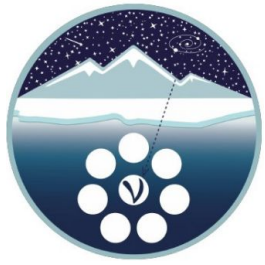


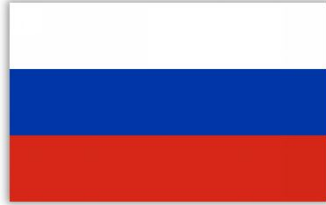
Эксперимент Baikal-GVD

Григорий Сафронов (ИЯИ РАН)
от коллаборации Baikal-GVD



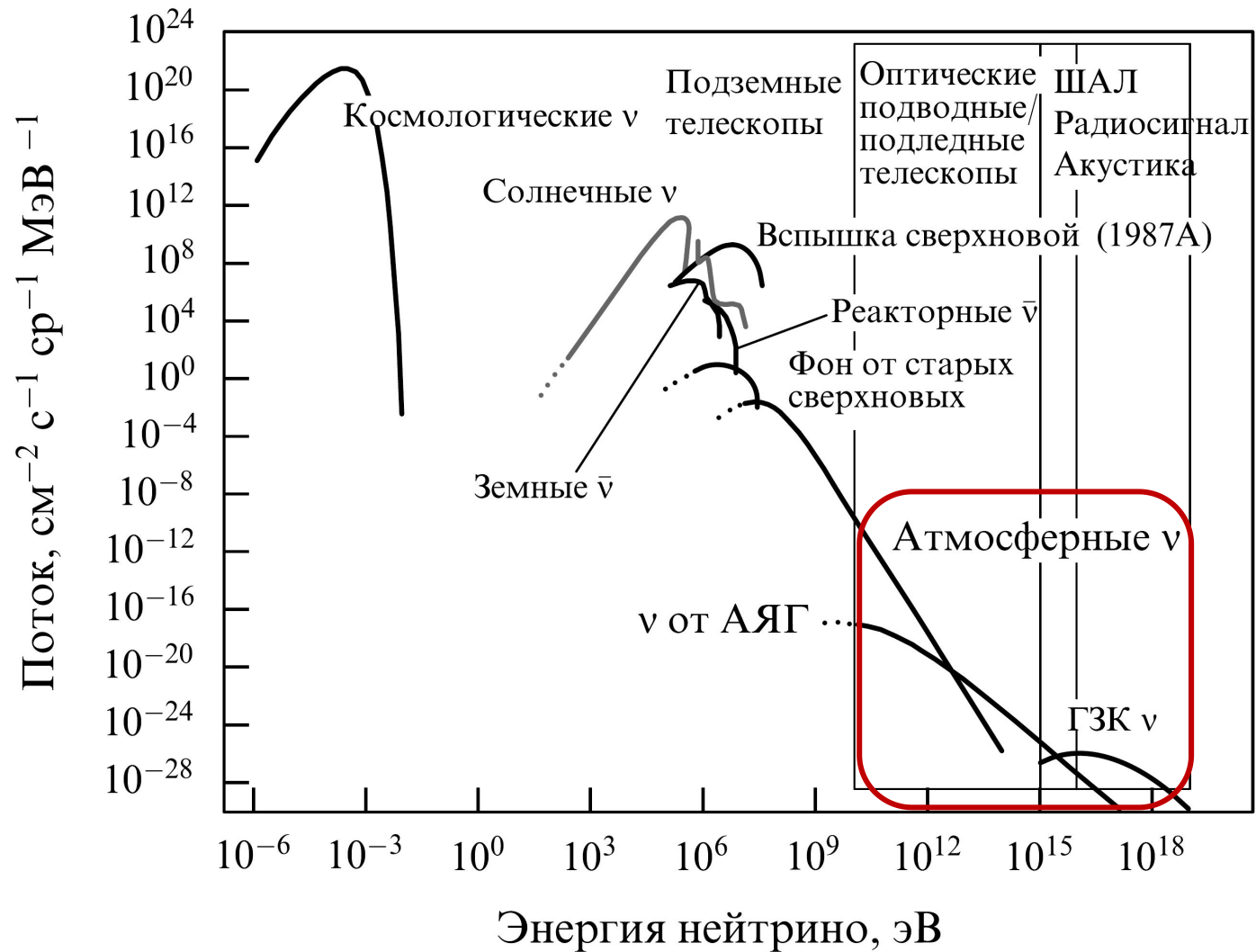
Эксперимент Baikal-GVD

10 институтов, ~70 участников



- Институт Ядерных Исследований (Москва)
- [Объединенный Институт Ядерных Исследований \(Дубна\)](#)
- Иркутский Государственный Университет (Иркутск)
- [НИИ Ядерной Физики им. Д.В. Скобельцина МГУ \(Москва\)](#)
- Нижегородский Государственный Технический Университет (Нижний Новгород)
- [Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет \(Санкт-Петербург\)](#)
- Institute of Experimental and Applied Physics, Czech Technical University (Prague, Czech Republic)
- [EvoLogics \(Berlin, Germany\)](#)
- Comenius University (Bratislava, Slovakia)
- [Krakow Institute for Nuclear Research \(Krakow, Poland\)](#)

Эксперимент Baikal-GVD



Baikal-GVD - строящийся детектор нейтрино кубокилометрового масштаба в озере Байкал

Основная задача эксперимента - изучение потока астрофизических нейтрино

Уже в настоящее время Baikal-GVD - крупнейший нейтринный телескоп в Северном полушарии

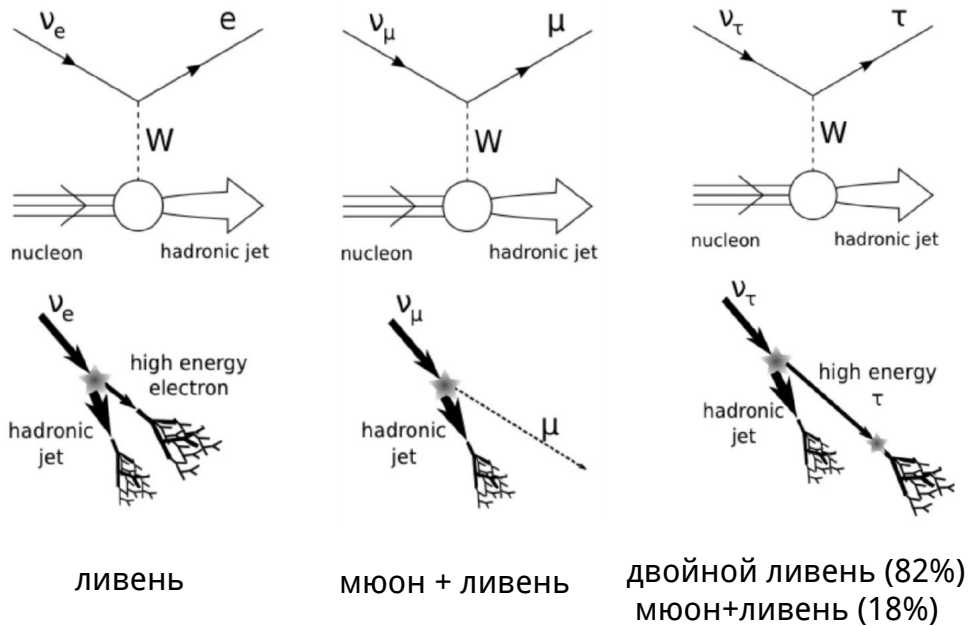
Область чувствительности крупномасштабных нейтринных телескопов

[10.3367/UfNr.0185.201505j.0531]

Принцип детектирования нейтрино

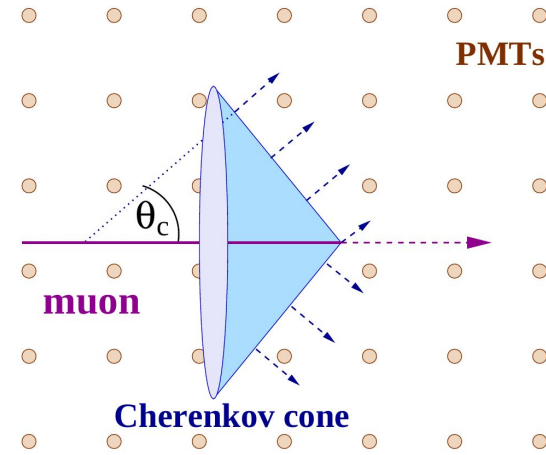
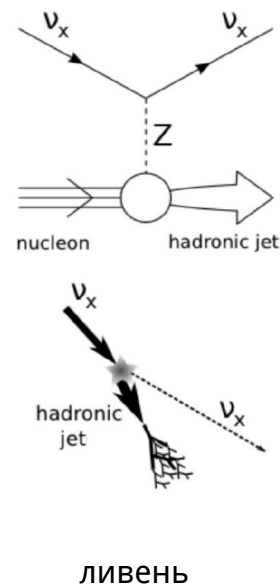
В 1960 году Моисей Александрович Марков предложил instrumentировать фотодетекторами большие объемы воды естественных водоемов для детектирования нейтрино высоких энергий

Заряженные токи:

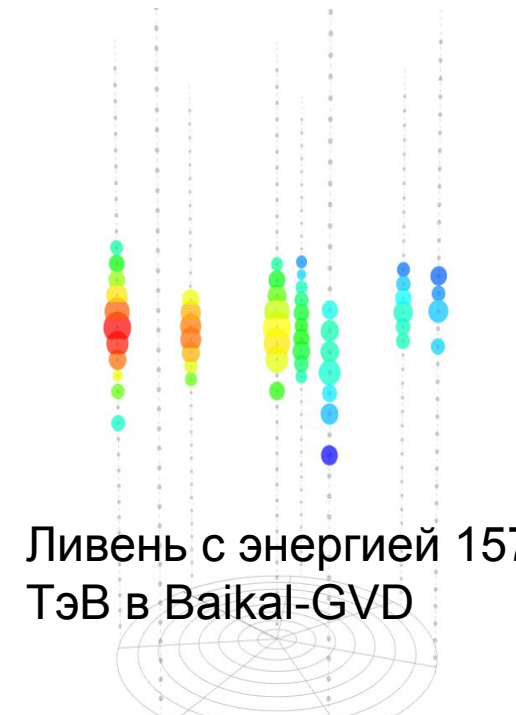
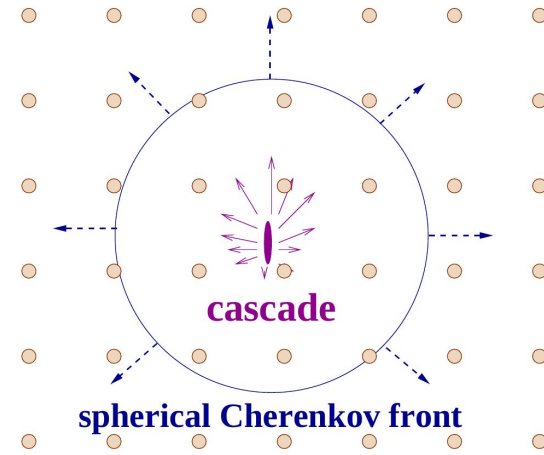


credit: J. Tiffenberg, NUSKY 11

Нейтральный ток:



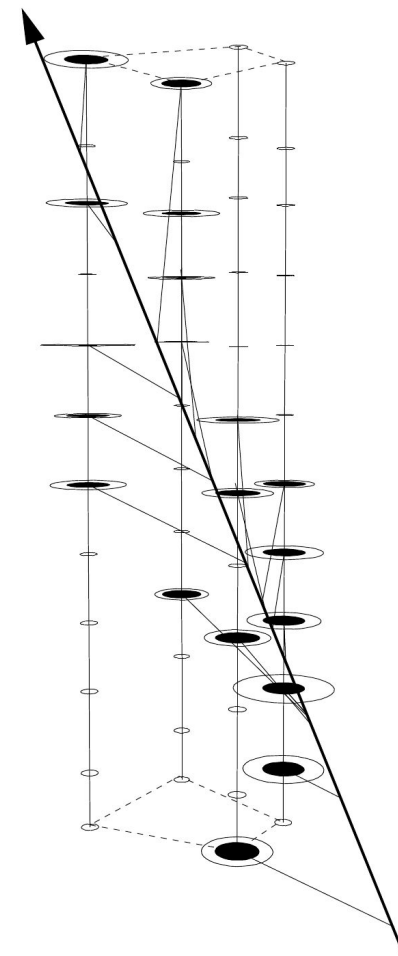
Восходящий мюон в Baikal-GVD



Ливень с энергией 157 ТэВ в Baikal-GVD

Развитие крупномасштабных нейтринных телескопов

- **1970е годы:** Разработка международного проекта DUMAND - изучение принципов детектирования в естественной среде
- **1980: Начало работ по созданию нейтринного телескопа на озере Байкал**
- **1991:** Начало работ по созданию нейтринного телескопа на Южном полюсе (AMANDA)
- **1994: Телескоп NT36 (Байкал): регистрация первого в мире подводного нейтрино**
- **2008:** Начало работы телескопа ANTARES в Средиземном море
- **2011:** Начало работы установки IceCube (Южный полюс) в полном масштабе
- **2013:** Телескоп IceCube: открытие потока астрофизических нейтрино
- **2015: Начало развертывания кубокилометрового телескопа Baikal-GVD**
- **2017:** Одновременное наблюдение слияния нейтронных звезд в гравитационных волнах и гамма/оптическом/радио диапазонах - рождение многоканальной астрономии; Регистрация IceCube нейтрино от блазара TXS0506+056 в совпадении с ростом его активности в гамма/оптическом/радио диапазонах



Один из первых кандидатов в нейтрино, **NT96, 1997 г.**
[\[arXiv:astro-ph/9705244\]](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9705244)

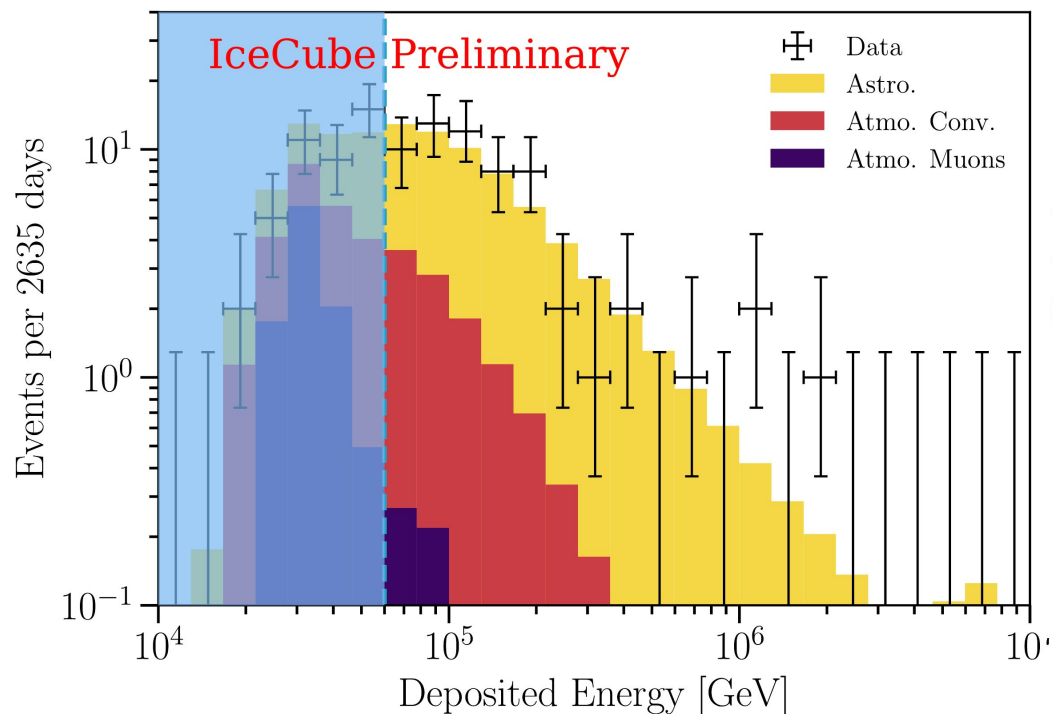
Астрофизика нейтрино высоких энергий

Важные результаты получены телескопом IceCube

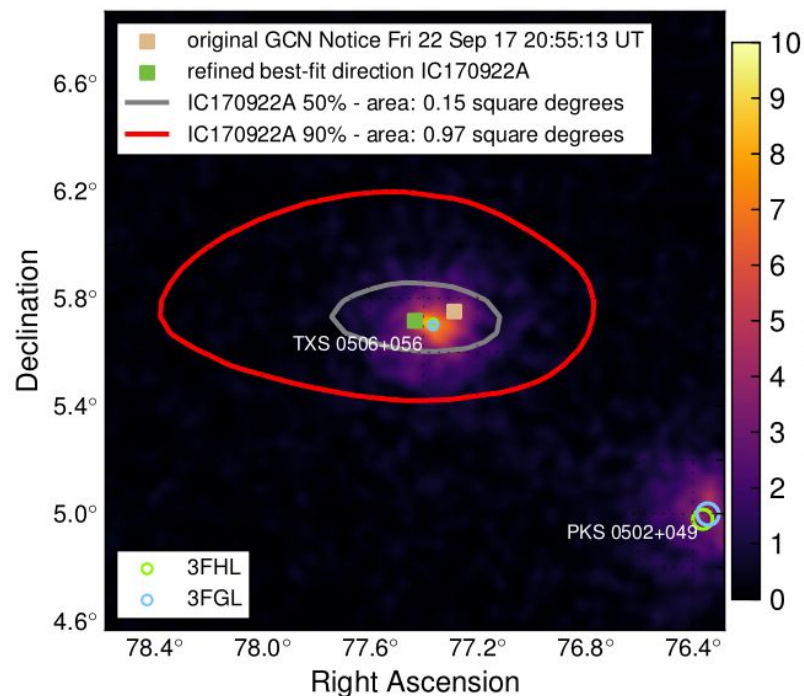
60 HESE событий от нейтрино с $E > 60$ ТэВ

- 42 ливня, 16 треков, 2 двойных ливня [\[EPJ Web Conf. 207 02005 \(2019\)\]](#)

Спектр HESE событий IceCube
[\[PoS \(ICRC2019\) 1004\]](#)

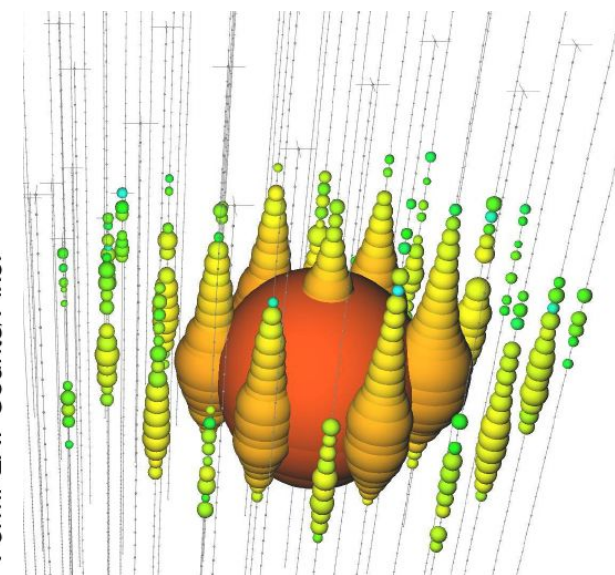


Блазар TXS 0506+056
идентифицирован как
источник нейтрино на
уровне 3σ



[\[10.1126/science.aat1378\]](#)

Ливень $E = 1.1$ ПэВ
[\[10.1126/science.1242856\]](#)

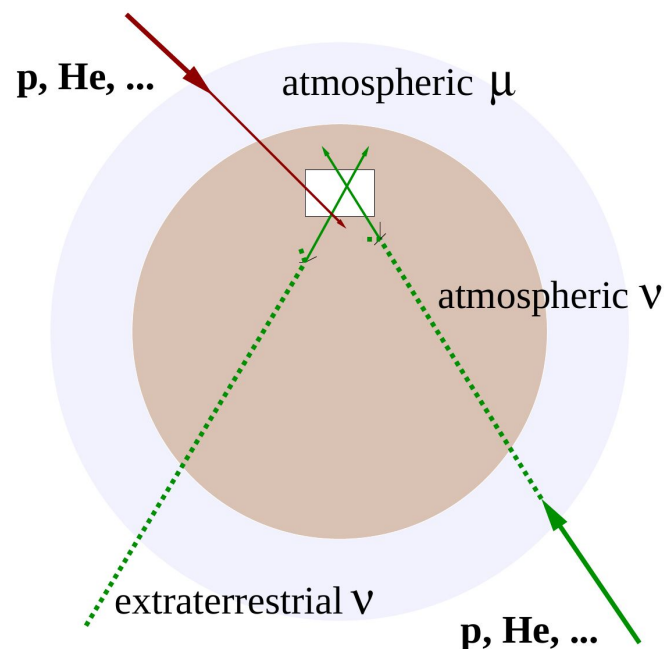


Типичное угловое
разрешение IC:
ливни: 15°
треки: 1°

Астрофизика нейтрино высоких энергий

Поток атмосферных мюонов
составляет фон к нейтрино

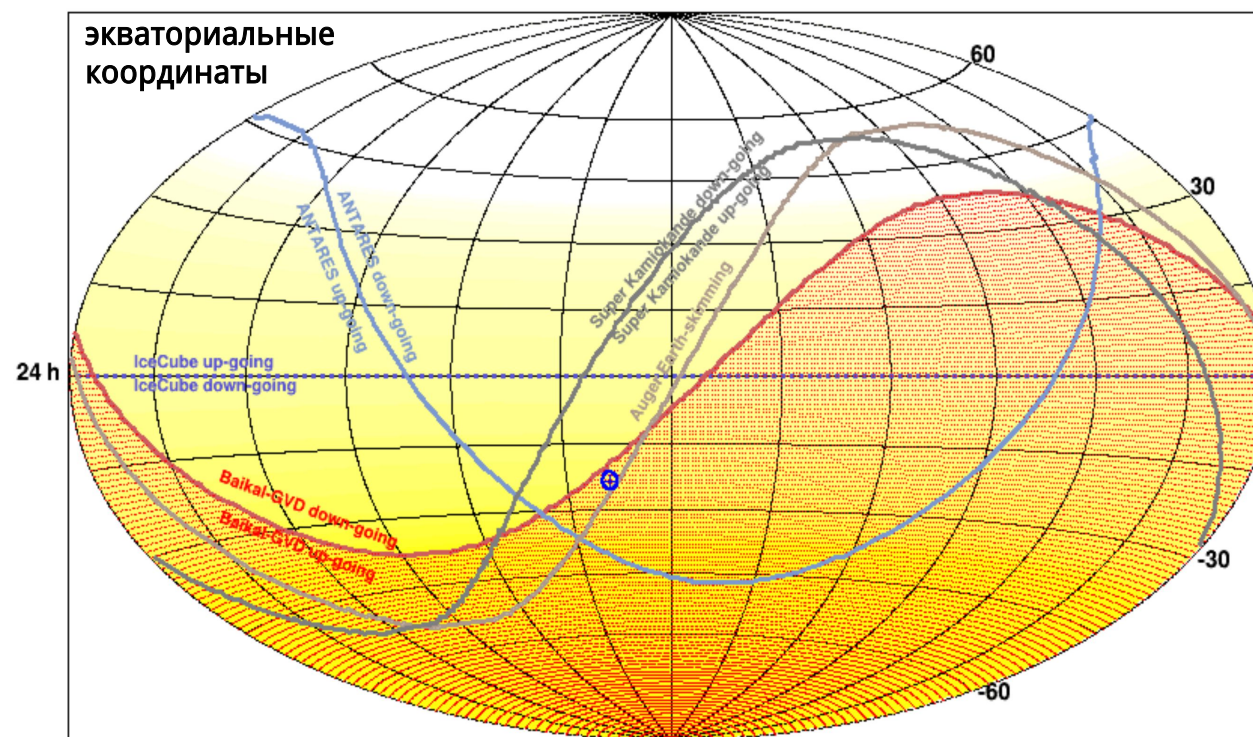
До энергий масштаба сотен ТэВ
нейтринные телескопы
чувствительны в основном к потоку
восходящих нейтрино, далее к
горизонтальным нейтрино



Baikal-GVD
дополняет
область зрения
IceCube

Хорошее угловое разрешение
для идентификации источников

Угловое разрешение
Baikal-GVD:
Ливни: $3-4^\circ$
Мюоны: $<1^\circ$



Расположение эксперимента

Платформа 106 км Кругобайкальской ЖД

Телескоп расположен в 3.6 км от берега

Глубина озера 1366 -1367 м

Прозрачность воды:

- Длина поглощения: 22 м
- Длина рассеяния: 30 - 50 м

Стабильный ледовый покров
февраль - апрель, 6-8 недель

- Монтаж новых кластеров
- Устранение неисправностей



Зимняя экспедиция



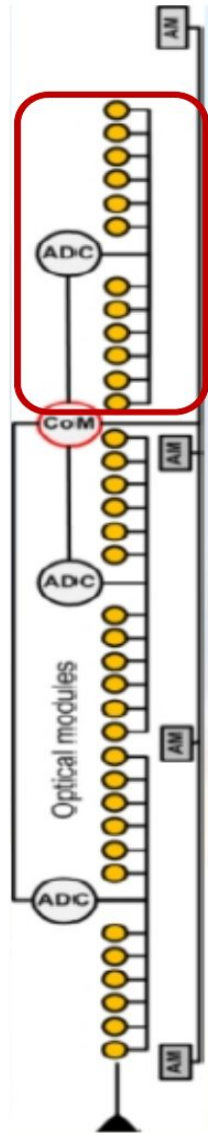
Детектор Baikal-GVD I

Чувствительный элемент телескопа: оптический модуль (ОМ),
1440 установлено, 576 в процессе установки



Детектор Baikal-GVD II

гирлянда:
3 секции



Секция
12 ОМ

Кластер - независимая структурная единица телескопа

Кластер включает 288 ОМ распределенных по 8-ми гирляндам на глубинах от 750 до 1275 м

ОМ ориентированы ко дну озера

Каждая гирлянда закреплена якорем на дне озера

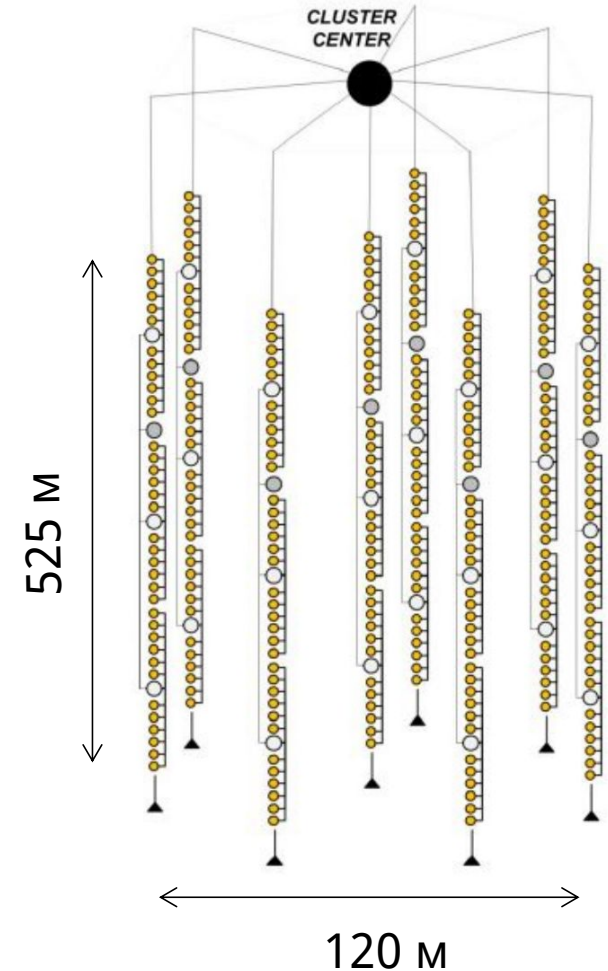
Расстояние между ОМ по вертикали 15 м

Расстояние между гирляндами 60м

На глубине 30м расположен центр кластера

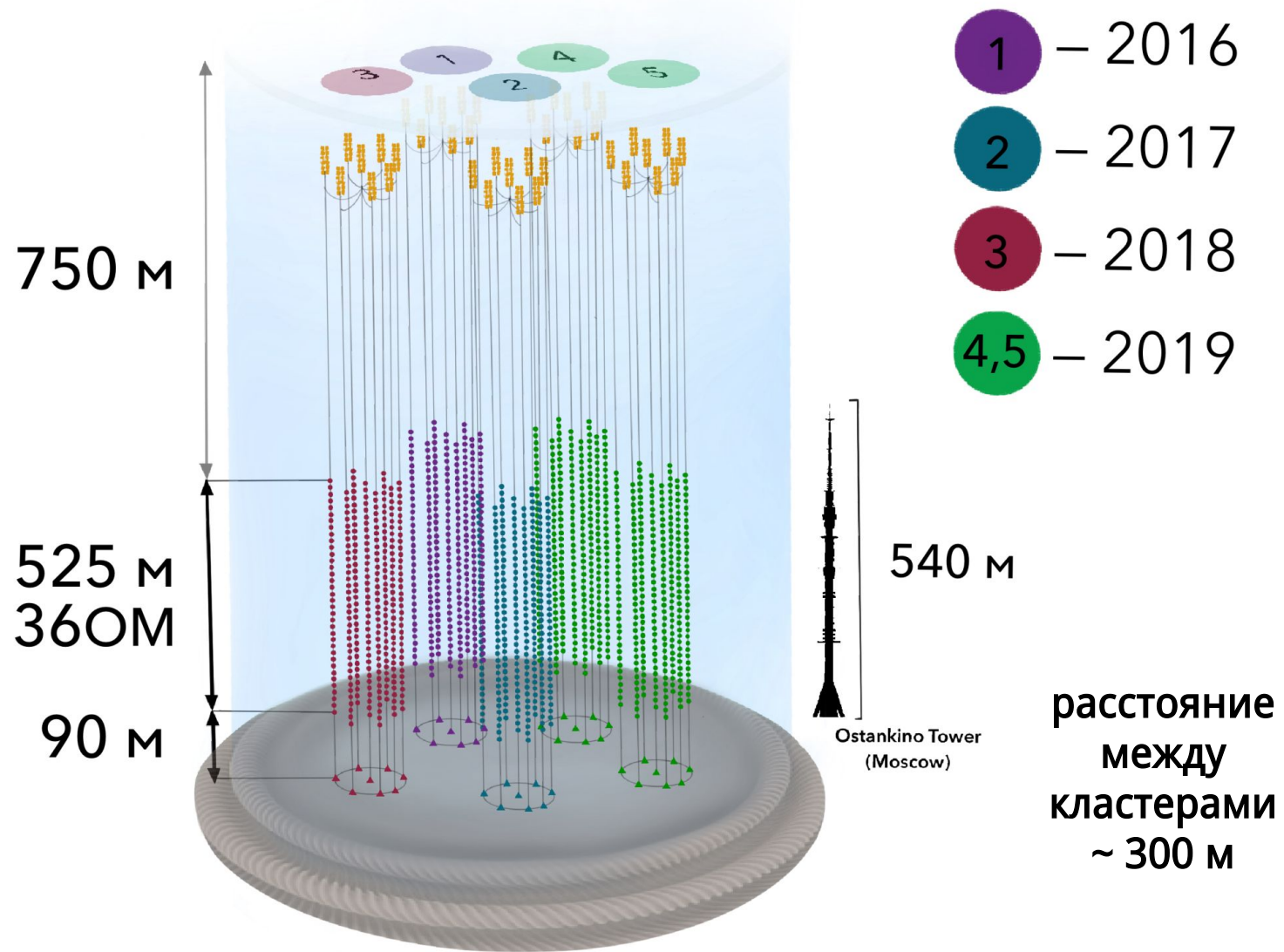
- Триггерная электроника
- Питание
- Оборудование для передачи данных

Кластер: 8 гирлянд



Детектор Baikal-GVD III

Baikal-GVD 2019: 5 кластеров



План развертывания телескопа

Год	Суммарное число кластеров	Число ОМ
2016	1	288
2017	2	576
2018	3	864
2019	5	1440
2020	7	2016
2021	9	2592

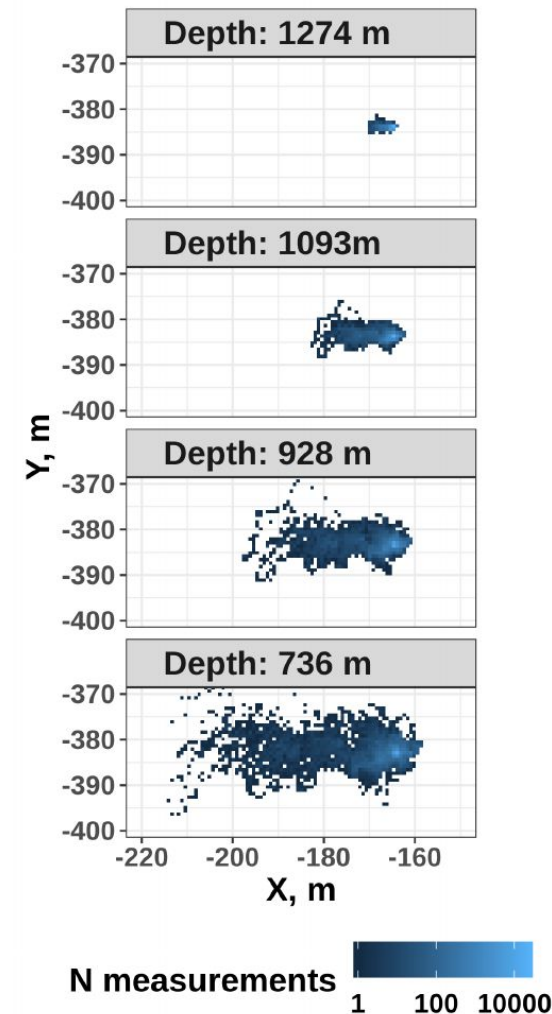
Система акустического позиционирования

Течения провоцируют отклонения верхних ОМ до 50 метров от среднего положения со средней скоростью 0.5 см/с и максимальной 3 см/с

Система акустических маяков на каждой гирлянде:

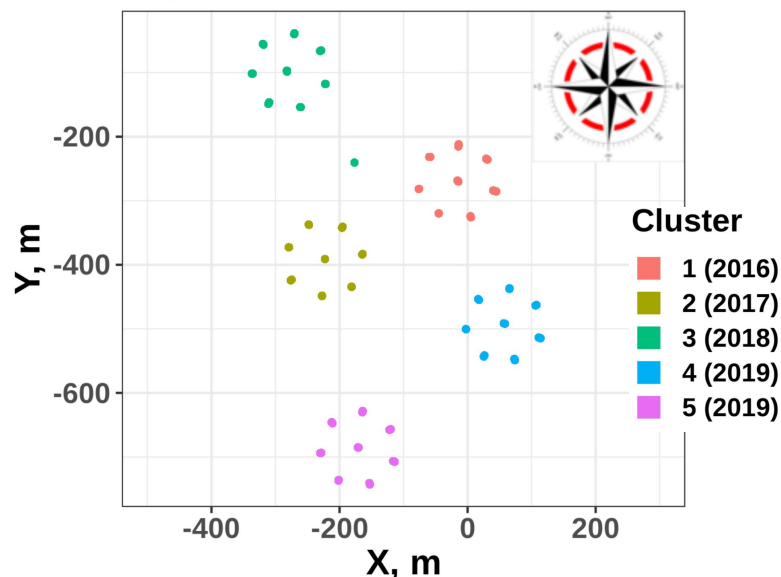
- С интервалом ~1 минута измеряется время распространения сигнала между маяками
- Для каждого измерения реконструируется точное расположение ОМ в режиме реального времени
- **Точность определения координат ОМ < 20 см**

Cluster 2, string 2
April 2018 - February 2019

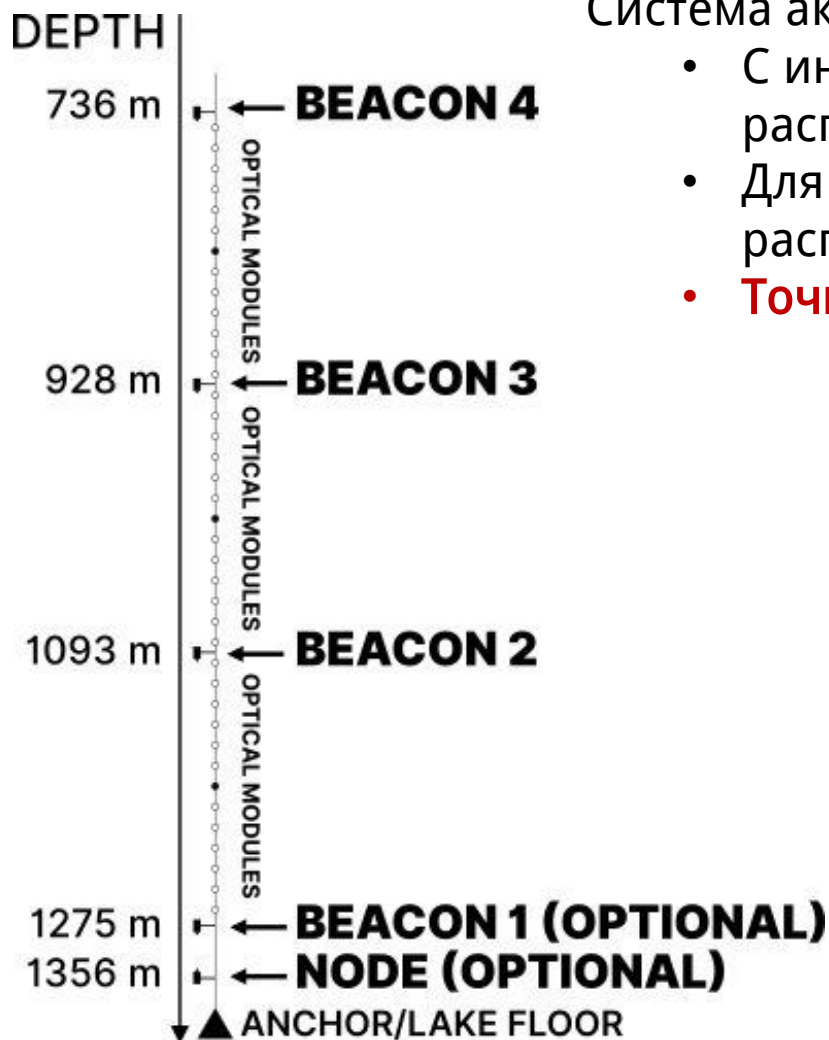


BAIKAL-GVD 2019

Top view



Григорий Сафронов от Baikal-GVD



Калибровка времени отклика

Время импульса ФЭУ - важнейшая характеристика сигнала, используемая в реконструкции

Межканальная внутрисекционная калибровка:

Калибровочные светодиоды

Межсекционная калибровка:

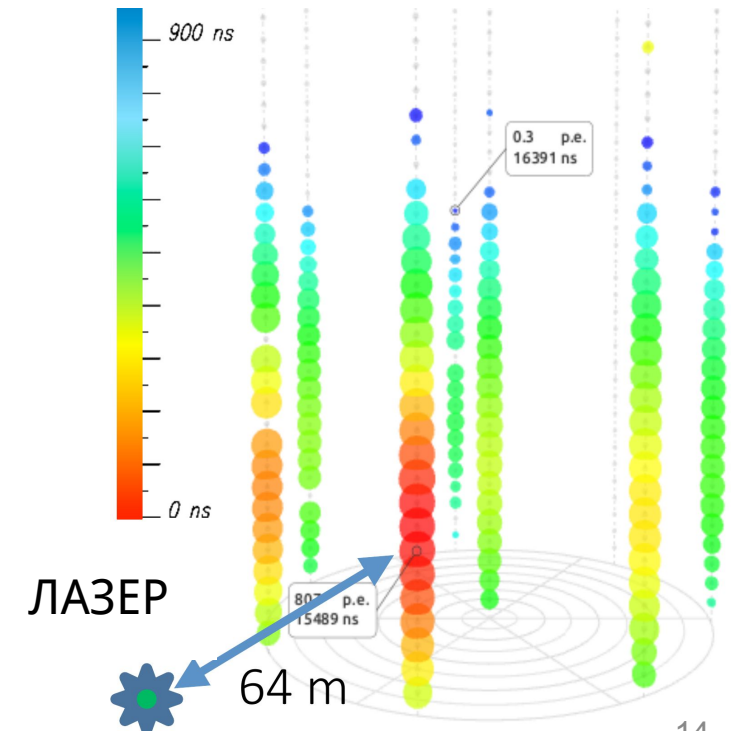
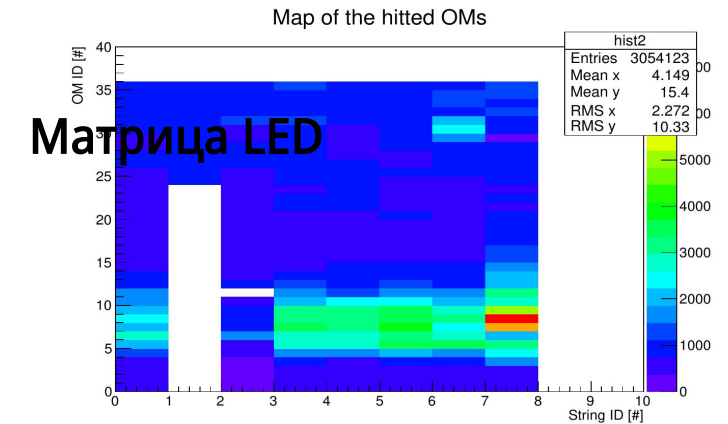
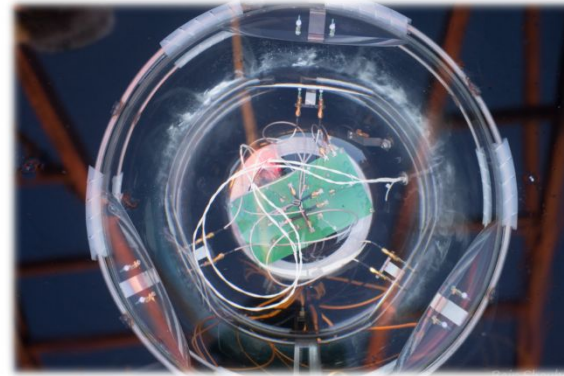
Матрица светодиодов

Межкластерная калибровка:

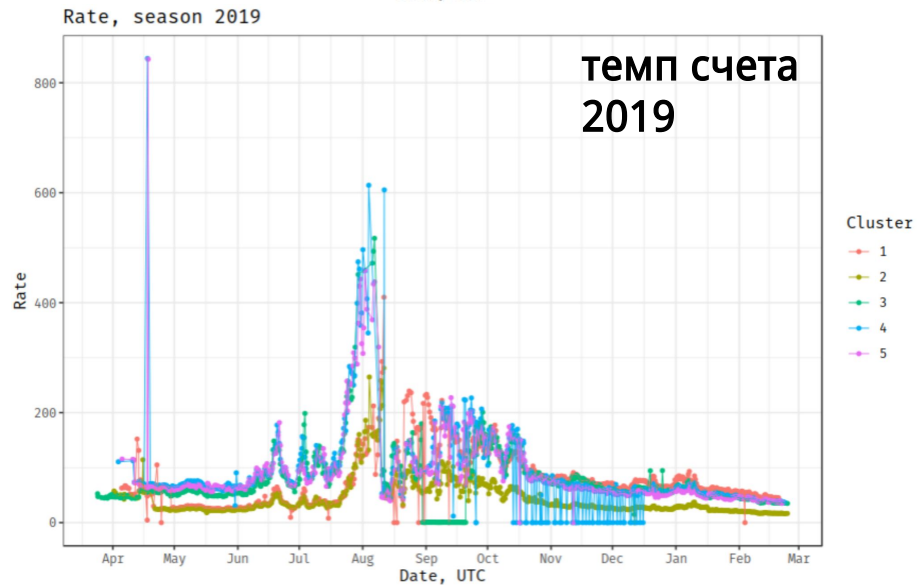
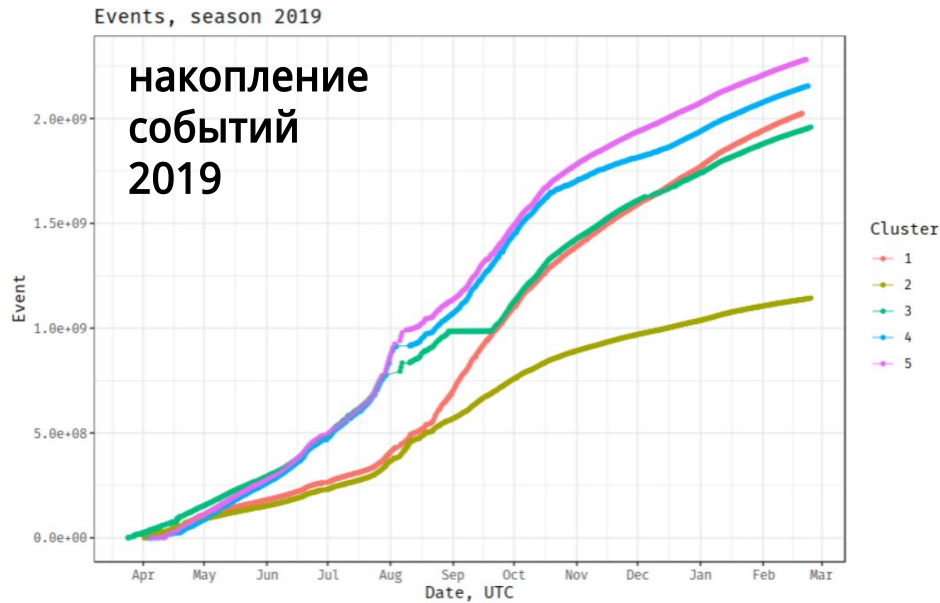
Два специально разработанных изотропных лазера

- Вспышки 532нм, 0.37 мДж (10^{15} фотонов), длительность 1 нс
- В 2020 будет установлено еще 4 лазера

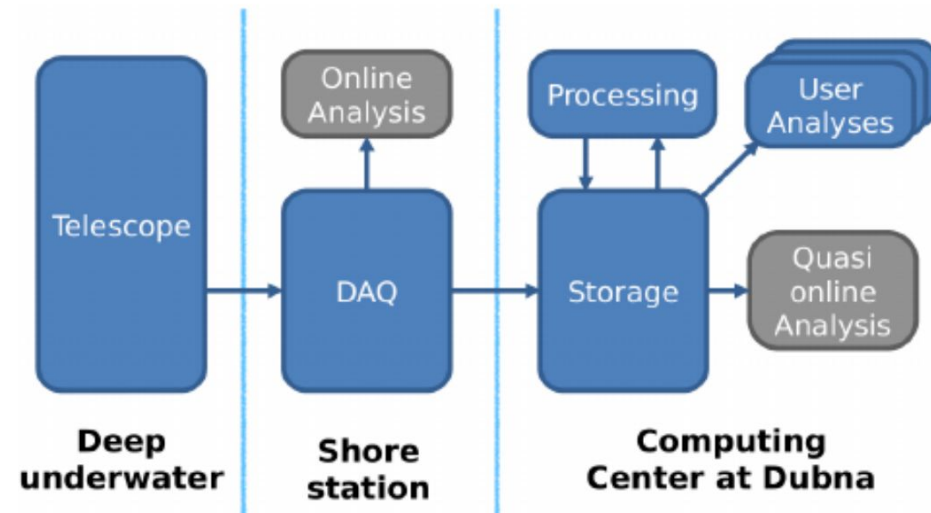
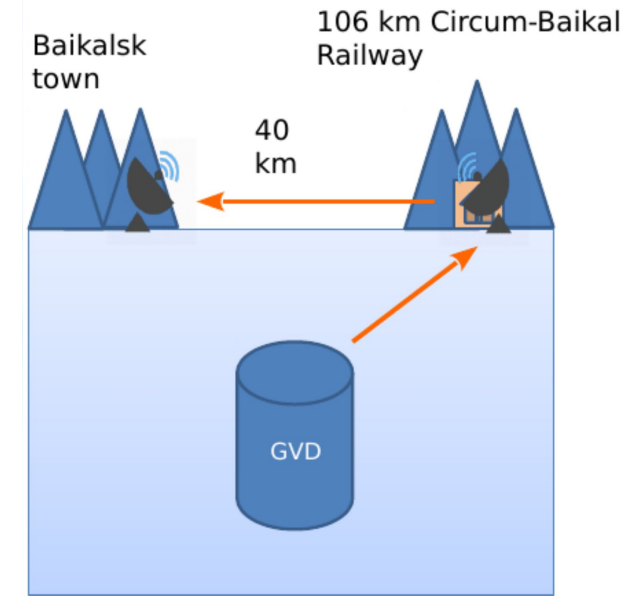
Точность внутрисекционной и межсекционной калибровки ~ 2.5 нс



Поток данных с телескопа

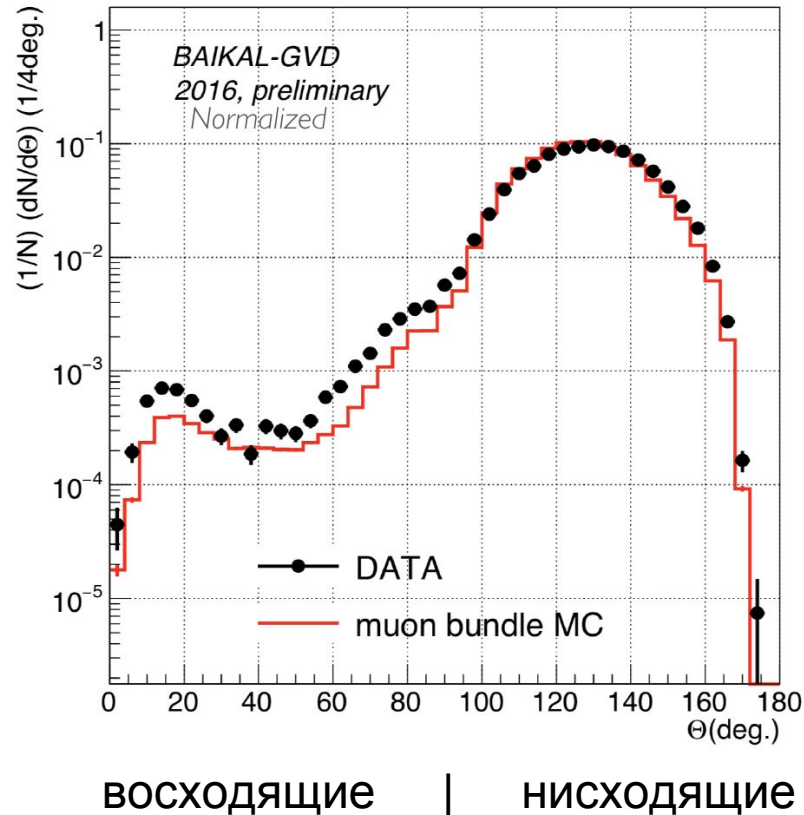


- 40 Гб с кластера в день в береговой центр
- Радиоканал 250 Мб/с с Байкальском
- Данные передаются в ОИЯИ по интернету
- Автоматическая обработка первичных данных в ОИЯИ
- Пользовательский анализ на вычислительной ферме в ОИЯИ



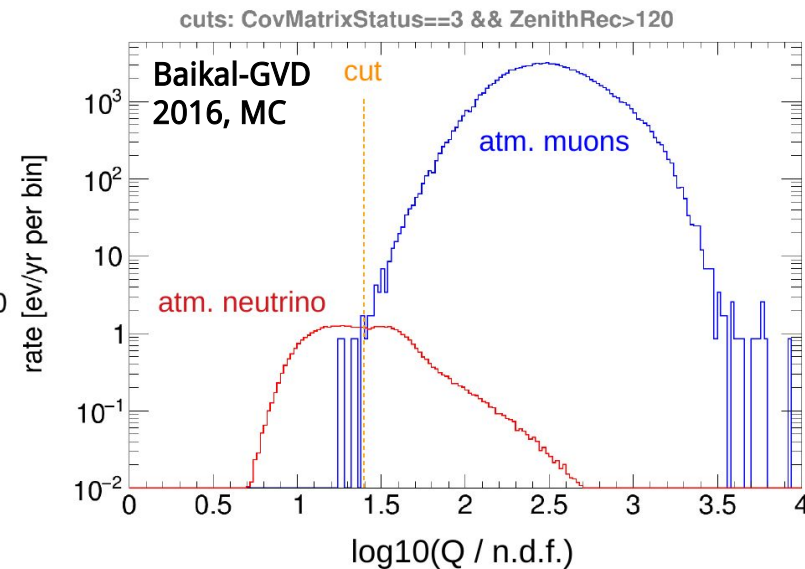
Восстановление мюонов

Угловое распределение атмосферных мюонов

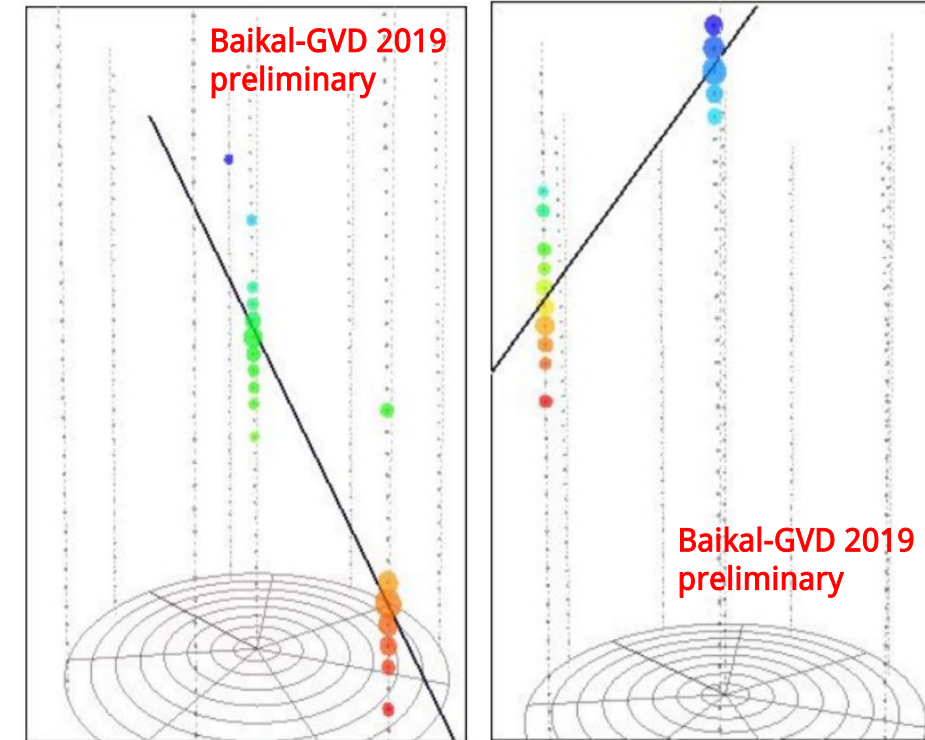


Точность восстановления направления для одиночных восходящих мюонов, $E > 100$ ГэВ: 1.2°

В разработке процедуры отбора мюонов от атмосферных нейтрино



Кандидаты в восходящие нейтрино



cluster 4, run 99
21/05/2019, time 16:43
 $N_{\text{hits}} = 18$, $N_{\text{strings}} = 3$
 $\theta_{\text{rec}} = 17.99^\circ$

cluster 1, run 157
12/06/2019, time 1:12
 $N_{\text{hits}} = 15$, $N_{\text{strings}} = 2$
 $\theta_{\text{rec}} = 18.29^\circ$

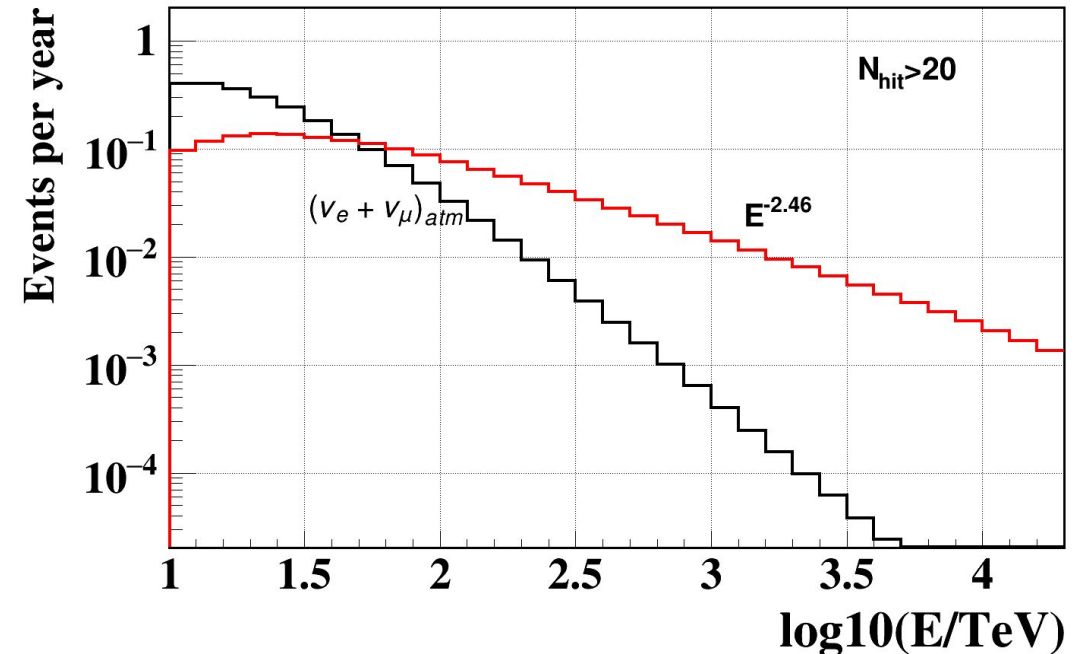
Ливни высоких энергий I

В настоящее время эффективный объем установки для регистрации ливней высоких энергий составляет 0.25 км^3 , или 0.6 от объема IceCube для HESE событий

Спектр энергий астрофизических нейтрино, измеренный IceCube:

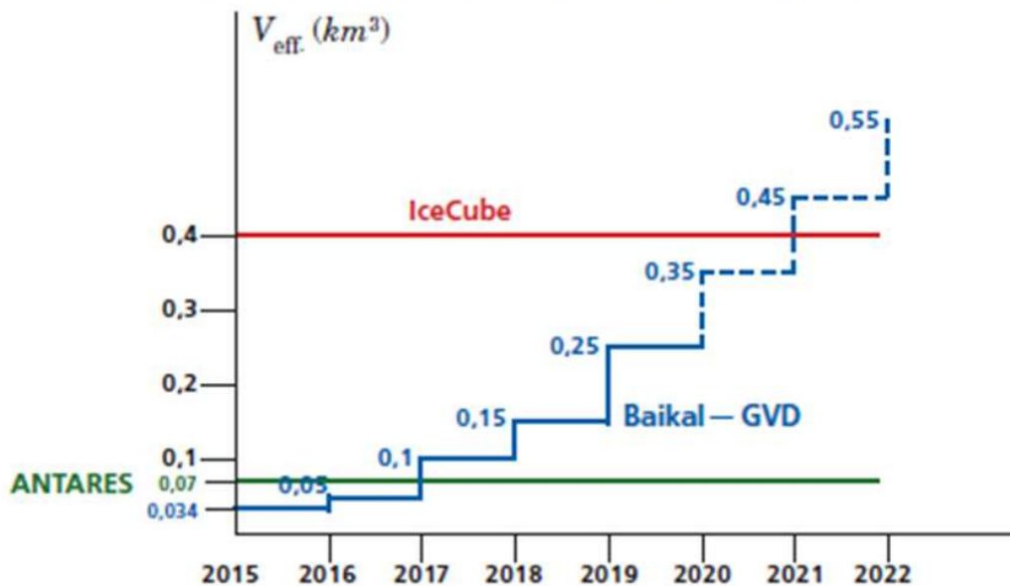
$$4.1 \cdot 10^{-6} E^{-2.46} \text{ GeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

Ожидаемое количество ливней на кластер Baikal-GVD за год

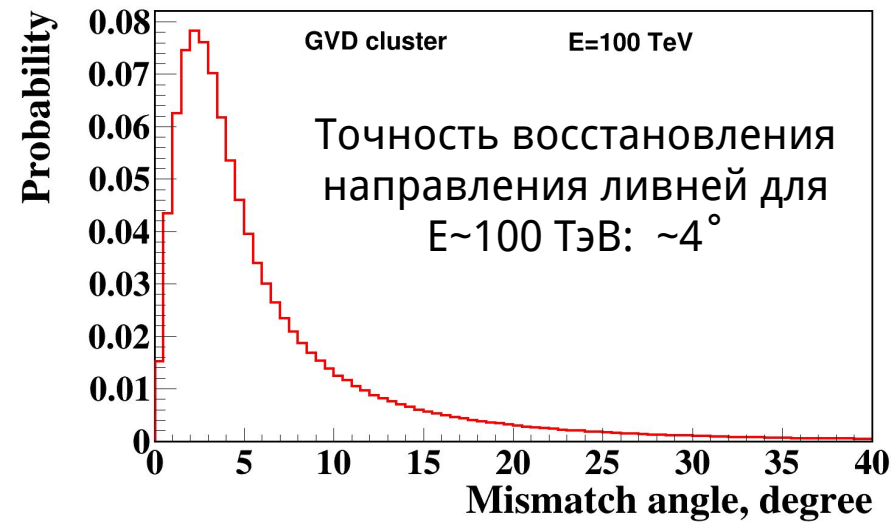


Ожидается 0.6 ливневых событий с $E > 100 \text{ ТэВ}$ и $N_{hit} > 20$ на кластер за год

Эффективный объем детекторов для регистрации ливневых событий от нейтрино в области энергий 100 TeV — 10 PeV



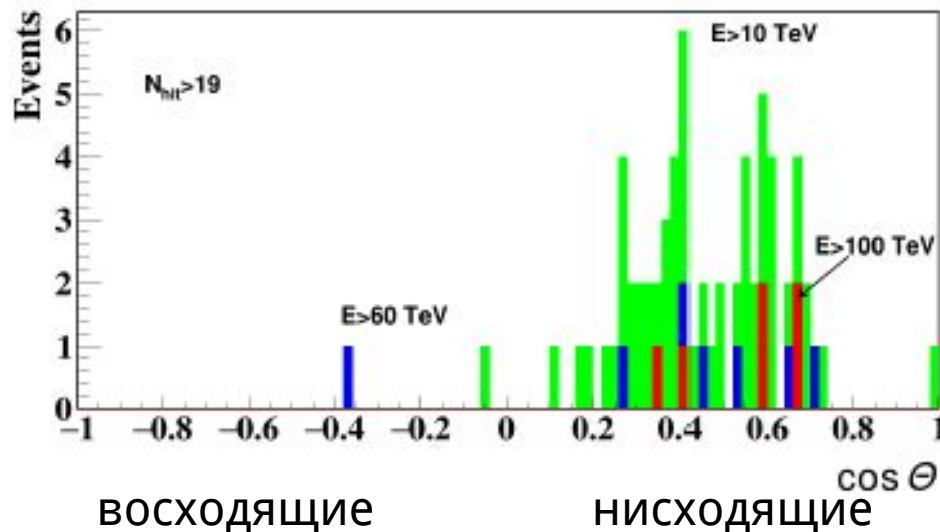
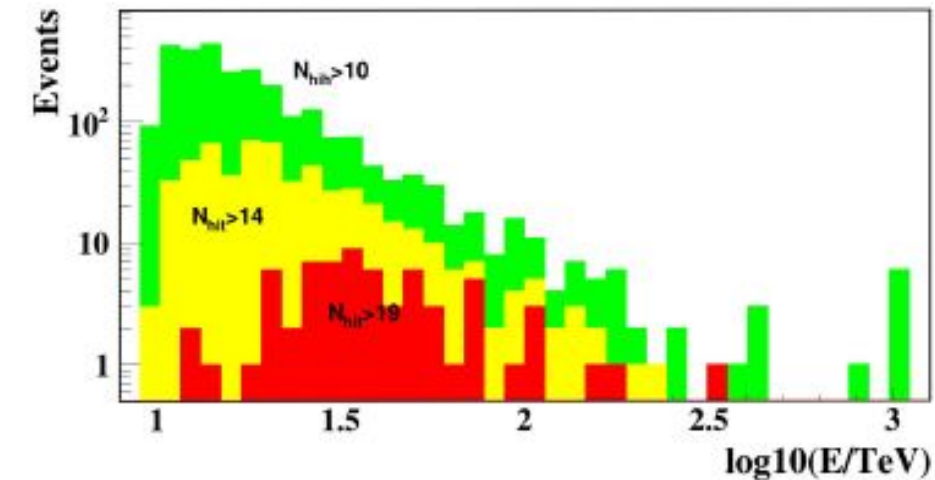
Ливни высоких энергий II



Обработаны данные
2016, 2018 и 2019 (4 месяца) годов,
полная экспозиция: 1364 дня

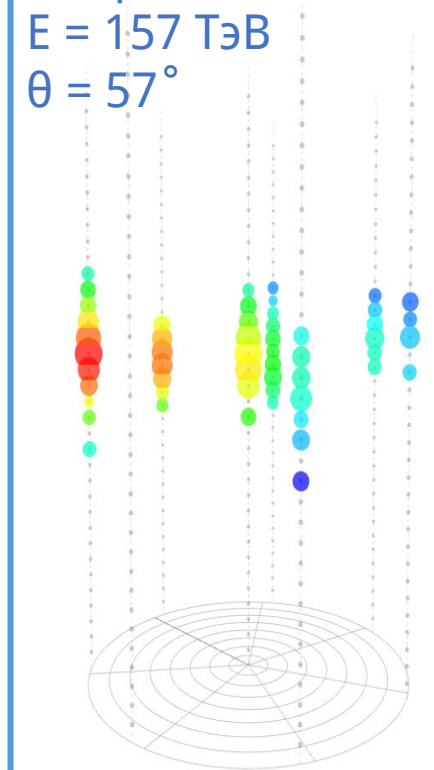
Найдено 7 кандидатов с энергией
 $E > 100$ ТэВ и числом хитов > 19

Найден восходящий ливень
с $E = 71$ ТэВ



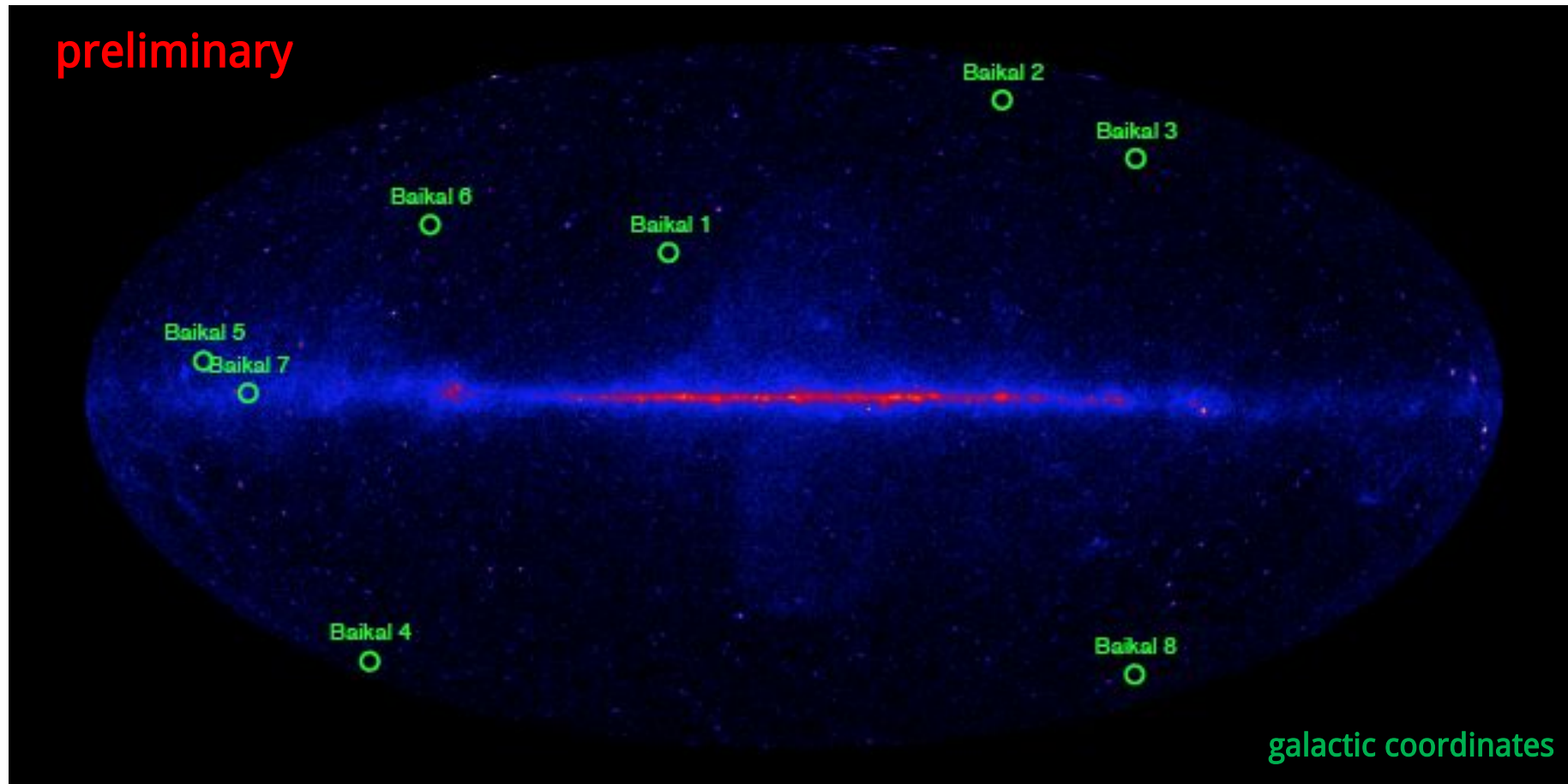
Ливневое событие

53 сработавших ОМ
 $E = 157$ ТэВ
 $\theta = 57^\circ$



Ливни высоких энергий III

Карта кандидатов в нейтрино высоких энергий в ливневом канале, $E > 100$ ТэВ
Предварительно!



4FGL, карта источников для $E_\gamma > 10$ GeV (Д.Семикоз, А.Неронов)

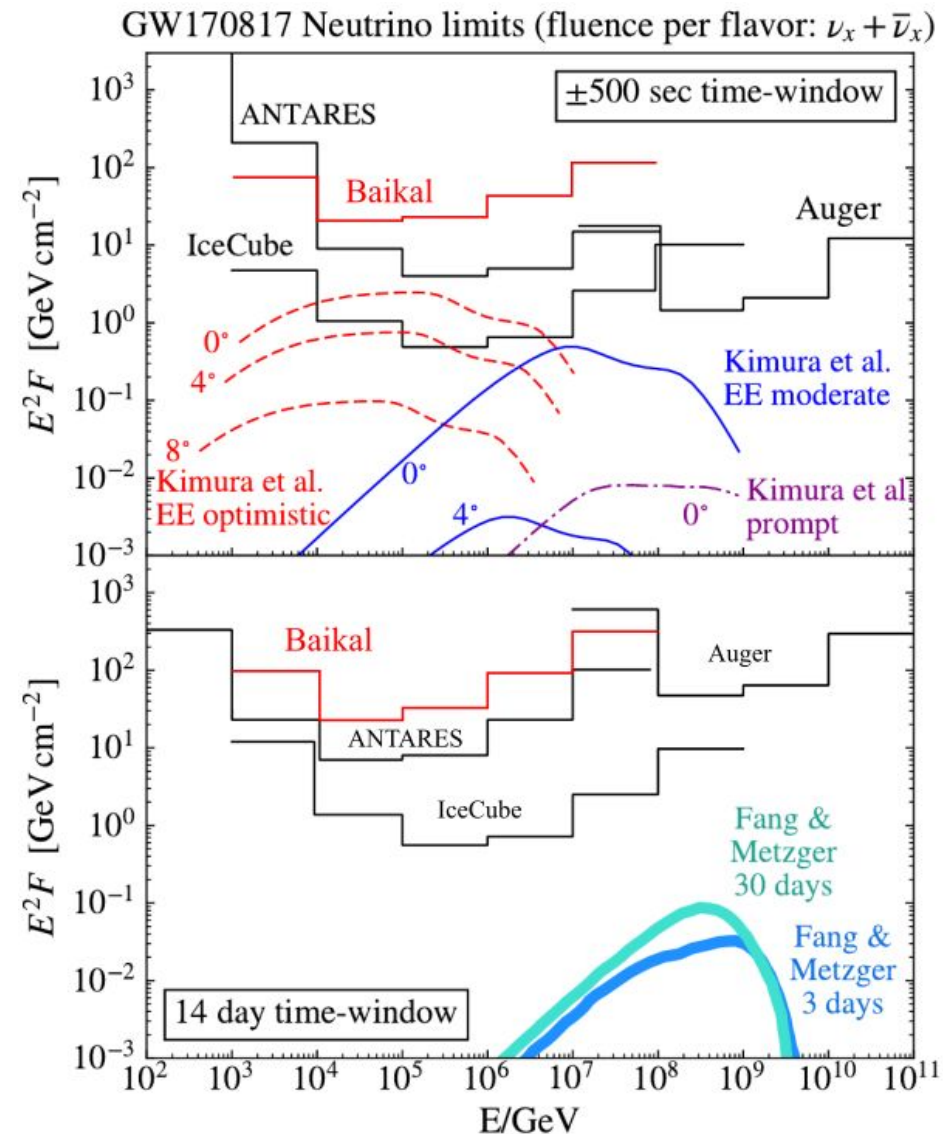
Поиск ливневых событий от GW170817

GW170817 - первое наблюдение гравитационных волн, сопровождавшихся сигналом в гамма/оптическом/радио диапазонах

В ливневом канале не было найдено событий ассоциированных с GW170817 в окне ± 500 секунд и 14 дней после события слияния нейтронных звезд

Было установлено ограничение на поток на уровне 90 % CL в предположении спектра E^{-2} и одинакового потока всех флэйворов

[JETP Letters, v.108, issue 12, arXiv:1810.10966]

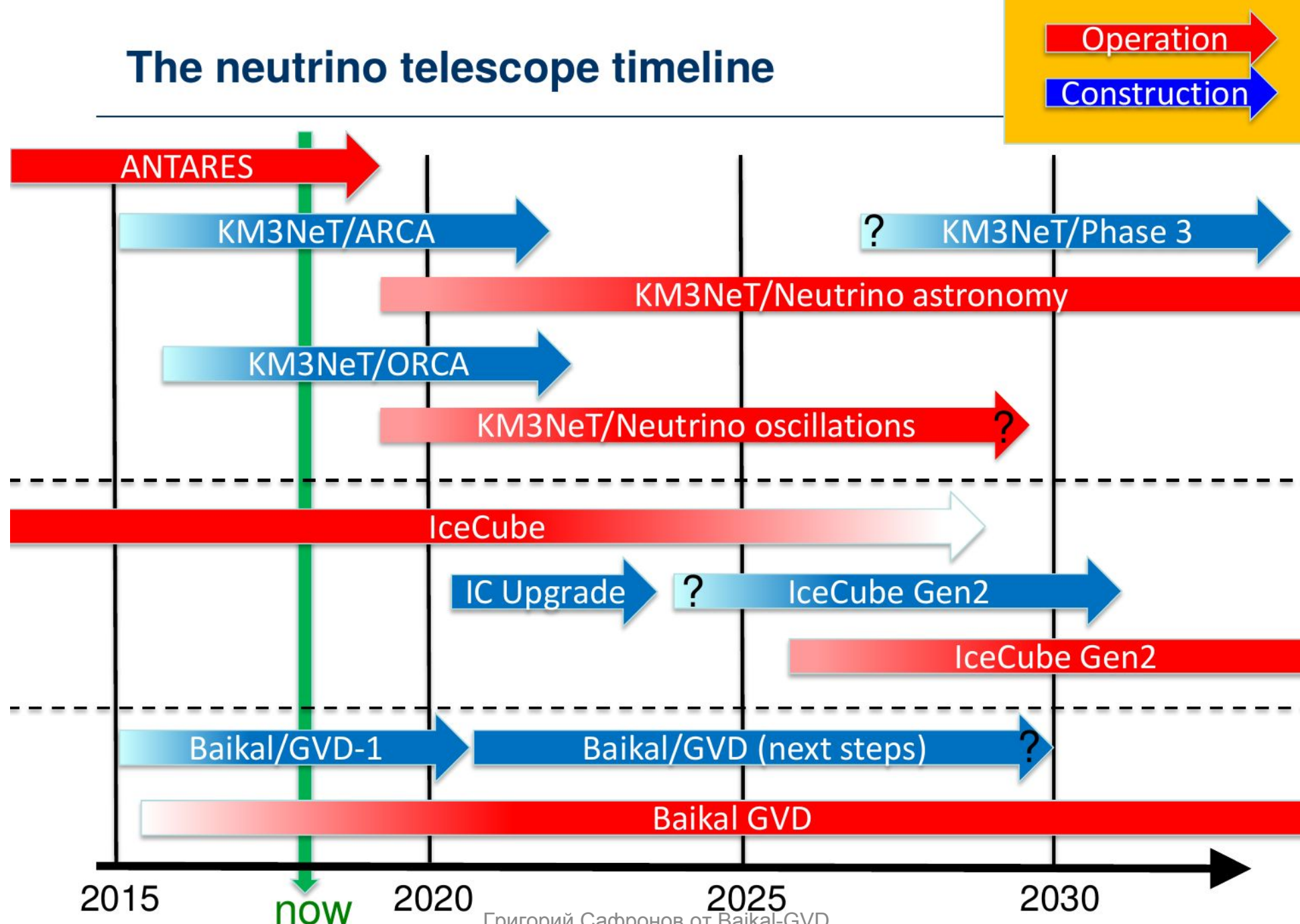


Заключение

- Нейтринный телескоп Baikal-GVD - крупнейший детектор нейтрино высоких энергий в Северном полушарии
- С апреля 2019 года установка работает в составе 5 кластеров, (1440 оптических модулей), в экспедиции 2020 планируется установить два новых кластера
- Разработаны процедуры позиционирования и калибровки модулей телескопа
- Разработана система автоматической обработки первичных данных
- Получены первые предварительные результаты по восстановлению ливней высоких энергий и мюонов

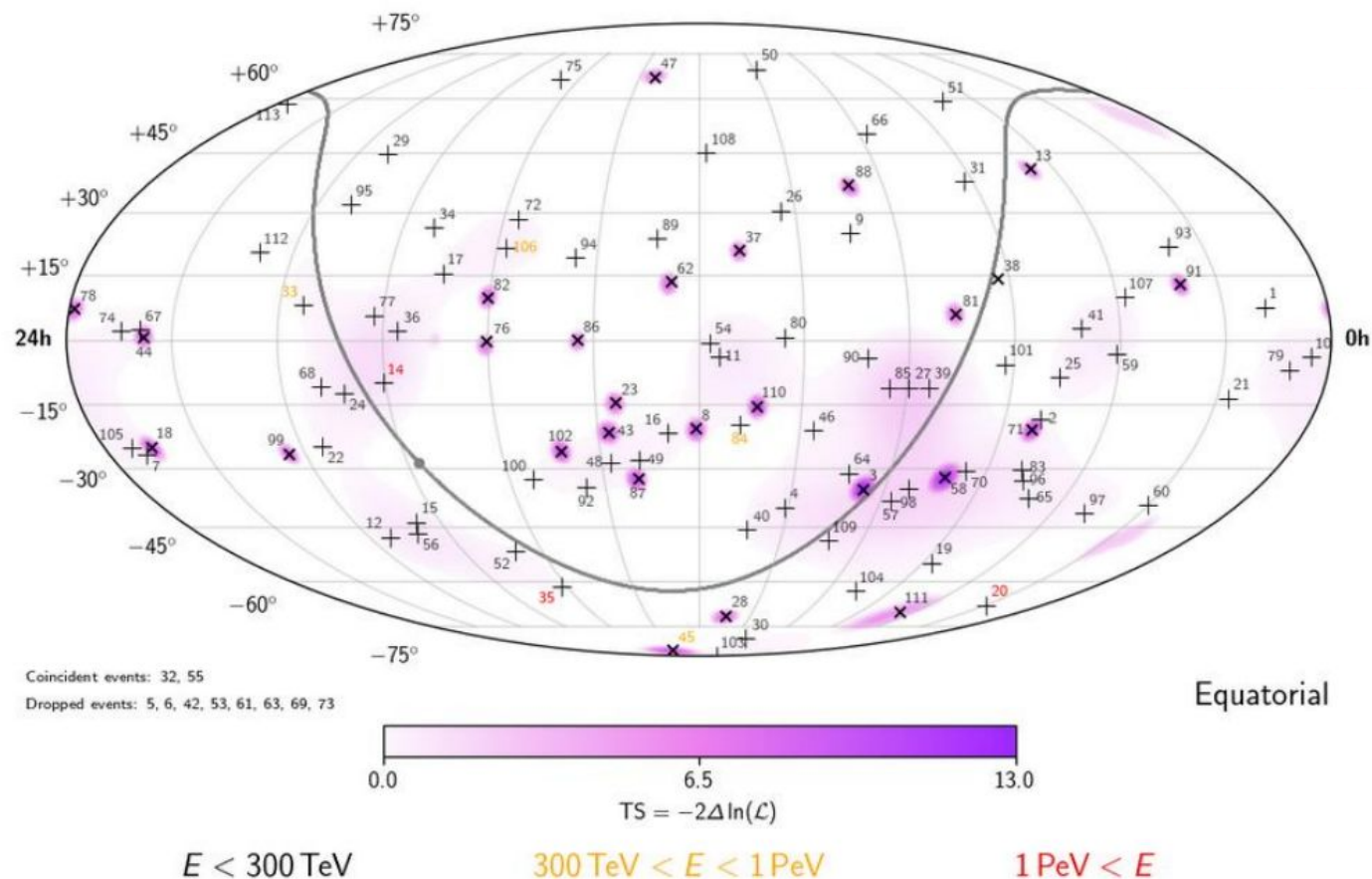
Дополнительные материалы

The neutrino telescope timeline



Астрофизика нейтрино высоких энергий

Наиболее важные результаты получены подледным телескопом IceCube



Нейтрино высоких энергий
в IceCube

События HESE - эффективный
объем установки 0.4 km^3

За 7.5 лет набрано 60 событий
с $E > 60 \text{ ТэВ}$

ливни/мюоны - 80/20 %

Типичное угловое
разрешение IceCube:

ливни: 15 deg.
мюоны: 2-4 deg.

Экспедиция 2020



Baikal-GVD – status 20 Nov 2019

Total: 5 Clusters → 40 Strings → 120 Sections → 1440 OMs

Faulty channels: “Counts = 0”

Cluster 1 Str 4 Sec 3 Ch 1-12 Str 5 Sec 1 Ch 12 Str 6 Sec 2 Ch 1-12 Str 6 Sec 3 Ch 8-12 Str 7 Sec 1 Ch 11	Cluster 2 Str 1 Sec 3 Ch 12 Str 5 Sec 2 Ch 7-12 Str 7 Sec 1 Ch 1-6,11 Str 8 Sec 1 Ch 11,12 Str 8 Sec 2 Ch 3,7	Cluster 3	Cluster 4 Str 4 Sec 1 Ch 1-12 Str 5 Sec 3 Ch12	Cluster 5 Str 1 Sec 3 Ch 3,4, 9-12 Str 3 Sec 3 Ch 7; Str 5 Sec 3 Ch 12; Str 8 Sec 1 Ch 1 PM Comm 300 VDC
---	---	------------------	--	--

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Total
27 May 2019	18	10	0	0	1	29 (2.0%)
20 Nov 2019	31	18	0	13	9	71 (4.9%)

Характеристики водной среды

Уровень шума, сезон 2016

