

Автоматическое отслеживание многоканальных астрофизических оповещений на телескопе Baikal-GVD

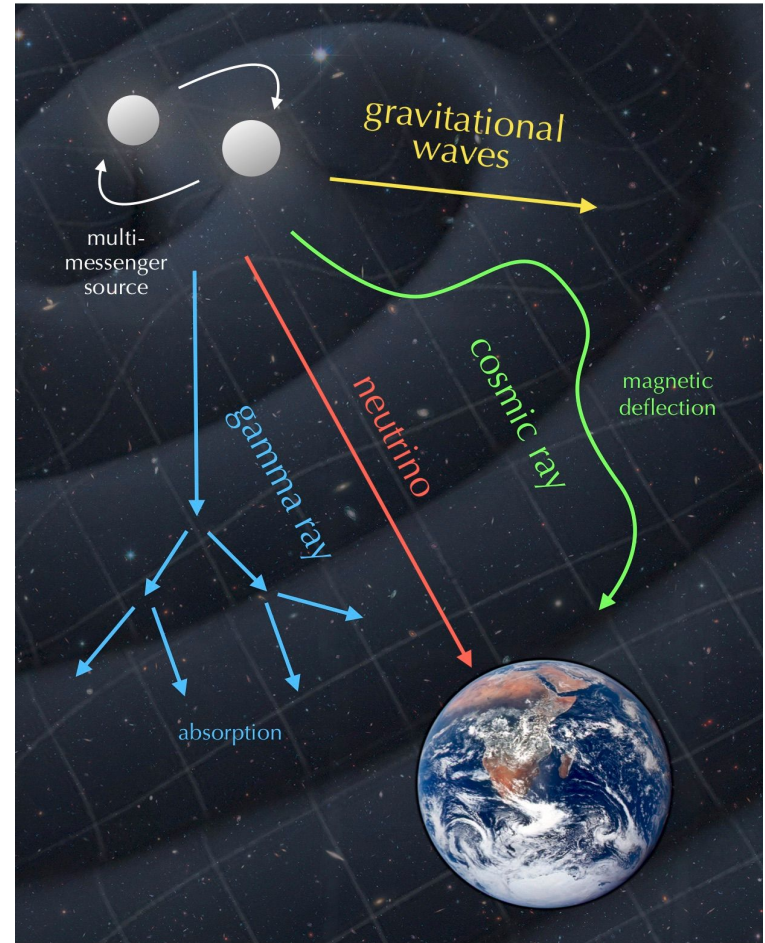
39-ая Всероссийская конференция по космическим лучам ВККЛ-2026

В. Дик, О.В. Суворова
от имени коллаборации
Baikal-GVD

Дубна, 2.07.2026 г.

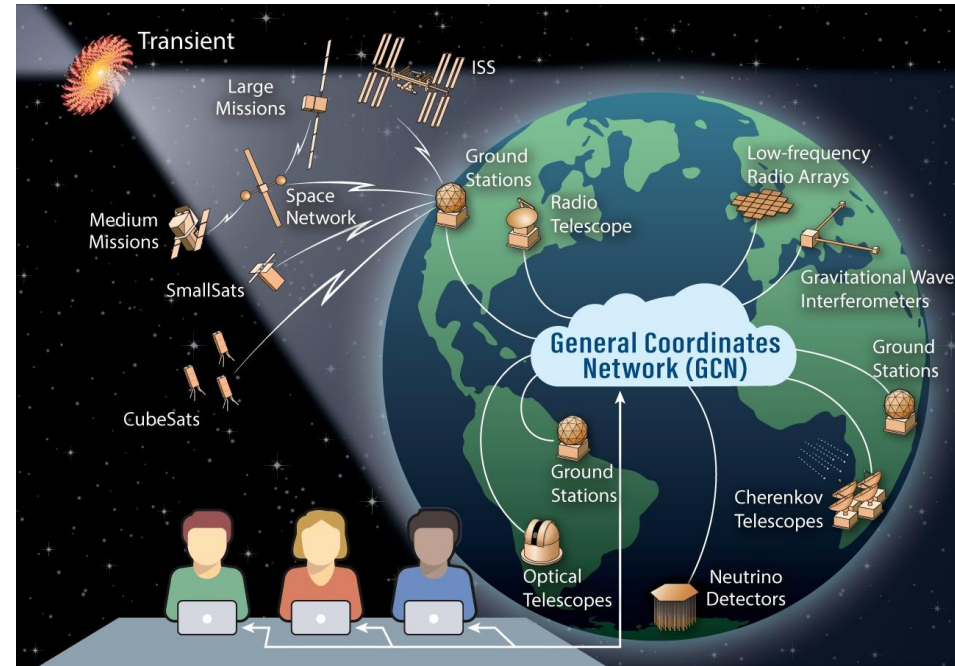
Актуальность работы

- Обнаружение диффузного потока астрофизических нейтрино на IceCube и Baikal-GVD.
- Актуальная проблема — определение источников нейтрино.
- Многоканальная астрономия — совместный анализ:
 - нейтрино
 - электромагнитного излучения
 - гравитационных волн
 - космических лучей



Обмен астрофизическими оповещениями

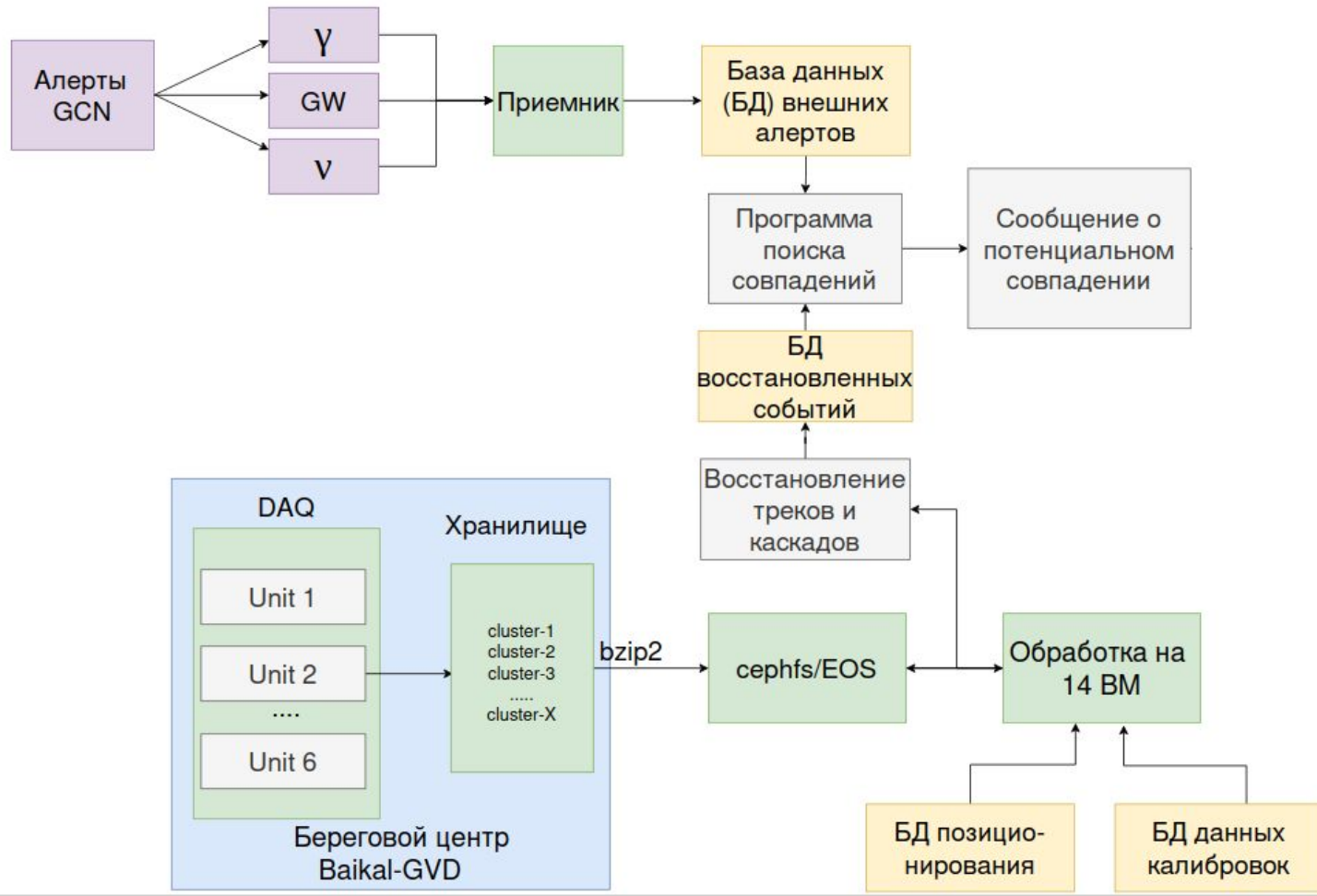
- Длительность экстремальных астрофизических процессов варьируется от секунд до нескольких суток и более.
- Система GCN — для своевременного и координированного обмена информацией между установками.
- Задача: интеграция телескопа Baikal-GVD в сеть GCN.



<https://gcn.nasa.gov>

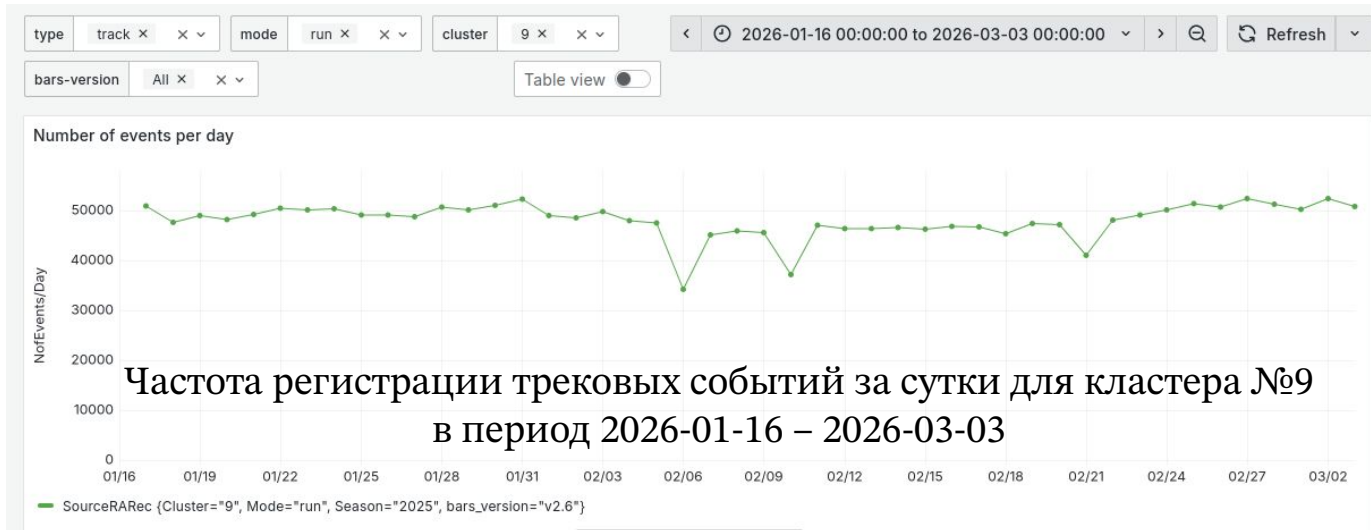
Методика отслеживания

Сбор и обработка данных Baikal-GVD



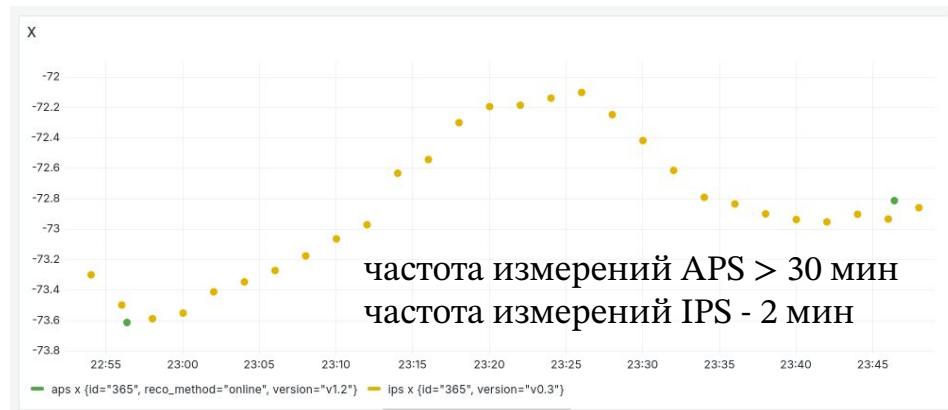
Мониторинг телескопа Baikal-GVD

- Для стабильной работы телескопа требуется мониторинг состояния его компонентов и обработки данных, а также оперативные оповещения о неисправностях.
- Хранение данных в базе InfluxDB позволяет реализовать мониторинг телескопа на основе Grafana.



Режимы обработки данных Baikal-GVD

	Первичная обработка	Вторичная обработка
Задержка между регистрацией события и информацией о нем	1.5 - 18.5 минут	~27 часов
Зарядовая калибровка	статическая для сезона	динамическая
Позиционирование	APS (Acoustic Positioning System)	APS + IPS (Inertial Positioning System)



Систематическая неопределенность направления трековых событий, восстановленных первичной обработкой:
 $\Delta\Psi_{\text{med}} = 1.8^\circ$.

Во время сильных течений частоты измерений APS недостаточно (~5% за год) и дополнительно необходимо использовать IPS; доп. угловое смещение для первичной обработки $\Delta\Psi_{\text{med}} = 7^\circ$.

Оценка сигнала и фона: ON-OFF подход

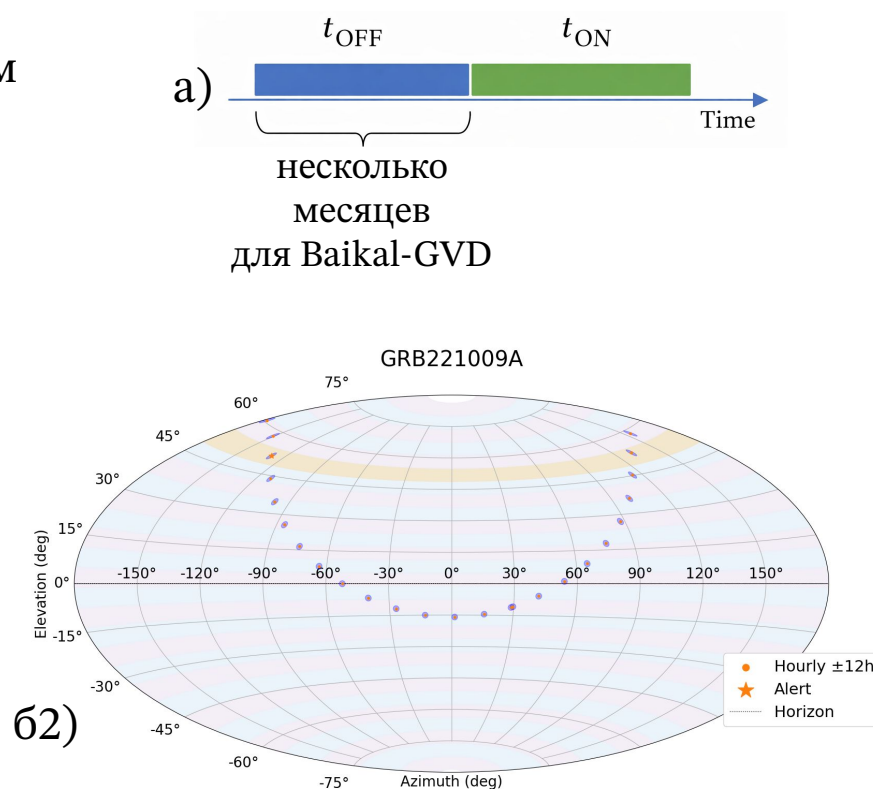
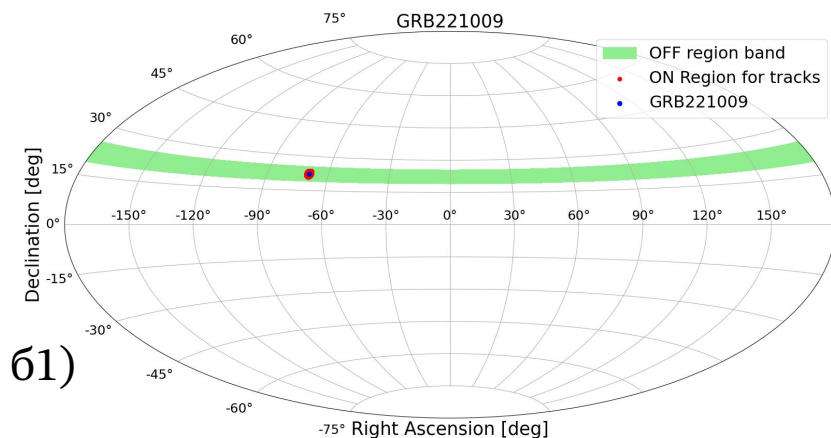
Область ON включает угловые неопределенности внешнего события и события Baikal-GVD.

OFF-область — смещение ON с сохранением схожих условий наблюдения по:

а) времени

б1) RA (интервал поиска > суток)

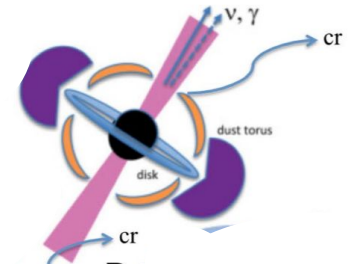
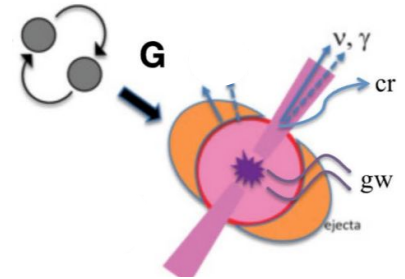
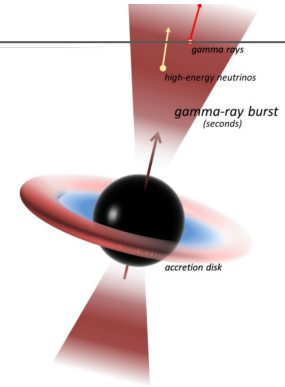
б2) азимуту (для коротких интервалов)



Ширина полосы по склонению/зениту зависит от размера области ON.

Выбор временного окна поиска корреляций

- **Гамма-всплески (GRB):**
 - ± 500 с — основной фотонный пик
 - ± 1 ч — раннее послесвечение
 - $[0, +1 \text{ д}]$, $[-12 \text{ ч}, +1 \text{ д}]$, $[-1 \text{ д}, +1 \text{ д}]$ — поздняя и ранняя активность
- **Гравитационные волны:**
 - ± 500 с — квазисинхронная эмиссия нейтрино при слиянии NS-NS или BH-NS
 - ± 1000 с — расширенное квазисинхронное окно
 - $[-1000 \text{ с}, +1 \text{ ч}]$, $[-500 \text{ с}, +1 \text{ д}]$ — задержанные процессы
- **Нейтринные алерты:**
 - ± 1 ч — кратковременная эмиссия нейтрино (от блазаров)
 - $\pm 12 \text{ ч}$, $\pm 1 \text{ д}$ — длительная активность источника
- Оффлайн поиск до 14 дней и более.

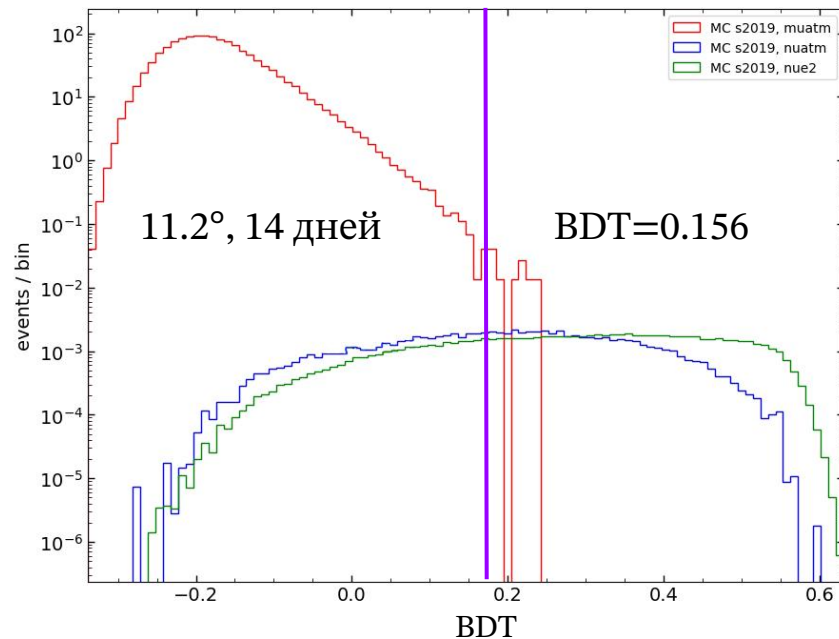


Оптимизация отбора трековых событий

- Критерий BDT (метод ML - Boosted Decision Tree) был оптимизирован для различных размеров области ON и временных окон поиска.
- Пороговое значение BDT соответствует максимальной чувствительности к сигналу.

$R_{on}, ^\circ$	Временной интервал	BDT (Poisson)
0.7	+/- 1 д	- 0.022
5	0, +1 д	0.017
11.2	0, + 14 д	0.156

В результате оптимизации чувствительность была улучшена в среднем на 30% относительно стандартного отбора $BDT=0.25$.



Программная реализация



Проверка новых
оповещений
в БД



Отбор событий в
ON во временных
окнах



Расчет фона и
значимости



Формирование
отчетов



Рассылка
(внутренняя)

GVD Alert Search

Search within a [-24, 24] hours window:

Alert Details:

Potential coincidences for alert ICECUBE_ASTROTRACK_BRONZE at 2025-08-31 18:00:45.820000+00:00:

Alert RA: 105.63

Alert Dec: 5.10

Alert Zen: 98.83

Event Details:

copy

Type	Time (UTC)	Run	Cl	Enrg	NH	RA	Dec	Zenith	HOC	Diff(h)	Back	p-value
track	2025-08-31 08:39:03	197	10	5.86	12	106.30	4.53	97.18	0.87	9.36	0.11	0.1042

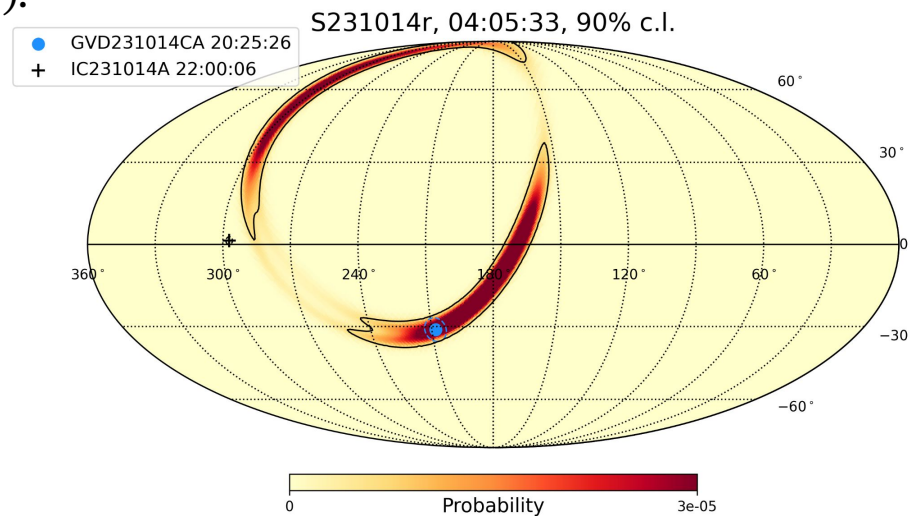
11:19 AM

Форма внутреннего отчета рассылки

Результаты отслеживания

Отслеживание гравитационно-волновых событий

- **S231014r** - слияние двух черных дыр (LIGO).
- Нейтринная эмиссия возможна при наличии окружающей материи с отложенным временем прихода нейтрино значительно больше нескольких часов.
- Вероятность ложного триггера: 1 событие/1,5 г.
- **GVD231014CA** $\uparrow$ с $E \sim 35$ ТэВ через ~ 16 ч после T_0 .
- 90%-ая область события GVD231014CA - 5,5% от 90%-ой области S231014r.
- Ожидаемое фоновое число $N_{\text{back}} = 0.25$, статистическая значимость $0,77\sigma$.



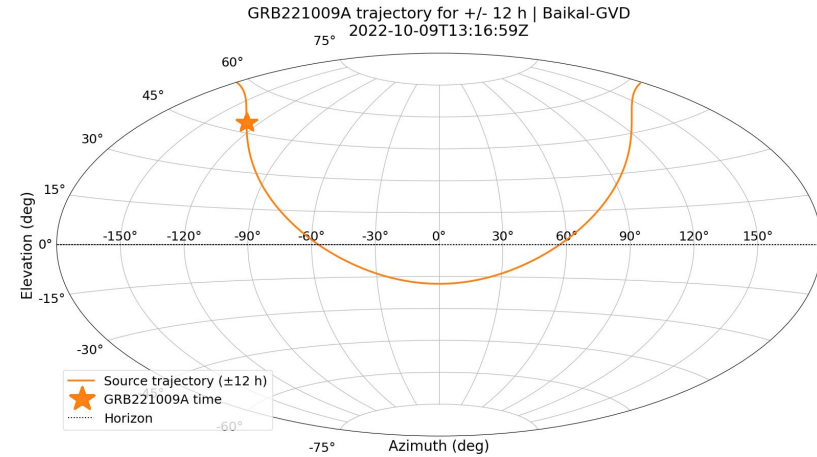
**Было отслежено 350
гравитационно-волновых событий
LIGO-Virgo-KAGRA (ран O4).**

Отслеживание гамма-событий Fermi

- **GRB 221009A** - предположительно коллапс массивной звезды, один из самых ярких ближайших гамма-источников.
- Регистрация Fermi: 9 октября 2022, 13:16:59.
- Наблюдалось в ЭМ диапазоне.
- На Baikal-GVD корреляций в интервалах до [-1 д, + 1д] не обнаружено.

Верхние пределы на интегральный поток нейтрино $E^2 F(E)$ ГэВ·см⁻² для [-1 д, + 1д]:

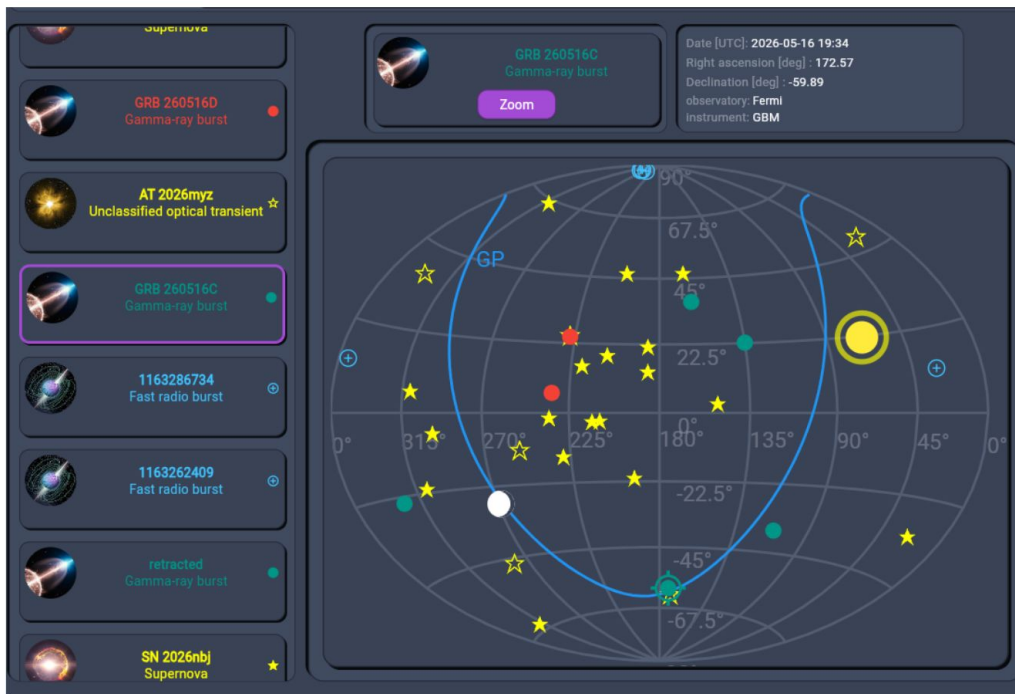
IceCube	KM3NeT	Baikal-GVD
0,04	1,1 ↑ / 4,4 ↓	0,41/2,03 (каскады/треки)



**С ноября 2024 г. было отслежено
~300 оповещений Fermi.**

Отслеживание GRB 260516C

Fermi-GBM Final Position: 2026-05-16 19:34:38 UTC, RA = 172.57°, Dec = -59.89°, Err = 3.19°



<https://astro-colibri.science/>

Трековое ↑ событие Baikal-GVD

на расстоянии 2.8° 9.5 ч после
GRB 260516C.

$E \sim 4 \text{ ТэВ}$, $\text{BDT} = 0.2$

отбор	N_{back} (январь-май 2026)	значимость (pre-trial)
$\text{BDT} > 0.017$ (Poisson)	$9.8 \cdot 10^{-3}$	2.34σ
$\text{BDT} > 0.15$ (Gauss)	$5.2 \cdot 10^{-4}$	3.27σ

Отслеживание событий IceCube

- 2020-2025 гг. — 180 оповещений IceCube.
- Большинство трековых событий IceCube наблюдается из Северного полушария, где лучшая чувствительность Baikal-GVD в каскадной моде регистрации.
- Для каскадов Baikal-GVD были определены верхние пределы на 90% д.у. на интегральный поток нейтрино $E^2F(E)$ за ± 12 ч от триггера IceCube в диапазоне 1 ТэВ – 10 ПэВ в отсутствие статистически значимых совпадений:
 - Один кластер (2020–2023): $1\text{--}3 \text{ ГэВ}\cdot\text{см}^{-2}$.
 - Вся установка, 13 кластеров (2024–2025): $0,5\text{--}0,7 \text{ ГэВ}\cdot\text{см}^{-2}$.

Baikal-GVD collab. (Dzhilkibaev Zh.-A. M., Suvorova O.V. et al) Astron. Lett. 47 (2021)

Baikal-GVD collab. (Dik V.Y. et al) Bull. RAS: Physics 87 (2023)

Baikal-GVD collab. (Dik V.Y. et al) PoS(ICRC2025) 921 (2025)

Заключение

1. Была разработана методика для автоматического поиска пространственно-временных совпадений между событиями Baikal-GVD и астрофизическими оповещениями GCN и создан соответствующий комплекс программ.
2. Чувствительность отслеживания астрофизических оповещений при отборе сигнальных трековых нейтринных событий Baikal-GVD была улучшена в среднем на 30% за счёт применения машинного обучения на данных, полученных методом Монте-Карло моделирования.
3. Разработано автоматическое формирование сообщений с результатами корреляционного и статистического анализа при отслеживании астрофизических оповещений. Сообщение о результатах поиска одновременного нейтринного излучения содержит информацию о событиях Baikal-GVD, восстанавливаемых с минимальной задержкой 1,5 минуты с момента их регистрации, что обусловлено временем накопления данных.
4. Получены результаты поиска пространственно-временных совпадений событий Baikal-GVD с оповещениями IceCube, Fermi и LIGO-Virgo-KAGRA.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!