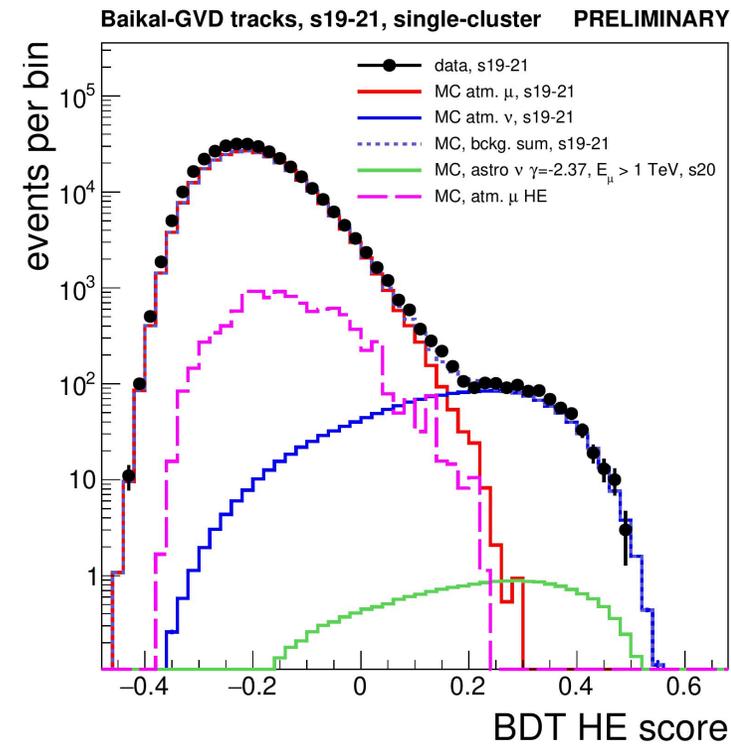
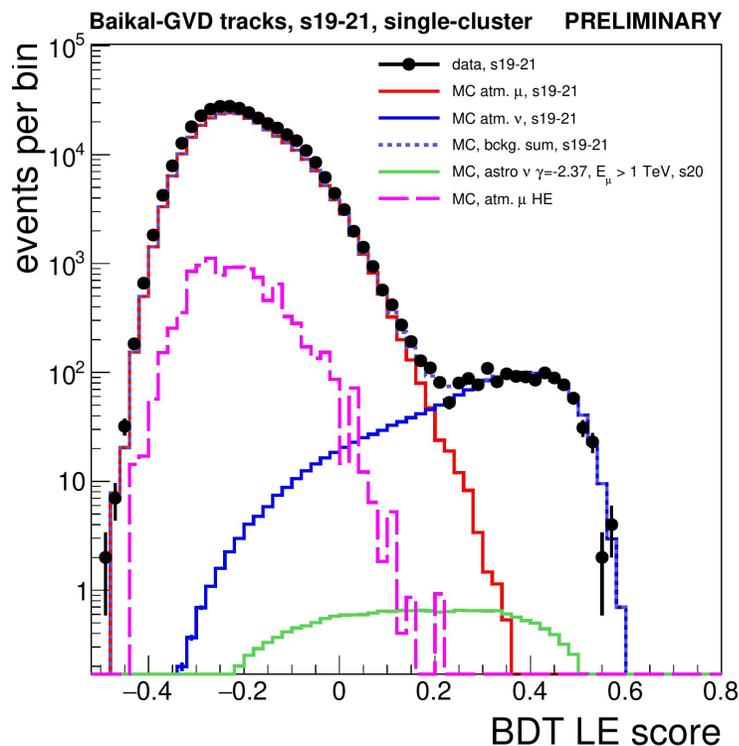
- Переменные качества восстановления
- Переменные топологии события

Два классификатора, натренированные на разных сигнальных спектрах

- BDT LE, для низких энергий: $E_\mu < 10$ ТэВ, спектр атмосферных нейтрино
- BDT HE, для высоких энергий: $E_\mu > 10$ ТэВ, астрофизический спектр $\nu \sim E^{-2}$

В качестве фона

- Группы атмосферных мюонов, естественный спектр
- Группы атмосферных мюонов с лидирующим мюоном $E_\mu > 100$ ТэВ





Оценка энергии мюонов

Оценка энергии оптимизирована для событий - кандидатов в нейтрино

Линейные потери энергии мюона в среде начиная с $E \sim 1$ ТэВ

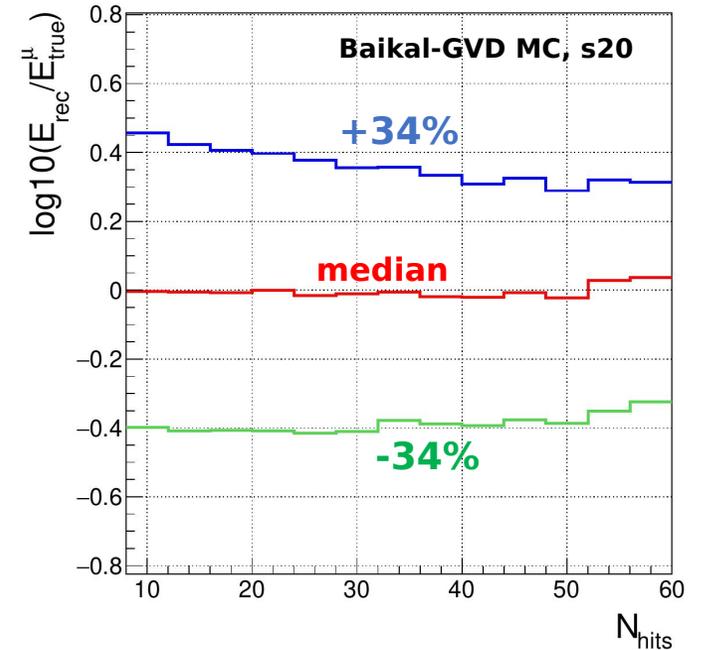
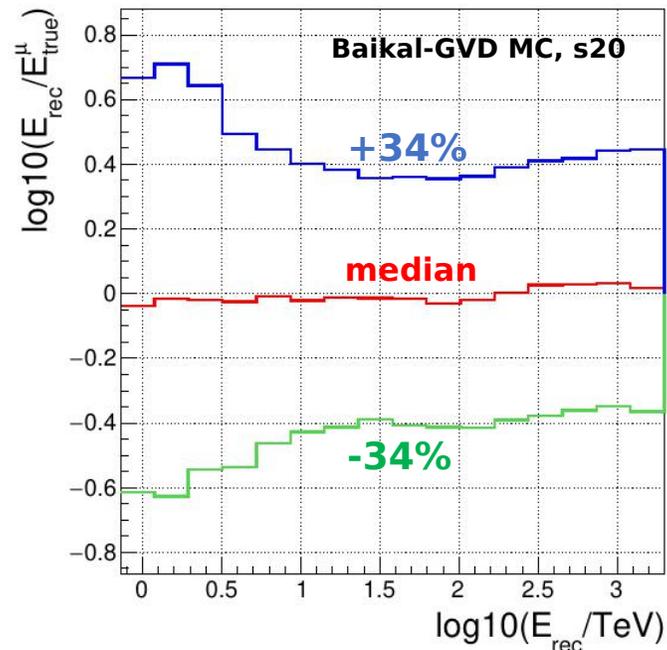
$$-\frac{dE_\mu}{dx} = a + b \cdot E_\mu$$

Оценка по медианным потерям энергии мюона в процессе прохождения через детектор

- Оценивается соответствующая яркость трека для каждого срабатывания ОМ
- Выбирается медианное значение
- Ему сопоставляется медианное значение энергии мюона в центре установки

Интервал 68% для E_{true}^μ :

- $\sim (E_{\text{rec}}/2.5, 2.5 \times E_{\text{rec}})$ в диапазоне $10 < E_{\text{rec}} < 1000$ (ТэВ):
- Разрешение улучшается с ростом количества хитов

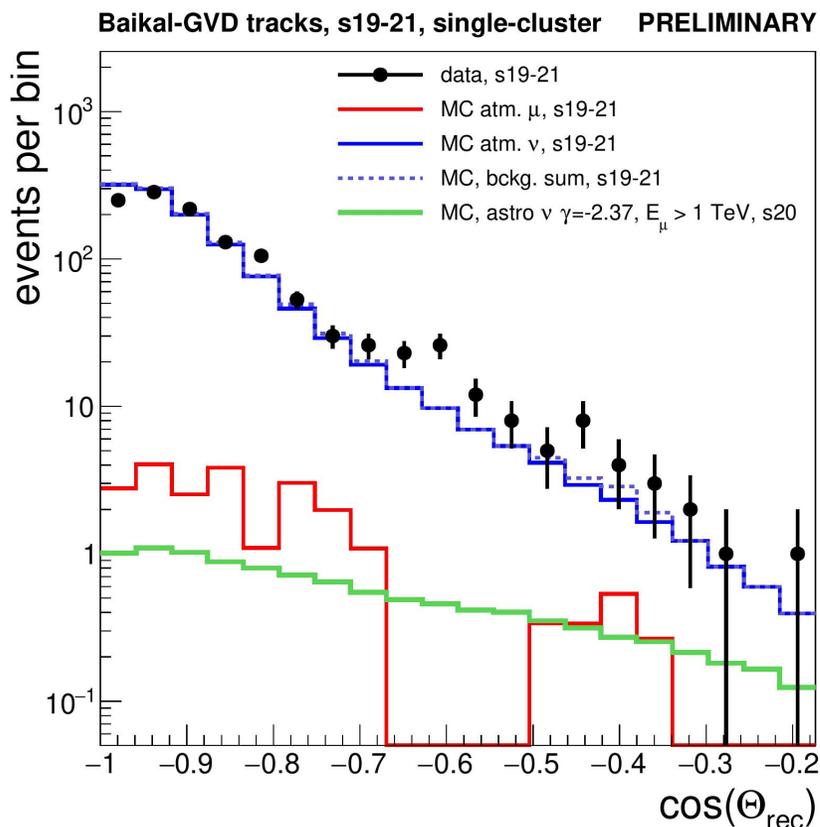




Результаты обработки данных

В однокластерном трековом канале обработаны данные сезонов 2019-2023

- Общая экспозиция: эквивалент ~ 32 лет работы одного кластера
- Доступны наборы сигнального и фонового МК, учитывающие специфику каждого сезона
- Идет работа над уточнением характеристик полученного набора событий



Демонстрационный набор событий по сезонам 2019 - 2021:

- Общая экспозиция: эквивалент 14.37 лет работы одного кластера
- Применен отбор без оптимизации:
 $\text{BDT_HE} > 0.25 \parallel \text{BDT_LE} > 0.25$
- Выделено 1189 событий-кандидатов в нейтрино

Монте-Карло

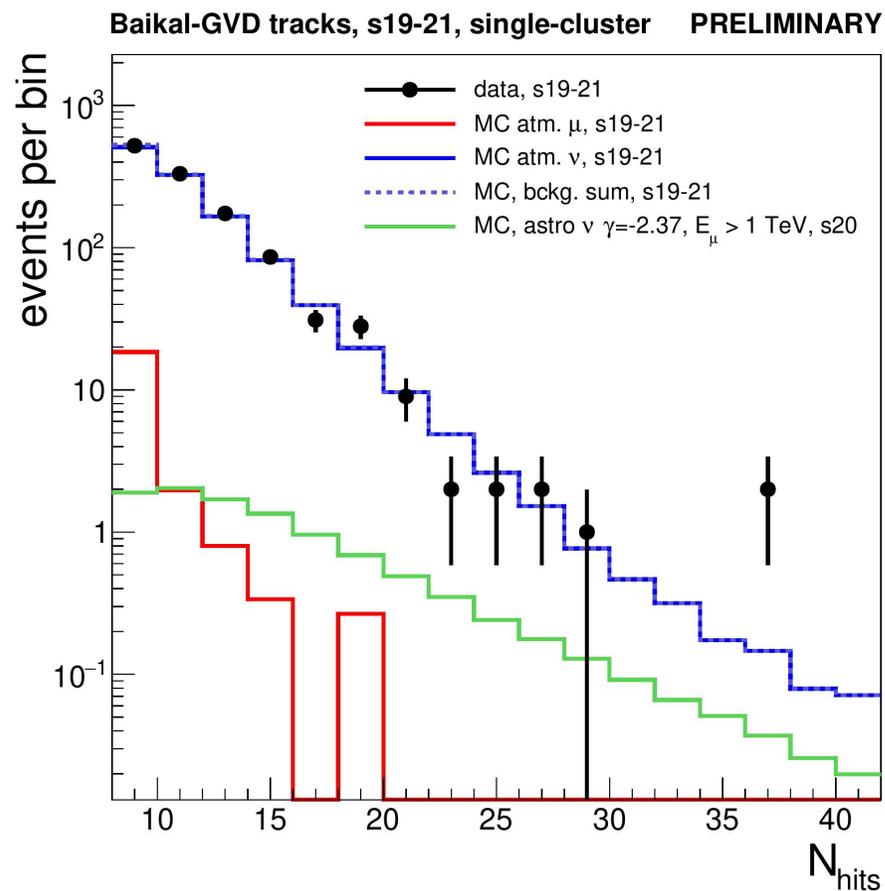
- атм. ν : Bartol flux [[Phys. Rev. D 70, 023006](#)]
- астро- ν : треки IceCube [[R. Abbasi et al 2022 ApJ 928 50](#)]

К нормировке атмосферных и астро- ν применен фактор 1.32

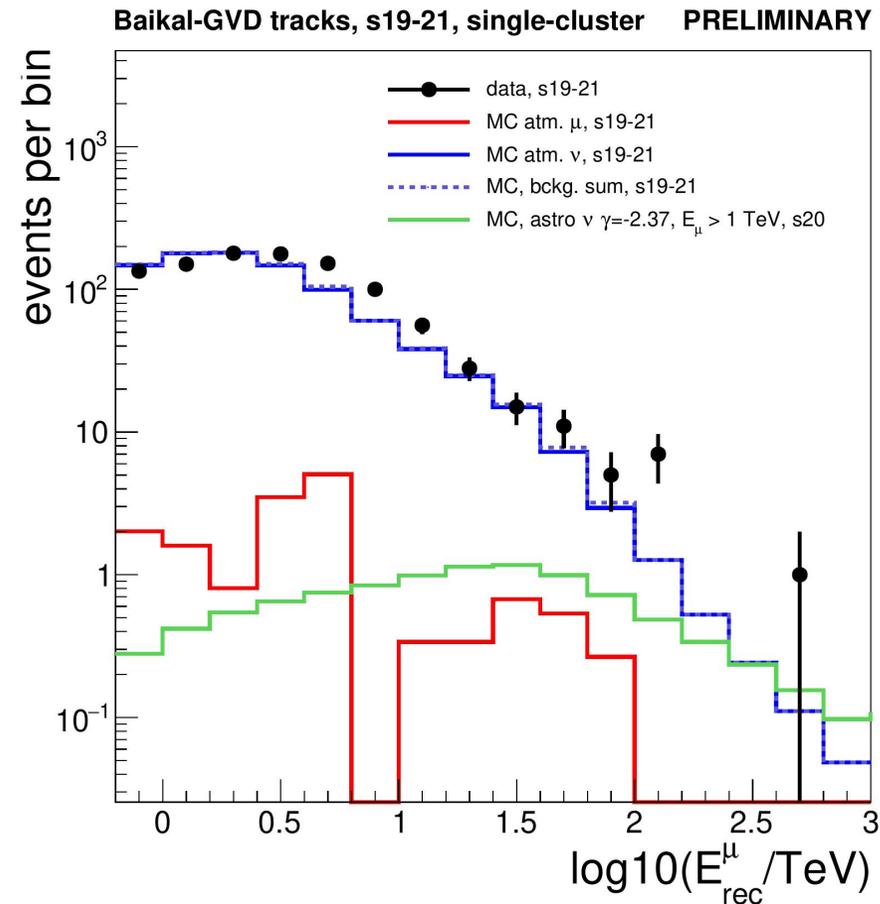


Результаты обработки данных

Распределение по числу срабатываний ОМ



Распределение по оценке энергии мюонов





Некоторые интересные события s19-21

Сезон 2019, Декабрь
Кластер 3

N_{hits} 36
 E_{rec}^{μ} 62.1 ТэВ
 θ_{rec} 153.1°
 L_{track} 332.4 м

Угловая точность:

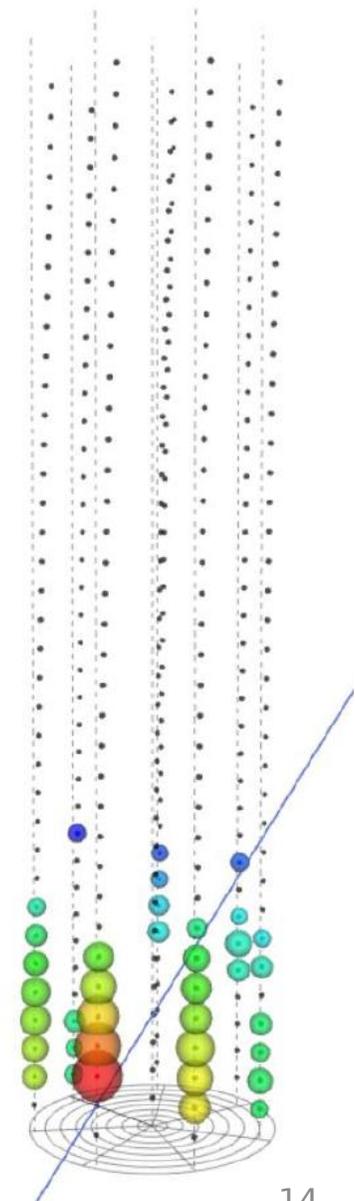
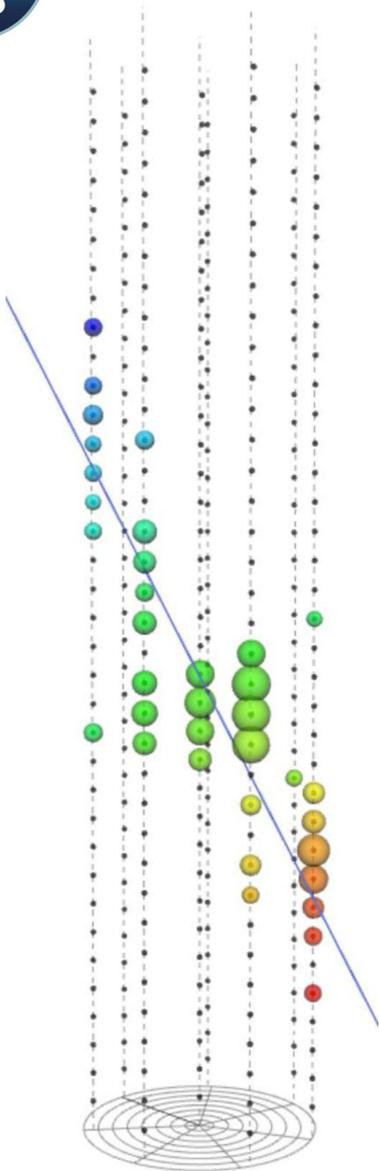
50%: 0.5°
68%: 0.7°
90%: 1.0°

Сезон 2020, Сентябрь
Кластер 5

N_{hits} 37
 E_{rec}^{μ} 107.2 ТэВ
 θ_{rec} 116.7°
 L_{track} 140.1 м

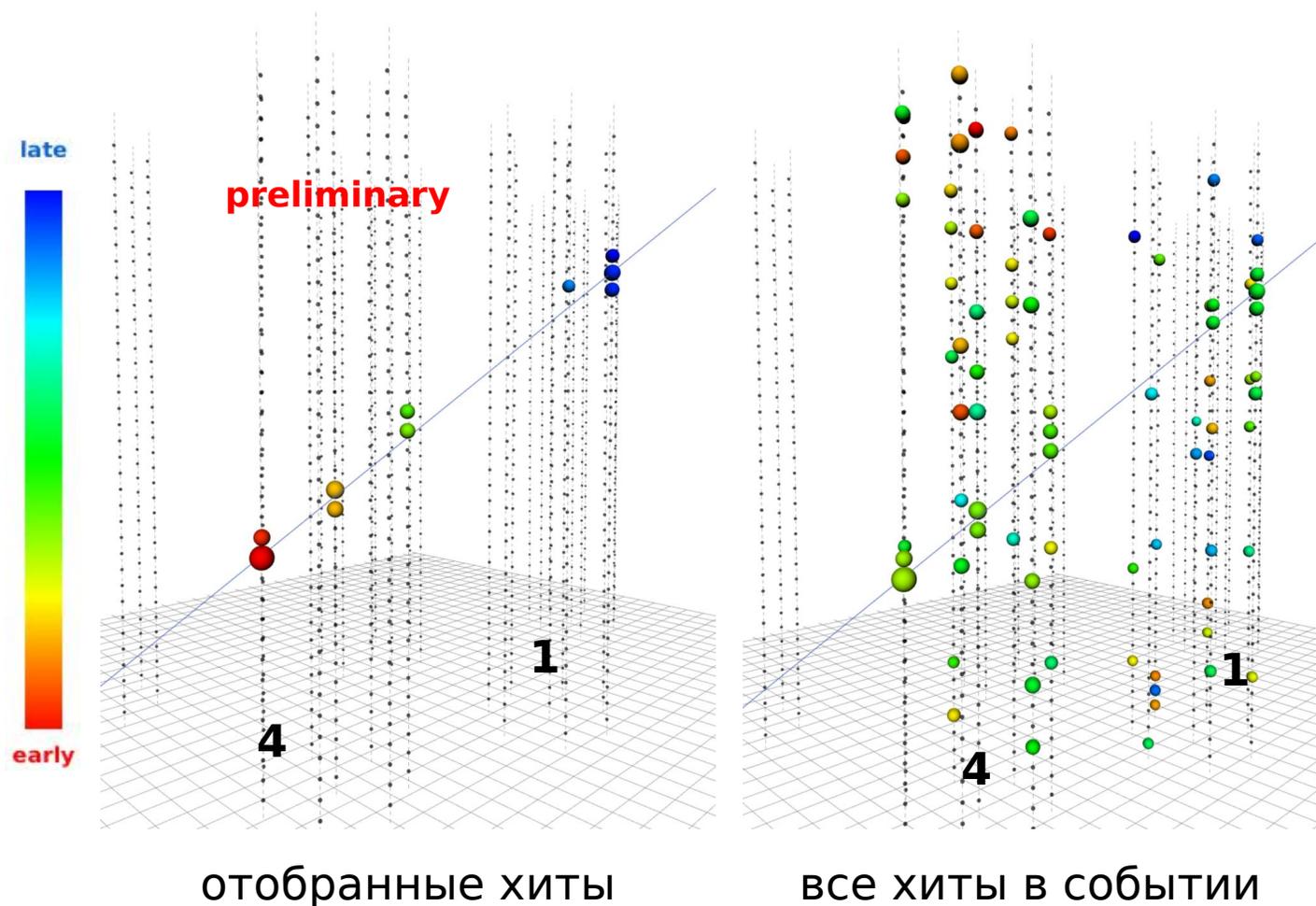
Угловая точность:

50%: 0.7°
68%: 1.0°
90%: 1.5°





Мультикластерный трековый анализ



Мультикластерные треки позволяют достичь наилучшего углового разрешения для мюонов высоких энергий

Пример мультикластерного кандидата в ν :

Лето 2019

Кластеры 1 & 4

$$\theta_{\text{rec}} = 125.6^\circ$$

$$N_{\text{hits}} = 10$$

$$L_{\text{track}} = 399 \text{ м}$$

$$E_{\text{rec}} < 1 \text{ ТэВ}$$



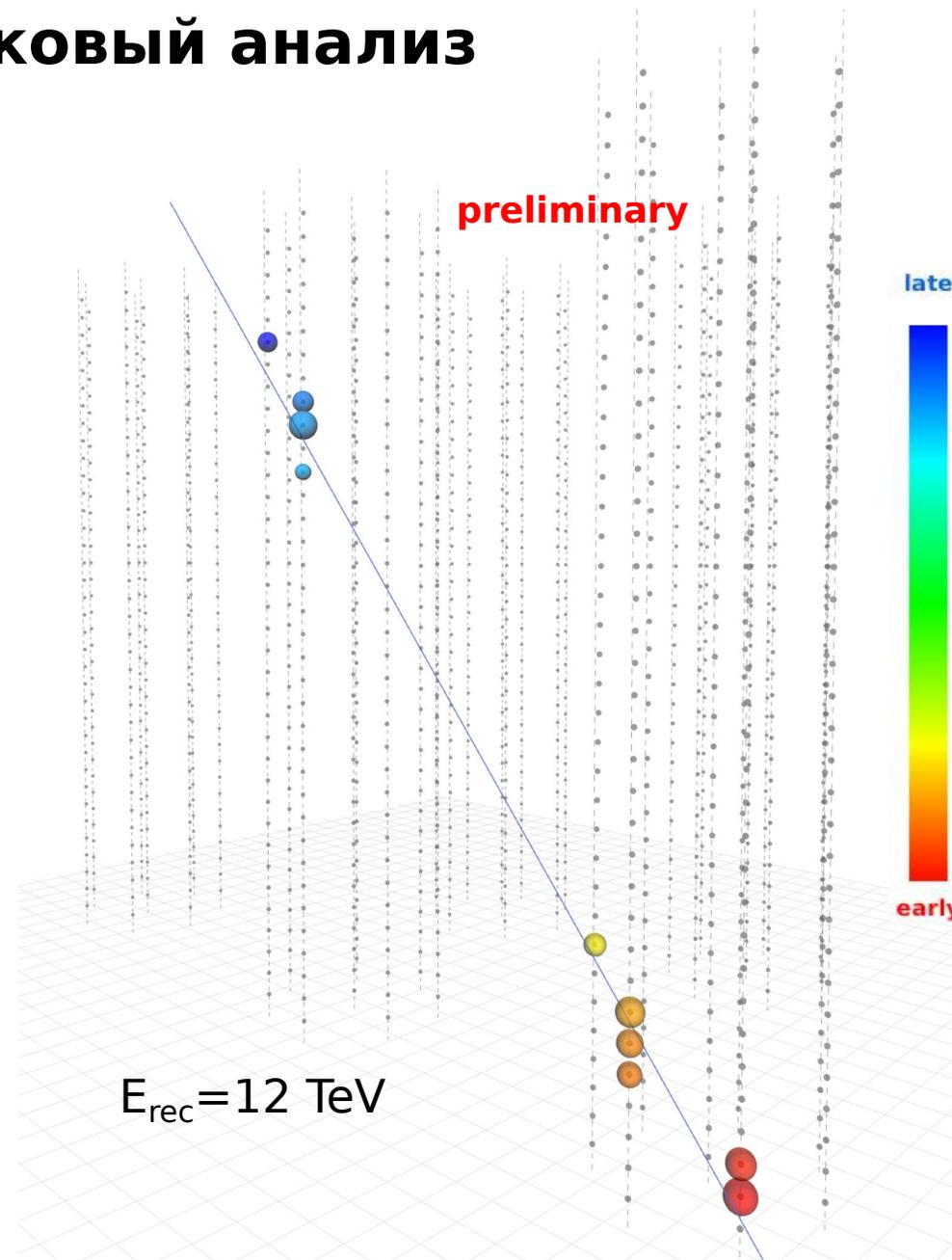
Мультикластерный трековый анализ

В мультикластерном анализе обработан сезон 2019

В 150 днях данных 2019 года выделено 5 кандидатов в нейтрино

В наборе преобладают атмосферные нейтрино

Мультикластерный анализ в стадии разработки





Заключение

В Baikal-GVD разработаны методики восстановления направления и энергии мюонов и отбора событий- кандидатов в нейтрино

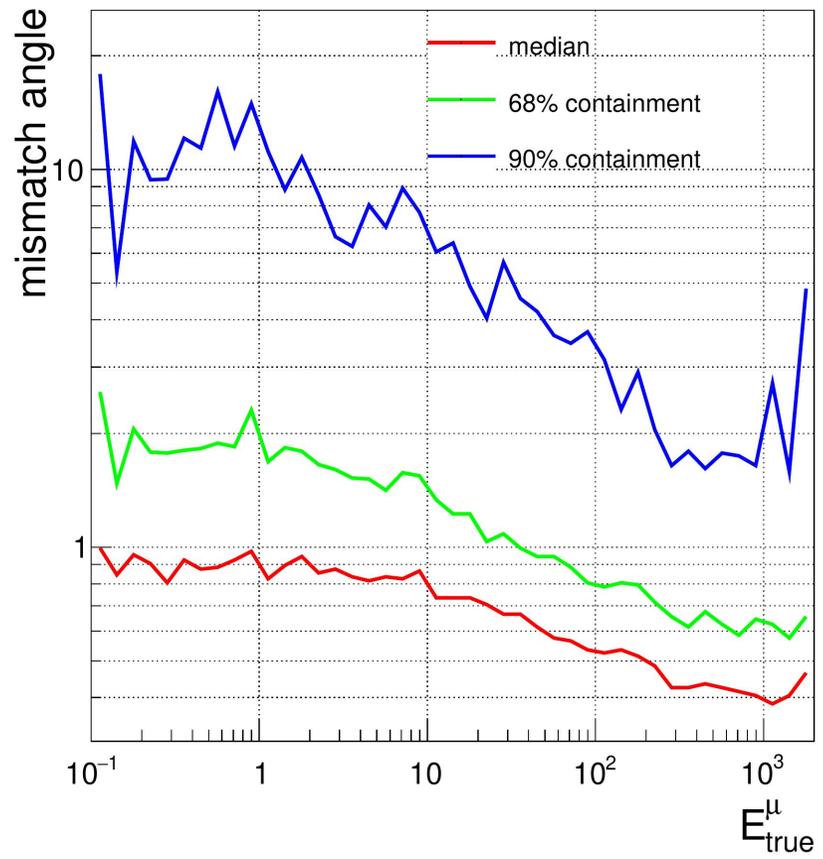
В однокластерном анализе обработаны данные сезонов 2019-2023, ведется работа над уточнением характеристик полученного набора событий

Впервые представлен набор из 1189 событий-кандидатов в нейтрино по результатам однокластерного анализа данных 2019-2021 годов

- Энергетический спектр полученных событий простирается в область >100 ТэВ

В мультикластерном анализе обработаны данные 2019 года, получены первые события - кандидаты в нейтрино, ведется работа над развитием анализа

Дополнительные материалы

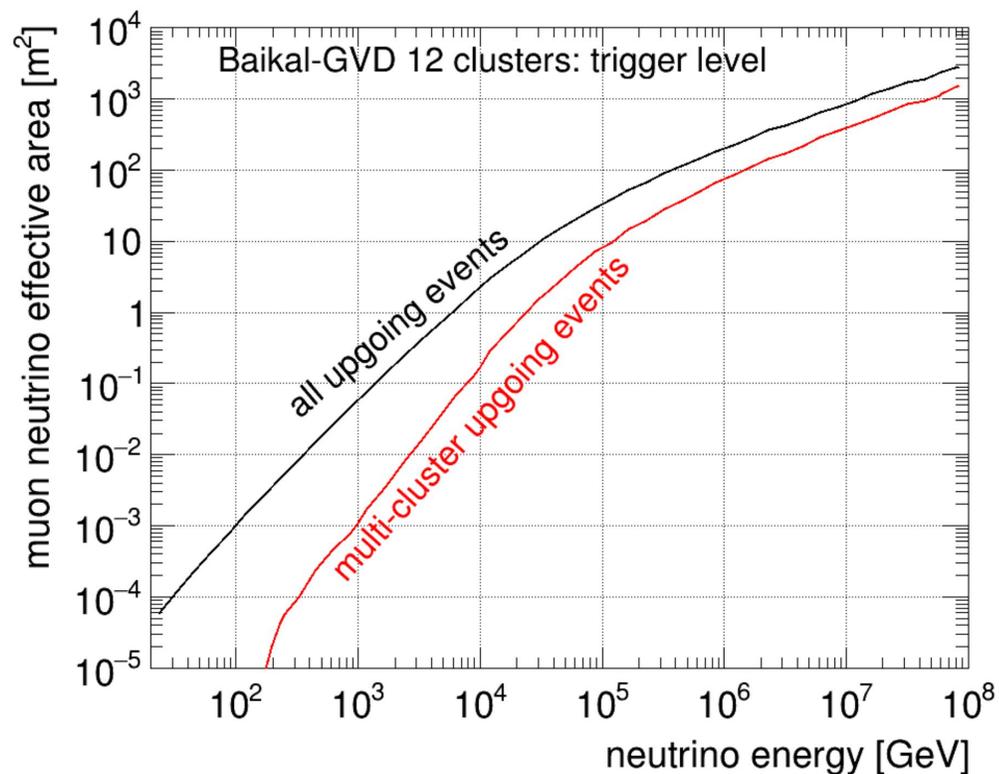


Угловое разрешение в однокластерном анализе как функция энергии мюона

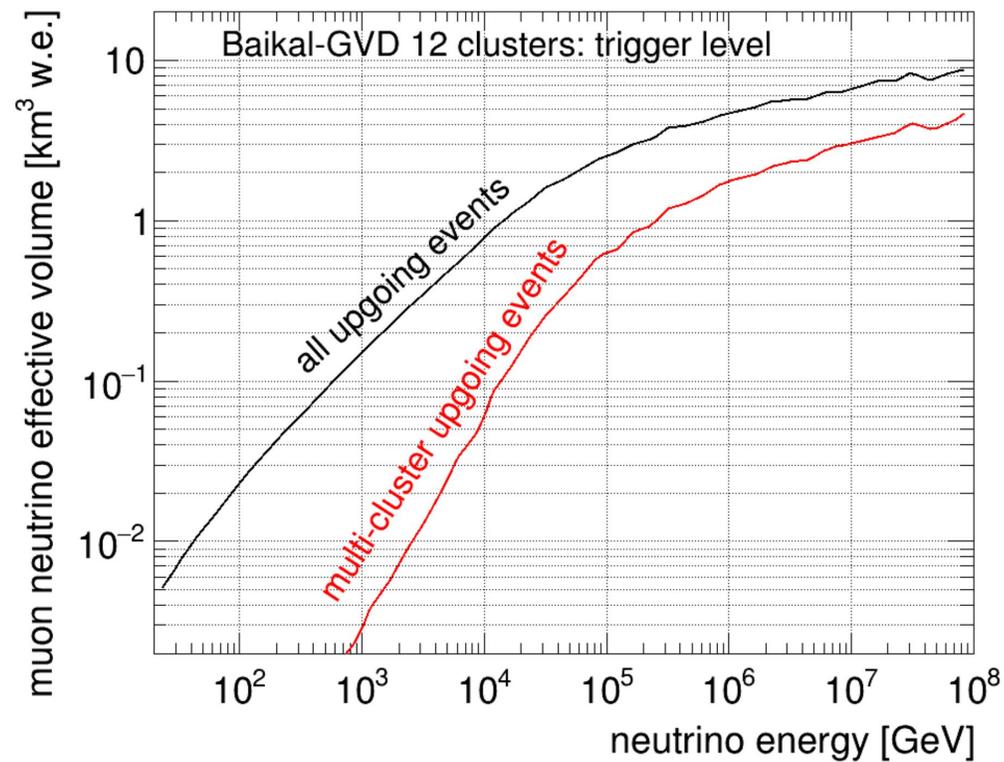


Чувствительность детектора к трековым событиям

Эффективная площадь



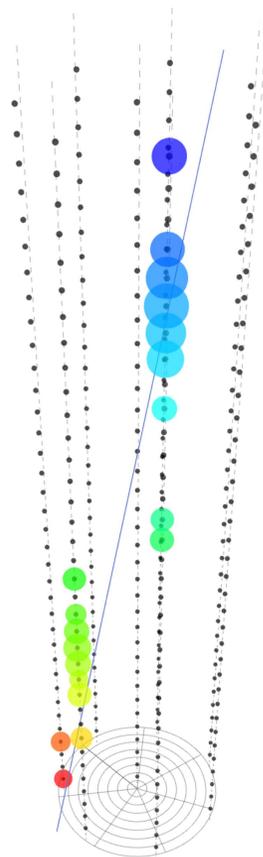
Эффективный объем



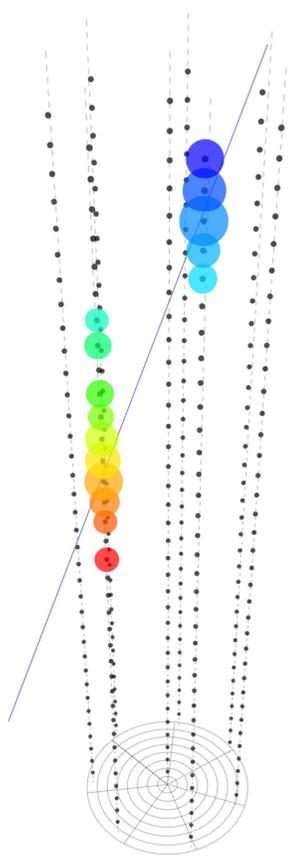
Мультикластерные события составляют около 20% событий для $E_\nu \sim 100$ ТэВ



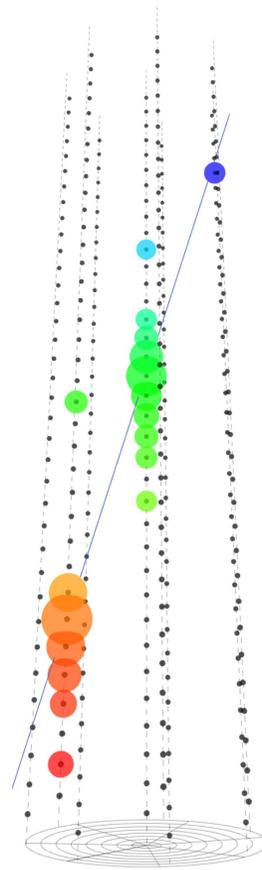
Muon neutrino candidates



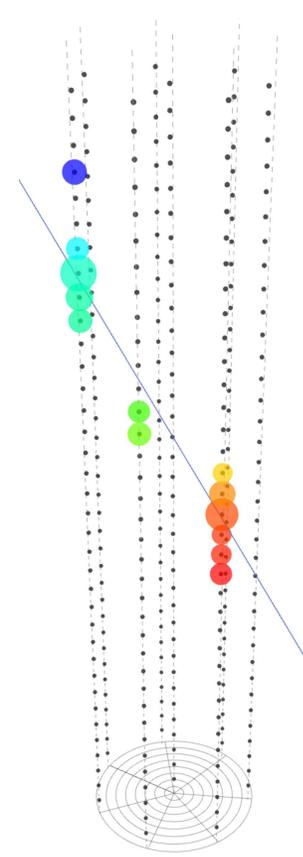
cluster 3, run 122
evt. 1549343
 $\theta_{\text{zenith}} = 169.78^\circ$
 $N_{\text{strings}} = 3$
 $N_{\text{hits}} = 19$



cluster 1, run 157
evt. 1414137
 $\theta_{\text{zenith}} = 161.78^\circ$
 $N_{\text{strings}} = 2$
 $N_{\text{hits}} = 15$



cluster 4, run 99
evt. 438088
 $\theta_{\text{zenith}} = 162.22^\circ$
 $N_{\text{strings}} = 3$
 $N_{\text{hits}} = 18$



cluster 5, run 162
evt. 1939721
 $\theta_{\text{zenith}} = 148.07^\circ$
 $N_{\text{strings}} = 3$
 $N_{\text{hits}} = 13$

