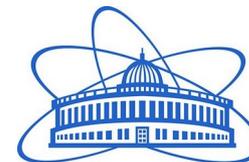
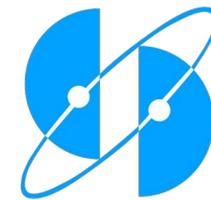




BAIKAL-GVD



JOINT INSTITUTE
FOR NUCLEAR RESEARCH



Отслеживание нейтринных оповещений телескопа IceCube глубоководным телескопом Baikal-GVD

Дик В.Я., Суворова О.В.

30.06.2022

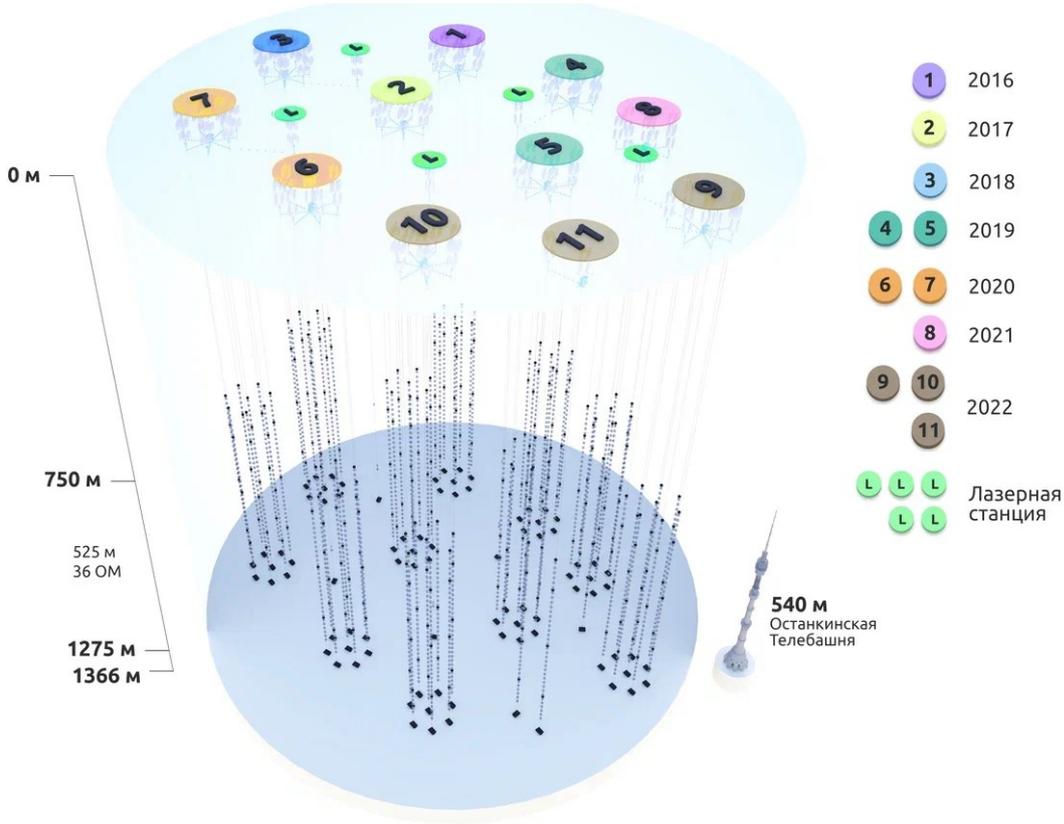
Цель работы

- С августа 2020 г. Baikal-GVD отслеживает оповещения от телескопа IceCube в онлайн-режиме.
- Цель – поиск корреляции по направлению и времени между нейтринными событиями IceCube и событиями, реконструированными по мюонной и каскадной модам Baikal-GVD.

Содержание

1. Baikal-GVD: общая информация.
2. Схема передачи и обработки данных в режиме follow-up.
3. Результаты поиска корреляций GVD-IC 2020-2022 по каскадной моде.

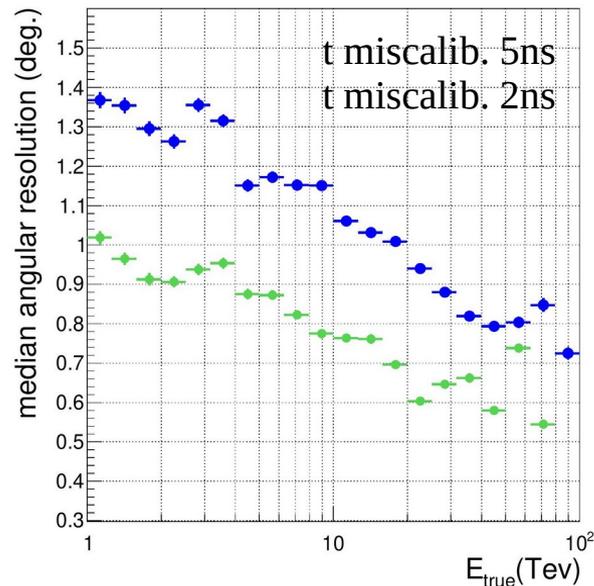
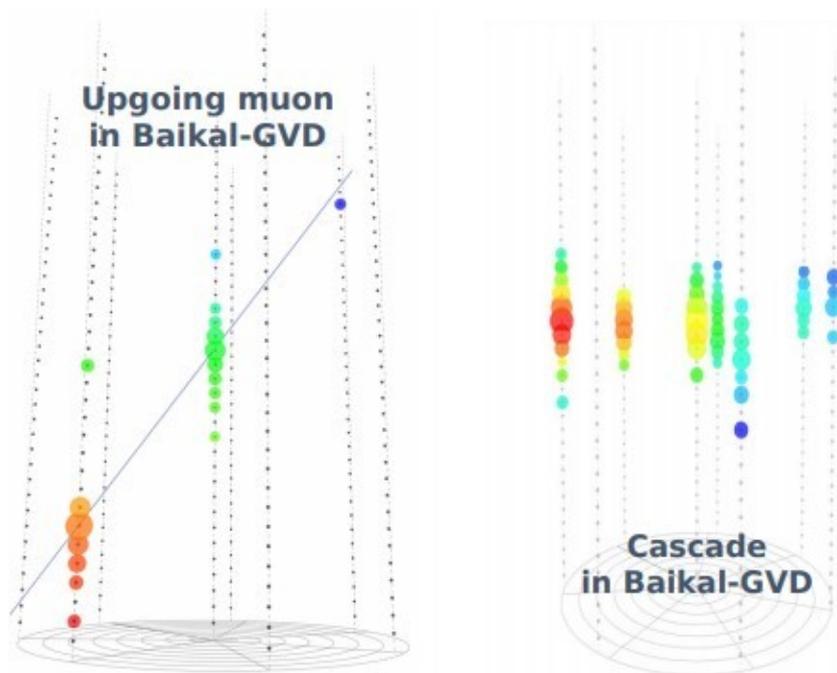
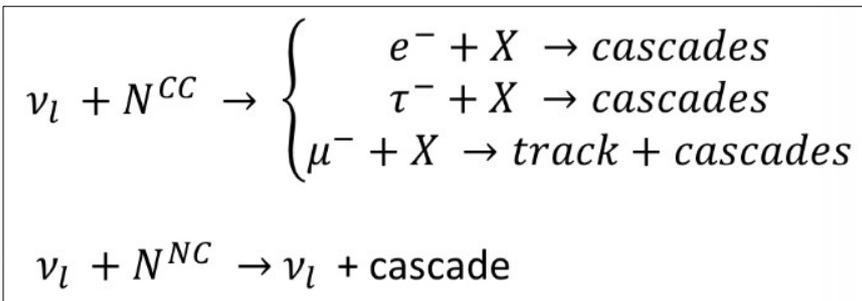
Baikal Gigaton Volume Detector



Всего на 2022: 10 кластеров и 2916
оптических модулей
с учетом экспериментальных стрингов



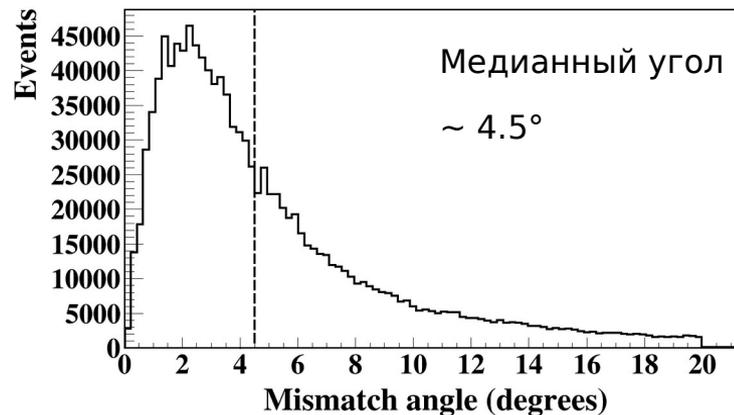
Мюонная и каскадная моды восстановления событий



Медианные угловые разрешения для **трековых однокластерных событий**, в зависимости от энергии нейтрино для двух значений временной точности.

Онлайн отбор трековых событий отсекает Zen<120.

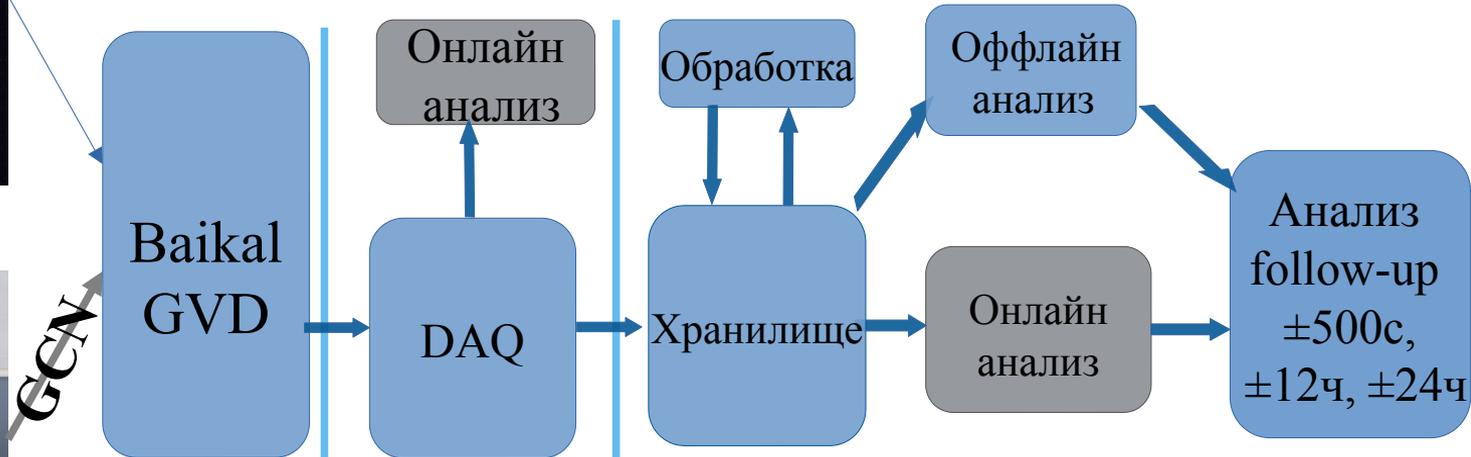
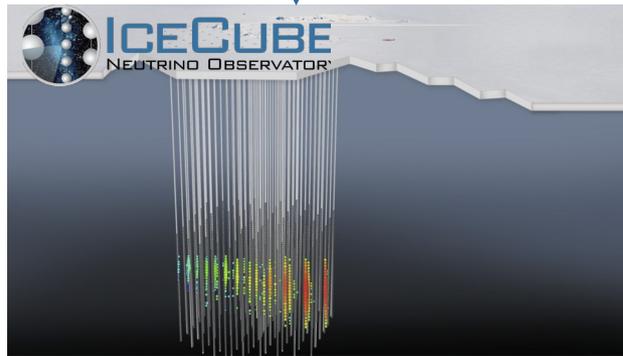
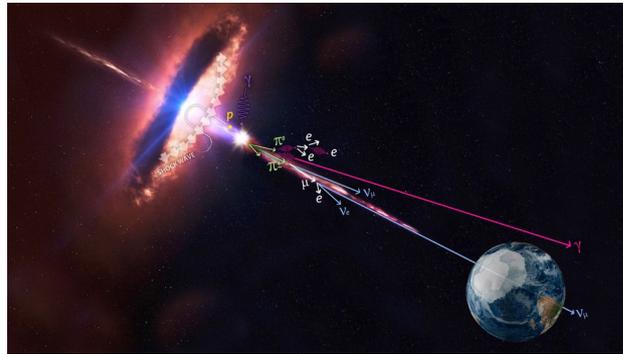
См. доклад Г.Сафронова



Распределение событий по углу между симулированными и восстановленными направлениями **ливней** для одного кластера.

Работа GVD в режиме follow-up

Схема передачи и обработки данных



Глубокая вода

Береговая станция

Компьютерный центр, Дубна

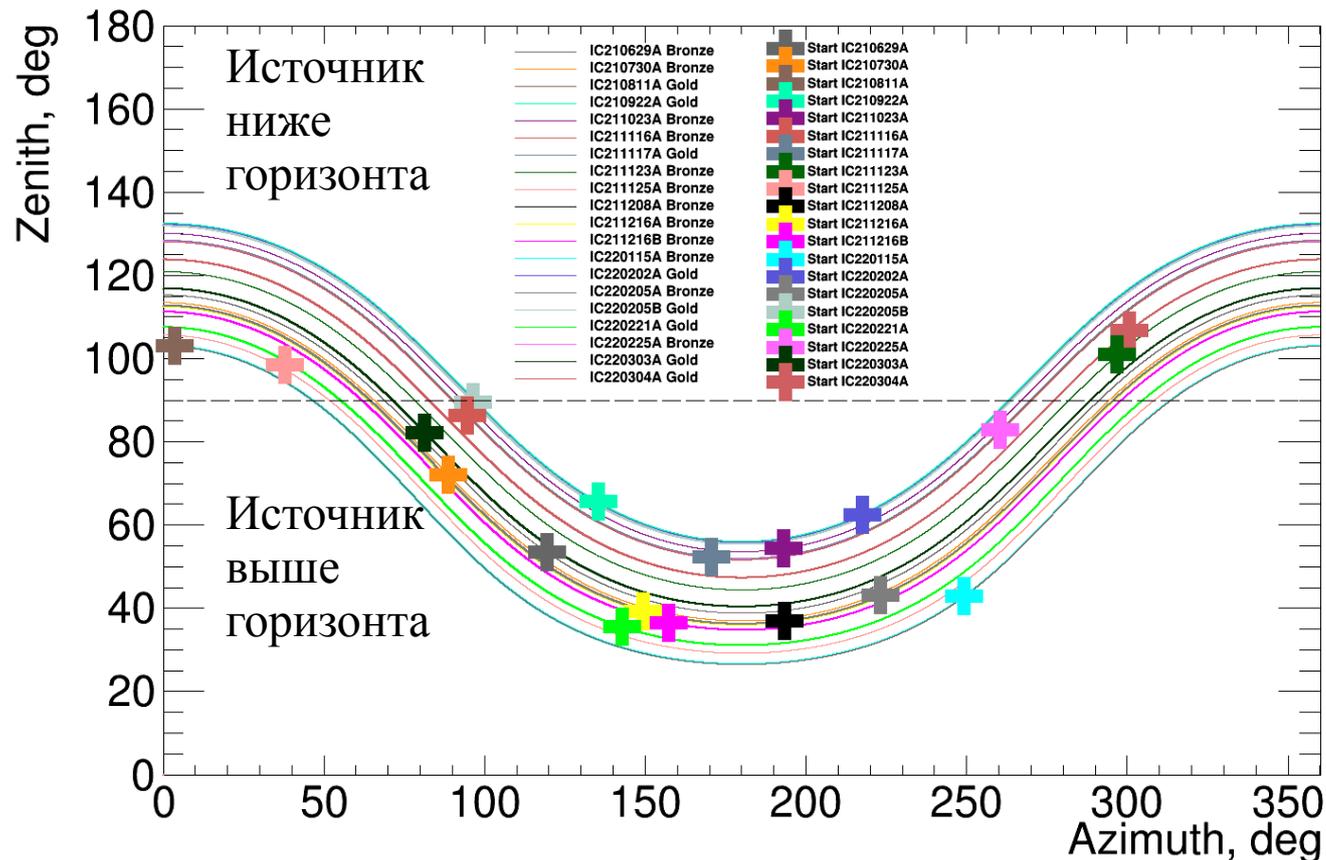
Временные задержки follow-up анализа:

Онлайн ~ 3 мин

Оффлайн ~ 24 ч

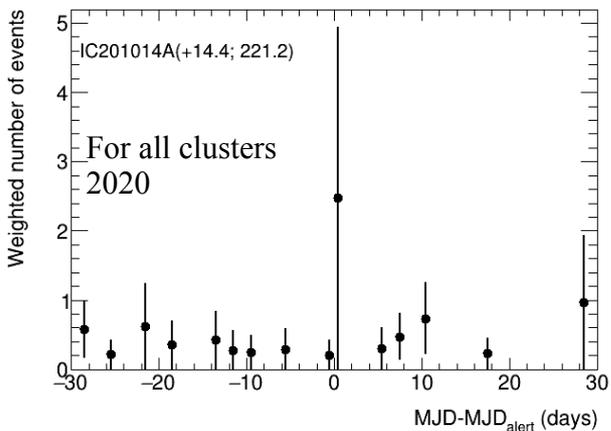
Отслеживание высокоэнергичных IC событий

С авг. 2020 года с помощью циркуляра GCN было отслежено 54 алерта (сигнала об оповещении) IC (μ треки $\uparrow E > 100$ TeV).

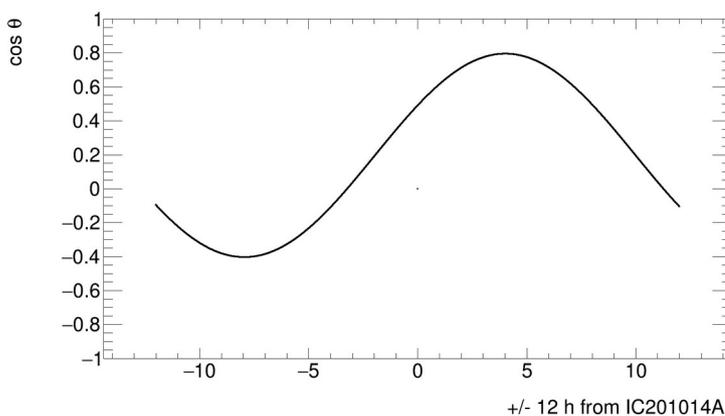


- Суточные траектории событий IC 2021 в горизонтальных координатах Baikal-GVD.
- Для больш-ва IC алертов направления прихода являются нисходящими относительно горизонта Baikal-GVD, т. е. $Zen < 90^\circ$.
- Поиск корреляций с событиями GVD осуществляется в конусе с углом раствора: $\Psi = 5^\circ, 10^\circ$.

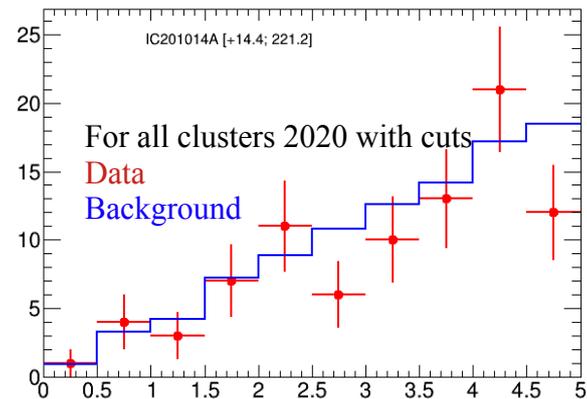
Пример follow-up анализа для однокластерных каскадов и IC201014A



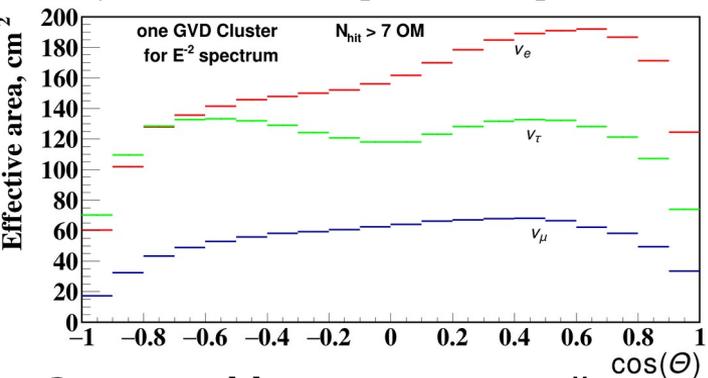
1. Пространственно-временной анализ:
число каскадных событий GVD (вес $1/\psi$)
с $\psi < 5^\circ$ в ± 30 д от времени алерта



2. Определение зенитного угла
источника в ± 12 ч от времени алерта



3. Фоновый анализ: число каскадных
событий, прошедших каты, в $\psi < 5^\circ$
для набора 2020 в направлении алерта.



Значения эффективных площадей для
каждого типа нейтрино в зависимости от $\cos(\text{Zen})$
для $E=1 \text{ TeV} \div 10 \text{ PeV}$ для одного кластера.

4. Число наблюдаемых совпадений в ± 12 ч: $N_{\text{obs}} = 1$

Число фоновых событий в ± 12 ч: $N_{\text{bg}} = 0.44$

P-value = **0.36**

Предельное число ожидаемых событий: $n_{90\%} = 4.36$

Экспозиция (используя Eff area): $\text{Expos} = 1787 \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^2$

Ограничение на поток нейтрино:

$$E^2 F = n_{90\%} / \text{Expos} = 2.44 \cdot 10^{-3} \text{ TeV cm}^{-2}$$

Результаты follow-up анализа по однокластерной каскадной моде 2020-2021

1. **2020** г.: в отсутствии наблюдения значимых превышений над фоном в окне ± 12 ч. были подсчитаны верхние пределы на потоки нейтрино для спектра E^{-2} : $\sim 1-2.5 \text{ GeV/cm}^2$.
2. **2021** г.: в алгоритм поиска совпадений для событий GVD добавлено условие отбора $E > 40 \text{ TeV}$.
3. **2021** г.: обнаружено 5 совпадений с $E_{\text{casc}} > 40 \text{ TeV}$, из них 2 прошли оффлайн-отбор.
4. Впервые на Baikal-GVD в **2021** г в онлайн режиме было выделено высокоэнергичное событие, коррелирующее по времени и направлению с IC алертом и с активным радио-источником. Была направлена телеграмма в ATel (The Astronomer's Telegram).

IC211208A Bronze 171 TeV and PKS0735+17

1) Совпадение каскада GVD с E=43 TeV с IC211208A

- $\Delta T = 3.95$ ч после IC
- $\Psi = 5.3^\circ$

2) Активный блазар PKS0735+178 на момент наблюдения каскада GVD

- $\Psi = 4.68^\circ$.
- pre-trial p-value=0.0044 (2.85 σ)
- binned (unbinned) LLh method sigma = 1.29(1.13) σ

3) Телеграмма ATel#15112

о корреляции была отправлена в Astronomer`s telegram.



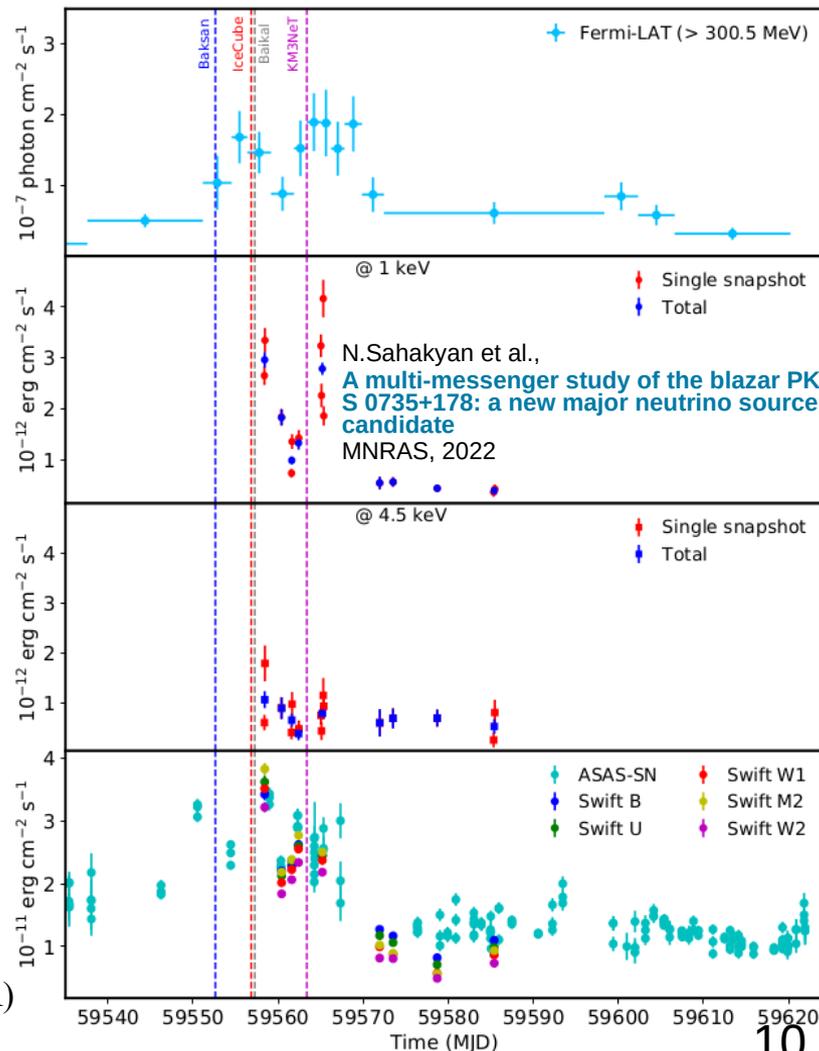
 (самый левый) GVD211208A

 BUST-211204A (Baksan) $\sim 3\sigma$ (Atel#15143)

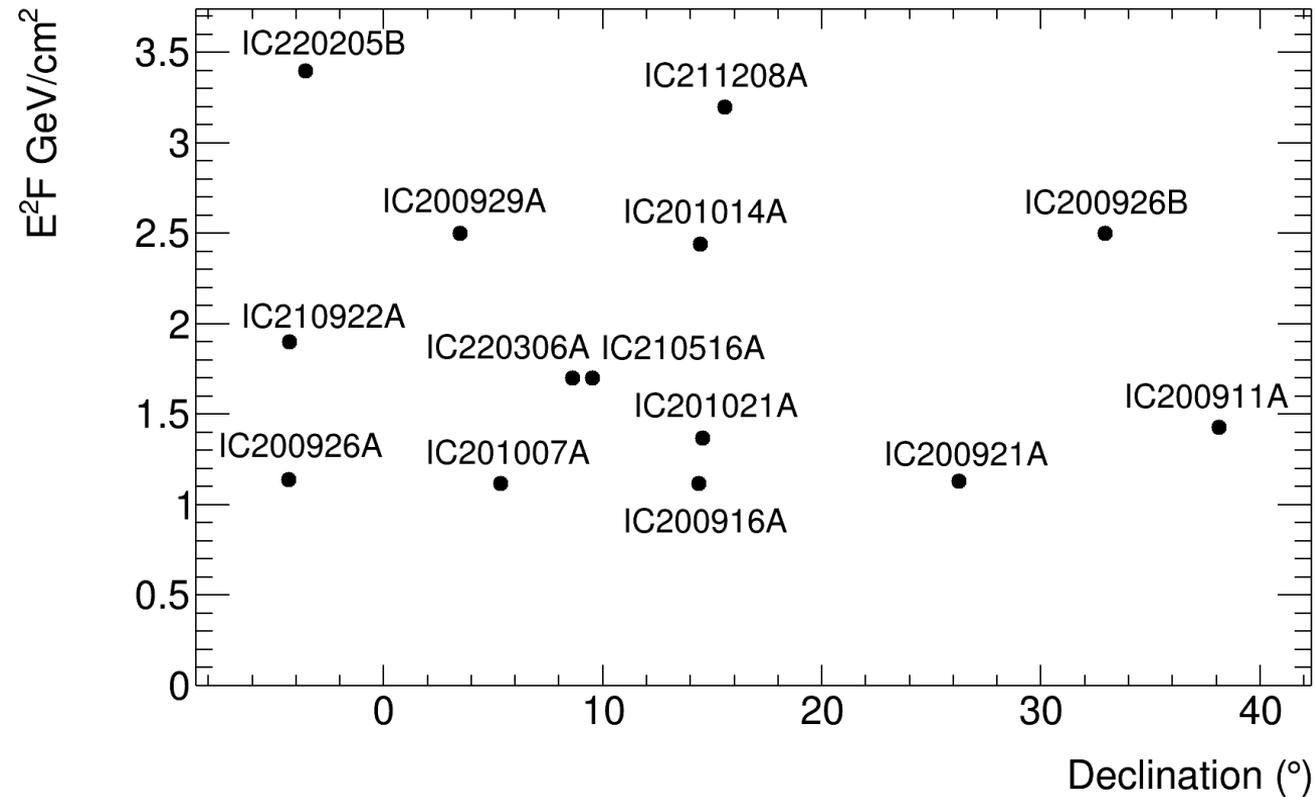
 IC211208A

 Оптический транзient (от остатков SNR)

KM3Net 211215 $\sim 1.1\sigma$ (Atel#15290)



Верхние пределы на поток нейтрино^{*,**} для IC 2020-2022



* Для энергий 1 TeV – 10 PeV со спектром E^{-2} в предположении о равной доле типов нейтрино в полном потоке.

** Значения пределов (2020 - 2021) были опубликованы:

- A.D. Avrorin et al., **High-Energy Neutrino Follow-up at the Baikal-GVD Neutrino Telescope**, *Astron.Lett.* 47 (2021) 2, 94-104, *Astron.Zh.* 47 (2021) 2, 114-124; DOI: 10.1134/S1063773721020018.
- V. Dik et al., **Follow-up of the IceCube alerts with the Baikal-GVD telescope**, *JINST* 16 (2021) 11, C11008; (VLVnT).
- O.V.Suvorova et al., **Multi-messenger and real-time astrophysics with the BaikalGVD telescope**, *PoS ICRC2021* (2021) 946, (ICRC2021, VLVnT2021) **11**

Заключение

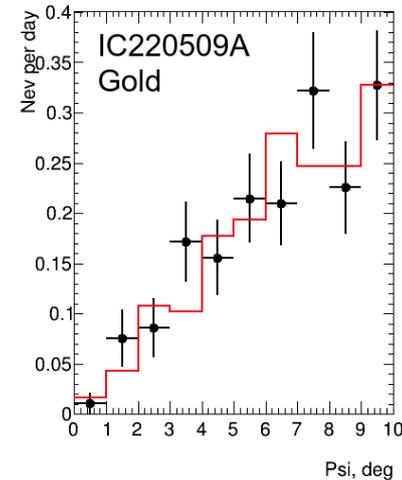
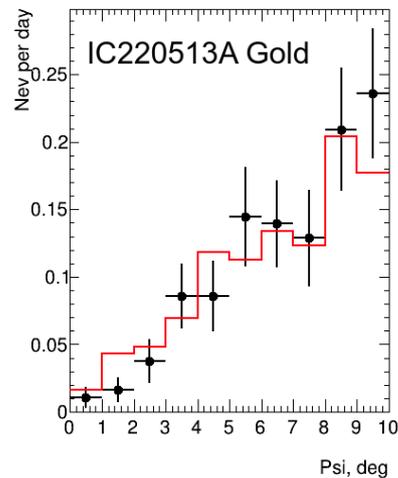
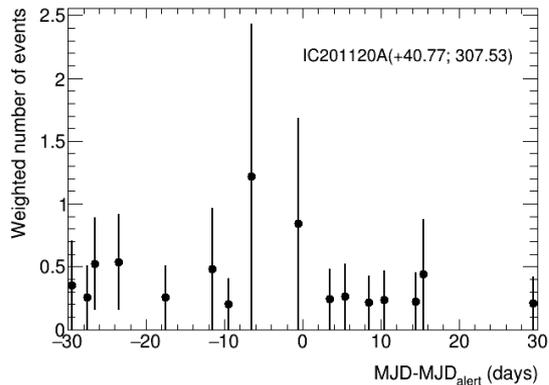
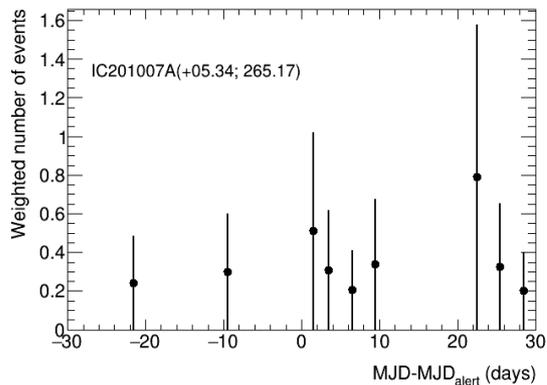
1. Baikal-GVD отслеживает оповещения о нейтринных событиях IceCube в онлайн-режиме.
2. Были показаны результаты поиска совпадений между трековыми событиями IceCube и каскадными событиями Baikal-GVD за 2020-2022.
3. Для однокластерной каскадной моды были получены ограничения на 90% д.у. на поток нейтрино одного типа со спектром E^{-2} в предположении о равной доле типов нейтрино в полном потоке: **$1 \div 3 \text{ GeV/cm}^2$** .

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта "Наука", грант № 075-15-2020-778.
Работа В. Дик поддержана грантом ОИЯИ для молодых ученых и специалистов № 22-202-02.*

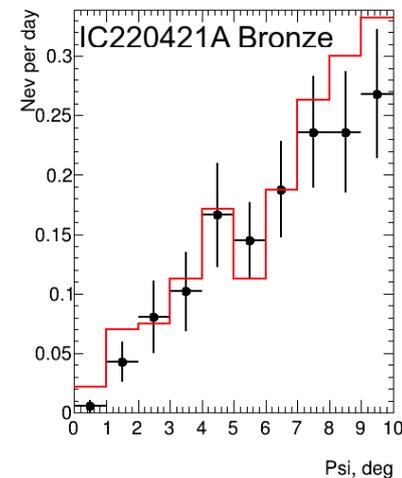
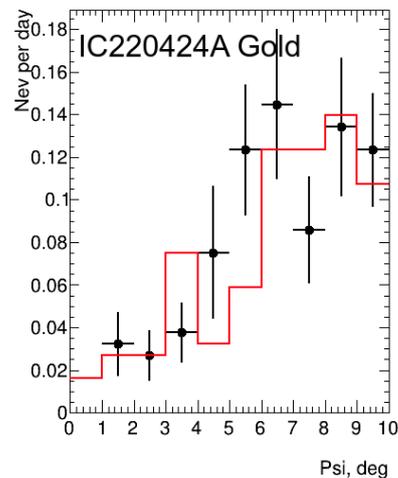
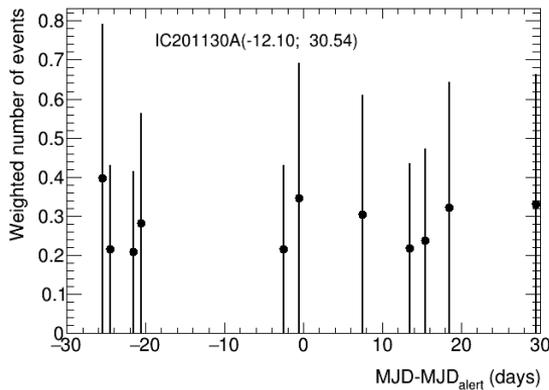
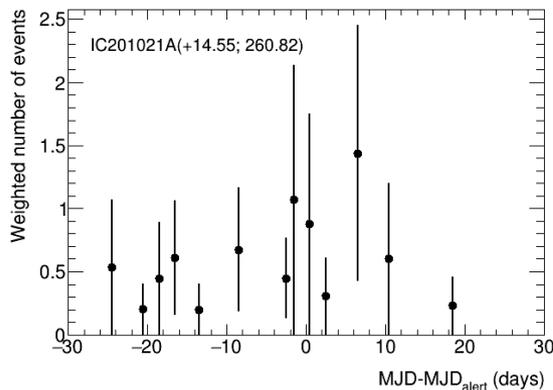
Спасибо за внимание!



Методы пространственно-временного и фонового анализа



Data Background



Число каскадных событий GVD (с весом $1/\psi$)
с $\psi < 5^\circ$ в ± 30 д от времени алерта

Число каскадных событий в $\psi < 10^\circ$ для
набора 2021 г. в направлении алертов

Формулы

$$1 - C.L. = e^{-s_{up}} \frac{\sum_{m=1}^n (s_{up} + b)^m / m!}{\sum_{m=1}^n b^m / m!}$$

$$\Phi_{\nu}^{up} = \frac{s_{up}}{\bar{S}_{eff} \cdot T}$$

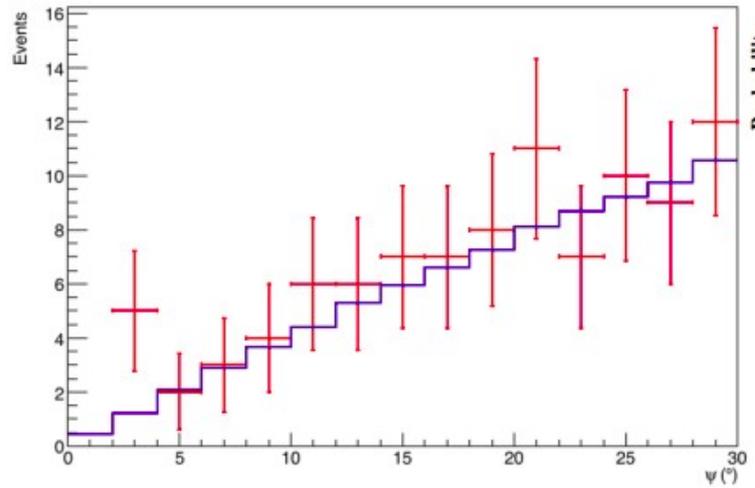
$$\bar{S}_{eff} = \frac{\int S_{eff}(E) \cdot \Phi_{\nu}(E) dE}{\Phi_{\nu}(E)}$$

1. Верхний предел Sup – метод Байеса, находится численным методом уравнения

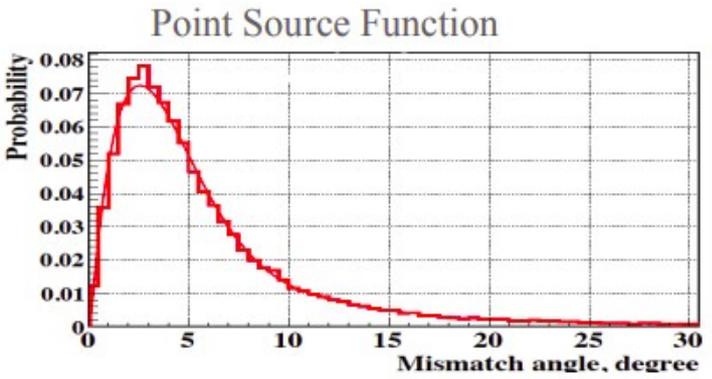
2. Φ – верхние пределы

Binned/unbinned LLH tests twd PKS 0735+178

PKS0735+17/GVDCascades_Apr2018-Mar2022/E>40TeV



Psi data distribution

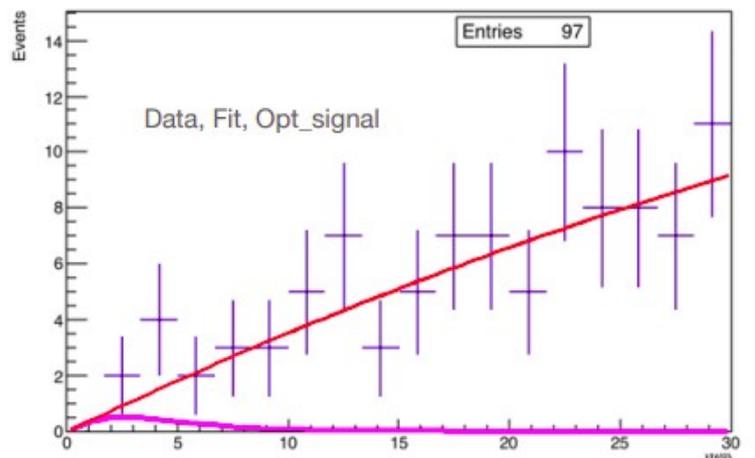


Point Source Function

$$\mathcal{L}(\mu) = \prod_{i=1}^{N_{bins}} \text{Poisson}(n_{obs}^i; n_{obs}^{Total} f(i; \mu))$$

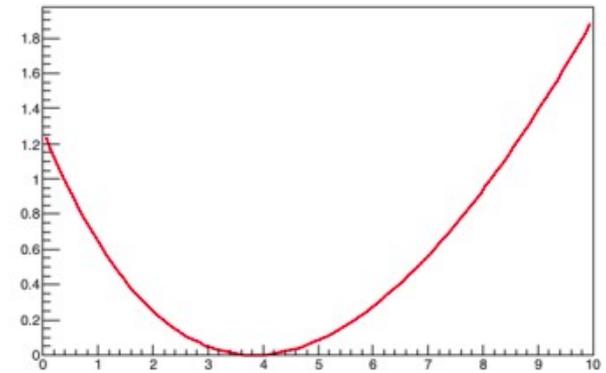
$$f(i; \mu) = \mu \mathcal{S}_i + (1 - \mu) \mathcal{B}_i$$

Background pdf is obtained from scrambled (in RA) data



Data, Fit, Opt_signal

Likelihood_f(x)-635.647



Unbinned LLH:

Integral = 97
 signal_normalization=1.00001
 background_normalization=0.999997
 FCN=4.8661 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 34 CALLS 35 TOTAL
 EDM=1.51298e-22 STRATEGY=1 ERROR MATRIX ACCURATE
 EXT PARAMETER STEP FIRST
 NO. NAME VALUE ERROR SIZE DERIVATIVE
 1 p0 3.76103e-01 1.54638e-01 4.35243e-05 -1.53049e-10
 2 p1 -2.33409e-03 6.87039e-03 1.93374e-06 -5.74133e-09

LLH=635.647

sigma = 1.13019

root [1]

Binned LLH: Sigma =1.2935