

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

Гресь Олег Анатольевич

**Многоканальные исследования астрофизических источников высоких  
энергий во Вселенной**

1.3.1. Физика космоса, астрономия

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научные руководители:

д. ф.-м. н., Почетный профессор МГУ

Липунов Владимир Михайлович

д. ф.-м. н., Буднев Николай Михайлович

Москва – 2022

Оглавление	
<b>Введение</b> .....	4
Общая характеристика работы .....	4
Актуальность темы и степень её разработанности .....	6
Цели и задачи работы .....	8
Методология и методы исследований .....	10
Объект исследования .....	12
Научная новизна .....	12
Практическая и научная значимость работы .....	13
Положения, выносимые на защиту .....	14
Публикации по теме диссертации .....	15
Достоверность научных результатов .....	19
Личный вклад автора .....	19
Структура диссертации .....	21
<b>Глава 1 Оперативная оптическая инспекция уникального нейтринного мультиплета IC160217, выполненная на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР</b> .....	24
1.1 Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ .....	24
1.2 Стратегия наблюдений больших полей ошибок астрофизических источников высоких энергий.....	28
1.3 Нейтринная астрономия IceCube и ANTARES .....	28
1.4 Оперативная оптическая инспекция уникального нейтринного мультиплета IC160217 .....	30
1.5 Выводы.....	39
<b>Глава 2 Исследование событий, зарегистрированных нейтринным детектором ANTARES, на Глобальной сети МАСТЕР</b> .....	40
2.1 Исследование 179 событий, зарегистрированных нейтринным детектором ANTARES, на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР. ....	40

2.2 Анализ источников .....	43
2.3 Оптическая переменность блазаров .....	49
2.4 Анализ возможных других источников.....	52
2.5 Выводы .....	61
<b>Глава 3 Энергетический спектр первичных космических лучей по данным Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE .....</b>	<b>62</b>
3.1 Введение .....	62
3.2 Установка Tunka-133 .....	64
3.3 Установка TAIGA-HiSCORE .....	66
3.4 Установка TAIGA-IACT .....	68
3.5 Энергетический спектр первичных космических лучей. . . . .	71
3.6 Заключение. . . . .	75
<b>Глава 4 Обнаружение и исследование оптических транзиентов на телескопах-роботах МАСТЕР при инспекции гравитационно-волновых алертов aLIGO, LIGO/Virgo и гамма-всплесков .....</b>	<b>76</b>
4.1 Принципы организации инспекционных и алертных наблюдений на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР . . . . .	76
4.2 Наблюдения, обнаружение и анализ транзиентов из полей ошибок гравитационно-волновых событий, регистрируемых aLIGO, LIGO/Virgo...80	
4.3 Наблюдения полей ошибок гамма-всплесков и обнаружение их оптических компонентов .....	91
4.4 Выводы .....	99
<b>Заключение.....</b>	<b>100</b>
Благодарности .....	101
Список литературы .....	102

## **Введение**

### *Общая характеристика работы*

Работа посвящена многоканальным исследованиям на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ [1 – 11] астрофизических источников высоких энергий во Вселенной [1 – 187]: мультиплета нейтрино IC160217 [21], полей ошибок алертов нейтринной обсерватории АНТАРЕС (ANTARES), кандидатов в их возможные источники [24], исследованию оптических транзиентов, обнаруженных на широкопольных изображениях телескопов МАСТЕР [5, 6] в результате инспекции гравитационно-волновых алертов [15] и областей гамма-всплесков [14, 32]; а также исследованию на установках Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE энергетического спектра первичных космических лучей [97, 98, 116, 119]. В результате детально восстановлен энергетический спектр первичных космических лучей в диапазоне энергий  $10^{14} - 10^{18}$  эВ, полученный по данным Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE; проведен анализ сотен квадратных градусов полей ошибок нейтринных событий, регистрируемых детекторами IceCube (в том числе мультиплета IC160217), ANTARES, по результатам которого составлен список переменных астрофизических объектов - кандидатов в источники нейтрино высоких энергий.

Как известно, до сих пор не прояснен до конца процесс рождения космических нейтрино высоких и сверхвысоких энергий [12, 13]. Предполагается прямая связь появления высокоэнергичных гамма-квантов и нейтрино в космических источниках вследствие взаимодействия ускоренных протонов (адронов) или с ядрами атомов среды, или с низкоэнергичными фотонами. В результате взаимодействия протонов, распадающиеся  $\pi$ -мезоны рождают поток нейтрино, спектр которых должен быть близок с спектру протонов. Нейтрино обладает высокой проникающей способностью, вследствие этого регистрация космических нейтрино представляется крайне важной задачей современной физики и астрофизики.

Гамма-астрономия высоких энергий имеет большие достижения при регистрации гамма-квантов как от галактических, так и от внегалактических источников [62, 89, 91]. Ускоренные до высоких энергий адроны и электроны порождают высокоэнергетические гамма-кванты. Поэтому при изучении космических источников гамма-квантов (гамма-всплески, остатки сверхновых, ядра активных галактик и пр.) возникает проблема определения вклада адронов и электронов в поток гамма-квантов [12, 13].

Открытие космических частиц высоких энергий дало начало работам по исследованию механизмов ускорения заряженных частиц в астрофизических объектах. В спектре космических лучей есть частицы с энергией порядка  $10^{15}$ – $10^{18}$  эВ. Космические лучи сверхвысоких энергий активно исследуются на базе установки Тунка-133 на Астрофизическом полигоне МГУ-ИГУ. Установка регистрирует космические лучи по черенковскому излучению от заряженных частиц широких атмосферных ливней, в настоящее время Тунка-133 является крупнейшей установкой такого типа в мире. В работе выполнен анализ данных за 7 сезонов наблюдений с 2009 по 2017 гг.

*Актуальность темы и степень её разработанности*

До сих пор до конца не ясны механизмы появления нейтрино высоких и сверхвысоких энергий. Важную роль в исследовании областей ошибок нейтринных алертов играют роботизированные телескопы, способные быстро навестись по заранее неизвестным координатам в заранее неизвестное время, способные автоматически получить и обработать широкопольные изображения и позволить наблюдателям оперативно проанализировать все объекты на изображениях с целью поиска источника события. С 2015 г. Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ вместе с соискателем активно участвует в программе быстрой оптической поддержки крупных физических и астрофизических экспериментов, таких как гравитационно-волновой LIGO/Virgo, орбитальные гамма-обсерватории для изучения гамма-всплесков, нейтринные обсерватории ANTARES, IceCube и БНО (Баксанская нейтринная обсерватория) для изучения нейтрино высоких и сверхвысоких энергий. Лидирующая роль при проведении оперативной оптической поддержки этих физических обсерваторий принадлежит телескопам-роботам Глобальной сети МАСТЕР МГУ. Многоканальным исследованиям астрофизических источников высоких энергий во Вселенной (Multi-messenger astronomy), таких как нейтринные события, детектируемые на обсерваториях IceCube и ANTARES, обнаружению и исследованию оптических компонентов в полях ошибок источников гамма-всплесков, исследованию транзиентов, найденных при инспектировании областей ошибок (вероятности нахождения) источников гравитационных волн, исследованию спектра первичных космических лучей на установках Тунка-13 и TAIGA-HiSCORE и посвящена диссертационная работа. Начиная с 2015 г. Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ вместе с соискателем активно участвует в оптической поддержке таких глобальных физических проектов, как IceCube, ANTARES/KM3NeT (по регистрации нейтрино сверхвысоких энергий), LIGO/Virgo (по регистрации гравитационных волн), а также в поиске источников быстрых радио-вспышек

FRB (Fast Radio Bursts), а с 2002 г. МАСТЕР исследует гамма-всплески. Благодаря правильно выбранному распределению обсерваторий МАСТЕРа по земному шару удалось достичь больших успехов в современной нейтринной астрономии, гамма-астрономии и гравитационно-волновой астрономии, в частности (при активном участии автора):

1) исследовать сотни полей ошибок нейтринных алертов, получаемых с IceCube, ANTARES и Baksan, наладив алертную систему передачи сигнала с Баксанской нейтринной обсерватории на оптические инструменты поддержки МАСТЕР МГУ;

3) обнаружить миллисекундный пульсар внутри поля ошибок нейтринного события ANTARES-150901.32;

4) провести оперативные наблюдения мультиплета нейтрино IceCube160217, внося наибольший вклад в оптическую поддержку IceCube;

5) провести инспекционные наблюдения всех полей ошибок (error-box) событий, зарегистрированных на гравитационно-волновой обсерватории LIGO ( aLIGO в эпоху наблюдений O1 в 2015 г. и LIGO/Virgo в эпохи O2, O3 в 2017 и 2019-2020 гг.);

6) обнаружить оптические источники десятков гамма-всплесков на ранней стадии;

7) открыть и исследовать многие другие объекты;

Накоплен большой материал, который нуждался в тщательном анализе, что и было сделано диссертантом в работе.

Также в диссертации представлены результаты исследования космических лучей сверхвысоких энергий, полученные диссертантом с соавторами на установках Тунка-133 и комплексе TAIGA-HiSCORE.

*Цели и задачи работы.*

Целью данной работы является исследование нейтринных событий, регистрируемых детекторами IceCube и ANTARES – астрофизических источников высоких энергий, а также поиск и исследование переменных объектов (оптических источников) в полях ошибок нейтринных событий, в полях ошибок источников гравитационных волн и источников гамма-всплесков; а также исследование спектра первичных космических лучей, полученного по данным Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE.

Проведение наблюдений и последующий анализ источников в различных диапазонах длин волн (многоканальные исследования) дадут лучшее понимание процессов, происходящих в момент образования гамма-всплеска, в момент образования нейтрино высоких энергий, в момент слияния компактных объектов, сопровождающихся гравитационно-волновым всплеском, регистрируемым детекторами LIGO/Virgo. Обнаружение оптического источника в первые минуты после регистрации события (срабатывания триггера) и оперативная публикация его координат (MASTER – лидер по ранним наблюдениям [14, 34]) позволят подключиться к многоканальным исследованиям множеству научных групп в мире.

Для изучения свойств материи при сверхвысоких энергиях, в сотни и тысячи раз превышающие возможности Большого Адронного Коллайдера, можно использовать естественные источники, существующие во Вселенной [188, 189]. Из всех частиц сверхвысоких энергий по Вселенной свободно перемещаются только нейтрино, и именно поэтому регистрировать их технически сложно. Такие нейтрино были найдены, а вот где и как они рождаются – до сих пор оставалось загадкой [188, 189]. В 2015 г. нейтринные детекторы перешли на режим автоматической передачи информации о срабатывании триггера в течение сроков от суток до первой минуты после регистрации [188, 189]. Поэтому необходимо иметь возможность в течение первой минуты наводиться в любую точку неба по сигналу с нейтринных детекторов и осуществить быстрый обзор. Такие

задачи могут быть решены только на полностью роботизированных инструментах, в России это – Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ. С помощью телескопов-роботов МАСТЕР были получены доказательства связи между блазаром и нейтринным событием (уменьшение яркости блазара TXS 0506+056 вблизи времени регистрации нейтринного события IceCube-170922) [31, 188, 189]. Обнаружено более сотни оптических источников гамма-всплесков, исследованы сотни полей ошибок нейтринных алертов IceCube и ANTARES, для чего были проведены оперативные алертные и инспекционные наблюдения на телескопах-роботах МАСТЕР в России (-Амур, -Тунка, -Кисловодск, -Таврида), в Испании (MASTER-IAC), ЮАР (MASTER-SAAO), Аргентине (MASTER-OAFA) и Мексике (MASTER-OAGN). При исследовании гравитационно-волновых полей ошибок во время O1, O2, O3 эпох работы aLIGO и LIGO/Virgo детекторов на телескопах Глобальной сети МАСТЕР МГУ были проанализированы новые и переменные оптические источники, обнаруженные программным обеспечением обработки изображений в режиме реального времени МАСТЕР, что и было успешно реализовано автором работы и проанализировано в диссертации.

Наиболее эффективным способом изучения природы галактических и внегалактических источников космических лучей высоких энергий является изучение их потоков гамма-излучения, что входит в одну из основных целей эксперимента TAIGA: поиск объектов, в которых протоны ускоряются до энергий 100 ПэВ (т.н. Пэватронов) [190, 191]; поиск пределов по энергии для ускорения частиц в остатках сверхновых; поиск избытка диффузного гамма-излучения с энергиями выше 100 ТэВ; поиск корреляций с нейтринными событиями нейтринной обсерватории IceCube; исследование формы спектра гамма-излучения с энергиями выше 10 ТэВ от блазаров; поиск астрофизических оптических транзиентов в наносекундном диапазоне от слияния черных дыр и нейтронных звезд и другие. Результаты, полученные автором на установках Тунка-133 и комплексе TAIGA-HiSCORE,

представлены в работе.

### *Методология и методы исследований*

Для решения поставленных задач были использованы общенаучные, аналитические и численные методы. Аналитические методы использовались для построения математических моделей, численные методы реализованы в специально разработанных компьютерных программах.

С 2015 года телескопы-роботы Глобальной сети МАСТЕР МГУ при активном участии автора диссертации начали проводить раннюю быструю (начало экспозиции максимально близко к времени триггера) инспекцию нейтринных полей ошибок, получаемых от детекторов IceCube и ANTARES в автоматическом режиме с целью поиска возможных источников нейтрино высоких и сверхвысоких энергий. Из 179 нейтринных алертов, полученных от нейтринной обсерватории ANTARES и наблюдавшихся телескопами МАСТЕР, только 20 высокоэнергетичных нейтринных событий содержат блазары в области ошибок прихода с радиусом не более 0.7 град от наиболее вероятного направления прихода нейтрино. В одном случае событие ANT190315A по направлению совпадает с активной галактикой Cen A. Следует отметить что кроме нейтрино ANT190315A в пределах до 8 град от центра галактики Cen A обнаруживаются еще несколько нейтринных алертов, а именно: ANT170314A, ANT171117A, ANT210202A и BAKSAN-200601A. Была проведена фотометрия блазаров, попадающих в области неопределенности вычисления положения (error-box) источников нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, и проанализированы их кривые блеска в базе данных телескопов МАСТЕР за период с 2004 г. по 2020 г. В процессе поиска переменности привлекалась информация базы данных спутника Gaia.

Исследования быстропротекающих в оптическом диапазоне явлений с временами жизни, доступным для земного наблюдателя (временем быстрой переменности), от нескольких секунд (долей секунд для FRB) и минут эффективно проводить именно на полностью роботизированных телескопах,

как это реализовано в программном комплексе [1 – 11, 35] на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ, что дает лидерство МГУ и России в оптическом исследовании транзиентных явлений (и именно на ранней стадии), таких как гамма-всплесков, гравитационно-волновые всплески, и возможные источники нейтрино сверхвысоких энергий [1 – 10].

Телескопы-роботы Глобальной сети МАСТЕР МГУ установлены в девяти пунктах земного шара (с востока на запад МАСТЕР-Амур, МАСТЕР-Тунка, МАСТЕР-Урал, МАСТЕР-Кисловодск, МАСТЕР-Таврида (Россия), MASTER-SAAO в ЮАР, MASTER-IAC в Испании, MASTER-OAFA в Аргентине, MASTER-OAGH в Мексике, см. Рис.1). Для оперативного анализа кривой блеска нужного источника (целеуказания) за большие временные промежутки, или оперативного анализа всего комплекса архивных изображений на предмет отсутствия источника, очень важно сохранять идентичность приемного оборудования и вести фотометрические исследования в одной фотометрической системе до 24 час в сутки, что и реализовано на телескопах МАСТЕР и является одним из ключевых свойств всей сети, делая ее уникальной в мире [1 – 11]. Программный комплекс (робот МАСТЕР) обеспечения проведения наблюдений, учета калибровок, получения изображений, отождествления всех источников на каждом за время, меньшее следующей экспозиции (то есть в режиме реального времени – порядка одной минуты), обработки и быстрого анализа результатов наблюдений (широкопольных и сверхширокопольных изображений МАСТЕРа), оперативное изменение автоматического планировщика, позволяющее менять целеуказания удаленно, а также непрерывный доступ (по интернету) к изображениям и фотометрии объектов позволяют быстро публиковать результаты (GCN, ATel) [1 – 11], что особенно актуально при обнаружении оптических источников гамма-всплесков, Сверхновых, Килоновой, когда особенно важен вопрос приоритета). Достоверность обнаруженных объектов, эффективность выбранной методологии обнаружения объектов и их фотометрия подтверждаются наблюдениями

других научных групп и публикациями.

### *Объект исследования*

Объектом исследования являются нейтринные события, регистрируемые детекторами IceCube и ANTARES, – астрофизические источники высоких энергий, а также переменные в оптическом диапазоне объекты в их областях ошибок; новые объекты в полях ошибок источников гравитационных волн и гамма-всплесков; а также спектр первичных космических лучей, полученный по данным Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE.

### *Научная новизна*

Все широкопольные изображения, полученные на телескопах-роботах МАСТЕР в процессе выполнения исследований по диссертационной работе являются уникальными, получены впервые.

1. Проведены самые масштабные наблюдения нейтринного мультиплета IC160217 на телескопах Глобальной сети МАСТЕР, получены широкопольные изображения поля ошибок за месяц до события и проведен мониторинг в течении двух месяцев после регистрации триггера, внесен наибольший вклад в оптическую поддержку этого события, исследованы на переменность в оптическом диапазоне астрофизические источники.

2. Исследованы 179 полей ошибок алертов нейтринных детекторов ANTARES на телескопах Глобальной сети МАСТЕР, получены уникальные широкопольные изображения полей ошибок в течении недели после триггера, предложен список возможных источников.

3. Обнаружены и исследованы оптические транзиенты на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР при активном участии автора при инспекции гравитационно-волновых алертов aLIGO, LIGO/Virgo и полей ошибок гамма-всплесков.

4. Проведены длительные наблюдения космических лучей высоких энергий на уникальных установках Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE, регистрирующих черенковское излучение от широких атмосферных ливней (ШАЛ). Представлены результаты обработки экспериментальных данных, указывающие на существование новой особенности в энергетическом спектре космических лучей, неизвестную до начала работы этих установок, и уточняющие поведение энергетического спектра космических лучей в диапазоне энергий  $2 \cdot 10^{14}$  –  $2 \cdot 10^{18}$  эВ, от диапазона высокогорных экспериментов и экспериментов на спутниках (HAWC, Нуклон) до энергетического порога гигантских установок (Auger, TA).

#### *Практическая и научная значимость работы*

Источники высоких и сверхвысоких энергий во Вселенной до сих пор остаются одними из самых интересных объектов во Вселенной [1 – 11, 188 – 191]. Для поиска источников нейтрино сверхвысоких энергий в Антарктиде была создана обсерватория IceCube, в Средиземном море – обсерватория ANTARES (в настоящее время это KM3NeT), на Байкале - Baikal-GVD [2 – 11, 187, 188]. Автором проанализированы несколько сотен полей ошибок источников нейтринных алертов, детектируемых IceCube и ANTARES, проанализирована фотометрию источников высоких энергий внутри полей ошибок, составлен список возможных кандидатов в источники, определил параметры энергетического спектра космических лучей. Полученные данные могут быть применены для более глубокого исследования событий, регистрируемых коллаборацией нейтринной астрономии, гравитационно-волновой астрономии, гамма-астрономии. Например, созданным диссертантом программным комплексом была обнаружена оптическая переменность трех блазаров из 20 нейтринных событий астрофизической природы ANTARES. Во всех этих случаях, момент нейтринного триггера попадал на спад после максимума на кривой блеска.

*Положения, выносимые на защиту:*

1. Оптические источники в области полей ошибок уникального нейтринного мультиплета IC160217, выявленные в результате оперативной оптической инспекции с помощью телескопов-роботов глобальной сети МАСТЕР, не показывают переменность в интервале времени от 1 месяца до и до 2-х месяцев после события, свидетельствующие об их связи с IC160217.

2. Оптическая переменность блазаров 5BZBJ 2256-3303, PMN J2345-1555, PMN J0328-2329 на характерных временах порядка нескольких суток вблизи триггера нейтринного события, обнаруженная на телескопах-роботах глобальной сети МАСТЕР в области полей ошибок источников событий, зарегистрированных нейтринными детекторами ANTARES, указывает на связь данных блазаров с нейтринными событиями.

3. Новый оптический источник MASTER OT J044914.02+464511.9, открытый на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР, в результате инспектирования поля ошибок гравитационно-волнового события GW151226, является неперiodической карликовой новой с блеском 17.4m в момент обнаружения и амплитудой более 6.6m. Новый оптический источник MASTER OT J124141.98+715028.0, открытый на телескопе МАСТЕР-Тунка в поле ошибок GRB150413A, является оптическим послесвечением гамма-всплеска; максимальный блеск источника составляет 14.9m.

4. При энергии  $2 \cdot 10^{16}$  эВ в энергетическом спектре космических лучей присутствует особенность, неизвестная до начала работы установки Тунка-133. При этой энергии показатель наклона дифференциального энергетического спектра при аппроксимации степенным законом изменяется на 0.3 от  $-3.28 \pm 0.01$  при энергиях меньших  $2 \cdot 10^{16}$  эВ, до  $-2.99 \pm 0.01$  при больших энергиях.

*Публикации по теме диссертации*

По результатам работы автором с коллегами опубликовано 3690 работ (ADS, из них 1669 циркуляров GCN, 1033 циркуляров ATel), в том числе 326 работ в рецензируемых публикациях, среди них 2 статьи в Nature.

**Индекс Хирша диссертанта равен 27 (ADS).**

**Количество цитирования работ диссертанта равно 6186.**

Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях, 5 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science/Scopus/RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. Aartsen M., et al., Master Collaboration: Lipunov V., Gorbovskey E., Tiurina N.V., Balanutsa P.V., Kuznetsov A., Kornilov V.G., Chazov V., Budnev N.M., Gress O.A. et al. "Multiwavelength follow-up of a rare IceCube neutrino multiplet" // *Astronomy and Astrophysics*. 2017 – Vol.607A. – p.115. (IF WoS: 5.363)

2. Lipunov V.M., Kornilov V.G., Zhirkov K., Kuznetsov A., Gorbovskey E., Budnev N., Buckley D.A.H., Rebolo Lopez R., Serra-Ricar M., Francile C., Tyurina N., Gress O., Balanutsa P., Antipov G., Vlasenko D., Topolev V., Chasovnikov A., Svertilov S., Podesta R., Podesta F., Minkina E., Tlatov A., Yurkov V., Gabovich A., Ershova O., Senik V., Kuvshinov D. "MASTER Real-Time Multi-Message Observations of High Energy Phenomena" // *Universe* – 2022. – Vol.8. – p.271. (IF WoS: 2.2)

3. Budnev N.M., Chiavassa A., Gress O.A., et al. "The primary cosmic-ray energy spectrum measured with the Tunka-133 array" // *Astroparticle Physics*. – 2020. – Vol.117. – p.102406. (IF WoS: 2.61)

4. Bezyazeev P., Bonvech E., Borodin A., Brückner M., Bulan A., Chernov D., Chiavassa A., Dyachok A., Gafarov A., Garmash A., Grebenyuk V., Gress O., et al. "TAIGA -- An Innovative Hybrid Array for High Energy Gamma Astronomy, Cosmic Ray Physics and Astroparticle Physics" // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2021. – Vol.84. – №3. – p.362. (IF WoS: 0.328)

5. Gress O., et al. (TAIGA Collab.) "The wide-aperture gamma-ray telescope TAIGA-HiSCORE in the Tunka Valley: Design, composition and commissioning" // Nuclear Instrument and Method A. – 2017. – Vol.845. – p.367. (IF WoS: 1.265)

а также 3 публикации — в сборниках трудов конференций:

1. Gress O.A., Lipunov V.M., Dornic D., Gorbovskey E.S., Kornilov V.G., et al. "MASTER Investigation of ANTARES and IceCube Alerts" // Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Serie de Conferencias – 2019. – Vol.51. – p.89.

2. Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskey E., Tiurina N., Kuznetsov A., Balanutsa P., Chazov V., Gress O., Kuvshinov D., Vladimirov V., Buckley D., Rebolo R., Serra-Ricart M., Podesta R., Levato H., Budnev N., Ivanov K., Tlatov A., Gabovich A., Yurkov V. "MASTER Global Robotic Net: new sites, new result" // Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Serie de Conferencias – 2018. – Vol.48. – p.42.

3. Zhurov D.P., Gress O.A., et al. (TAIGA Collab.), "TAIGA-IACT pointing control and monitoring software status" // Processing of Science - 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2021). – 2021. – Vol.690.

*Доклады на конференциях, в которых обсуждались результаты работы:*

**1) MASTER investigation of ANTARES, IceCube alerts (Устный)**

Автор: Gress O.A.

Международная конференция "Bursting Universe by Robots Eyes" (Взрывающаяся Вселенная глазами роботов), Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга, Россия, 14-18 августа 2017 г.

**2) Локализация источника нейтрино высоких энергий (Устный)**

Авторы: Липунов В.М., Корнилов В.Г., Жирков К.К., Горбовской Е.С., Бакли Д., Реболо Р., Сьерра-Римкарт М., Подеста Р., Тюрина Н.В., Гресь О.А., Сергиенко Ю.П., Юрков В.В., Габович В., Балануца П.В., Горбунов И.А.,

Власенко Д., Балакин Ф., Тополев В., Поздняков А., Кузнецов А.С., Владимиров В., Часовников А., Кувшинов Д., Гриншпун В., Минкина Е., Петков В., Свертилов С., Тлатов А.

Пресс-конференция МАСТЕР МГУ в рамках семинара ОСА имени Я.Б.Зельдовича, <http://master.sai.msu.ru/ru/osa/archive/2020г/06/05/>, Россия, 5 мая 2020 г.

### **3) Открытие эффекта антикорреляции оптика-нейтрино (Устный)**

Авторы: Жирков К., Липунов В.М., Корнилов В.Г., Балакин Ф., Часовников А., Горбовской Е., Тюрина Н., Балануца П., Владимиров В., Кузнецов А., Тополев В., Буднев Н., Гресс О., Горбунов И., Габович А., Юрков В.

УСПЕХИ РОССИЙСКОЙ АСТРОФИЗИКИ 2020 г: Теория и Эксперимент, МГУ ГАИШ, Россия, 18 декабря 2020 г.

### **4) Мультиплет IceCube, 200 алертов ANTARES (Устный)**

Авторы: Тюрина Н., Гресь О., Липунов В., Горбовской Е., Корнилов В., Ишмухаметова Ю., Балануца П., Кузнецов А., Владимиров В.

Успехи Российской Астрофизики 2017: теория и эксперимент, Москва, МГУ, ГАИШ, Россия, 22-23 декабря 2017 г.

### **5) TAIGA gamma-observatory (Устный)**

Авторы: Budnev N., Gress O.

Международная конференция "Bursting Universe by Robots Eyes" (Взрывающаяся Вселенная глазами роботов), Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга, Россия, 14-18 августа 2017 г.

### **6) Астрофизический центр Тайга (Устный)**

Авторы: Буднев Н. Танаев А., Балануца П., Гресс О., Горбовской Е., Горбунов И., Черясов Д.

УСПЕХИ РОССИЙСКОЙ АСТРОФИЗИКИ 2020 г: Теория и Эксперимент, МГУ ГАИШ, Россия, 18 декабря 2020 г.

### **7) Многоканальные исследования астрофизических источников высоких энергий во Вселенной**

Автор: Гресь О.А.

Семинар лаборатории космического мониторинга ГАИШ МГУ, 21 апреля 2022 г.

**8) Возможность регистрации гамма-излучения в области энергий 30-100 ТэВ в эксперименте TAIGA (Устный)**

Авторы: Полещук В., Свешникова Л.Г., Попова Е.Г., Астапов И.И., Барабашина Н., Богданов А., Борейко В., Буднев Н.М., Воронин Д., Вишневский Р., Гресс О.А., и др.

34-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Дубна, Россия, 15-19 августа 2016 г.

**9) Энергетический спектр космических лучей по данным установки HISCORE (Устный)**

Авторы: Полещук В., Попова Е.Г., Астапов И.И., Барабашина Н., Богданов А., Борейко В., Буднев Н.М., Воронин Д., Вишневский Р., Гресс О.А. и др.

34 Всероссийская конференция по космическим лучам, Дубна, Россия, 15-19 августа 2016 г.

**10) Connecting neutrino Astrophysics to Multi-TeV to PeV gamma-ray astronomy with TAIGA (Устный)**

Авторы: Pakhorukov A., Panasyuk M., Pankov L., Nachtigall R., Osipova E.A., Petrukhin A., Platonov V., Poleschuk V., Popova E.G., Porelli A., Postnikov E.B., Prosin V., Ptuskin V., Rubtsov G., Pushnin A., Samoliga V., Satunin P., Semenev Y., Silaev A., jun Silaev A., Skurikhin A., Slucka V., Spiering C., Sveshnikova L.G., Tabolenko V., Tarashansky B., Tkachenko A., Tkachev L., Voronin D., Wischnewski R., Zagorodnikov A., Zurbanov V., Yashin I., Tluczykont M., Budnev N., Astarov I., Bezyazeekov P., Bogdanov A., Boreyko V., Brueckner M., Chiavassa A., Chvalaev O., Lubsandorzhev N., Mirgazov R., Lubsandorzhev B., Lenok V., Kuzmichev L., Kunnas M.H., Kozhin V., Korosteleva E.E., Monkhoev R., Mirzoyan R., Gress O., Gress T.

Magellan Workshop : Connecting Neutrino Physics and Astronomy., Гамбург, Германия, 17-18 марта 2016 г.

### *Достоверность научных результатов*

Результаты работы являются обоснованными и достоверными, опубликованы в 8 рецензируемых журналах, и подтверждены независимыми наблюдениями на других обсерваториях. Достоверность результатов определяется использованием высокоточных многолетних фотометрических наблюдений, полученных на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ и установках Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE. Использовались адекватные методы анализа, при анализе данных проводилась оценка достоверности получаемых величин.

### *Личный вклад автора*

Проведение наблюдений на установках Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE, на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР (Глава 3, статьи [3-5] из списка публикаций и 3 из списка сборников трудов конференций). На Глобальной сети МАСТЕР с 2009 по 2022 гг. автор принимал непосредственное участие в создании обсерваторий МАСТЕР-Тунка, MASTER-SAAO, MASTER-IAC, в проведении наблюдений, в поиске и исследовании оптических источников в областях полей ошибок событий, связанных с нейтрино высоких энергий (IceCube, ANTARES, Главы 1-2, статьи [1, 2] из списка публикаций и [1, 2] из списка сборников трудов конференций), с гамма-всплесками и с источниками гравитационных волн (LIGO/Virgo) (Глава 4, статья [2] из списка публикаций и [1, 2] из списка сборников трудов конференций). Для событий, регистрируемых детекторами IceCube: проведение наблюдений с 2015 до 2022 гг. и исследование полей ошибок нейтринных событий IceCube, в том числе мультиплета IC160217 (Глава 1, статья [1]). Для событий, регистрируемых детекторами ANTARES: проведение наблюдений с 2015 до 2022 гг. и исследование 179 полей ошибок, по результатам которого автором составлен список переменных астрофизических объектов – возможных кандидатов в источники событий

(Глава 2, статья [2] из списка публикаций и [1, 2] из списка сборников трудов конференций). Для гамма-всплесков: проведение наблюдений с 2009 до 2022 гг., независимая фотометрия оптических источников всплесков (Глава 4 статья [1] из списка сборников трудов конференций). Аналогичное исследование было проведено автором на всех полях ошибок источников гравитационных волн, зарегистрированных LIGO/Virgo в эпохи O1, O2, O3 (Глава 4, статья [2] из списка публикаций). Автор создал программный комплекс поиска и оперативного анализа известных источников высоких энергий внутри полей ошибок алертов гамма-детекторов, гравитационно-волновых детекторов, нейтринных детекторов для изображений, полученных на телескопах Глобальной сети МАСТЕР (использованы в Главах 1,2,4, [1,2]). Автор внес существенный вклад в создание, длительную эксплуатацию и анализ экспериментальных данных, полученных на всех установках регистрирующих черенковское излучение ШАЛ в Тункинском эксперименте, начиная от установки Тунка-4 до установок Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE (Глава 3, статьи [3-5] из списка публикаций и [3] из списка сборников трудов конференций).

### *Структура диссертации*

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей 4 главы, заключения и библиографии. В диссертации 120 страниц, включая 39 рисунков и 4 таблицы. Библиография включает 193 наименования.

Во *Введении* описывается важность исследования полей ошибок нейтрино высоких и сверхвысоких энергий и поиска их возможных оптических источников. Определяется актуальность избранной темы, степень ее разработанности, цели и задачи, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология диссертационного исследования, степень достоверности и апробация результатов. Формулируются положения, выносимые на защиту. Приводится список работ, в которых опубликованы основные научные результаты диссертации и перечень российских и международных конференций, в которых апробированы результаты работы. Приведен личный вклад автора в проделанную работу.

В *Главе 1* представлены результаты исследований мультитрета нейтрино IC160217 на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ. IceCube – физический эксперимент, главным рабочим телом которого является кубический километр льда в Антарктиде, впервые в истории зарегистрировал приход трех нейтрино сверхвысоких энергий в течении 100 секунд (Рис.1). Нейтрино, результат взаимодействия которого с рабочим телом детектора регистрируется на Южном полюсе, приходит из северной небесной сферы, проходит всю Землю, попадая в лед порождает электрически заряженный мезон, который в свою очередь двигаясь со сверхсветовой скоростью, порождает черенковское излучение, регистрируемое многочисленными фотоумножителями, расположенные в специальных шурфах километровой глубины установки IceCube. Обычное событие на детекторе – это регистрация одного нейтрино, но 17 февраля 2016 года IceCube зарегистрировал сразу три, и все три события приходят с одного

направления. Была проведена специальная кампания по электромагнитной поддержке нейтринного эксперимента, где участвовали гамма-, рентгеновские и оптические телескопы. Россия была представлена Глобальной сетью МАСТЕР МГУ, которая внесла наибольший вклад в оптическую поддержку IC160217. Проведенная кампания – самая крупная попытка наблюдений в новой области физики, – нейтринной внегалактической астрономии.

В *Главе 2* представлены результаты наблюдений на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР полей ошибок 179 нейтринных событий, зарегистрированных детекторами ANTARES. Треть всех алертов МАСТЕР начал исследовать в течении минуты от момента триггера. Начало наблюдений в течении 2-х часов означает время прихода сообщения об алерте до заката, начало наблюдений в течении суток означает видимость алерта на рассвете и облачность/дождь в это время на текущей обсерватории и приход алертов гамма-всплесков. Для случаев ANT181108A и ANT160111A в поле ошибок расположены блазары, для которых зарегистрировано изменение яркости в моменты, близкие к триггеру. Анализ остальных событий показал присутствие рентгеновских источников, радио-источников, гамма-источников из каталога Ферми, шарового звездного скопления и миллисекундный радиопульсар для ANT150901.

В *Главе 3* представлены результаты исследования черенковского света широких атмосферных ливней (ШАЛ), поток которых пропорционален энергии первичной частицы. В главе представлены результаты обработки экспериментальных данных установок Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE для диапазона энергий от  $10^{14}$  до  $10^{18}$  эВ. Для каждого ливня восстанавливаются направление прихода, координаты оси на плоскости наблюдения и энергия первичной частицы. Процедура восстановления параметров ШАЛ по данным TAIGA-HiSCORE основана на методах и алгоритмах, разработанных для обработки данных Тунка-133. Точность восстановления зенитного угла  $\theta$  составляет 0.1 – 0.4 градуса в зависимости от количества сработавших

оптических станций. Реконструкция положения оси ШАЛ выполняется путем подгонки измеренных амплитуд  $A_i$  функцией амплитуда-расстояние. Точность определения положения оси ШАЛ составляет около 5–10 м. Энергия первичной частицы восстанавливается по черенковской плотности светового потока на расстоянии 200 м от оси ШАЛ с точностью около 15%. Энергетический порог установки TAIGA-HiSCORE при регистрации гамма-излучения составляет  $\sim 40$  ТэВ, для космических лучей  $\sim 80$  ТэВ.

В *Главе 4* представлены результаты исследований оптических транзиентов, обнаруженных на широкопольных изображениях МАСТЕРа в полях ошибок гамма-всплесков и гравитационных волн как показатель эффективности проводимых инспекционных и алертных наблюдений телескопами-роботами Глобальной сети МАСТЕР.

В *Заключении* приводятся основные результаты диссертационной работы и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

## **Глава 1 Оперативная оптическая инспекция уникального нейтринного мультиплета IC160217, выполненная на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР**

При подготовке данного раздела диссертации использованы публикации [21, 23, 24] (в том числе, выполненные автором в соавторстве), в первой из которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования.

Новые возможности в астрофизике для исследования Вселенной появились с началом работы гравитационно-волновых (LIGO/Virgo) и нейтринных обсерваторий ANTARES [25, 26] и IceCube [27, 28] - эпоха многоканальной астрономии. Ведущую роль в оптической поддержке этих экспериментов играет Глобальная сеть телескопов-роботов МГУ МАСТЕР.

### **1.1 Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ**

Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ (Рис. 1.1, [1, 2]) - единственная сеть телескопов, распределенная по Земному шару с идентичным приемным оборудованием и работающая в режиме реального времени (публикующая ежедневно циркуляры о проводимых наблюдениях) [1 – 11]. Телескопы сети МАСТЕР расположены в Северном и Южном полушариях [1 – 11] и способны проводить алертные (по целеуказанию непосредственно после триггера), инспекционные (с использованием своего планировщика, распределяющего между соседними обсерваториями МАСТЕР задачи получить изображения больших полей ошибок). Все телескопы сети МАСТЕР объединены общим центром принятия решений и решают общие задачи [5 - 11], [14 - 24] исследования транзиентных явлений во Вселенной в режиме реального времени. Ключевые особенности телескопов-роботов Глобальной сети МАСТЕР – идентичное приемное оборудование в 9 пунктах сети, географическая распределенность по Земному шару (Рис.1.1, Рис.1.2), собственное программное обеспечение

обработки широкопольных изображений в режиме реального времени (1-2 минуты после считывания с приемника) с полной идентификацией всех объектов и выделением новых, единый центр принятия стратегических решений, централизованное объединение баз данных изображений и результатов наблюдений всех телескопов сети МАСТЕР, что дает возможность проводить наблюдения одного объекта (целеуказания) до 24 часов в сутки в одной фотометрической системе и увеличивает эффективность исследования больших областей распределения вероятности местонахождения источника алертов (например, тысячи квадратных градусов полей ошибок LIGO/Virgo) [192]. Каждая обсерватория МАСТЕР - это двойной широкопольный (2x4 квадратных градуса - основной оптический канал и 800 квадратных градусов - сверхширокопольный оптический канал) цветной (BVRI+PP) поляризационный роботизированный телескоп (см. Рис 1.1, 1.2) [1 – 14, 192].

Непрерывная круглосуточная работа всех телескопов Глобальной сети МАСТЕР, обработка наблюдений в режиме реального времени и доступ по интернету к результатам в любой момент времени дают возможность непрерывного сопровождения целеуказания [1 - 192]. Это позволяет команде МАСТЕР (при активном участии автора диссертации) проводить именно ранние наблюдения оптического излучения гамма-всплесков и открывать их оптические источники, что позволило обнаружить поляризации их собственного оптического излучения [10] (статья в соавторстве с диссертантом в Nature [14]), исследовать гравитационно-волновые события, детектируемые LIGO/Virgo (МАСТЕР внес наибольший вклад в оптическую поддержку первого GW150914 [15, 16] и всех событий O1, O2, O3 LIGO/Virgo [17], независимо открыл Килоновую на месте слияния нейтронных звезд GW170817 [18, 19], благодаря чему стало возможным независимое определение постоянной Хаббла (статья в соавторстве с диссертантом в Nature [20]), внести наибольший вклад в оптическую

поддержку нейтринного мультиплета IceCube IC160217 [21], обнаружить и получить самые ранние изображения десятков оптических источников гамма-всплесков [22], исследовать больше 200 полей ошибок (областей вероятности нахождения источника) источников нейтрино сверхвысоких энергий [23, 24], регистрируемых детекторами ANTARES и IceCube, обнаружить впервые переменность поляризации оптического излучения V404 [29, 30], получить доказательства связи блазара и нейтринного события IC170922 [31] и др.



Рис. 1.1: Расположение телескопов-роботов (справа налево): МАСТЕР-Амур, МАСТЕР-Тунка, МАСТЕР-Урал, МАСТЕР-Кисловодск, МАСТЕР-Таврида (в России); MASTER-SAAO (в ЮАР), MASTER-IAC (в Испании), MASTER-OAFA (в Аргентине), MASTER-OAGH (в Мексике).

Свыше 3500 обнаруженных МАСТЕРом оптических транзиентов (ОТ) [32, 33, 34] позволяет уверенно выделять среди автоматически обнаруженных в режиме реального времени на широкопольных изображениях МАСТЕРа

программным обеспечением МАСТЕР кандидатов в транзиенты реальные интересные источники, быстро анализировать их и публиковать [1 - 35], например, оптические источники гамма-всплесков, зарегистрированных орбитальными детекторами с большой координатной неопределенностью, например, Fermi-GBM [36] или LIGO/Virgo [37], когда размеры квадратов ошибок достигают нескольких десятков, сотен или тысяч квадратных градусов. МАСТЕР регулярно опережает по скорости наведения и получения первых изображений и рентгеновский детектор Swift-XRT, и оптический телескоп Swift-UVOT обсерватории Swift [38]. Большие поля ошибок Fermi-GBM (не связанные напрямую с источниками гравитационных волн, детектируемыми LIGO/Virgo), исследует и обнаруживает оптический источник в подавляющем большинстве случаев только МАСТЕР [10]. Пример такой работы приведен в Главе 4.



Рис. 1.2: Два варианта укрытия для телескопов-роботов Глобальной МАСТЕР – в экстремальных погодных условиях (МАСТЕР-Тунка, слева) и в более мягких условиях (в Мексике, MASTER-OAGH).

## **1.2 Стратегия наблюдений больших полей ошибок астрофизических источников высоких энергий**

Основными критериями любого алертного и инспекционного обзора неба являются полнота и скорость, т.к. в оптическом диапазоне неизвестный заранее источник может проявлять переменность порядка секунд и минут, и его надо обнаружить, провести первичный анализ и его результаты как можно быстрее опубликовать. Поэтому широкопольные телескопы МАСТЕР должны быть в состоянии получать изображения текущего алертного поля ошибок как можно быстрее, с лучшим пределом и перераспределять задачи в случае прихода более важного алерта (например, гамма-всплеска с аппарата Swift) более близкими площадками. Поэтому все небо делится на площадки чуть меньше поля зрения МАСТЕРА (т.е. меньше 4 квадратных градусов, чтобы иметь перекрытия площадок). Таким образом, МАСТЕР разделяет небо на ~10000 полей, проход по заданным площадкам позволит применить второй способ обработки широкопольных изображений МАСТЕРА – анализ разности текущего и архивного изображений с целью обнаружения слабых транзиентных источников.

Центральный планировщик МАСТЕРА при распределении площадок для алертной (инспекционной) съемки между всеми обсерваториями Глобальной сети МАСТЕР учитывает высоту и азимут текущей площадки в текущий момент и через час, угловое расстояние от Млечного Пути, эклиптики, Луны и Солнца, полученные пределы и т. д.

## **1.3 Нейтринная астрономия. IceCube и ANTARES**

Некоторые вопросы регистрации космических нейтрино в нейтринной астрономии излагаются в данном абзаце согласно [9, 188, 189]. Нейтрино, благодаря их чрезвычайно слабому взаимодействию со средой, в отличие от космических лучей, способны сохранить траекторию от источника ускорения

частиц. Источниками космических лучей для энергий, превышающих  $10^{19}$  эВ, могут быть активные ядра галактик, гамма-всплески, а для более низких энергий – вспышки сверхновых, пульсары или микроквезары. Среди действующих нейтринных обсерваторий – это расположенный в Средиземном море ANTARES, вблизи Южного полюса IceCube, на озере Байкал с 2015 г. начал работу первый кластер глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD. А в 2014 г. в Средиземном море началось строительство крупномасштабного нейтринного детектора KM3NeT. Основным фоном для нейтринных детекторов являются атмосферные нейтрино, возникающие при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли. Поэтому астрофизические нейтрино наблюдаются из противоположного полушария, где Земля выступает в качестве фильтра для атмосферных нейтрино. Астрофизические нейтрино и их спектр впервые наблюдались на IceCube, в результате получен предел на их поток как от блазаров, так и от гамма-всплесков [39]. Обнаружение возможного источника осложняется большим полем ошибок - большой неточностью, (большепорядка углового градуса). Программа поддержки нейтринных экспериментов задействует как наземные, так и космические обсерватории [40, 41, 42]. МАСТЕР активно участвует в программе обнаружения оптических источников регистрируемых событий, проводя инспектирование и алертные наблюдения областей неопределенности положения источника нейтринных событий, регистрируемых детекторами IceCube и ANTARES/KM3NeT.

С 2015 г. телескопы-роботы Глобальной сети МАСТЕР МГУ при активном участии автора начали раннюю быструю (начало экспозиции максимально близко к времени триггера) инспекцию нейтринных полей ошибок, выдаваемых детекторами IceCube и ANTARES в автоматическом режиме, с целью поиска возможных источников нейтрино высоких и сверхвысоких энергий. С целью изучения оптической переменности блазаров, попавших в области ошибок высокоэнергичных нейтринных алертов ANTARES, в

настоящей работе были изучены их кривые блеска в базе данных телескопов МАСТЕР за период с 2004 г. по 2020 г.

Из 179 нейтринных алертов, полученных МАСТЕРом от нейтринной обсерватории ANTARES и наблюдавшихся на телескопах Глобальной сети МАСТЕР, треть всех алертов МАСТЕР начал исследовать в течении 1 минуты от момента триггера (Рис. 2.2). Начало наблюдений в течении 2-х часов означает время прихода сообщения об алерте до заката, а начало наблюдений в течении суток означает: приход алерта на рассвете для ближайшей обсерватории МАСТЕР, или видимость алерта на рассвете/закате несколько десятков минут и/или плохие метеоусловия (облачность, дождь) в это время на текущей обсерватории, а также более ранний приход алертов гамма-всплесков или гравитационно-волновых всплесков с приоритетом в наблюдениях (Swift, Fermi-LAT, INTEGRAL, +LIGO).

#### **1.4 Оперативная оптическая инспекция уникального нейтринного мультиплета IC160217**

Нейтринная обсерватория IceCube представляет собой детектор нейтрино объемом в кубический километр, расположенный на Южном полюсе в Антарктиде во льду на глубине 1450 – 2450 м, содержит 5160 оптических модулей на 86 гирляндах. Для обнаружения нейтрино оптические модули могут регистрировать черенковское излучение, испускаемое вторичными частицами, возникающими в результате взаимодействия нейтрино в окружающей среде. С февраля 2011 г. IceCube функционирует в проектной конфигурации. Поле зрения IceCube покрывает все небо с временем безотказной работы ~99%, но более чувствителен к поискам в северном небесном полушарии, где Земля ослабляет большую часть атмосферного мюонного сигнала. Точность восстановления направлений прихода нейтрино (с энергией  $\geq 30$  ТэВ) от мюонного сигнала  $\sim 1$  град., а от каскадного события  $\geq 15$  град. Именно в эксперименте IceCube была определена

величина потока нейтрино астрофизической природы и понят необходимый уровень чувствительности. Отдельные стационарные источники нейтрино пока не обнаружены. Онлайн-системы IceCube постоянно развиваются, чтобы расширить возможности и производительность детектора. Система оповещения кандидатов астрофизических нейтрино в реальном времени принимает поток событий с частотой  $\sim 6.5$  мГц [43]. С апреля 2016 г. за период 5.7 лет было получено 99 одиночных нейтринных кандидатов IceCube для последующей оптической инспекции телескопами МАСТЕР.

17 февраля 2016 г. нейтринная обсерватория IceCube (Рис. 1.3.) зарегистрировала триплет нейтрино в 19:21:31.65 UT из одной области ошибок определения местонахождения источника (error-box), пришедший в течении 100 сек [21] (Рис.1.4, а). Среднее направление прихода всех трех событий:  $RA = 25.7^\circ$ ,  $Dec = 39.6^\circ$ , с радиусом поля ошибок  $\sim 3.6^\circ$  (90%). Оценка энергии нейтрино составила 0.3, 1.1 и 0.5 ТэВ, соответственно.



Рис. 1.3: Взаимодействие телескопов-роботов Глобальной сети МАСТЕР и нейтринного детектора IceCube.

При этом оценки показывают, что случайное нейтринное событие-триплет ожидается один раз каждые 13.7 года. По техническим причинам (время на обработку сигнала и отправки сообщений об алертах через сеть GCN) сообщение об алерте пришло в электромагнитную группу поддержки по электронной почте через сутки.

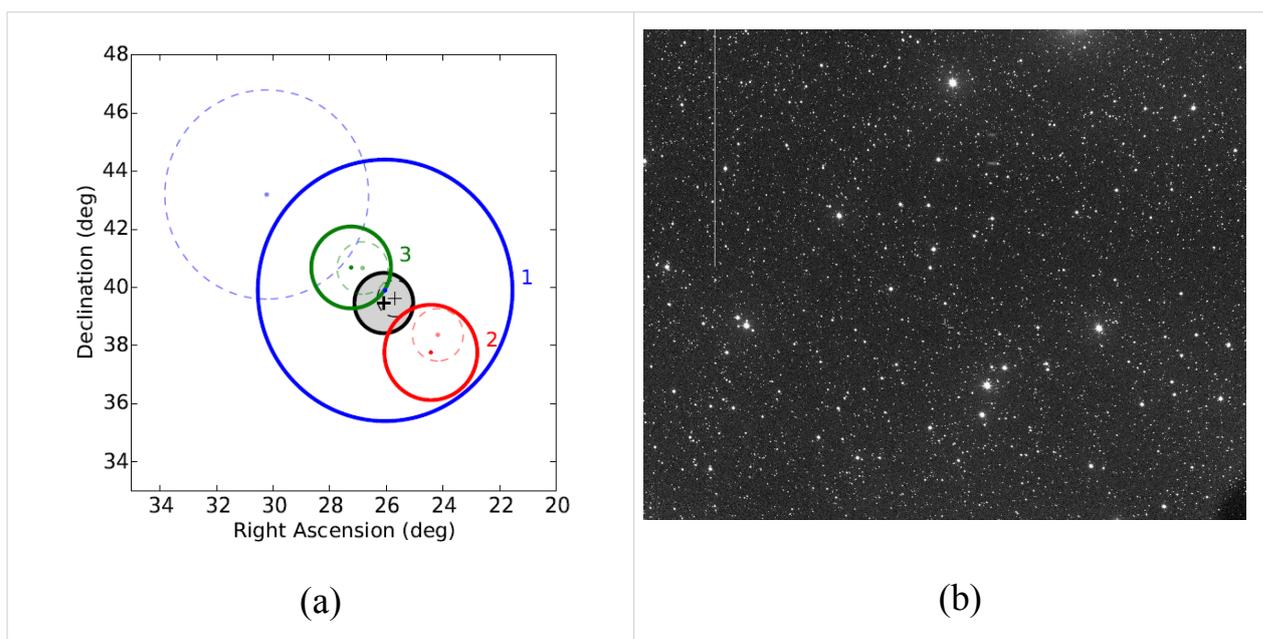


Рис. 1.4: (a) Расположение трех нейтринных кандидатов в мультиплете IC160217 с их 50% полями неопределенности. (b) Изображение, полученное на телескопах МАСТЕР области IC160217 размером  $1.9^\circ \times 1.9^\circ$  с предельной звездной величиной  $18.8^m$ , где насчитывается  $\sim 13000$  звезд и 47 галактик.

Наблюдения оперативно (по отношению к времени прихода сообщения об алерте, первое изображение получено в 2016-02-18 17:15:58 UTC) были проведены на телескопах МАСТЕР-Кисловодск, МАСТЕР-Тунка и на канарском MASTER-IAC (см. Табл. 1.1). Для анализа использовались широкопольные изображения МАСТЕРА за 3 месяца – 1 месяц до события и 2 после. Временной интервал выбран группой IceCube.

Таблица 1.1: Высота центра поля ошибок алерта IC160217 над горизонтом в момент прихода сообщения 2016-02-18 17:15:58 UT.

Обсерватория	Высота алерта, град.	Высота Солнца, град.	Комментарий
МАСТЕР-Амур	04	-47	Слишком низко
МСТЕР-Тунка	13	-50	Облачный слой
МАСТЕР-Кисловодск	43	-28	Облачность
МАСТЕР-SAAO	-08	01	Под горизонтом
MASTER-IAC	78	20	Снежная буря
MASTER-OAFA	-01	69	Под горизонтом

Оптические наблюдения МАСТЕРа: 110 квадратных градусов сняты по 53 раза в течении 60 суток после триггера и проанализированы в течении 30 суток до триггера, каждая площадка снята не менее 3 раз в ночь, таким образом проведен анализ 17490 квадратных градусов. С оптической стороны в наблюдениях кроме МАСТЕРа участвовали ASAS-SN (All-Sky Automated Survey for Supernovae, [44]) (6 изображений за месяц до события и одно через 2 дня после триггера) и LCO (Las Cumbres Observatory, [45]) (двадцать два – 19 февраля и по восемь 1 и 3 марта). МАСТЕР внес наибольший вклад в оптическую поддержку мультиплета (Рис.1.5 и Рис. 1.6). МАСТЕР проводил наблюдения в белом свете и в фильтрах В, I с экспозицией 60 – 180 с. Были проанализированы все полученные на МАСТЕРе широкопольных изображения с пределом до  $19^m$  –  $20^m$  звездной величины. Проведенная оптическая инспекция нейтринного мультиплета подтверждает предположения о том, что не все такие события связаны с блазарами и существуют и другие механизмы ускорения частиц, среди возможных источников могут быть и такие как гамма-всплески, сверхновые и др.

Были проанализированы все возможные переменные источники,

выделенные автоматическим программным обеспечением МАСТЕРа, а также кандидаты, предложенные группой Swift и блазары из каталога Fermi.

Обсерватория Swift [38] навелась на IC160217 через 100 сек после обнаружения первого нейтрино, а монитор гамма-всплесков Swift-BAT (15 – 150 кэВ) осуществил съемку из 3-х экспозиций. Дальнейший анализ не показал наличие источников, а только случайные колебания фона.

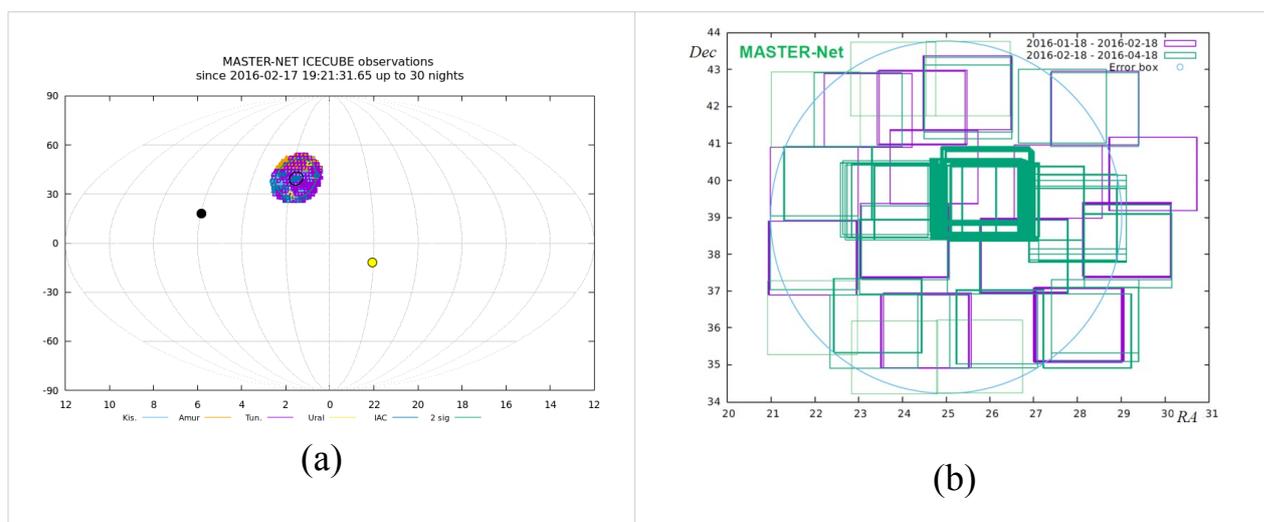


Рис. 1.5: Карта покрытия телескопами МАСТЕР поля ошибок IC160217: (a) — в экваториальных координатах, (b) — увеличенное изображение. За период до триггера (фиолетовые квадраты) 2016-01-18/02-18 и после (зеленые).

Рентгеновский спектрометр Swift-XRT (0.3–10 кэВ) осуществил наблюдения 50% поля через 22.6 час после обнаружения нейтрино, в результате было получено рентгеновское изображение (Рис. 1.7 (a)) и определены 6 источников рентгеновского излучения. Источник X1 не вспыхивал во время наблюдения. Источник неизвестного происхождения X6 подвергался долговременным наблюдениям на Swift-XRT до июля 2016 г., и его излучение уменьшилось в девять раз за пять месяцев. С точки зрения анализа кривой блеска рентгеновского излучения X6 были сделаны следующие выводы:

- 1) исключается возможность гамма-всплеска GRB,
- 2) экстремальная звездная вспышка, или скрытый и далекий AGN,
- 3) вряд ли связан с триплетом нейтрино.

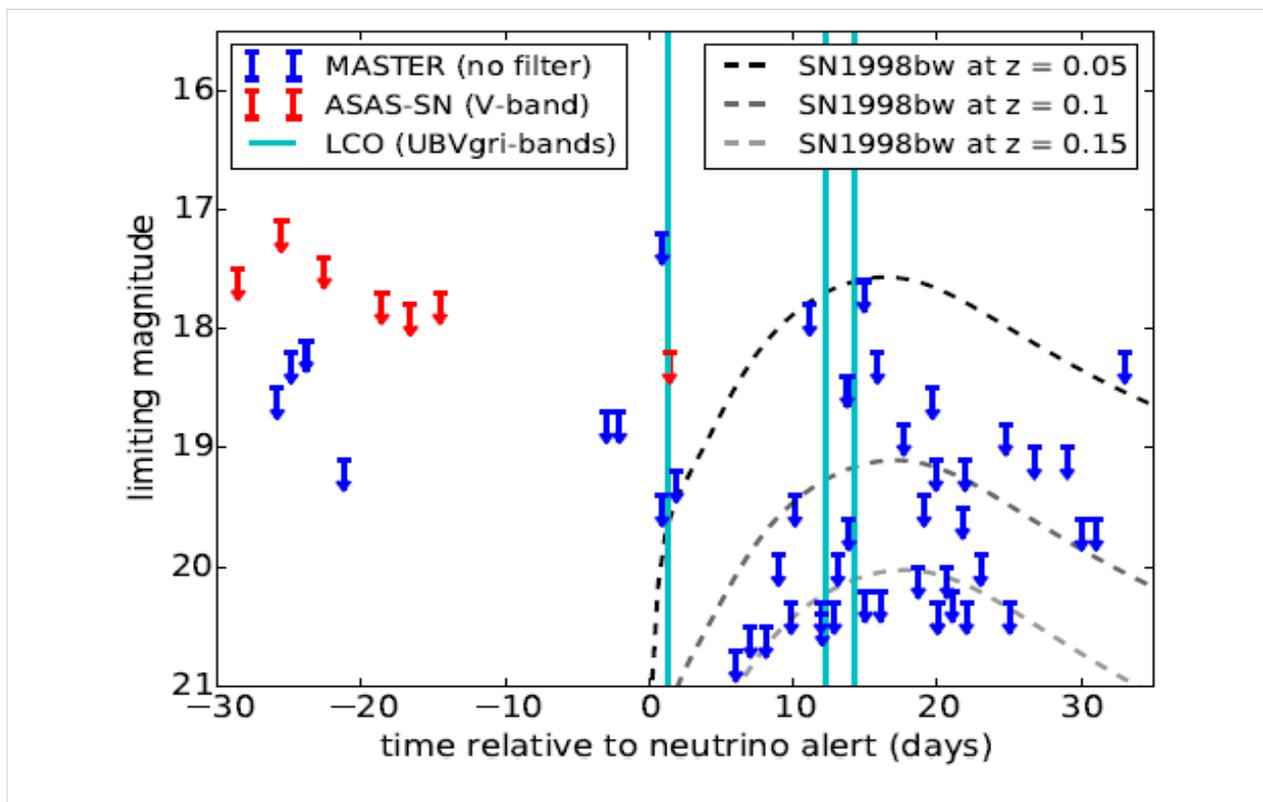


Рис. 1.6: График предельных звездных величин от времени наблюдения, дающих ограничение на яркость возможного источника нейтринного алерта IC160217. Штриховые линии – кривые блеска сверхновой SN1998bw (SN.Ic,  $z=0.0085$ ,  $M_V = -19.4^m$ , и GRB980425) для сравнения в качестве возможного кандидата для разных расстояний (230, 480, 740 Мпс соответственно).

Рентгеновские источники, предложенные Swift:

- 1) X1 – B2 0138+39B, сейфертовская (1) галактика,  $z \sim 0.08$ ,  $16.0^m$  V
- 2) X2 – HD 10438, звезда,  $6.7^m$  V
- 3) X3 – V\* OQ And, переменная звезда,  $7.6^m - 7.7^m$  V
- 4) X4 – 1RXS J014658.4+391526, звезда TYC 2815-255-1,  $10.6^m$  V

5) X5 – HD 10169, звезда, 7.2m V

6) X6 – Unknown, RA = 25.0107°, Dec = +39.6033°, >17.4m AB

Для этих источников был проведен анализ кривых блеска в базе данных МАСТЕР на всем временном промежутке с 2009 г. по 2016 г.

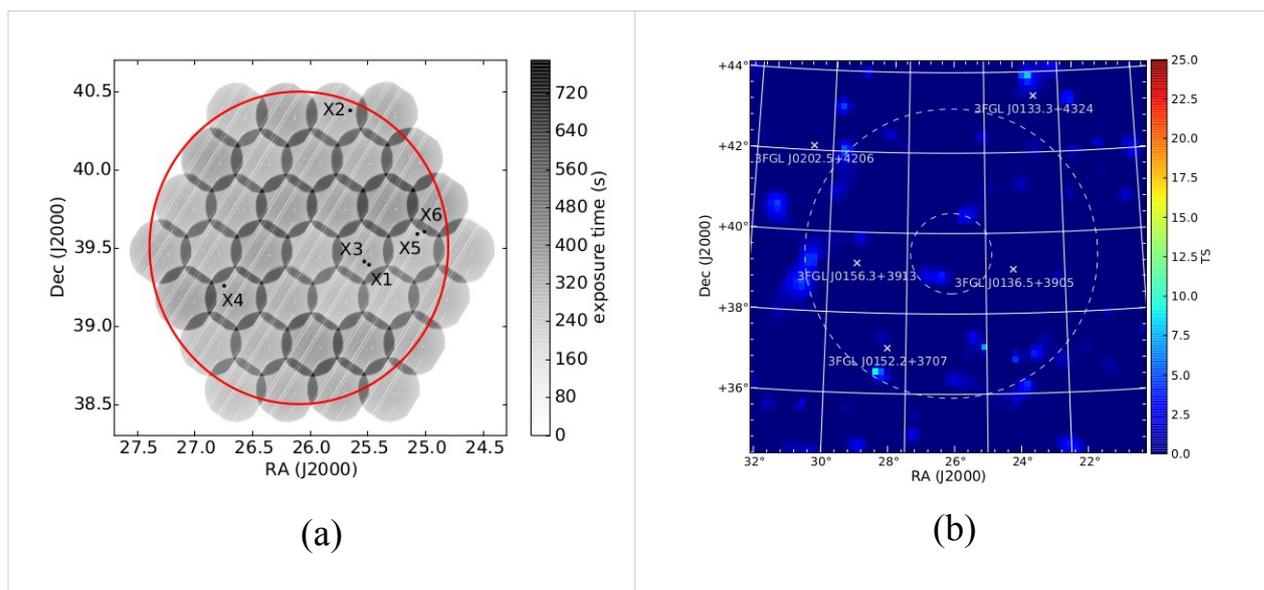


Рис. 1.7: (a) Карта расположения источников рентгеновского излучения Swift-XRT, обнаруженных в поле IC160217. (b) Карта значимости и гамма-источников Fermi-LAT по результатам поиска в области триплета IC160217 в течение 14 дней после обнаружения нейтрино. Пунктирные кружки – 50% и 90% ошибки нейтринного триплета. Крестики – расположение известных источников Fermi.

Космическая гамма-обсерватория Fermi [36] (состоит из: гамма-телескоп Fermi-LAT, 20 МэВ – 300 ГэВ; монитор гамма-всплесков Fermi-GBM, 8 кэВ – 1 МэВ и 150 кэВ – 40 МэВ) в момент обнаружения нейтринного события была перекрыта Землей, и поэтому нет данных по наличию гамма-транзиента. Команда Fermi при анализе данных Fermi-LAT в диапазоне энергий 100 МэВ – 100 ГэВ за 14 дней после обнаружения нейтрино

IC160217 не выявила выбросов, превышающих ожидаемый фон (Рис. 1.7 (b)), а также и переменности известных гамма-источников Fermi.

В поле IC160217 обнаруживаются следующие известные гамма-источники (первые три - внутри поля 90%):

- 1) 4FGL\_J0136.5+3905 – bll B3\_0133+388,  $z \sim 0.750$ , 15.8m V;
- 2) 4FGL\_J0156.5+3914 – bcu MG4\_J015630+3913, 18.4m G;
- 3) 4FGL\_J0152.2+3714 – bcu B2\_0149+37, 18.7m G;
- 4) 4FGL\_J0132.7+4323 – bcu B3\_0129+431, 20.0m G;
- 5) 4FGL\_J0202.7+4202 – bll B3\_0159+418, 19.0m G;

Для этих Swift и Fermi источников был проведен анализ кривых блеска в базе данных МАСТЕР на всем временном промежутке с 2009 г. по 2016 г. В связи с большим разрывом (больше суток) между триггерным событием IC160217 и сообщением оптическим наблюдателям о событии, изменений яркости (как это было выявлено с соавторами для TXS 0506+056 [31]) возможных кандидатов в источники нейтрино не обнаружено.

Для быстрого анализа возможных кандидатов астрофизических нейтринных событий, исследуемых телескопами-роботами Глобальной сети МАСТЕР МГУ, диссертантом была создана в едином формате обновляемая база данных из астрономических каталогов и программный комплекс для поиска этих кандидатов по координатам алертов с учетом полей ошибок. Более подробная информация по используемым каталогам приведена в главе 2.4.

В частности, в поле ошибок нейтринного триплета IC160217 с радиусом поиска  $3.6^\circ$  от наиболее вероятного направления прихода (кроме выше приведенных источников Swift и Fermi) обнаруживаются:

- 4 оптических транзиента, открытых сетью МАСТЕР за период 2012 – 2020 гг.;

- 8 оптических транзиентов из каталога группы ASAS-SN;
- 12 транзиентов из каталога спутника Gaia;
- 16 ярких рентгеновских источников ROSAT и 155 источников из каталога SWIFT-XRT Point Source;
- 49 радиоисточников NVSS из NRAO VLA Sky Survey Catalog;
- 6 сверхновых: SN.Ia – 2, SN.II – 1, неизвестного типа — 3;
- 391 звезд по SKY2000 Catalog и 246 галактик из каталога GLADE-v2.0;
- 1 пульсар PSR J0156+3949 с периодом  $P_0 = 1.81156061131$  сек;
- 1 гамма-источник – ТэВ-ый блазар RGB J0136+391 ( $z > 0.27$ ) [47] из TeVCat Catalog, он же – 4FGL\_J0136.5+3905;
- 6 блазаров из Roma-BZCAT Catalog.

Следует отметить, что на данный момент в поле триплета IC160217 не обнаруживаются совпадений с известными нейтринными алертами ANTARES, Baksan и Baikal-GVD, а также с предупреждениями AMON.

## 1.5 Выводы

Проведено многоволновое исследование мультиплета нейтрино IC160217. На телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР мониторинг в оптическом диапазоне проводился 2 месяца. При анализе широкопольных изображений и всех оптических источников, в них содержащихся, на переменность учитывались 3 месяца, в том числе 1 - до триггера.

Оптический источник, непосредственно связанный с нейтринным событием, не выявлен. Проведенная оптическая инспекция нейтринного мультиплета подтверждает предположения о том, что не все такие события связаны с блазарами, и существуют и другие механизмы ускорения частиц, среди возможных источников могут быть и такие как гамма-всплески, сверхновые и др.

В базе данных МАСТЕР по результатам мониторинга 2 месяца после триггера и один месяц до него, исследованы в оптическом диапазоне на переменность рентгеновские источники, предложенные для анализа детектором Swift-XRT [1]. Оптическая переменность в январе-марте 2016 г. для них не обнаружена.

Исследованы все оптические источники на широкопольных изображениях, полученных на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР с целью поиска переменности по кривой блеска за длительный период, а также по показателю цвета В-І на временах, близких к триггеру. Не обнаружено источников с вариацией на кривой блеска, связанной с нейтринным событием, в исследованные моменты времени вблизи триггера.

## **Глава 2 Исследование событий, зарегистрированных нейтринным детектором ANTARES, на Глобальной сети МАСТЕР**

Содержание Главы основано на проведенной работе, результаты которой опубликованы в [3 – 6, 15 – 24, 29, 30, 31, 33, 34, 35]. При подготовке данного раздела диссертации использованы публикации [3 – 6, 15 – 24, 29, 30, 31, 33, 34, 35] (в том числе, выполненные автором в соавторстве), в [3, 4, 23, 24] из которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования.

### **2.1 Исследование 179 событий, зарегистрированных нейтринным детектором ANTARES, на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР**

Нейтринный телескоп ANTARES [25] непрерывно работает с 2008 г., он расположен на глубине 2475 м в Средиземном море (RA= 06d 09m 56.0s E, Dec= +42d 47m 56.0s N), в 40 км от г. Тулон (Франция), с геометрическим объемом  $\sim 180 \times 180 \times 480 \text{ м}^3$ . Основная цель эксперимента ANTARES – поиск нейтрино астрофизического происхождения путем обнаружения треков мюонов высокой энергии ( $\geq 0,1 \text{ ТэВ}$ ), инициированных взаимодействием нейтрино вблизи детектора. Этот подводный черенковский массив фотодатчиков состоит из 885 фотоумножителей, которые расположены на 12 стрингах с 25-ю регистрирующими модулями каждый, при этом расстояние между модулями - 14.5 м, а среднее расстояние между стрингами  $\sim 70 \text{ м}$ . Медианные угловые ошибки направлений прихода регистрируемых ANTARES нейтрино составляют  $\sim 0.4^\circ$  при 10 ТэВ и  $\sim 0.7^\circ$  при 1 ТэВ. Эти значения соответствуют радиусу гауссовой ошибки поля, которое содержит 50% событий. Значение  $1.4^\circ$  является консервативным значением на уровне  $\sim 3\sigma$ .

Оперативная система выдачи оповещений (алертов) ANTARES работает с начала 2009 г. [26], и условия выработки алертов заключаются в следующем:

1) одиночные нейтрино высокой энергии ( $\sim 5$  ТэВ,  $\sim 20$  событий/год) и сверхвысокой энергии ( $\sim 30$  ТэВ,  $\sim 3-4$  событий/год); 2) нейтрино по направлению к близким галактикам ( $\sim 1$  ТэВ,  $\sim 10$  событий/год); 3) двухкратные нейтринные события ( $\sim 0.04$  событий/год). Среднее время формирования оповещения составляет  $\sim 5$  сек, и с 2009 г. было выдано  $\geq 300$  нейтринных алертов. Средний темп получения телескопами-роботами МАСТЕР нейтринных алертов ANTARES с февраля 2015 г. по январь 2000 г. составил  $\sim 3$  события/месяц.

В феврале 2022 г. телескоп ANTARES был отключен, и его функции берет на себя новый строящийся KM3Net [79].

За период 2015-2021 гг. МАСТЕР получил и при активном участии диссертанта провел наблюдения 179 ANTARES алертов. Распределение координат алертов по небесной сфере представлено на Рис.2.1.

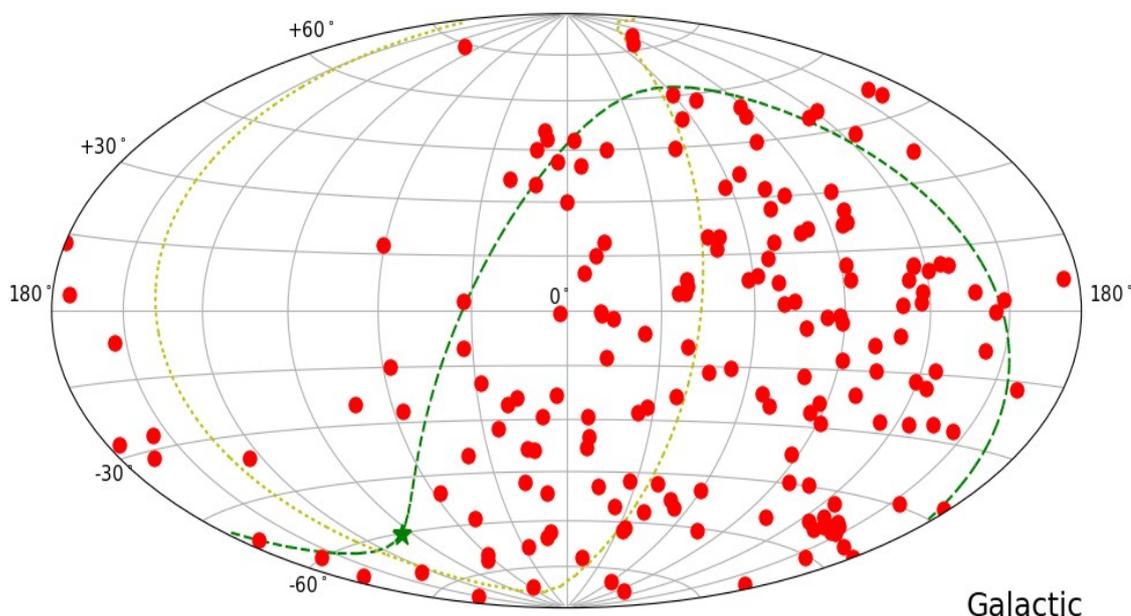


Рис. 2.1: Расположение направлений прихода алертов ANTARES по небесной сфере (галактические координаты).

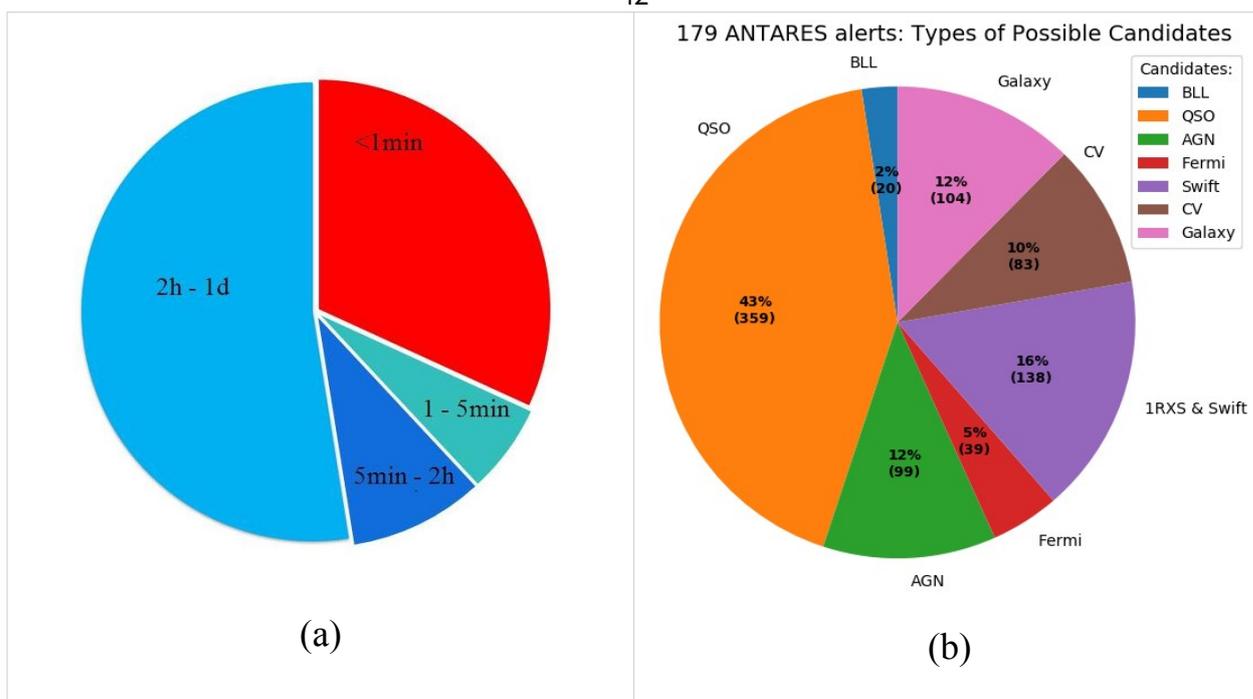


Рис. 2.2.: Статистика по быстродействию наведения и возможным кандидатам в источники нейтрино. (а) Диаграмма скорости наведения телескопов МАСТЕР – начала алертных наблюдений (время старта первой экспозиции) от времени триггера. (б) Иллюстрация распределения объектов, которые находятся МАСТЕРом в поле ошибок нейтринных событий ANTARES.

Скорость реакции телескопов МАСТЕРА (время от момента прихода сообщения до момента начала первой экспозиции) показано на Рис.2.2 (а). Задержка до 5 мин связана с окончанием предыдущих алертных (Ферми, Свифт и т.д.) наблюдений, от 5 мин до 2 час задержка связана с временем прихода алерта в вечернее время, при дождливой погоде и для тех обсерваторий МАСТЕРА, где положение объекта под горизонтом. Задержка больше 2 час связана с восхождением координат над горизонтом и с метеоусловиями после набора объектом требуемой высоты для наблюдения.

Среди обнаруженных по результатам анализа полей ошибок событий ANTARES, среди интересных объектов можно выделить следующие: 359

активных ядер галактик (43%), 104 галактики (12%), 138 рентгеновских источников (ROSAT, Swift), 39 источников, выделенных Fermi (и не являющихся QSO, BLL), 83 катаклизмических переменных CV (см. Рис. 2.2 (b)).

## 2.2 Анализ источников

После тщательного анализа параметров высокоэнергичных нейтринных алертных событий, командой ANTARES были выделены 20 наиболее вероятных астрофизических нейтрино, анализ которых приводится в текущей главе. Эти 20 высокоэнергичных нейтринных событий содержат блазары в областях полей ошибок (error-box) алертов с радиусом не более 0.7 град.

В одном случае событие ANT190315A по направлению совпадает с галактикой Центавр А (Cen A, NGC 5128, Seyfert 2 galaxy). Cen A – ближайшая к нам активная галактика, удаленная от нас примерно на 4 Мпк. Она классифицируется как радиогалактика и имеет визуальный размер  $\sim 26 \times 20$  угловых минут<sup>2</sup>. В рентгеновских лучах обнаружена внутренняя струя протяженностью примерно в 1 кпк со сложной структурой из ярких узлов. В радиодиапазоне видны сложные струйные структуры, простирающиеся от ядра до гигантских внешних лепестков с угловым расширением до  $8 \times 4$  град<sup>2</sup> [81]. Следует отметить, что в направлении до 8 град от центра галактики Cen A (см. Рис. 2.3) кроме нейтринного алерта ANT190315A расположены центры полей ошибок еще нескольких нейтринных алертов, а именно: ANT170314A, ANT171117A, ANT210202A и BAKSAN-200601A.

Была проведена фотометрия оптических транзиентов, обнаруженных в полях ошибок событий ANTARES, в том числе блазаров, попадающих в области неопределенности положения источников нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, и проанализированы их кривые блеска в базе данных телескопов MASTER за период с 2004 г. по 2020 г. В процессе поиска переменности привлекались базы данных спутника Gaia [52], а также

каталоги космических рентгеновских и гамма-обсерваторий, каталоги блазаров, радио-источников, сверхновых, нейтринных алертов IceCube и BAKSAN и др. (см. описание в Главе 2.4).

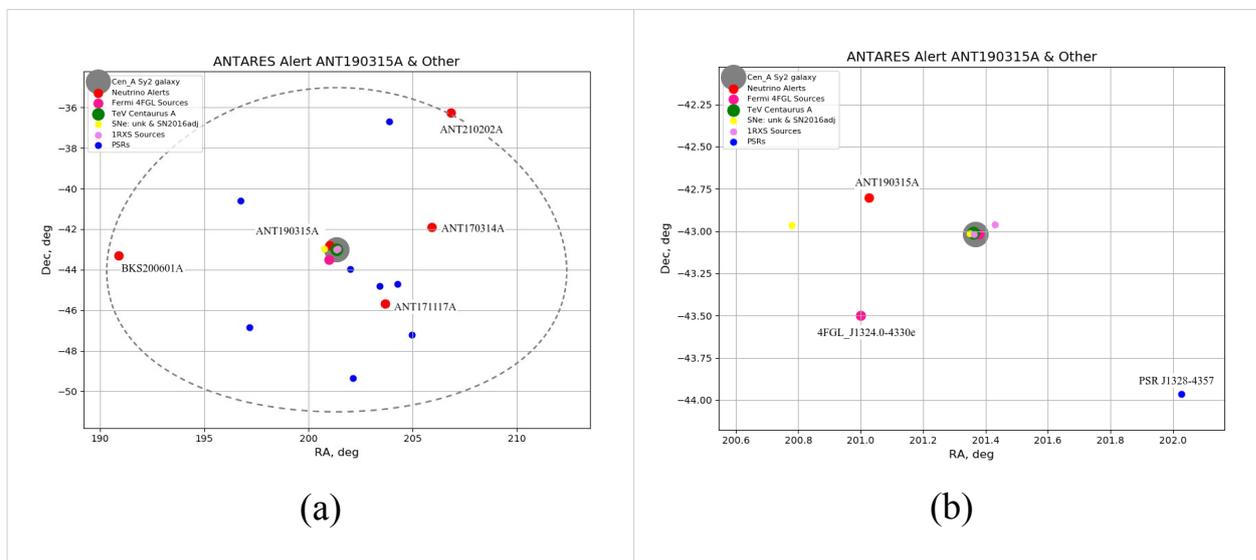


Рис. 2.3: Расположение нейтринных алертов и других объектов в окрестности галактики Cen A: (a) в области с радиусом поиска до 8 град от центра Cen A, (b) вблизи галактики Cen A.

Для выборки из 20 сверхвысокоэнергичных нейтринных событий (Таблица 2.2) в 17 случаях в поля ошибок нейтринных алертов ANTARES попадают рентгеновские источники, в 9 случаях попадают радиоисточниками, при этом в 8-ми случаях наблюдаются и рентгеновские и радиоисточники. Только в 5-ти случаях наблюдается совпадение алертов с гамма-источниками Fermi. За все время наблюдения на телескопах МАСТЕР с 2010 г. по 2020 г. (для Gaia с 2014 г.) обнаруживается совпадение направления полей ошибок алертов с оптическими транзиентами в 6 случаях из 20, причем интервал времени составляет порядка 1-3 лет как до, так и после алерта (за исключением ANTI151106A и ANTI170811A). Более подробная информация о результатах поиска приведена в Таблицах 2.1 и 2.2.

*ANT151106A*

Через месяц после получения алерта ANT151106A был обнаружен короткий (виден в обеих трубах 2015 Dec 02.076 UT,  $m_{OT} = 18.6^m$ ,  $m_{LIM} = 19.0^m$ ) оптический транзист MASTER OTJ115059.36-342142.2 вблизи галактики PGC663454 ( $G = 21.2^m$ ,  $z \sim 0.091$ ). Карта покрытия области наблюдения ANT151106A приведена на рис. 2.4 (a).

*ANT170811A*

В области (в поле ошибок) нейтринного алерта ANT170811A наблюдается 3 рентгеновских источника 2SXPS и 1 слабый ROSAT, и 3 радиоисточника NVSS с плотностью потока не менее  $\sim 100$  mJy. По данным Gaia объект Gaia17cbr (AT2017gck [80]) ярчает на 4 звездные величины до  $16.6^m$  через 8 часов после триггера на расстоянии 0.553 град от центра наиболее вероятного направления алерта. Данный объект испытывал кратковременное повышение блеска и в дальнейшем, – в марте 2018 г. и в ноябре 2019 г.

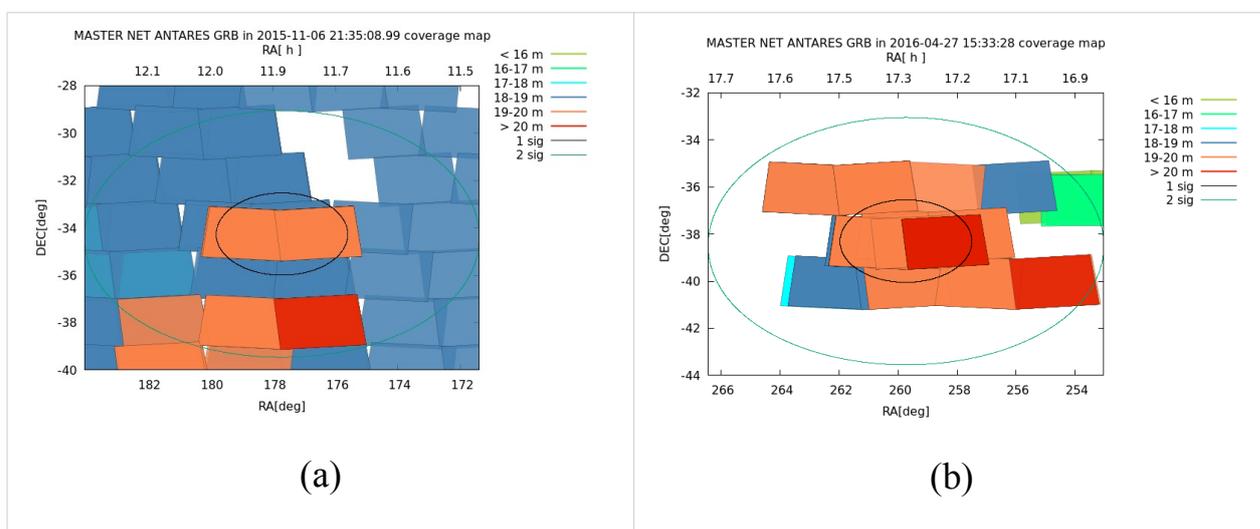


Рис. 2.4: Карта покрытия телескопами Глобальной сети MASTER полей ошибок ANT151106A (a) и ANT160427A (b) с предельной величиной, указанной на рисунке.

*ANT180725A, ANT160427A*

В области поиска 0.5 град от наиболее вероятного положения центра поля ошибок алерта ANT180725A обнаруживается множество рентгеновских источников и радио-источников, а также 6 пульсаров и 1 гамма-источник 4FGL\_J1721.6-3916 неизвестной природы. Следует заметить, что внутри области алерта ANT180725A с радиусом поиска 1.3 град находятся 3 остатка сверхновых (SNR) G349.2-0.1, G348.5-0.0 и G350.0-2.0. За 2 года до события ANT180725A с этого направления был зарегистрирован еще один алерт ANT160427A на расстоянии 0.76 град от первого. И кроме того, на расстоянии 0.9 град от центра поля ошибок алерта ANT180725A в данной области находится TeV-гамма источник HESS\_J1718-385 (4.2 кпс). Взаимное расположение этих объектов приведено на рис. 2.5 (а), карта порытия на рис. 2.4 (b) и рис 2.5 (b).

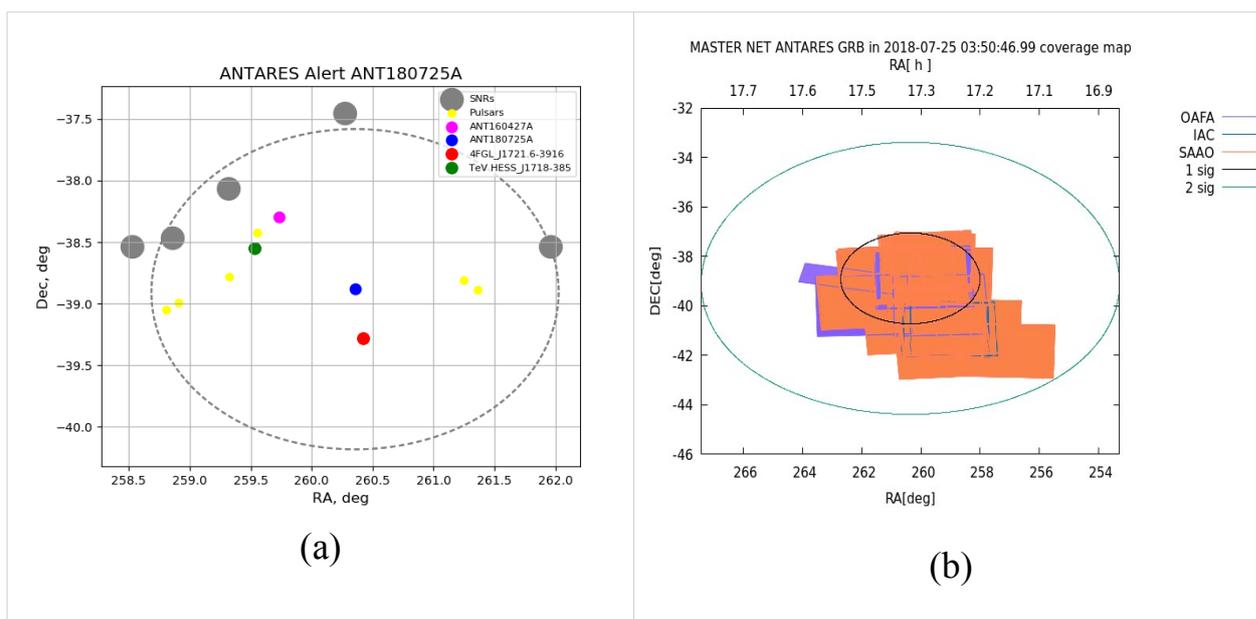


Рис. 2.5: Взаимное расположение найденных объектов относительно поля высокоэнергичного нейтринного события ANT180725A (а) и карта покрытия области наблюдения телескопами MASTER-SAAO, -IAC и -OAFAs .

Таблица 2.1: Сводная таблица по результатам изучения оптической переменности возможных источников (Blazar), попавших в поле ошибок высокоэнергичных нейтринных событий ANTARES (Alert). Обозначения: Dist – положение объекта (Blazar) от наиболее вероятного направления прихода нейтрино,  $z$  – красное смещение, Mag – звездная величина, Var – наличие оптической переменности объекта в базе данных МАСТЕР.

Alert	Dist (deg)	Blazar	$z$	mag	Var
ANT150517A	0.356	2E 0336-2453	0.251	R18.6	
	0.276	ESO 482-14	0.044	R14.2	
	0.342	QSO B0336-2454	0.043	V17.4	
ANT150518A	0.649	5BZQ J2003-3251	3.773	R17.1	
ANT160111A	0.610	PMN J2345-3251	0.621	R18.5	Yes
ANT160210A	0.463	PKS 0325-222	2.220	G18.9	
ANT160731A	0.426	QSO J0724-0715	0.271	V18.0	
ANT160815A	0.327	PKS J1809-4552	0.070	G17.6	
ANT160902A	0.481	NVSSJ102827+055515	0.234	V19.6	
	0.683	SDSS J10279+0631	0.158	V18.7	
	0.434	SDSS J10285+0600	0.313	G18.3	
ANT161031A	0.280	PKS 0524+034	0.509	G19.4	
ANT161209A	0.614	PMN J2256-6533	0.247	G16.8	
ANT161214	0.381	5BZU J1928-0456	0.587	V18.4	
ANT170307A	0.358	QSO B0327-241	0.895	V18.1	
	0.126	QSO HE0327-2348	1.550	V17.6	
	0.491	PMN J0328-2329	-	V18.6	Yes
ANT170406A	0.395	PKS0420-484	0.527	V17.5	
ANT170907A	0.575	PKS2053-323	-	G18.8	
ANT180526A	0.310	QSO B1925-610	3.254	R19.9	
ANT180608A	0.597	GB6 J1231+1421	0.256	G17.7	
	0.441	NGC4501	0.007	V13.2	
	0.561	NGC 4548	0.002	V13.6	
	0.308	QSO B1230+1440	0.313	G14.4	
	0.482	QSO B1230+1430	0.332	G17.2	
ANT181108A	0.686	5BZB J2256-3303	0.243	G18.5	Yes
ANT190225A	0.202	PKS 0341-256	1.419	G18.8	
ANT190315A	0.402	5BZU J1325-4301	0.002	V6.8	
ANT191011A	0.048	QSO B0317+185	0.190	G17.9	
	0.217	PKS J0319+1901	0.296	G20.3	
ANT1201219A	0.309	5BZG J1154+1225	0.081	G18.8	

Таблица 2.2: Результаты оптического наведения телескопов МАСТЕР на сверхвысокоэнергичные ( $VHE, \geq 100\text{ТэВ}$ ) нейтринные события ANTARES (Trigger Id). Обозначения: Telescope – название телескопа МАСТЕР, первым осуществившим наведение, Delay – время от момента поступления триггера до первого изображения,  $m_{lim}$  – предельная звездная величина на нем.

Trigger Id	Telescope	Delay,s	Exp.,s	$m_{lim}$
ANT150409A	MASTER-SAAO	36	60	18.6
ANT150422A	MASTER-Tunka	127871	60	17.3
ANT150901A	MASTER-SAAO	35217	60	20.1
ANT151027A	MASTER-Tunka	120181	60	18.2
ANT151106A	MASTER-SAAO	617926	60	19.4
ANT160227A	MASTER-Amur	36	60	16.0
ANT160320A	MASTER-SAAO	184069	60	18.6
ANT160524A	MASTER-SAAO	49446	60	18.7
ANT170401A	MASTER-SAAO	31174	60	17.5
ANT170811A	MASTER-OAFA	731191	60	18.4
ANT170902A	MASTER-SAAO	34	60	20.2
ANT180327A	MASTER-SAAO	31584	60	16.6
ANT180725A	MASTER-OAFA	10957	60	16.1
ANT180917A	MASTER-OAFA	948	60	18.2
ANT190410A	MASTER-SAAO	12968	60	20.5
ANT190428A	MASTER-OAFA	42447	60	15.3
ANT191126A	MASTER-Tunka	43	60	18.6
ANT191231A	MASTER-SAAO	13598	60	17.6
ANT200108A	MASTER-Amur	31	60	15.2
ANT201222A	MASTER-OAFA	143	60	19.1

### 2.3 Оптическая переменность блазаров

Как было показано в работе [31] для нейтринного события IC170922 МАСТЕРом (телескопом-роботом МАСТЕР-Таврида, МГУ, Крым, Россия)) обнаружено и интерпретировано падение оптической мощности сверхмассивной чёрной дыры (блазар TXS 0506+056) через 73 секунды после регистрации нейтрино высокой энергии ( $> 100$  ТэВ) антарктической установкой IceCube. На телескопах Глобальной сети МАСТЕР также были проведены исследования по поиску переменности блазаров на временах, близких к триггерам ANTARES, в оптическом диапазоне.

С целью изучения оптической переменности блазаров, попавших в область неопределенности прихода высокоэнергичных (HE,  $<100$  ТэВ) и сверхвысокоэнергичных (VHE,  $\geq 100$  ТэВ) ANTARES нейтринных алертов, были изучены их кривые блеска в базе данных телескопов МАСТЕР [77] за период с 2004 г. по 2020 г. Также в процессе поиска переменности привлекалась информация базы данных спутника Gaia [52].

Для 3-х блазаров из 20 наиболее вероятных астрофизических нейтринных событий высокой энергии обнаружена существенная оптическая переменность.

*PMN J2345-1555*: Блазар PMN\_J2345-1555 (4FGL J2345.2-1555) представлен в каталоге ультра-ярких источников Fermi [58] в гамма-диапазоне. Он является радиоквazarом с плоским спектром FSRQ (flat-spectrum radio quasar) с сильными широкими эмиссионными линиями в оптическом спектре. Расстояние (красное смещение)  $z = 0.621$ , интегральный поток в диапазоне 1 – 100 ГэВ –  $1.1754 \cdot 10^{-8}$  фотон·см<sup>-2</sup>·сек<sup>-1</sup>, плотность потока излучения на 1.4 ГГц – 227 мJy [82]. Оптическая переменность блеска блазара PMN\_J2345-1555, совпадающая по времени с одиночным нейтринным событием ANT160111A, представлена на Рис. 2.6.

*PMN J0328-2329*: Блазар PMN\_J0328-2329 (NVSS J032806-232955) относится к классу радиоисточников с плоским спектром, плотность потока

излучения на 1.4 ГГц – 99 mJy [82]. Оптическая переменность блеска блазара PMN\_J0328-2329, совпадающего с одиночным нейтринным событием ANT170307A, представлена на Рис. 2.7.

*5BZBJ2256-3303*: Блазар 5BZBJ2256-3303 ([2MASS](#) J22561332-3303386) относится к классу лацертид (BL Lac), красное смещение  $z = 0.243$ , плотность потока излучения на 1.4 ГГц – 21 mJy [75]. Оптическая переменность блеска блазара 5BZBJ2256-3303, совпадающего с одиночным нейтринным событием ANT181108A, представлена на Рис. 2.8.

Во всех этих случаях, как можно заметить, момент нейтринного триггера случается не в максимуме оптического блеска блазара, а на спаде после максимума.

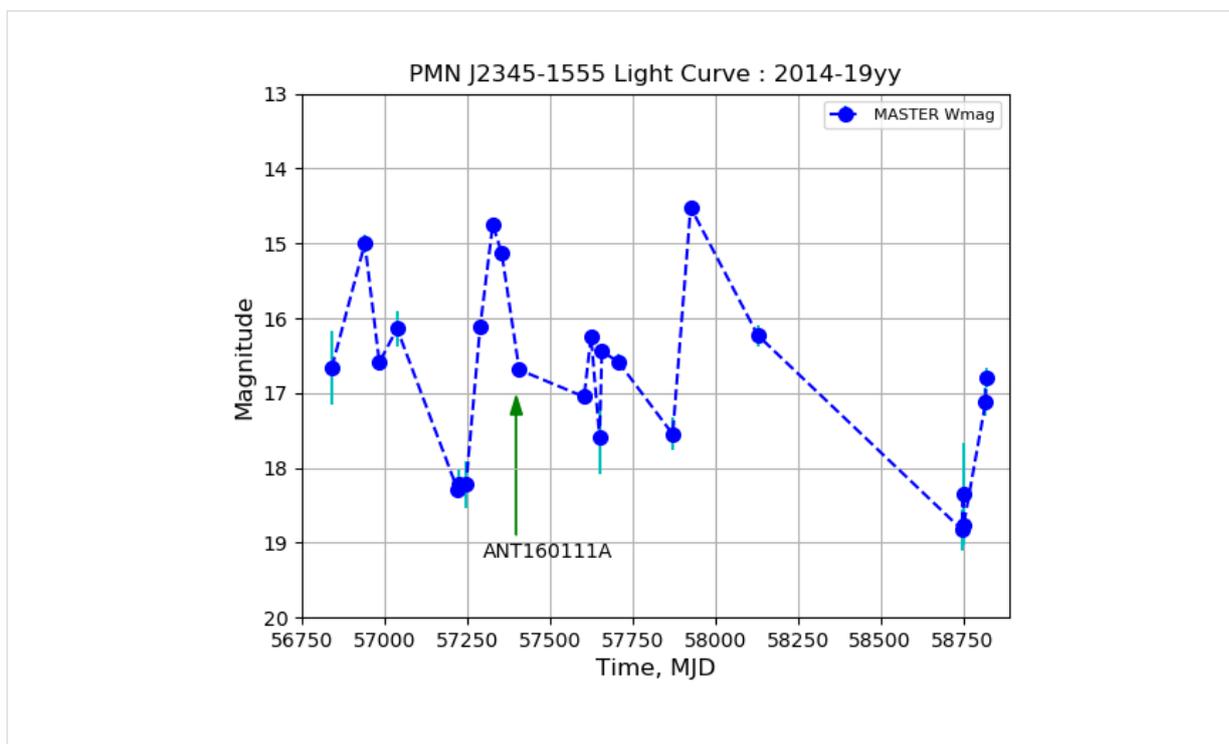


Рис. 2.6: Переменность в оптическом диапазоне PMN\_J2345-1555 по данным, полученным на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ. Стрелка – момент регистрации ANT160111A.

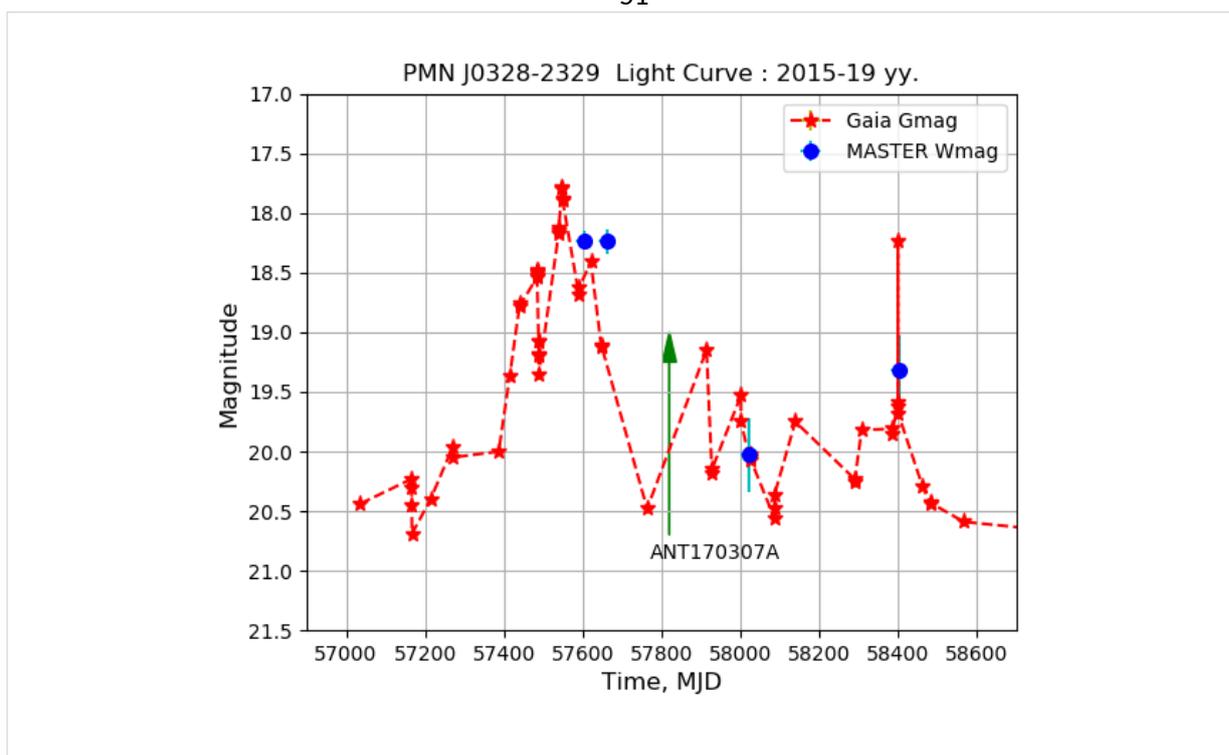


Рис. 2.7: Переменность в оптическом диапазоне по данным сети МАСТЕР МГУ и данных Gaia для блазара PMN\_J0328-2329. Стрелка – момент регистрации ANT170307A.

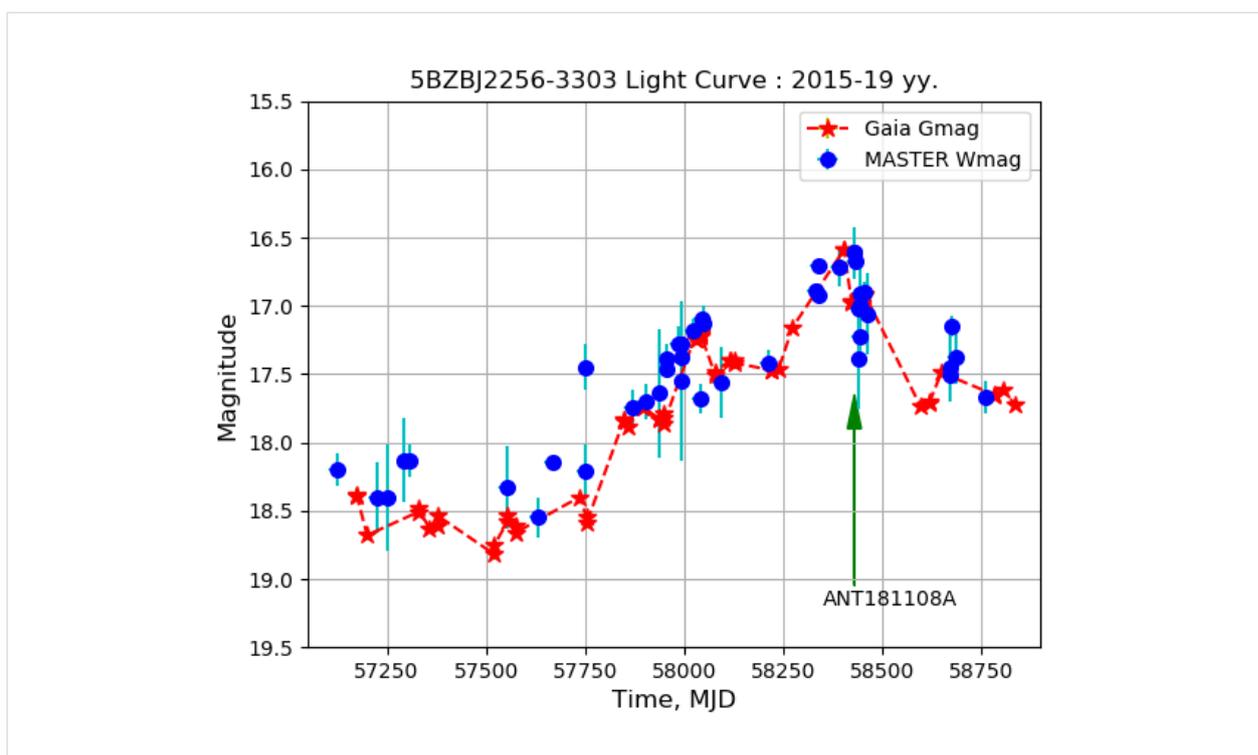


Рис. 2.8: Оптическая переменность блеска блазара 5BZBJ2256-3303 по данным MASTER and Gaia. Стрелка – момент регистрации ANT181108A.

## 2.4 Анализ возможных других источников

С целью оперативного количественного и качественного анализа полей ошибок нейтринных событий обсерваторий ANTARES и IceCube (и других возможных алертов), которые исследуются телескопами-роботами МАСТЕР, создана периодически обновляемая поисковая база данных (по модульному принципу в едином формате) из разных доступных астрономических каталогов. А также и программное обеспечение для поиска возможных кандидатов по координатам алертов с учетом их полей ошибок. Эта поисковая база пополняется с учетом открытий новых транзиентных явлений, например, из сообщений ATel [48] или GCN [49].

Используемые каталоги в поисковой базе данных включают в себя:

- оптические транзиенты, открытые телескопами-роботами МАСТЕР [50], ASAS-SN [51], обсерваторией Gaia [52] и оптически переменные источники из INTEGRAL-OMC catalogue [53];
- рентгеновские источники обсерваторий ROSAT (1RXS, 0.1 – 2.4 keV) [54], XMM-Newton (4XMM-DR10, 0.2 – 12.0 keV) [55], Swift-XRT (2SXPS Catalog, 0.3 – 10 keV) [56] и Swift-BAT (Transient Source Catalog, 15-50 keV) [57];
- гамма-источники обсерватории Fermi-LAT (4FGL Catalog, 50 MeV – 1 TeV) [58];
- радиоисточники NVSS (1.4 GHz) [59], компактные радиоисточники RFC [60], быстрые радиовсплески FRB [61];
- источники гамма-излучения очень высокой энергии из TeVCat [62] и 3HWC [63] каталогов;
- кандидаты в сверхновые с коллапсом ядра в пределах 1 кпс [64], остатки сверхновых SNR в нашей Галактике [65] и сверхновые на текущий момент времени с 2010 г. из web-каталога «Bright Supernova – Archives» [66];

- маломассивные рентгеновские двойные системы (LMXB) в Галактике и Магеллановых Облаках [67] и ультраяркие рентгеновские источники (ULX) во внешних галактиках [68];
- пульсары из «ATNF Pulsar Catalogue» [69] и магнетары из «McGill Online Magnetar Catalog» [70];
- звезды из SKY2000 Catalog [71], галактики из GLADE-v2.0 Catalog [72] и 2MASS Redshift Survey Catalog [73];
- квазары QSO, лацертиды BL Lac и активные ядра галактик AGN по каталогу Верона-Сетти [74], а также – блазары из Roma-BZCAT Multi-Frequency Catalog [75];
- нейтринные события обсерваторий IceCube [76], ANTARES [77], Baksan [77] и Baikal-GVD [78]. А также – совпадающие события (типа AMON\_NU\_EM\_COINC Event, Alert from IceCube-HAWC, Fermi-LAT-ANTARES) нейтрино с гамма-квантами высокой энергии, и алерты HAWC BURST MONITOR Event [76].

Результаты поиска потенциальных источников ANTARES VHE нейтринных алертов в направлении полей ошибок для событий, представленных в Табл. 2.2. Обозначения: dist – угловое расстояние объекта от наиболее вероятного направления прихода алерта.

**ANT150409A** – 17 источников из SWIFT-XRT Point Source Catalog (2SXPS);

– 1 гамма-источник 4FGL\_J2023.8-4830, dist= 0.645 deg;

– SN2012bl, Ia, 14.8m at 2012-03-26.380 UT;

**ANT150422A** – 1 пульсар PSR\_J0419+44 (P=1.241 sec);

– 1 радио-источник NVSS\_J035722+440609;

– 1 яркий источник 1RXS\_J035916.7+440406;

**ANT150809A** – Gaia16bcv – CV?, 18.16m, голубой объект;

– 3 рентгеновских источника ROSAT;

**ANT150901A** – 2 рентгеновских источника ROSAT;

– 59 источников 2SXPS ;

– CCSN Progenitor (Antares, 0.17 kpc), dist= 1.265 deg.;

**ANT151027A** – 1 радио-источник NVSS;

– 11 рентгеновских источников 4XMM-DR10;

– 4 рентгеновских источника ROSAT ;

– 2 рентгеновских источника 2SXPS;

– 1 AGN 3C\_382.0 ( $z=0.058$ , 15.4m), dist= 0.629 deg;

**ANT151106A** – 1 fast MASTER\_OTJ115059.36-342142.2 at 2015-12-02.076 UT

(<http://observ.pereplet.ru/MASTEROTJ115059.36-342142.2.html>);

– Gaia19czp - PSN near galaxy 2MASX\_J11521276-3424422;

– 2 радио-источника NVSS;

**ANT160227A** – 1 рентгеновский источник ROSAT;

**ANT160320A** – 1 радио-источник NVSS;

– 1 рентгеновский источник ROSAT;

**ANT160524A** – 2 радио-источника: NVSS;

– 1 рентгеновский источник ROSAT;

– 6 рентгеновских источников 2SXPS;

– 1 пульсар PSR J0820-1350 ( $P=1.238$  sec), dist= 0.641 deg;

**ANT170401A** – Gaia20edr, 18.47m, транзиент ?;

– 3 рентгеновских источника ROSAT;

**ANT170811A** – Gaia17cbr, dist= 0.553 deg., source brightens by almost 4 mag:  
(<http://gsaweb.ast.cam.ac.uk/alerts/alert/Gaia17cbr/>);

- 3 радио-источника NVSS;
- 4 рентгеновских источника ROSAT;

**ANT170902A** – 6 рентгеновских источников ROSAT;

- 3 рентгеновских источника 2SXPS;

**ANT180327A** – Gaia16brt, declining blue transient;

- MASTER\_OTJ165813.55-532904.7, dist= 0.628 deg,  
16.6m at 2018-08-05.960 UT, ATel#11920;
- 4FGL\_J1658.5-5324 (PSR\_J1658-5324, 2 msec), dist= 0.572 deg;
- 6 рентгеновских источников ROSAT;
- 12 рентгеновских источников 2SXPS;

**ANT180725A** – SNRs G349.2-0.1, G348.5-0.0 and G350.0-2.0, dist= 1.3 deg;

- alert ANT160427A, dist= 0.76 deg;
- 1 гамма-источник 4FGL\_J1721.6-3916;
- TeV-гамма HESS\_J1718-385 (4.2 kpc), dist= 0.891 deg;
- 6 пульсаров: PSR J1715-3859, PSR J1715-3903,  
PSR J1715-3903, PSR J1718-3825, PSR J1725-3848,  
PSR J1725-3853;
- 41 радиоисточник NVSS, (NVSS\_J172007-385734, 20.61 Jy);
- 2 рентгеновских источников ROSAT;
- 69 рентгеновских источников 4XMM-DR10;
- 32 рентгеновских источников 2SXPS;

**ANT180917A** – SN2018dz, SN.II 17.2m at 2018-01-08.708 UT, dist= 1.066 deg;

**ANT190410A** – MASTER\_OTJ032252.81-482912.8 at 2016-11-19.884,  
17.8m, ATel#9778;

– Gaia16a4k, 18.4m, PSN at edge of galaxy

2MASX\_J03220085-4800587;

– 4 рентгеновских источника ROSAT;

– 1 рентгеновский источник 2SXPS;

**ANT190428A** – 2 радиоисточника NVSS;

– 3 рентгеновских источника ROSAT;

**ANT191126A** – 1 радиоисточник NVSS\_J102854-210348 (207.6 mJy);

– 1 рентгеновский источник 1RXS\_J102701.0-205544;

**ANT191231A** – 4FGL\_J0150.5-5447 (PMN\_J0150-5450), dist= 0.607 deg;

**ANT200108A** – 1 рентгеновский источник 1RXS\_J025456.2-181138;

– 43 рентгеновских источников 2SXPS;

– 1 гамма-источник 4FGL\_J0251.1-1830, dist= 0.738 deg;

**ANT201222A** – MASTER OTJ101335.90-432438.0, 2020-12-22.322 UT,  
dist= 0.592 deg, ATel#14283;

– Gaia19aot at 2019-02-13 05:07:36 UT, dist= 0.616 deg;

– 3 рентгеновских источников 2SXPS;

– SN 2012cl (SN.IIP) near ESO\_263-G23;

**ANT210213** – не обнаруживается OTs из баз данных MASTER, ASASSN;

– 2 алерта от Gaia: SN2020nus (2020-07-06, Ia, z=0.055) и

DN V\* V372 Per (2018-08-03, ~4m)

– есть eclipsing V\* LS Per, ~11m

-- 2 AGN : PKS 1340+05 (17.8m) и SDSS J13467+0518 (19.4m);

-- 2 QSO : MS 13396+0519 (17.4m) , SDSS J13421+0417 (17.7m);

- 1 яркий источник ROSAT 1RXS\_J025223.5+372914
  - T Tau-type Star,  $V=10.7^m$ 
    - нет совпадений с предыдущими алертами IceCube, ANTARES, BAKSAN и типа AMON-IC или AMON-HAWC
  - 3 радиоисточника NVSS;
- В пределах двойного радиуса error-box обнаруживается:
- AGN Mrk\_1066 ( $z=0.012$  Sy2  $V=13.96$ ), нет переменности:
  - QSO S4\_0249+38 ( $z=1.122$   $V=19.2$ ; aka NVSS\_J025309+383525, 4FGL\_J0253.0+3834), нет переменности:

**ANT210202** -- UGSU ASASSN-15oj;

- 1 радиоисточник NVSS;
- 1 гамма-источник 4FGL\_J1344.4-3656 (PKS\_1341-366);

**ANT150901** -- ANTARES150901.32 (ATel#7987, ATel#8000):

Параметры события:

Время триггера – 2015-09-01 07:38:25 UT

Центр поля ошибок: RA(J2000) = 16h 25m 42s, Dec(J2000) = -27d 23m 24s

Радиус поля ошибок: 18 arcmin (50% containment)

Проведена инспекция на телескопах МАСТЕР в ЮАР и на Канарских островах. MASTER-SAAO наводился дважды – на рассвете через 16 с от триггера (регистрации события), и вечером после заката, начиная с 17:23:48 UT.

MASTER-SAAO: с 2015-09-01 17:23:48 UT (в белом свете) до 2015-09-01 20:25:18 UT с пределом  $18.5^m$  –  $19.8^m$  (экспозиция 180 с),  $20.6^m$  (при суммарной экспозицией 540 с); с 2015-09-03 17:13:59 UT с пределом  $m\_B\_lim= 19.1^m$  (180 с),  $19.6^m$  (540 с); с 2015-09-03 21:21:59 UT  $m\_V\_lim=$

19.3<sup>m</sup> (180 с), 19.9<sup>m</sup> (sum 540 с),  $m_{R\_lim} = 18.4^m - 19.0^m$  (60 – 180 с), 19.7<sup>m</sup> – 20.3<sup>m</sup> (540 с -1800 с),  $m_{I\_lim} = 17.5^m - 18.0^m$  (180 с), 18.5<sup>m</sup> (540 с) .

MASTER-IAC: с 2015-09-01 21:02:44 UT с  $m_{lim} = 18.7^m - 19.2^m$  (180 с), 19.8<sup>m</sup> (540 с) до 2015-09-01 21:17:34 UT; с 2015-09-03 20:08:40 UT –  $m_{B\_lim} = 19.8^m$  (180 с); с 2015-09-03 22:09:12 UT –  $m_{V\_lim} = 18.6^m$  (180 с).

В поле ошибок (Рис. 2.9) источника нейтрино высоких энергий ANT150901 содержатся: 1) одна из самых ярких ( $V = 0.96^m$ ) звезд южного неба — Антарес, 2) шаровое скопление M4 (NGC6121,  $V = 5.8^m$ ), в котором расположен ближайший к Земле миллисекундный радиопульсар PSR B1620–26 A (Период 11.075 сек, удаленность 3.8 кпс), 3) рентгеновский источник 2SXPS\_J162602.1-271813, обнаруженный космическим телескопом Swift.

До сих пор связь всех этих объектов не очевидна. То, что нейтрино, пойманное нейтринным детектором ANTARES, пришло из области близкой к звезде Антарес - случайное и "красивое совпадение". Случайным также оказалось попадание вспышки рентгеновского источника обнаруженной космическим аппаратом Swift (внутри меньшего зеленого круга -  $1\sigma$  круга потенциального места рождения нейтрино). Но это совпадение не такое эффектное. По нашим архивным данным ничего с этим источником особенного не произошло в оптике – кривая блеска не показывает изменений вблизи времени триггера, объект представляет собой молодую звезду типа Т Тельца, где не представляется возможным генерация нейтрино сверхвысоких энергий.

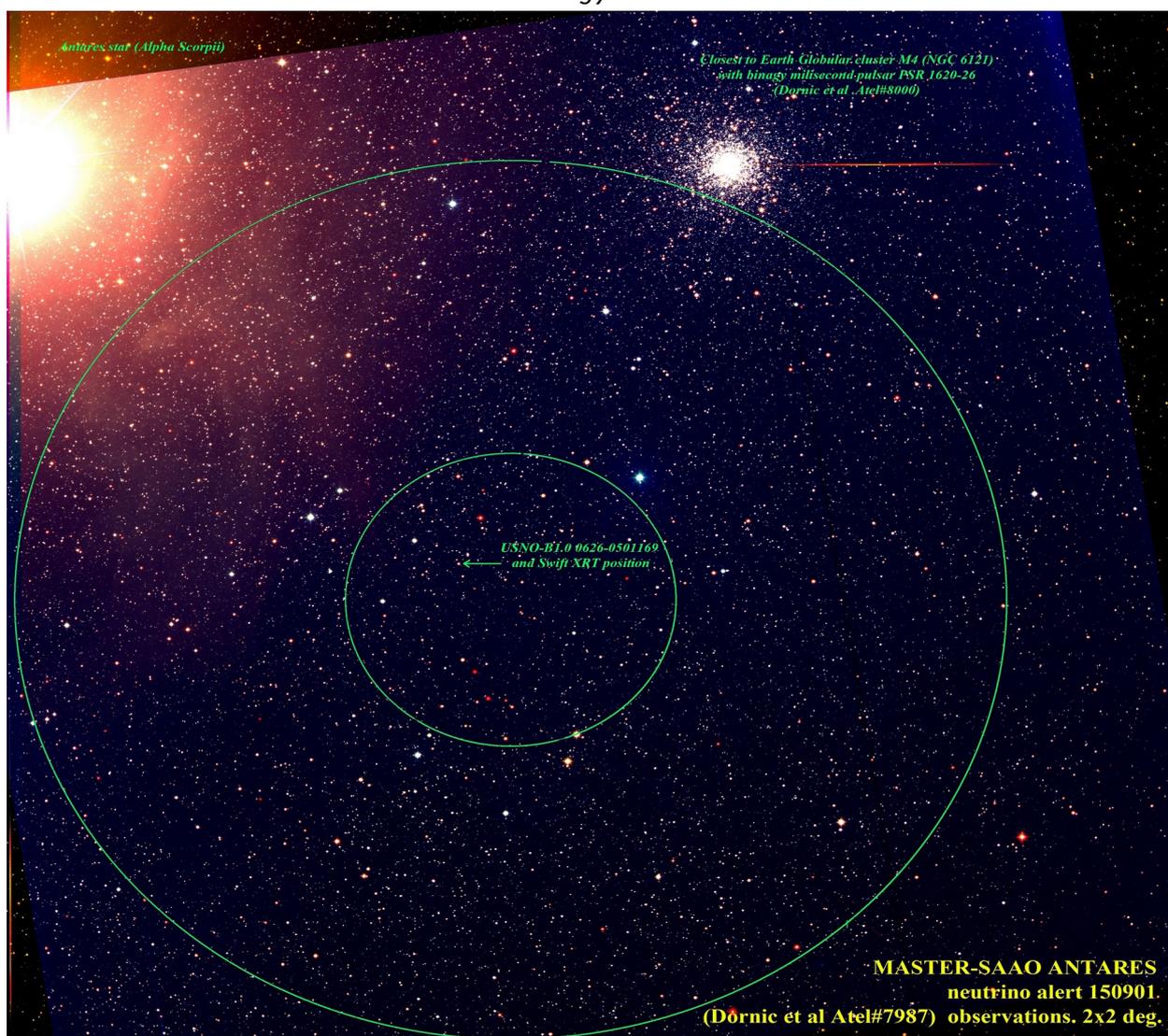


Рис. 2.9: Поле зрения МАСТЕР-SAAO (ЮАР), проводившего алертные и инспекционные наблюдения нейтринного алерта ANT150901. Внутренний и внешний зеленые круги –  $1\sigma$  и  $3\sigma$  (по уровню 50%) поля ошибок вероятности содержания источника события. Слева сверху – звезда Антарес. Справа сверху отмечено положение шарового скопления М4. Расположение источника Swit указано внутри первого круга зеленой стрелкой.

Еще один источник - шаровое скопление М4. Само шаровое скопление не порождает частицы сверхвысоких энергий, а миллисекундный радиопульсар вполне может, ведь радиопульсар – это замагниченная нейтронная звезда, которая является ускорителем релятивистских частиц. Сами нейтрино не

ускоряются, а вот заряженные частицы – ускоряются. Пульсар может ускорить заряженную частицу до "ПэВ-ных" энергий и, если она столкнется с ядром обычного атома, то родится как раз то самое нейтрино, обнаруженное в Средиземном море детекторами ANTARES. Происхождение в шаровом скоплении ядра обычного атома объясняется наличием экзопланеты PSR B1620–26 b вокруг радиопульсара PSR B1620–26 A, особенно миллисекундного: остаток бывшего красного карлика.

## 2.5 Выводы

Проведено исследование 179 полей ошибок событий, зарегистрированных нейтринным детектором ANTARES, по результатам которого составлен список вероятных кандидатов для 20 высокоэнергичных нейтринных событий.

Для 3-х кандидатов – блазаров, находящихся внутри полей ошибок нейтринных событий: PMNJ2345-1555 из ANT160111A, PMN\_J0328-2329 из ANT170307A, и 5BZBJ 2256-3303 из ANT181108A, – наблюдается характерное поведение кривой блеска (падение яркости) в момент наблюдения одиночного нейтринного алерта. База данных одиночных нейтринных алертов используется для поиска возможных повторяющихся событий в будущем.

Для события ANT150901 предложен в качестве источника радиопульсар в шаровом скоплении M4.

### Глава 3 Энергетический спектр первичных космических лучей по данным Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE

При подготовке данного раздела диссертации использованы публикации [93 – 98, 101 – 113, 115 – 119], в том числе, выполненные автором в соавторстве), в [94, 98] из которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования. Содержание Главы основано на проведенной работе, результаты которой опубликованы в [93 – 98, 101 – 113, 115 – 119].

#### 3.1 Введение

В Тункинской долине (в 50 км от оз. Байкал, республика Бурятия) с 2017 г. началось развертывание гамма-обсерватории TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy) [83, 102] для исследования гамма-квантов с энергией выше 30 ТэВ и поиска источников галактических космических лучей с энергиями в районе  $\sim 1$  ПэВ, т.е. вблизи классического колена в энергетическом спектре космических лучей.

Наиболее эффективным способом изучения природы галактических и метагалактических источников космических лучей высоких энергий является изучение их потоков гамма-излучения. На сегодняшний день наиболее важные результаты в области гамма-астрономии высоких энергий получены с использованием HEGRA [84], H.E.S.S. [85], VERITAS [86] и MAGIC [87], которые включают от 2 до 5 атмосферных черенковских телескопов (IACT). С помощью этих установок было обнаружено более 200 источников гамма-квантов с энергией  $>1$  ТэВ, однако фотонов с энергией выше 100 ТэВ зарегистрировано немного из-за недостаточной эффективной площади установок. В рамках проекта CTA [88] планируется охватить  $4.5 \text{ км}^2$  с помощью 70 малых телескопов SST для изучения источников гамма-излучения с энергиями выше 10 ТэВ. Помимо черенковских телескопов

важную информацию об источниках гамма-излучения в последнее время получают от высотных установок, регистрирующих заряженные частицы широких атмосферных ливней (ШАЛ): Tibet-III [89] и HAWC [90]. В мае 2021 года LHASSO сообщило об обнаружении более 530 фотонов с энергиями от  $>100$  ТэВ и до 1.4 ПэВ от 12 источников гамма-излучения сверхвысоких энергий со статистической значимостью более 7 стандартных отклонений [91]. Несмотря на то, что рядом с ними находится несколько потенциальных источников, в том числе туманности пульсарного ветра, остатки сверхновых и области звездообразования, ПеВатроны, ответственные за гамма-излучение сверхвысоких энергий, еще четко не локализованы и не идентифицированы (за исключением Крабовидной туманности [92]).

В проекте TAIGA разрабатывается гибридный подход к изучению потоков гамма-квантов высоких энергий и космических лучей [93]. Его будущее – объединение в единую систему телескопов TAIGA-IACT и черенковских широкоугольных детекторных станций установки TAIGA-HiSCORE, а также сцинтилляционных установок Tunka-Grande и TAIGA-Muon для регистрации электронов и мюонов ШАЛ.

Основные цели эксперимента TAIGA [94]: поиск ПеВатронов — галактических объектов, в которых протоны ускоряются до энергий 100 ПэВ; поиск энергетических пределов ускорения частиц в остатках сверхновых и пульсарных туманностях; поиск избытка диффузного гамма-излучения с энергиями выше 100 ТэВ; поиск корреляций с нейтринными событиями нейтринной обсерватории IceCube; исследование формы спектра гамма-излучения с энергиями выше 10 ТэВ от блазаров, что также позволит получить плотность внегалактического фонового света EBL (Extragalactic Background Light); поиск фотонных переходов в аксионоподобных частицах, что может быть связано с большей прозрачностью Вселенной, чем даже для минимального EBL; поиск нарушений лоренц-инвариантности и темной материи; поиск астрофизических оптических транзиентов в наносекундном диапазоне от слияниями черных дыр и нейтронных звезд; поиск

сверхтяжелой темной материи в рамках модели космологической инфляции Старобинского.

По данным, полученным с помощью астрофизического комплекса TAIGA, планируется детальное восстановление энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей в диапазоне энергий  $10^{14} - 10^{18}$  эВ. В этом диапазоне энергий ожидается смена основных источников ускорения в Галактике и переход от галактических к метагалактическим источникам, или к галактическим источникам нового типа, способным ускорять космические лучи до сверхвысоких энергий.

### 3.2 Установка Tunka-133

Установка Tunka-133 [95, 96, 97, 98], состоявшая в 2009 г. из 133 детекторов, сгруппированных в 19 кластеров по 7 детекторов в каждом, занимала площадь  $\sim 1$  км<sup>2</sup>. Она позволяет изучать энергетический спектр и массовый состав первичных космических лучей в энергетическом диапазоне  $10^{16} - 10^{18}$  эВ путем регистрации черенковского света, который излучается заряженными частицами ШАЛ в атмосфере. В 2011 г. в структуру установки были добавлены 6 внешних кластеров, расположенных приблизительно симметрично по окружности радиусом  $\sim 1$  км вокруг центра. В результате эффективная площадь возросла до  $\sim 3$  км<sup>2</sup>, а число детекторов до 175 (см. рис.3.1 (а)). Триггерным условием срабатывания является совпадение за 0.5 мкс импульсов в 4 детекторах любого из кластеров [97] и общий темп счета атмосферных ливней составляет  $\sim 1.8$  Гц [98]. За 7 сезонов регистрации ШАЛ с 2009 г. по 2017 г. общее время наблюдения в ясные безлунные ночи составило 2175 час и общее количество событий  $\sim 1.4 \cdot 10^7$  ливней в энергетическом диапазоне  $6 \cdot 10^{15} - 10^{18}$  эВ.

Измеренный на установке Tunka-133 дифференциальный спектр первичного космического излучения имеет ряд особенностей, то есть

отклонений от единого степенного закона. Результаты фитирования участков спектра с дважды нарушенным степенным законом показаны на рис. 3.1 (b).

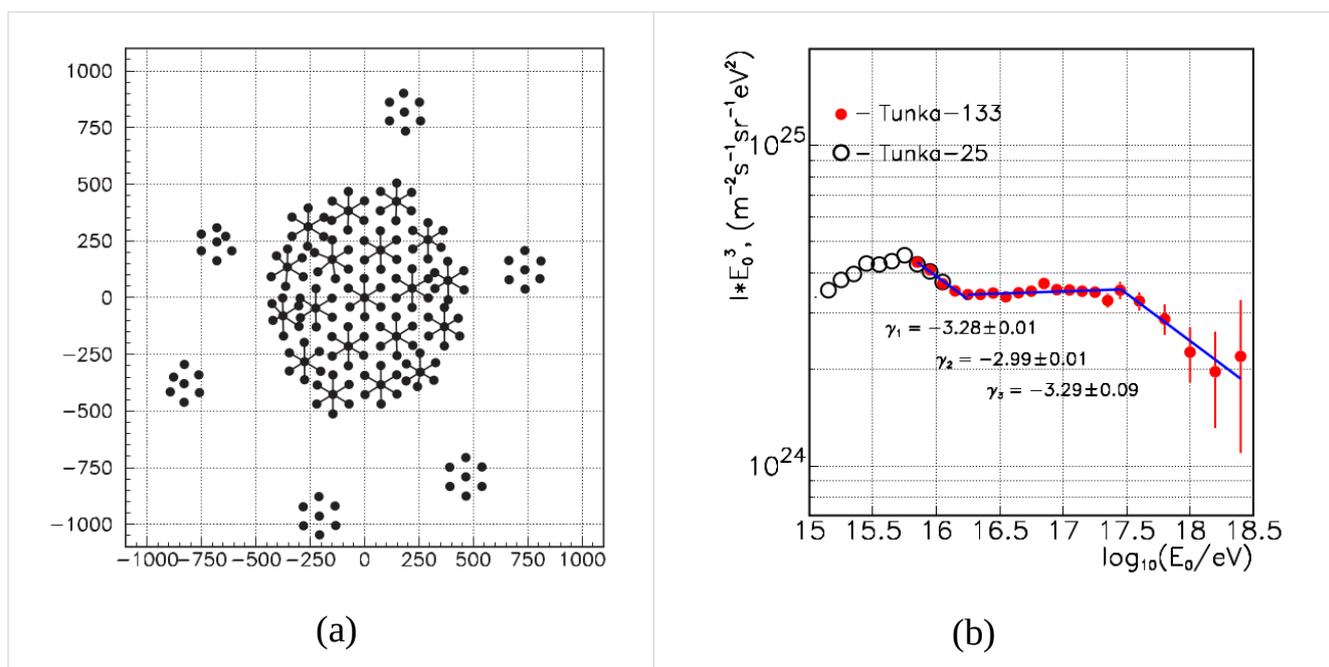


Рис. 3.1: (a) Схема черенковской установки Tunka-133. (b) Дифференциальный энергетический спектр первичных космических лучей.

С 2014 г. установка Tunka-133 дополнена сцинтилляционными детекторами Tunka-Grande [99], которые представляет собой 19 сцинтилляционных станций, размещенных вблизи внутренних кластеров установки Tunka-133. Сцинтилляционная станция включает наземный детектор электронов, состоящий из 12 счетчиков общей площадью  $8 \text{ м}^2$ , и подземный детектор мюонов площадью  $5 \text{ м}^2$  [193]. Задачей совместной работы установок является изучение энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей, а также поиск диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий  $5 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{17}$  эВ. Предварительные результаты по ограничению на поток диффузного гамма-излучения при энергии  $\sim 10^{17}$  эВ по данным установки Tunka-Grande составляют не более  $10^{-3}$  от интенсивности космических лучей [100].

### 3.3 Установка TAIGA-HiSCORE

Гамма-обсерватория TAIGA предназначена для исследования гамма-излучения заряженных космических лучей в диапазоне энергий  $10^{13} - 10^{18}$  эВ [83, 101]. Обсерватория будет включать в себя сеть широкоугольных черенковских станций, размещенных на площади  $5 \text{ км}^2$ , — установка TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity Cosmic ORigin Explorer) [94, 104], — и 5 атмосферных черенковских телескопов с анализом изображения ливней (IACT), которые будут расположены на этой же площади. Планируется, что такие установки будут дополнены мюонными детекторами (TAIGA-Muon), расположенными на площади  $1 \text{ км}^2$ . Общая площадь мюонных детекторов должна составить  $2000 \text{ м}^2$  [108].

Комплекс TAIGA включает в себя 120 широкоугольных (поле зрения  $0.6 \text{ ср}$ ) оптических станций временной черенковской установки TAIGA-HiSCORE (с 2013 г.), распределенных с шагом 106 м на площади около  $1 \text{ км}^2$  и 3 атмосферных черенковских телескопов с анализом изображения TAIGA-IACT (рис. 3.2). Все станции наклонены в южном направлении на  $25^\circ$  для увеличения времени наблюдения за источником гамма-квантов в Крабовидной туманности. Каждая оптическая станция содержит по четыре фотоумножителя (ФЭУ) с диаметром фотокатода 20 или 25 см (ET9352, R5912 и R7081). Площадь каждого ФЭУ увеличена в 4 раза с помощью светособирающего конуса Винстона, изготовленного из 10 сегментов зеркального материала Alanod 4300 UD. Угол обзора конуса  $\pm 30^\circ$  ( $\sim 0.6 \text{ ср}$ ). Станции соединены с центром сбора данных по волоконно-оптическому кабелю для передачи данных и синхронизации [106]. Стабильность синхронизации оптических станций достигает  $\sim 0.2 \text{ нс}$ . Условием для формирования локального триггера станции является превышение амплитудой аналоговой суммы сигналов с анодов ФЭУ заданного порогового уровня, равного  $\sim 200$  фотоэлектронам. Порог в 200 ф.э. с учетом площади фотокатодов и квантовой эффективности ФЭУ соответствует потоку

черенковского света  $0.3 \text{ фотон} \cdot \text{см}^{-2}$  [107]. Энергетический порог станции при таком подходе к выработке локального триггера в 2 раза ниже, чем для станции с одним ФЭУ. Скорость счета локальных триггеров станции  $\sim 18 \text{ Гц}$ . Сигналы с анодов и промежуточных динодов оцифровываются с шагом  $0.5 \text{ нс}$  с помощью 8-канального модуля на основе микросхемы DRS-4 [108].



Рис. 3.2: (а) Широкоугольная оптическая станция черенковской установки TAIGA-HiSCORE (справа), черенковский телескоп изображения ливней TAIGA-IACT (на заднем плане). Перед TAIGA-IACT и левее центра снимка – детектор установки Tunka-133. За телескопом TAIGA-IACT видно белое строение – один из 19-ти сцинтилляционных детекторов Tunka-Grande. (б) Схема расположения детекторов комплексной установки TAIGA. Квадраты — оптические станции черенковской установки TAIGA-HiSCORE, кружки — телескопы TAIGA-IACT.

Измерение направления прихода ШАЛ по задержкам прихода световых импульсов на различные регистрирующие станции требует точного измерения координат станций и относительных задержек импульсов в каждой станции. Координаты станций измерены с точностью  $5 \text{ см}$  [108] (соответствует  $\sim 0.2 \text{ нс}$ ). Временная калибровка проводится как по самим ШАЛ с высокой множественностью сработавших станций, так и

периодически с помощью отдельного мощного импульсного светодиодного источника света. В то время когда еще на борту МКС функционировал лидар CATS (Cloud Aerosol Transport System), установка TAIGA-HiSCORE регистрировала импульсы света от него на длине волны 532 нм с частотой 4 кГц в моменты пролета МКС над установкой. Сигнал от лидара был также зарегистрирован оптическим телескопом Tunka-MACTEP [108], расположенным на расстоянии 500 м от центра установки. Сопоставление углового положения событий с максимальными амплитудами в станциях, восстановленными с откалиброванными задержками, и положения точки максимальной яркости по данным телескопа МАСТЕР показало, что абсолютная угловая точность установки не хуже  $0.1^\circ$  [108, 109].

Точность определения направления прихода сильно зависит от количества сработавших станций. Угловое разрешение составляет  $0.4^\circ - 0.5^\circ$  для событий с 5-ю сработавшими станциями и около  $0.1^\circ$  для событий с более чем 10-ю сработавшими станциями [108].

### 3.4 Установка TAIGA-IACT

Атмосферный черенковский телескоп TAIGA-IACT [110, 111] (Рис. 3.2) имеет составное зеркало системы Дэвиса–Коттона площадью  $\sim 10 \text{ м}^2$  из 29 сегментов. Зеркала телескопа образуют сферическую поверхность с радиусом 4.75 м. В фокусе зеркал установлена чувствительная камера из 548 ФЭУ с диаметром фотокатода  $\sim 2 \text{ см}$  каждый (XP1911). К ФЭУ крепятся конусы Винстона, увеличивающие площадь фотокатода в 3 раза. Угол обзора каждого конуса ( $35^\circ$ ) перекрывает все зеркала телескопа. Диаметр камеры около 110 см. Угол обзора камеры –  $10^\circ \times 10^\circ$ . Камера собирается из однотипных кластеров по 28 ФЭУ в каждом. Внутри камеры установлен цифро-аналоговый преобразователь для управления высоковольтными источниками питания ФЭУ и аналого-цифровой преобразователь для измерения тока всех ФЭУ кластера. При выбранном рабочем усилении  $10^5$  ток ФЭУ составляет  $\sim 2$

мкА. На кросс-плате установлен 64-канальный блок оцифровки импульсов на основе специализированной интегральной микросхемы ASIC MAROC-3. В состав каждого канала входят предусилитель с изменяемым коэффициентом усиления, зарядо-чувствительный усилитель с переменным временем интегрирования и компаратор с управляемым порогом. Один ФЭУ подключается к двум каналам. 30-кратное различие в коэффициентах усиления этих каналов позволяет иметь линейность преобразования заряд-код до 3000 фэ при усилении ФЭУ  $\sim 10^5$ . Электроника камеры содержит мажоритарную схему совпадения, которая позволяет формировать локальный триггер кластера. Телескопы TAIGA-IACST работают в режиме наведения wobble-mode [112] с переключением направления каждые 20 мин, с точностью наведение на источник и расчета положения источника не хуже чем  $0.023^\circ$ .

Главным преимуществом работы телескопов TAIGA-IACST в сети широкоугольных черенковских станций является более эффективное выделение событий от гамма-квантов на фоне ШАЛ от заряженных космических лучей. Информация о параметрах изображения ШАЛ (параметрах Хилласа) дополняется параметрами ШАЛ (положение оси, направление, энергия), хорошо восстанавливаемыми широкоугольной установкой TAIGA-HiSCORE. Высокая эффективность подавления событий от космических лучей в современных гамма-обсерваториях достигается при стереоскопическом подходе, при котором ШАЛ регистрируется несколькими IACST. Расстояние между отдельными телескопами составляет 100–300 м, и, таким образом, для создания установки большой площади требуется большое количество телескопов. При таком гибридном подходе, как показывают результаты моделирования, подавление фона в 100 раз (при энергии 100 ТэВ) может быть достигнуто даже при расстоянии между телескопами до  $\sim 500$  м. Для экспериментальной проверки этой идеи три телескопа TAIGA-IACST установлены в вершинах треугольника со сторонами  $\sim 300$ ,  $\sim 400$  и  $\sim 500$  м между оптическими станциями ТАЙГА-HiSCORE (Рис. 3.2).

В настоящее время телескопы TAIGA-IACT осуществляют набор данных и мониторинг таких источников, как Крабовидная туманность, блазары Mrk421, Mrk501 и Mrk180, ТэВ-ые гамма-источники 3HWC\_J1908+063, Boomerang и Dragonfly. Пример регистрируемых изображений ливня приведен на рис. 3.3 (а), а на рис. 3.3 (б) представлен предварительный результат наблюдения источника в Крабовидной туманности на одиночном телескопе за 80 час набора данных при пороговой энергии регистрации  $\sim 4$  ТэВ [113]. Ожидаемая чувствительность установки для поиска локальных источников гамма-квантов в диапазоне энергий 30 – 200 ТэВ составит  $(0.5-1) \times 10^{-13}$  ТэВ $\cdot$ см $^{-2}$  $\cdot$ с $^{-1}$  в течение 300 час наблюдения источника [105].

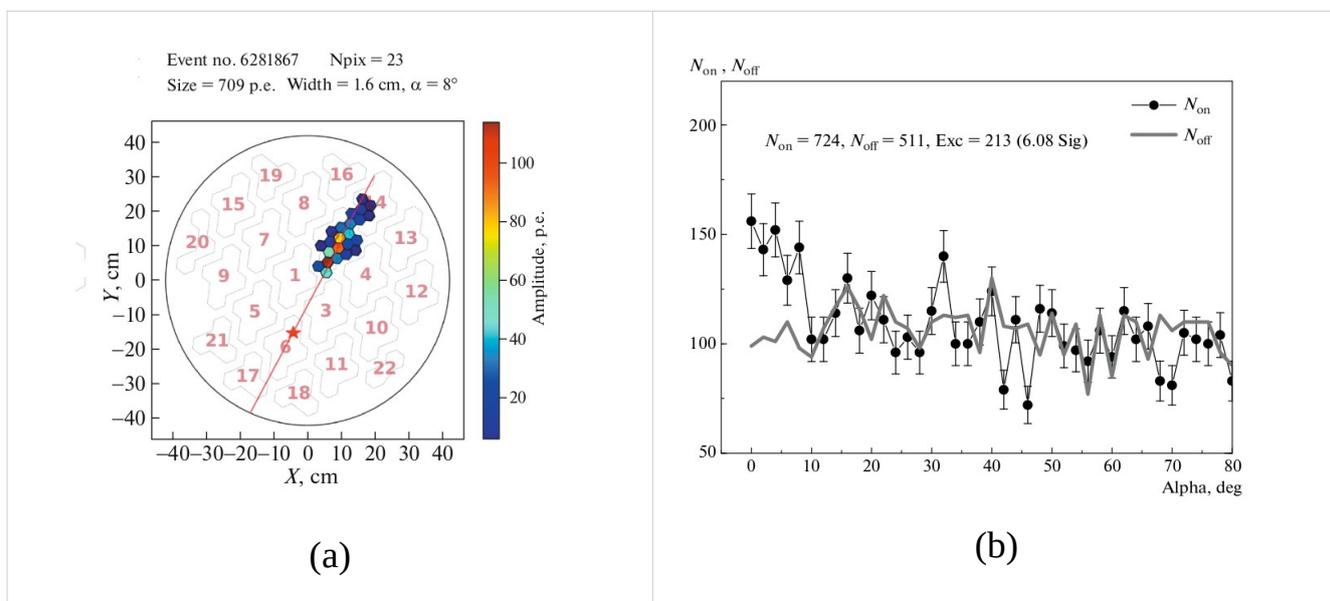


Рис. 3.3: (а) Пример совместного гибридного «гамма-подобного» события с камеры телескопа TAIGA-IACT. Параметры Хилласа изображения ливня: Size = 709 фотоэлектронов, Width = 0,13°, Alpha = 8.0°. (б) Предварительное распределение регистрируемых ШАЛ на одиночном телескопе TAIGA-IACT в зависимости от угла  $\alpha$  за 80 часов наблюдения источника в Крабовидной туманности. Источник виден на уровне 6.08 стандартных отклонений по критерию Li&Ma [114].

### 3.5 Энергетический спектр первичных космических лучей

Исследование черенковского света ШАЛ, поток которого пропорционален энергии первичной частицы, получил большое развитие в ряде экспериментов в последнее время. В Тункинской долине (50 км западнее южной оконечности оз. Байкал) НИИЯФ МГУ и НИИПФ ИГУ проводят эксперименты по регистрации ШАЛ по их черенковскому излучению с 1994 г. Первая установка Tunka-4 содержала четыре фотоприемника Квazar-370 (диаметр фотокатода 37 см), в 1996 г. была развернута установка Tunka-13, и в 2000 году – Tunka-25 [115], состоящая из 25 черенковских детекторов, расположенных внутри площади  $\sim 0.1$  км<sup>2</sup>. Использование фотоприемника Квazar-370 с площадью фотокатода 0.1 м<sup>2</sup> позволило достичь энергетического порога установки ( $\sim 8 \cdot 10^{14}$  эВ), что значительно ниже энергии излома в спектре первичных космических лучей ( $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ). На установке Tunka-25 получены важные результаты по исследованию энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей в области излома [125].

Установка Tunka-133 осуществила набор данных в течение 7 зимних сезонов с 2009 по 2017 гг. Накоплена информация за 350 ясных безлунных ночей. Полное время набора данных 2175 час. Обработка данных для установки Tunka-133 описана в работах [96, 97]. Положение оси ШАЛ определяется путем фитирования измеренных значений амплитуд импульсов функцией амплитуда-расстояние (ФАР) [96]. Направление прихода ливня, характеризующееся зенитным и азимутальным углами оси ливня, определяется путем фитирования измеренных временных задержек с учетом кривизны фронта черенковского света от ливня [116]. Энергия ливня определяется по плотности потока черенковского света на расстоянии 200 м от оси  $Q_{200}$ . Для интерполяции к 200 м от измеренных значений  $Q_i$  используется ФПР, описанная в [117]. Связь энергии с  $Q_{200}$  получена также из расчета по программе CORSIKA [116]. Для построения спектра по результатам обработки данных установки Tunka-133 отбирались события с

зенитными углами  $\theta \leq 45^\circ$  и положением осей в круге радиусом  $R_c < 450$  м для энергий  $E_0 < 10^{17}$  эВ и в круге радиусом  $R_c < 800$  м для ливней с энергией  $E_0 \geq 10^{17}$  эВ. Эффективность отбора событий достигает  $\sim 100\%$  для энергий  $E_0 > 6 \cdot 10^{15}$  эВ для круга радиусом 450 м и для энергий несколько менее  $10^{17}$  эВ для круга радиусом 800 м. Таким образом, для построения спектра использованы  $\sim 375000$  событий. Энергию более  $10^{17}$  эВ имеют около 4200 событий.

Процедура восстановления параметров ШАЛ по данным TAIGA-HiSCORE основана на методах и алгоритмах, разработанных для обработки данных Тунка-133 [96, 102]. Зенитный угол  $\theta$  и азимутальный угол  $\varphi$  направления ливня восстанавливаются по формуле подгонки измеренных задержек  $T_i$  к кривой фронта ливня:  $\Delta T = T_i - T_f = R(R + 500)/(cF)$ , где  $T_f$  – расчетная задержка для плоского фронта,  $R$  – расстояние по перпендикуляру от оси ливня в метрах,  $c$  — скорость света, а  $F$  — третий переменный параметр (вместе с  $\theta$  и  $\varphi$ ). Точность восстановления зенитного угла  $\theta$  составляет 0.1 – 0.4 град в зависимости от количества сработавших оптических станций. Реконструкция положения оси ШАЛ выполняется путем подгонки измеренных амплитуд  $A_i$  функцией амплитуда-расстояние. Точность определения положения оси ШАЛ составляет около 5–10 м. Энергия первичной частицы восстанавливается по черенковской плотности светового потока на расстоянии 200 м от оси ШАЛ с точностью около 15% [102]. Энергетический порог установки TAIGA-HiSCORE при регистрации гамма-излучения составляет  $\sim 40$  ТэВ, для космических лучей  $\sim 80$  ТэВ.

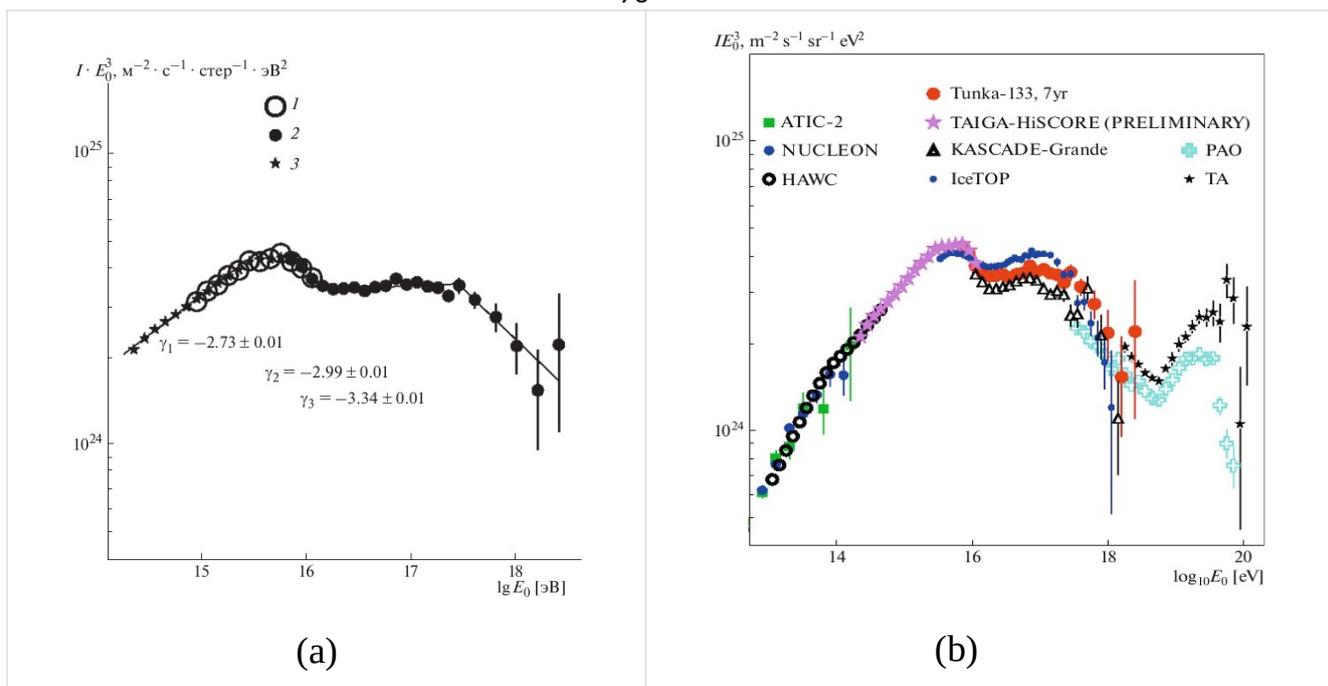


Рис. 3.4. (а) Дифференциальный энергетический спектр (умноженный на  $E^3$ ), полученный на установках: 1 – Тунка-25 [115] , 2 – Тунка-133, 3 – TAIGA-HiSCORE. (b) Энергетический спектр первичных космических лучей по данным Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE в сравнении с результаты других экспериментов [102]. Обозначения: PAO - Pierre Auger Observatory, TA - Telescope Array.

Обработка экспериментальных данных проводится с помощью программ, в которых все аппроксимирующие и пересчетные функции получены из анализа искусственных событий, сгенерированных по программе CORSIKA для диапазона энергий от  $10^{14}$  до  $10^{18}$  эВ. Для каждого ливня восстанавливаются направление прихода, координаты оси на плоскости наблюдения и энергия первичной частицы. В результате получен объединенный дифференциальный энергетический спектр всех частиц в диапазоне энергий  $2 \cdot 10^{14}$  –  $2 \cdot 10^{18}$  эВ. Полученный комбинированный дифференциальный энергетический спектр по данным установок Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE показан на рис. 3.4 вместе со спектром установки Тунка-25 [118, 119].

Начальный участок спектра ( $2 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$  эВ) может быть аппроксимирован степенным законом с показателем  $2.73 \pm 0.01$ . При больших энергиях спектр демонстрирует целый ряд особенностей — отклонений от степенного закона. На участке  $3 \cdot 10^{15} - 6 \cdot 10^{15}$  происходит постепенное нарастание крутизны наклона спектра (первое «колени»). Последующие точки до энергии  $2 \cdot 10^{16}$  эВ можно описать степенным законом с показателем  $\gamma = 3.3$ . Далее спектр резко становится более пологим, и в диапазоне  $2 \cdot 10^{16} < E_0 < 3 \cdot 10^{17}$  эВ в целом не противоречит степенному виду с наклоном  $\gamma = 2.99 \pm 0.01$ . При больших энергиях показатель резко увеличивается до  $\gamma = 3.34 \pm 0.09$  (второе «колени»). На рис. 3.4 (b) энергетический спектр, полученный черенковским методом, сравнивается с рядом других работ. На левом краю полученный спектр стыкуется со спектрами всех частиц, полученными в прямых экспериментах на баллонном ATIC-2 [120] и на спутниковом эксперименте NUCLEON [121]. Наибольшую статистику в этой области энергий получил в последнее время наземный эксперимент HAWC [122] в горах в Мексике. Его спектр отлично стыкуется как с прямыми экспериментами, так и с нашими результатами [119]. При энергиях  $\sim 10^{18}$  эВ, предельно больших для эксперимента Тунка-133, наблюдается совпадение с данными экспериментов Telescope Array (TA) [123] и Pierre Auger Observatory (PAO) [124].

Открытие излома в энергетическом спектре космических лучей – один из главных результатов в области физики космических лучей сверхвысоких энергий [125]. В настоящее время существование излома в спектре первичного космического излучения при  $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ подтверждено многими обсерваториями, однако интерпретация природы излома до сих пор остается важной проблемой. Тонкая структура энергетического спектра всех частиц состоит в том, что наблюдается острое «первое колени» при  $\sim 3$  ПэВ, закалка при 20-30 ПэВ, «второе колени» при  $\sim 300$  ПэВ. Согласно расчетам и анализу в [126, 127], считается что внегалактические протоны начинают возникать между  $10 \div 100$  ПэВ, где наблюдается «жесткость» спектра всех частиц, в

основном от перехода от ядер He к ядрам CNO, а затем вклад внегалактических протонов начинает достигать ~50% всех частиц в районе 300 ПэВ [128].

Единой точки зрения на природу излома пока нет. Изменение формы спектра может быть обусловлено либо особенностями ускорения в источниках, или связано с процессами распространения космических лучей в Галактике, или, наконец, является суммарным результатом обоих процессов [125].

### 3.6 Заключение

Совместный спектр всех частиц первичного космического излучения, полученный на черенковских установках Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE, перекрывает диапазон ~4 порядка по энергии единой методикой и демонстрирует прекрасное согласие с результатами прямых спутниковых и баллонных экспериментов и с результатами гигантских наземных установок. Получена тонкая структура энергетического спектра всех частиц с отождествлением резкого изменения наклонов спектра: «первое колено» –  $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ и «второе колено» –  $\sim 3 \cdot 10^{17}$  эВ.

При энергии  $2 \cdot 10^{16}$  эВ обнаружена особенность в энергетическом спектре космических лучей, неизвестная до начала работы установки Тунка-133. При этой энергии показатель наклона дифференциального энергетического спектра при аппроксимации степенным законом изменяется на 0.3 от  $-3.28 \pm 0.01$  при энергиях  $\leq 2 \cdot 10^{16}$  эВ до  $-2.99 \pm 0.01$  при больших значениях.

## **Глава 4 Обнаружение и исследование оптических транзиентов на телескопах-роботах МАСТЕР при инспекции гравитационно-волновых алертов aLIGO, LIGO/Virgo и гамма-всплесков**

При подготовке данного раздела диссертации использованы публикации [23, 1 – 6, 14 – 24] (в том числе, выполненные автором в соавторстве), в [3, 4] из которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования.

Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР осуществила оперативные инспекционные наблюдения всех гравитационно-волновых алертов aLIGO, LIGO/Virgo в эпохи наблюдений O1, O2, O3. Основные достижения – МАСТЕР внес наибольший вклад в исследование первого события GW150914 (см. Табл.1, главу 4 из [16]) и МАСТЕР независимо открыл Килоновую MASTER OTJ130948.10-232253.3/SSS17a в галактике NGC 4993 при инспекции GW170817 (слияние двух нейтронных звезд) в эпоху O2 LIGO/Virgo ([20], с диссертантом в соавторах) – (см.подробнее в диссертациях группы МАСТЕР Кузнецова, Владимирова, Зимнухова, Горбунова) и [1 - 192].

### **4.1 Принципы организации инспекционных и алертных наблюдений на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР**

Показателем эффективности стратегии проводимого инспекционного обзора является обнаружение многочисленных быстропеременных источников (не являющихся оптическими источниками для сливающихся пар НЗ-НЗ, НЗ-ЧД, ЧД-ЧД (НЗ — нейтронная звезда, ЧД — черная дыра), зарегистрированными LIGO/Virgo во время работы в 2015 г., в 2017 г. и в 2019 – 2020 гг.), что являющихся показателем результативности проводимого обзора. Доказанным фактом слияния НЗ-НЗ во всем электромагнитном диапазоне является только одна Килоновая GW170817 к 2022 году, что

лишний раз подтверждает трудность задачи поиска и обнаружения таких источников, в том числе, связанную с расстоянием до объекта и чувствительностью гамма- и рентгеновских детекторов.

Эффективность МАСТЕРа обусловлена следующими ключевыми факторами: распределенность по земному шару идентичного приемного оборудования, полностью роботизированный процесс наблюдений, полностью роботизированный процесс получения алертов (целеуказания) и съемки нужных координат (с отождествлением всех объектов на каждом изображении и выделением новых), распределения площадок для наблюдений между всеми обсерваториями МАСТЕР на текущий и ближайший момент с учетом факторов видимости площадки над горизонтом в момент прихода алерта, в ближайшее время, с учетом полученного предела на изображении, с учетом наличия алертов гамма-всплесков (приоритет у Swift, Fermi-LAT, MAXI, INTEGRAL, полностью попадающими в поле одного снимка МАСТЕРа).

Использование идентичного оборудования позволяет при активном участии диссертанта обнаружить с помощью программного обеспечения МАСТЕР и исследовать несколько тысяч транзиентов: Сверхновых, Новых, карликовых новых и других катаклизмических переменных, оптических компонентов гамма-всплесков, гравитационно-волнового всплеска GW170817 (Килоновая), вспышек квазаров, блазаров, обнаружении систем типа  $\varepsilon$ -Aur, обнаружении объектов типа RCtB, в автоматическом обнаружении двигающихся объектов – комет (COMET C/2015 G2 (MASTER) // MASTER-SAAO; COMET C/2015 K1 (MASTER) // MASTER-SAAO; COMET C/2016 N4 (MASTER) // MASTER-IAC при непосредственном участии диссертанта, COMET C/2020 F5 (MASTER) // MASTER-OAFA, COMET C/2021 K2 (MASTER) // MASTER-SAAO) и астероидов, в том числе потенциально опасных (2013 UG1 // MASTER-Tunka C94 , 2013 SW24 // MASTER-Tunka C94, 2014 EL45 // MASTER-Kislovodsk C41, 1998 SU4 //

MASTER-Tunka C94, 2014 UR116 // MASTER-Kislovodsk C41, 2011 QG21 // MASTER-IAC Z22 (см. Табл. 4.1), 2015 UM67 // MASTER-SAAO K95) (<http://observ.pereplet.ru/hazardMASTER.html> ).

Диссертантом обеспечены проведения наблюдений на телескопах-роботах МАСТЕР-Тунка, MASTER-SAAO, MASTER-IAC, позволившие в полностью автоматическом режиме программному обеспечению МАСТЕРа проводить наблюдения, находить новые объекты, определять и публиковать их параметры, в том числе для движущихся (обнаруженных МАСТЕРом в полностью автоматическом режиме, в том числе, благодаря обеспечению автором диссертации проведения наблюдений в автоматическом режиме комет:

- COMET C/2015 G2 (MASTER),
- COMET C/2015 K1 (MASTER),
- COMET C/2016 N4 (MASTER) (Табл. 4.1),
- COMET C/2020 F5 (MASTER),
- COMET C/2021 K2 (MASTER)

и потенциально опасных астероидов:

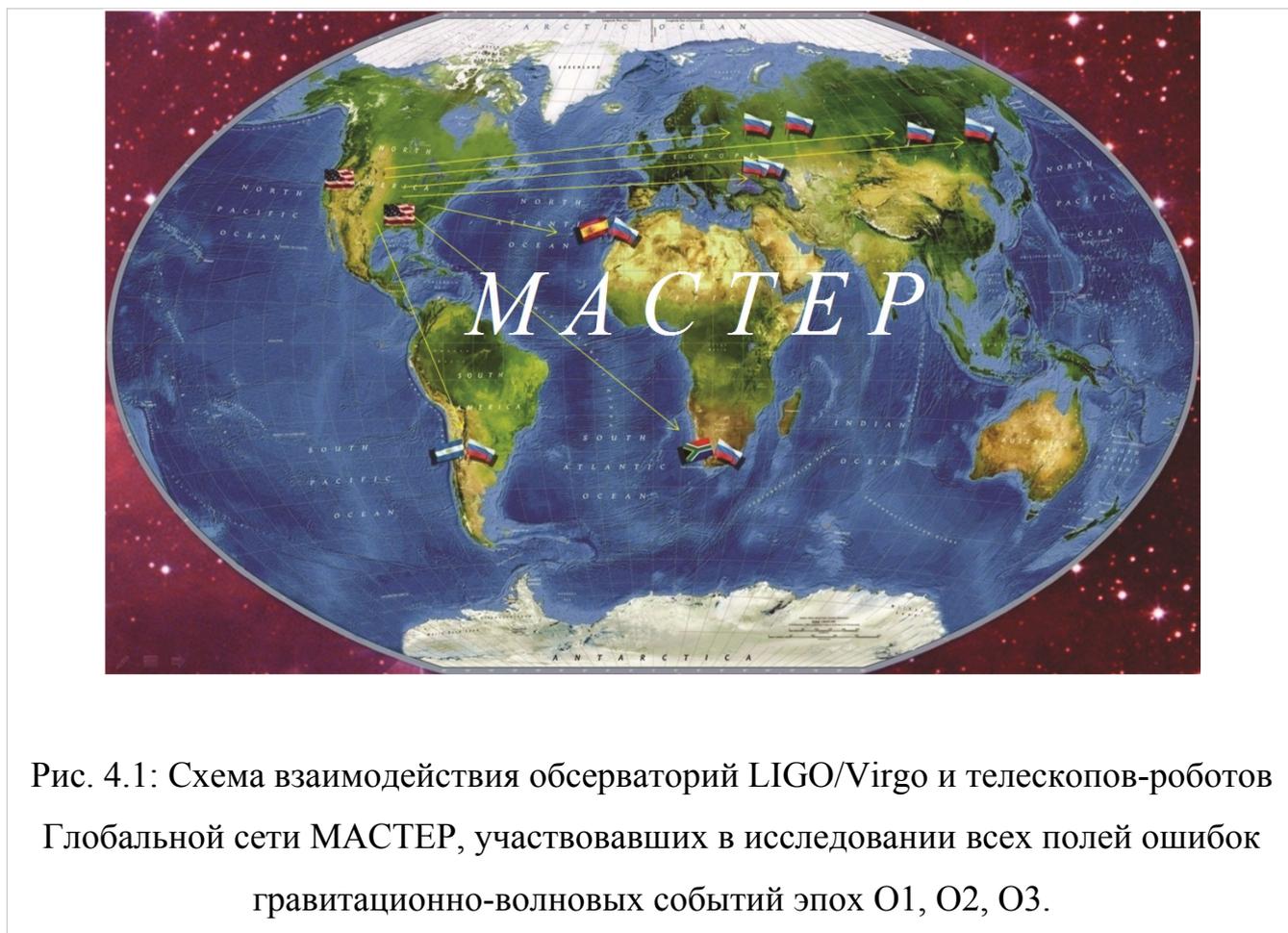
- MASTER hazard Asteroid 2013 UG1,
- MASTER hazard Asteroid 2013 SW24,
- MASTER discovered HAZARD ASTEROID 2014 EL45,
- MASTER rediscovered hazard Asteroid 1998 SU4 (потерянный в МПЦ к моменту обнаружения МАСТЕРом, ошибка определения его координат в МПЦ составляла 70 град.),
- MASTER hazard Asteroid 2014 UR116,
- MASTER HAZARD Asteroid 2011 QG21,
- MASTER HAZARD Asteroid 2015 UM67).

Таблица 4.1: Информация об открытой в автоматическом режиме при активном участии диссертанта комете COMET C/2016 N4 (MASTER) (<https://minorplanetcenter.net//mpec/K16/K16OQ6.html>).

Название кометы	Дата обнаружения, UT	RA Dec (2000)	Яркость в момент обнаружения	Телеграмма открытия	Телеграмма MPEC	MASTER
COMET C/2016 N4 (MASTER)	2016 Jul 15.14549	00 30 17.38 -18 16 42.3	16.8	MPEC 2016-O266: COMET C/2016 N4 (MASTER)	K16OQ6	IAC Z22

## 4.2 Наблюдения, обнаружение и анализ транзиентов из полей ошибок гравитационно-волновых событий, регистрируемых aLIGO, LIGO/Virgo

Не прерывая одновременных алертных и инспекционных наблюдений областей ошибок гамма-всплесков Fermi (несколько событий в день, стратегия – ближайшие 2-3 ночи), Swift (несколько событий в неделю, стратегия – ближайшая ночь на любой обсерватории), MAXI, INTEGRAL (оба – несколько событий в год, стратегия наблюдений – ближайшая ночь), нейтринных детекторов ANTARES (порядка одного в неделю, стратегия наблюдений – ближайшая ночь, через несколько дней, через неделю, через месяц для каждого), IceCube (порядка одного в месяц, стратегия наблюдений – ближайшая ночь, в течении месяца по возможности для каждого) и позднее с Баксанской нейтринной обсерватории (порядка нескольких событий в неделю, стратегия – ближайшие ночи), телескопы-роботы Глобальной сети



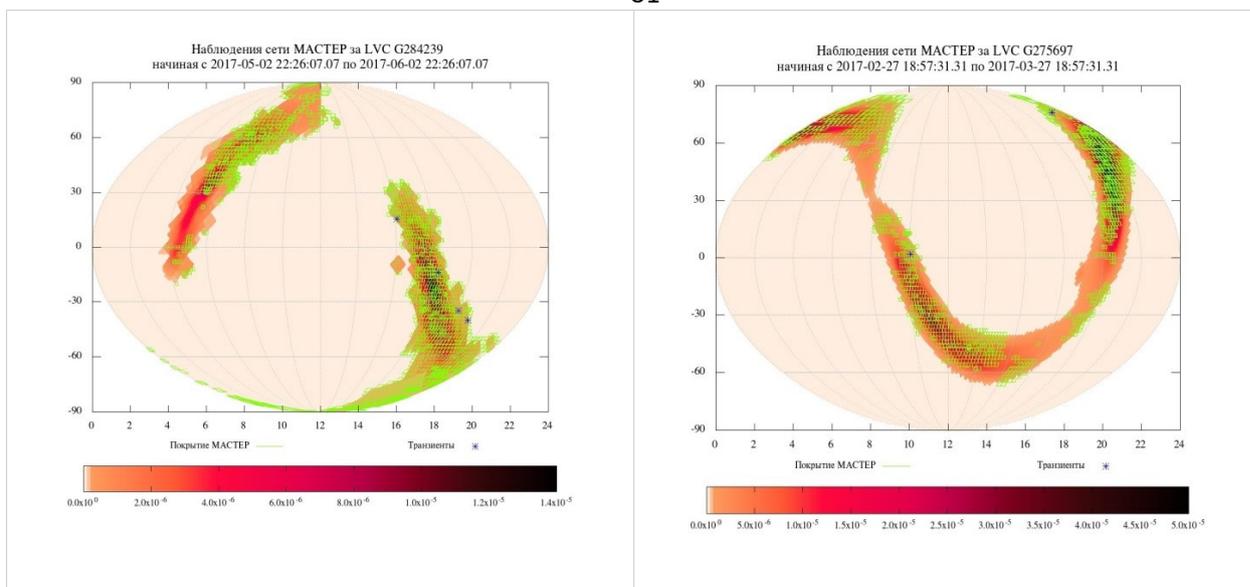


Рис. 4.2: Карта покрытия сетью телескопов роботов МАСТЕР поля ошибок события GW170502/G284239 за период 2 мая - 2 июня 2017 г. (слева) и события GW170227/G275697 за период 27 февраля - 27 марта 2017 г. (справа).

МАСТЕР благодаря алгоритмам центрального планировщика провели в 2015, 2017, 2019 – 2020 гг. наблюдения всех полей ошибок (область вероятности местонахождения источника) гравитационно-волновых событий, зарегистрированных в эпохи O1 (aLIGO), O2 и O3 (LIGO, LIGO/Virgo) (Рис. 4.1).

Рассмотрим примеры проведенных инспекционных обзоров телескопами-роботами Глобальной сети МАСТЕР полей ошибок LIGO/Virgo, aLIGO и обнаруженные в ходе инспекции переменные, в том числе новые объекты.

Осуществлялся обзор максимальной площади небесной сферы по каждому событию как можно раньше, т.е. ближе к моменту триггера по времени. Площадь каждого события в эпоху наблюдений O1 (2015 г.) больше тысячи квадратных градусов, в эпохи O2 (2017 г.) и O3 (2019 – 2020 гг.) не менее сотен квадратных градусов. В связи с уже упомянутым принципом наблюдений без ущерба для остальных тоже первоочередных задач, с учетом количества алертов в сутки, площади, которые надо осмотреть,

проанализировать и как можно быстрее сообщить о новых объектах, работа велась непрерывно.

Событие GW170502/G284239 было зарегистрировано LIGO/Virgo 2017-05-02 22:26:07.07 UT, с 2017-05-03 14:43:20.20 UT наблюдалось телескопами-роботами МАСТЕР-Кисловодск, -SAAO, -IAC, -Тунка, -Амур, -OАFA. Получены изображения с 4630 кв. градусов (55.2%) (Рис. 4.2). Оранжевым показано распределение наиболее вероятной (темнее) области расположения источника гравитационных волн, регистрируемого детекторами aLIGO (в эпоху наблюдений O1) и LIGO/Virgo (в эпохи наблюдений O2, O3).

Событие GW170227/G275697 от LIGO/Virgo 2017-02-27 18:57:31 UT, наблюдалось телескопами-роботами МАСТЕР- SAAO, -Тунка, -OАFA. В ходе инспекционного обзора получено 4626 кв. градусов (65.4%) (Рис. 4.2).

Событие GW151226/G211117 ( $m_{\text{source}}=14.2(+8.3, -3.7) M_{\odot}$   $m_2=7.5 (+2.3, -2.3) M_{\odot}$ ; chirp mass  $8.9 (+0.3) M_{\odot}$ , final mass  $20.8 (+6.1, -1.7) M_{\odot}$ , redshift  $z=0.09 (+0.03, -0.04)$ ) от aLIGO 2015-12-26 03:38:53 UT, наблюдалось телескопами-роботами Глобальной сети МАСТЕР, получившей в ходе инспекционного обзора 2915 кв.градусов (82.4%) (Рис.4.3) [3]. МАСТЕР получил синхронные изображения на сверхширокопольных камерах телескопов MASTER-Kislovodsk и MASTER-IAC для этого всплеска для 4.3% всей области вероятности нахождения источника.

Событие GW170225/G275404 от LIGO/Virgo 2017-02-25 18:30:21 UT, наблюдалось телескопами-роботами МАСТЕР- SAAO, -Тунка, -OАFA, -Амур. Получено 15940 кв. градусов (58.3%) (см. Рис.4.3).

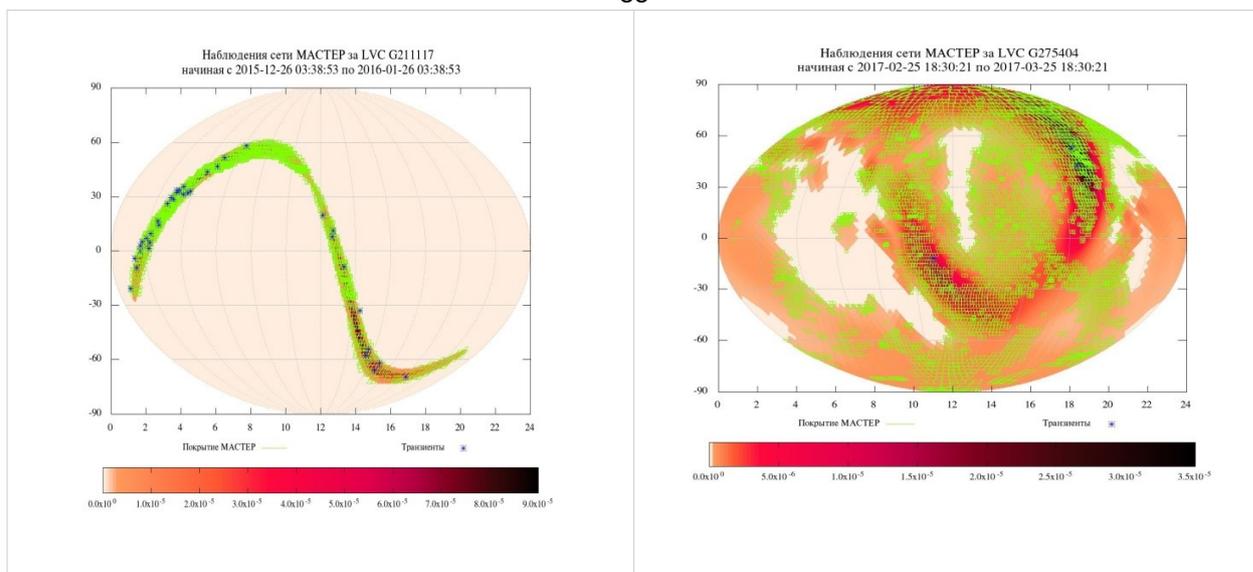


Рис. 4.3: Карта покрытия сетью телескопов роботов МАСТЕР события GW151226/G211117 за период 26 декабря 2015 - 26 января 2016 г. (слева) и события GW170225/G275404 за период 25 февраля - 25 марта 2017 г. (справа). Зеленые квадратики – размер поля зрения каждой трубы телескопа МАСТЕР.

Рассмотрим конкретные примеры обнаружения оптических переменных источников в полях ошибок гравитационно-волновых событий aLIGO, LIGO/Virgo как показатель эффективности проводимого обзора.

Во время инспекции GW151226/G211117, были обнаружены, в том числе, следующие объекты.

***MASTER044914.02+464511.9*** [3]: Новый оптический источник MASTER044914.02+464511.9 (Gress et al. ATel 8522) (нет известных источников в радиусе 5 секунд в базе данных VIZIER в момент обнаружения). Объект обнаружен диссертантом на 3 изображениях в базе данных транзиентов МАСТЕР-Тунка, экспозиция первого из серии начинается в момент времени 2016-01-06.76115 UT,  $m_{OT} = 17.4m$  (предел  $m_{lim}=19.7m$ ). Яркость сохраняется на всех его изображениях за текущую ночь (18:16:03, 18:36:49, 18:54:27, 19:28:19), что исключает классификацию

переменности UV Cet. Предел на изображениях с телескопа PanSTARRS (по соседним звездам в красном фильтре  $m_{\text{lim}} = 24\text{m}$ ) и отсутствие известных источников в базе данных VIZIER (в том числе на изображениях PanSTARRS) позволяет оценить амплитуду вспышки  $>6.6\text{m}$  (откалибровано по красному фильтру). Амплитуда вспышки составляет более  $6.6^{\text{m}}$  звездных величин. Кадр сравнения МАСТЕРа на рисунке обнаружения использовался за апрель 2015-04-15.64911 UT с пределом в белом свете  $19.0\text{m}$  (Рис. 4.4).

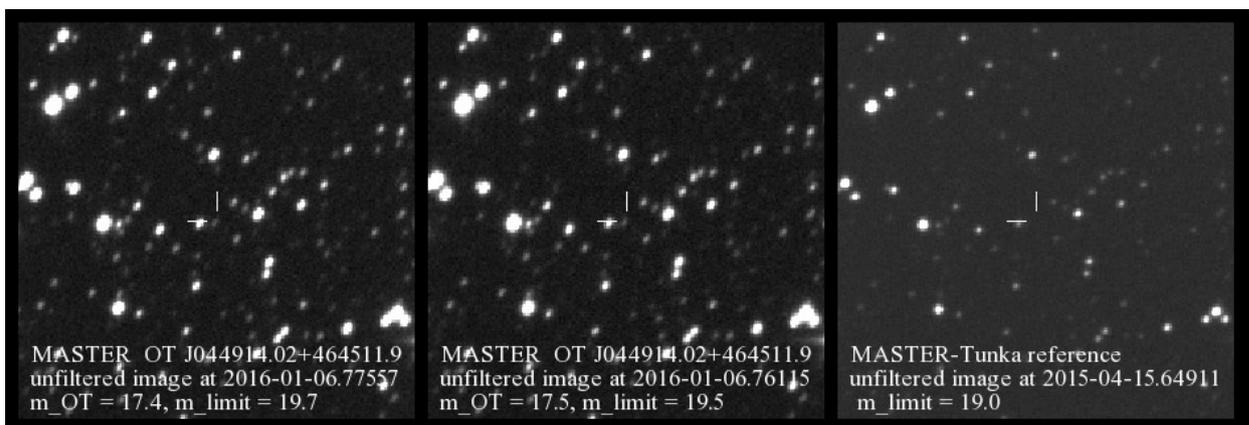


Рис. 4.4: Изображение нового объекта MASTER044914.02+464511.9.

Классификация нового объекта – вспышка непериодической карликовой новой (отсутствие вспышек в базе данных МАСТЕРа с 2012 по 2022 гг.).

*MASTER OT J164950.45-655405.0* ( $\text{ampl} > 4.8\text{m}$ ): На момент обнаружения не было известных источников в радиусе 5 секунд в базе данных VIZIER. После публикации 2016 г. объект был найден и в обзорных работах других исследователей и добавлен в VIZIER. Новый оптический источник MASTER OTJ164950.45-655405.0 был обнаружен автором диссертации в базе данных транзиентов MASTER-SAAO, по координатам (RA, Dec) = 16h 49m 50.45s - 65d 54m 05.0s, экспозиция первого изображения из семи за ночь начинается в момент времени 2016-01-05.08053 UT,  $m_{\text{OT}}=17.2\text{m}$  при  $m_{\text{lim}} = 19.2\text{m}$  (см. Рис. 4.5).

Опорное изображение (без объекта) использовалось за 2015-08-11.81249 UT с пределом 19.5m. Опорные изображения (без источника): 2015-10-22 19:08:15 UT с пределом  $m_{\text{lim}}=18.6$ , в 2015-08-11 19:29:59 UT с пределом  $m_{\text{lim}}=19.5$ , в 2015-04-13 00:36:33 UT с пределом  $m_{\text{lim}}=19.4$ , в 2015-01-31 01:01:15 UT с пределом  $m_{\text{lim}}=19.5$ . Предыдущая вспышка была обнаружена автором диссертации в архиве MASTER-SAAO с  $m_{\text{OT}}=16.5\text{m}$  в момент 2015-01-11 02:37:52.622 UT (т.к. изображение одно, а не два, автоматическим программным обеспечением на момент 11 января 2015 г. источник не был выделен как транзиент).

Классификация – вспышка карликовой новой с текущей амплитудой больше 4.8m, исторически – больше 5.5m.

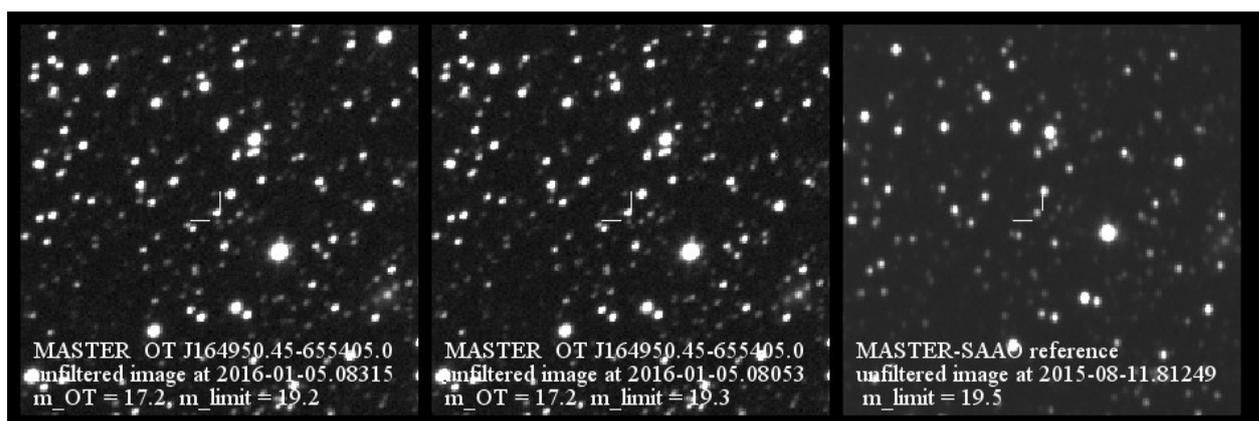


Рис. 4.5: Вспышка карликовой новой MASTER OTJ164950.45-655405.0.

Среди объектов, выявленных программным обеспечением МАСТЕР на инспекционных изображениях, встречаются самые разные источники, например, мирида RX Per – MASTER OTJ035116.11+330206.2 (см. иллюстрацию кривой блеска – Рис. 4.6).

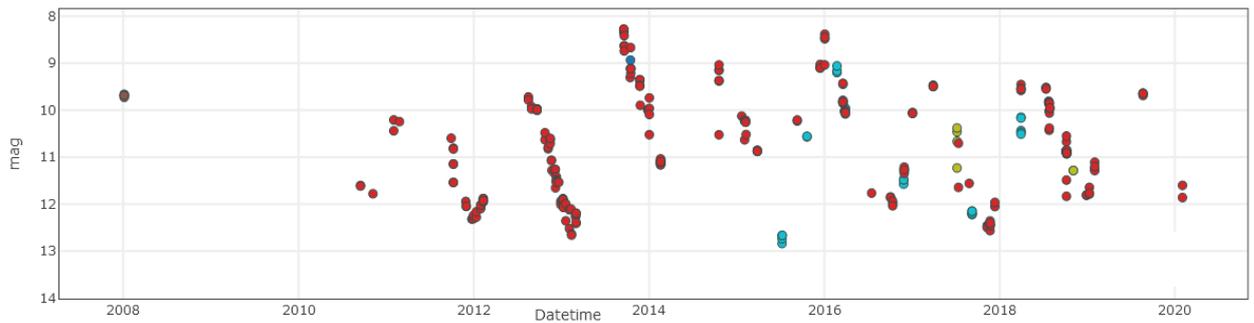


Рис. 4.6: Кривая блеска MASTER OTJ035116.11+330206.2 (архив базы данных МАСТЕРа).

Инспекция *GW170502/G284239* : Ttrigger = 2017-05-02 22:26:07.9 UT, (<https://gcn.gsfc.nasa.gov/other/G284239.gcn3>) сигнал зарегистрирован двумя детекторами LIGO Hanford Observatory (H1) и LIGO Livingston Observatory (L1), поле ошибок по уровню вероятности 90% составляло 3593 квадратных градусов. Телеграмма МАСТЕРа – GCN-21070, наблюдения начались на следующих телескопах:

- 1) МАСТЕР-Кисловодск – синхронно сверхширокопольные камеры (MASTER-VWFC 2x380 square degrees) с пределом  $m_{lim} = 11m$  на одиночных и  $m_{lim}=12.5$  на суммарной (1 минута) экспозиции.
- 2) МАСТЕР-Тунка начал наблюдения 7478 сек после получения сообщения об алерте (Notice Time) в 2017-05-03 16:34:32 UT.
- 3) MASTER -SAAO начал наблюдения 19358 сек после получения сообщения об алерте в 2017-05-03 20:05:59 UT.
- 4) MASTER- IAC начал наблюдения 26505 сек после получения сообщения об алерте в (85139 сек после триггера) в 2017-05-03 22:05:06 UT.

В результате инспекции на МАСТЕРе были обнаружены, в том числе, следующие объекты (как показатель эффективности проводимого обзора):

- 1) *MASTER OTJ205302.98-395748.9* – карликовая новая. Оптический источник MASTER OTJ205302.98-395748.9 был обнаружен автором в аргентинской базе данных кандидатов в транзиенты MASTER-OAFA по

координатам (RA, Dec)= 20h 53m 02.98s -39d 57m 48.9s,  $m_{OT}=16.7m$  в момент времени 2017-05-07 09:24:45.064 UT (Рис. 4.7). Источник есть в базе данных VIZIER, не красный, есть в каталоге GALEX (свидетельство процесса аккреции), с учетом кривой блеска МАСТЕРА, классификация – вспышка карликовой новой.

2) *MASTER OTJ200043.51-343626.5* – карликовая новая. Карликовая новая MASTER OTJ200043.51-343626.5 была обнаружена автором в базе данных кандидатов в транзиенты MASTER-OAFA 2017-05-07-07:52:15 UT с  $m_{OT}=16.9m$  (см. Рис. 4.8). В VIZIER есть объект (величина в синем фильтре GSC2.3.2  $jmag=20.9m$ ). С учетом кривой блеска MASTER-OAFA и данных VIZIER, классификация объекта – вспышка карликовой новой.

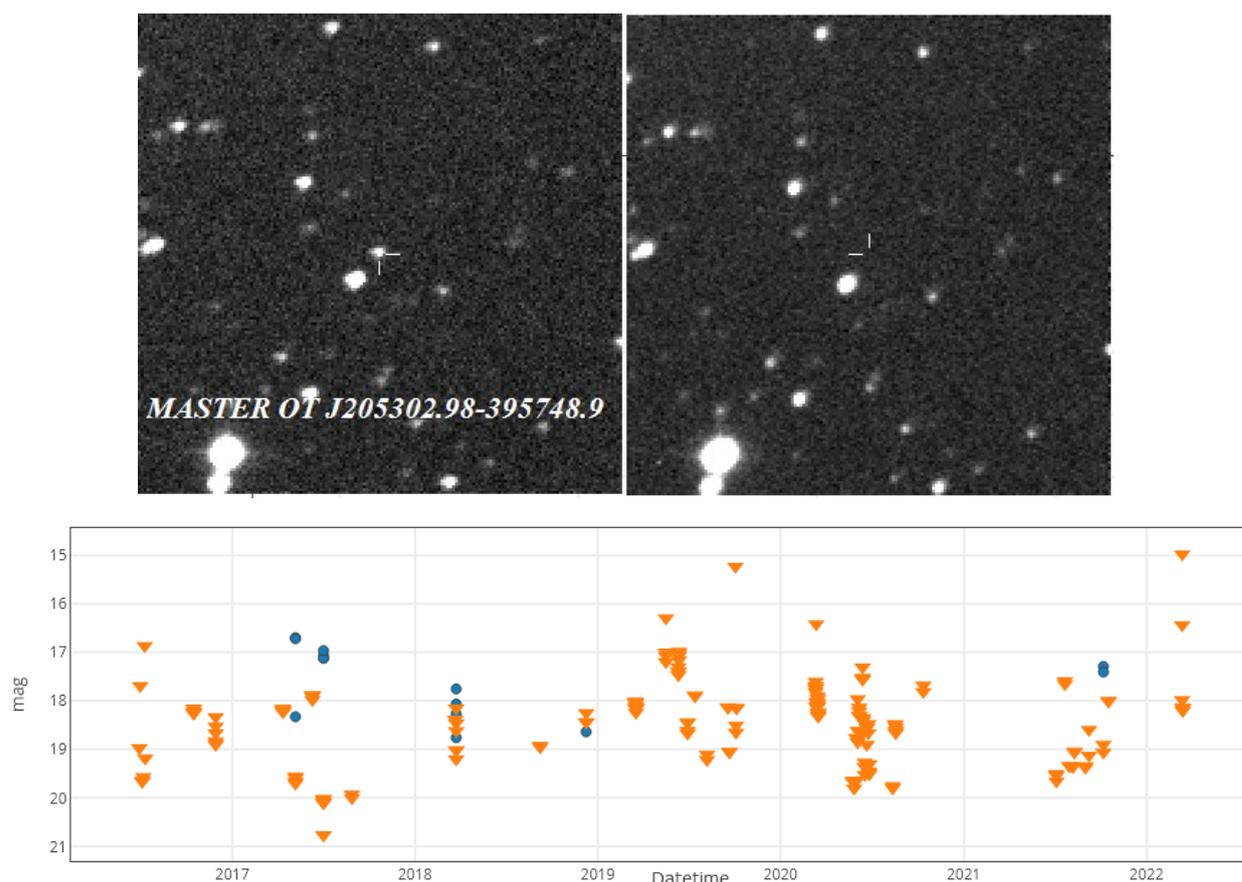


Рис. 4.7: Изображение MASTER OTJ205302.98-395748.9 и опорное изображение ( $m_{lim}=20m$ ) вверху и кривая блеска (внизу) с пределами на изображениях в том числе в моменты, когда объект отсутствует на них по базе данных MASTER-OAFA для MASTER OTJ205302.98-395748.9.

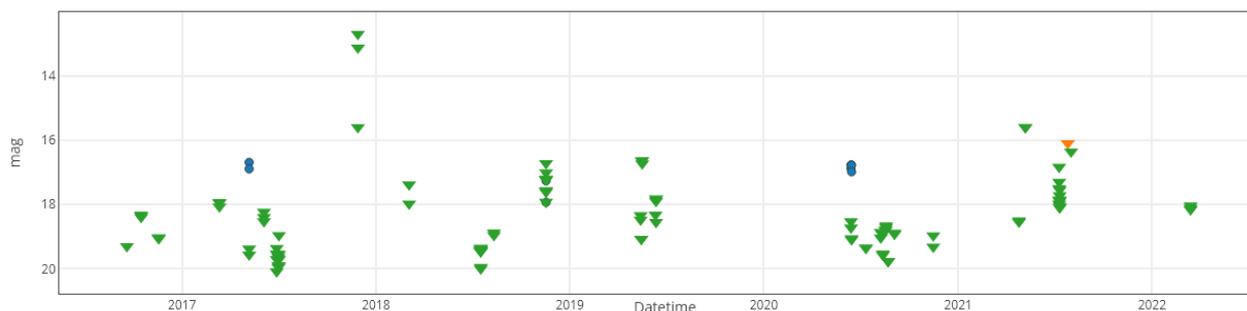
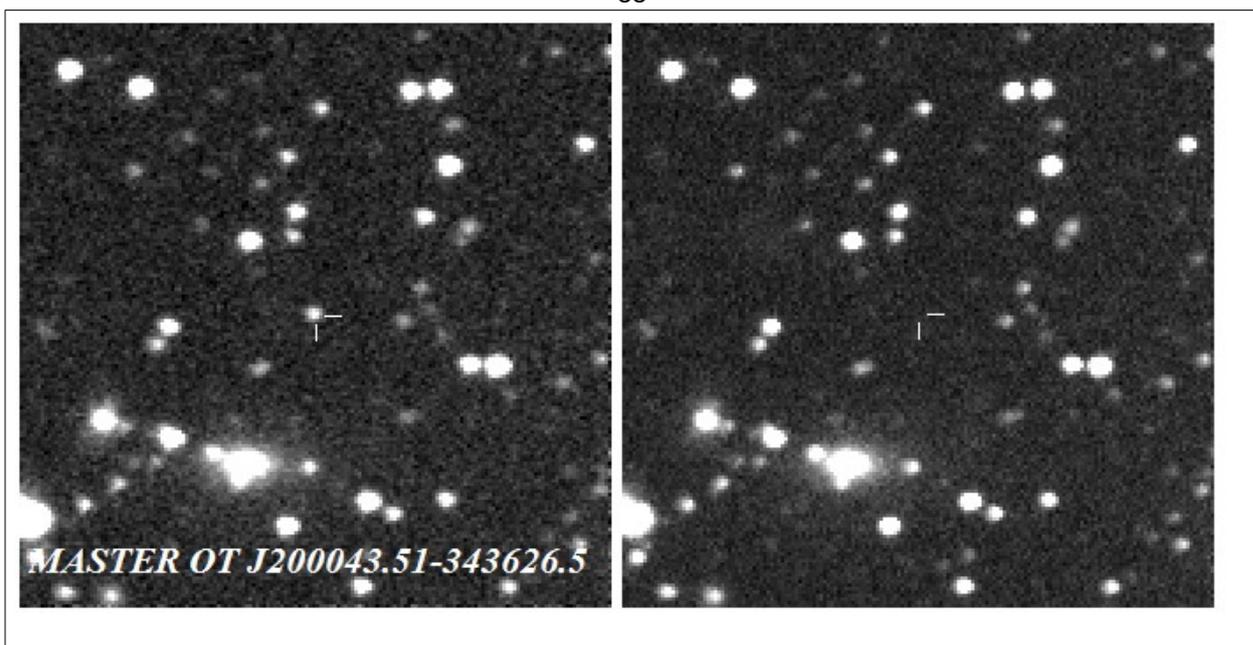


Рис. 4.8: Изображение MASTER OTJ200043.51-343626.5 и опорное изображение ( $m_{lim}= 20m$ ) вверху и кривая блеска (внизу) с пределами на изображениях в том числе в моменты, когда объект отсутствует на них.

3) *Событие GW150914 (aLIGO)* : Для первого в истории гравитационно-волнового события GW150914 ( $z\sim 0.09$ , [129]) на первоначальной карте распределения вероятности нахождения источника не было формального места нулевой вероятности обнаружить источник. К моменту определения окончательной области максимума вероятности со стороны aLIGO, со стороны МАСТЕРа было осмотрено 5200 квадратных градусов от первоначальной карты (Рис. 4.9), что позволило нам внести наибольший вклад в исследование этого исторического события [16, 17, 3].

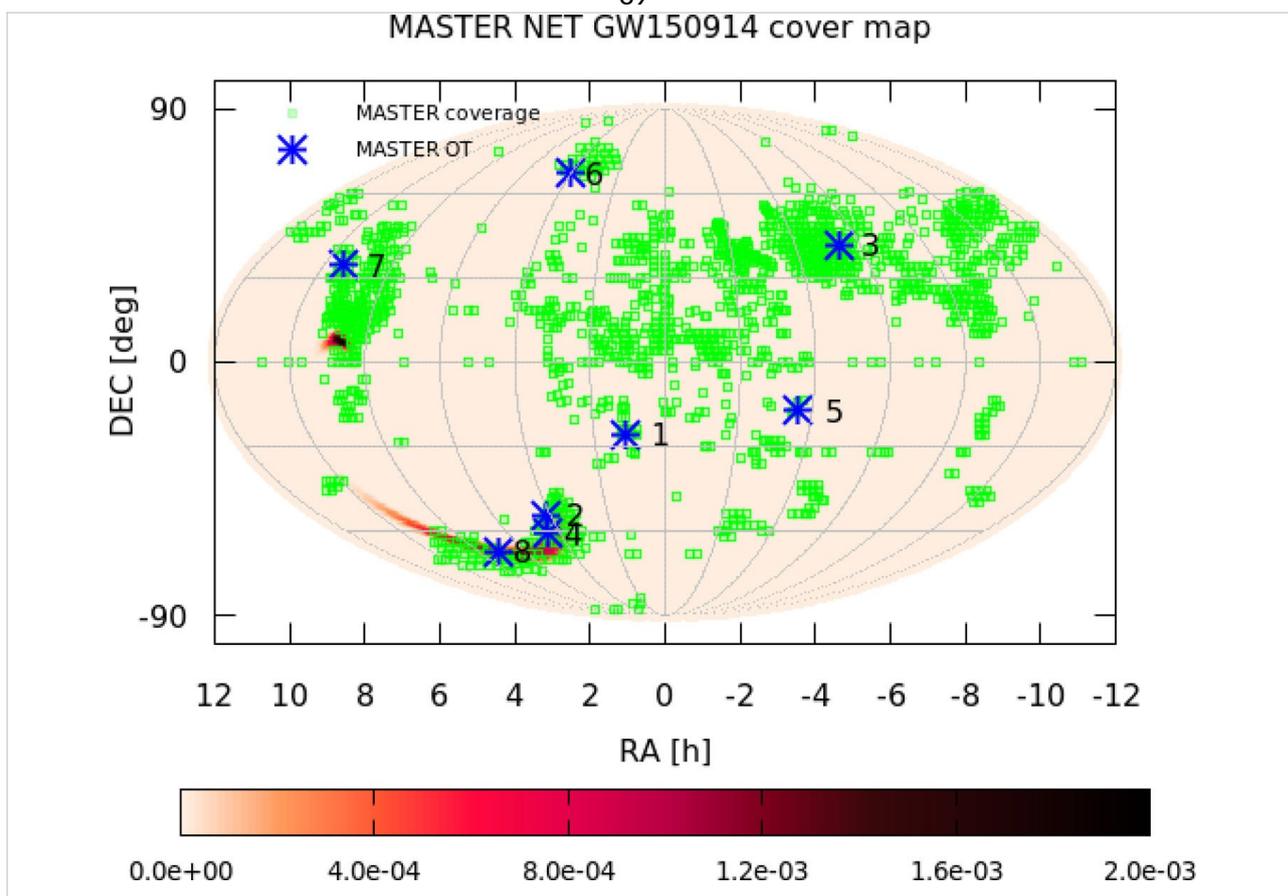


Рис. 4.9: Карта покрытия МАСТЕРОм (инспекции) всей площади распределения вероятности, начиная с первой версии, aLIGO GW150914. Зеленые квадраты – площадки, снятые телескопами-роботами Глобальной сети МАСТЕР (поле 4 кв. град. для каждой площадки). Звездочками отмечено расположение обнаруженных и исследованных оптических источников.

Автором с 2009 по 2022 гг. были проанализированы десятки тысяч кандидатов в оптические транзиенты [130, 132 – 187]. Накопив огромный опыт анализа переменных источников, найденных на изображениях МАСТЕР программным обеспечением (МАСТЕР-робот, MASTER auto-detection system), диссертант внес значительный вклад в исследование переменных и новых источников в полях ошибок гравитационно-волновых алертов, в том числе GW150914, среди которых были выделены следующие объекты, **MASTER OTJ040938.68-541316.9** - сверхновая звезда, **MASTER**

**OTJ070747.72-672205.6** – Карликовая новая типа U Gem, **MASTER OTJ042822.91-604158.3** – карликовая Новая и другие.

Система автоматического обнаружения объектов MASTER-SAAO открыла источник ОТ в (RA, Dec) = 07:07:47.72 –67:22:05.6 в 2015-09-21.995 UT [131] (Рис. 4.11). Звездная величина ОТ в белом свете составила 16.9m (предельная звездная величина 19.2m). ОТ был найден на 8 изображениях. В этом месте нет астероидов и др.движущихся объектов. В базе данных МАСТЕРа есть опорные изображения без ОТ, сделанные в 2014-12-25.027 UT и 2015-02-24.863 UT с пределом в белом свете 20.0m и 20.3m соответственно. В 3,8" от объекта находится звезда USNO-B1 (0226-0200013) со значениями блеска в синем и красном фильтре B2=20.97m и R2=20.01m соответственно.

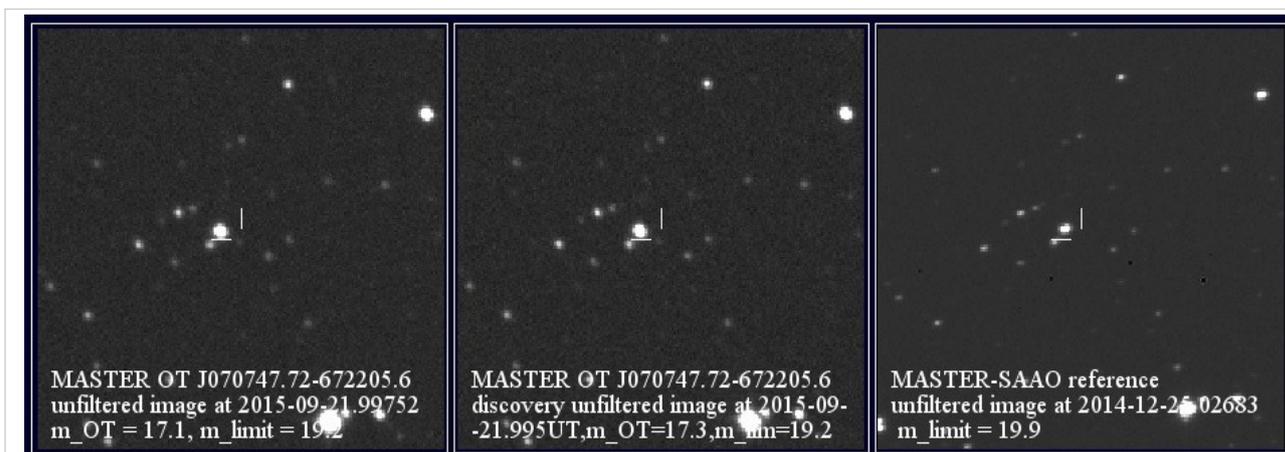


Рис. 4.10: Карликовая новая MASTER OTJ070747.72-672205.6, обнаруженная МАСТЕР-SAAO внутри поля LIGO GW150914, и опорный снимок.

AAVSO отождествил с этой звездой наш ОТ как катаклизмическую переменную. Изображение на момент открытия и снимок сравнения приведены на рисунке.

**MASTER OTJ042822.91-604158.3** – карликовая Новая.

Объект MASTER OTJ042822.91-604158.3 обнаружен на телескопе МАСТЕР-SAAO по координатам (RA, Dec) = 04:28:22.91 –60:41:58.3 в 2015-09-16.909 UT. Звездная величина ОТ в белом свете 18.2m (предел = 19.2m).

ОТ присутствует на 3 изображениях в 2015-09-16 21:49:04.329 / 21:55:28.386 / 22:01:50.134 UT и отсутствует на изображениях на 2015-09-24 02:33:07 UT с пределом 19.6m. Это означает, что ОТ (Рис. 4.11) не является сверхновой, несмотря на то, что он расположен в  $18.7''$  от галактики GALEXASC J042825.42-604155.3 с неизвестным красным смещением. С учетом опорных изображений с пределом 20.6m на МАСТЕР-SAAO, амплитуда вспышки составляет более 2.4m звездных величин.

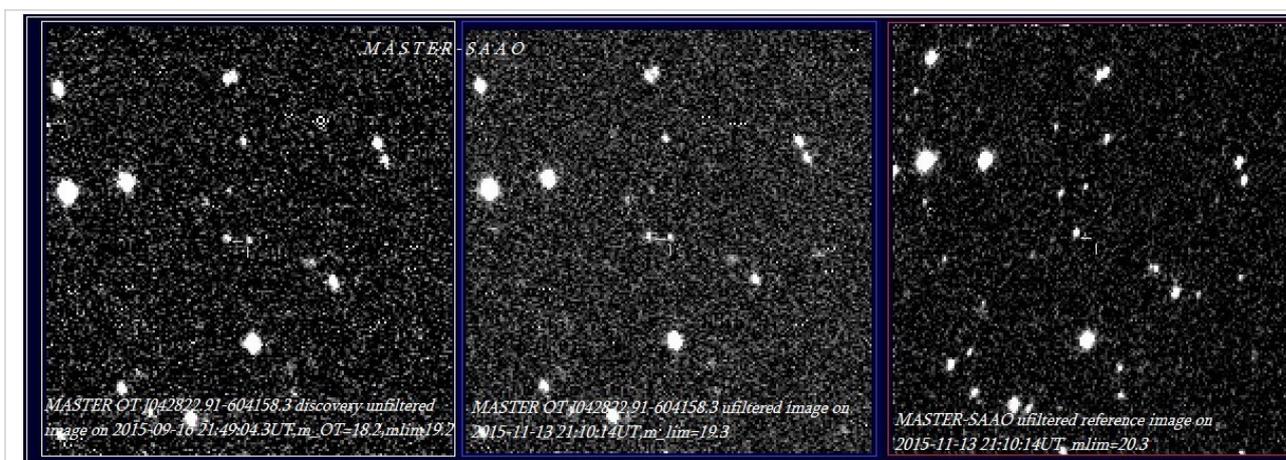


Рис. 4.11: МАСТЕР ОТJ042822.91-604158.3 и опорное изображение.

#### 4.3 Наблюдения полей ошибок гамма-всплесков и обнаружение их оптических компонентов

МАСТЕР одновременно исследует все виды алертов, приходящие из GCN, распределяя время начала и длительности наблюдений в зависимости от времени триггера, видимости и поведения площадки алерта, пределов на изображении и наличия срочных алертов от других детекторов автоматически. Приоритет центрального планировщика выставлен для Swift, Fermi-LAT, MAXI, INTEGRAL, IceCube, Ligo/Virgo-max, Fermi-GBM, ANTARES. Это означает, что в случае одновременного прихода нескольких видов алертов, наблюдаться они будут в этом порядке, при условии

видимости над горизонтом (погодных условий и т.д.). После прихода сообщения об алерте телескоп заканчивает предыдущую экспозицию и переезжает на координаты целеуказания за время считывания предыдущего изображения. Длительность экспозиций для гамма-всплесков зависит от времени триггера и при нормальном состоянии (когда сообщение о срабатывании триггера пришло сразу после события, когда координаты над горизонтом и на текущей обсерватории нет дождя) составляет 10, 20, 30, 40, 50, 60 секунд для получения кривой блеска с хорошим разрешением. Например, на GRB 160104A МАСТЕР-Тунка навелся за 10 сек, обнаружил оптический источник MASTER OT J050711.06+111925.4 с яркостью 17.2m и получил кривую блеска совместно с МАСТЕР-Амур. Обеспечение непрерывной работы всех телескопов сети МАСТЕР позволяет проводить наблюдения областей гамма-всплесков на ранней стадии, т.е. получать именно ранние кривые блеска источников.

Рассмотрим примеры таких событий.

**GRB 151021A:** Гамма-всплеск GRB 151021A зарегистрирован аппаратом Swift (BAT) (GCN 18425), и его кривая блеска в рентгене показала сложную многопиковую структуру длительностью не менее 100 сек. Телескоп-робот MASTER-SAAO (ЮАР) навелся 2015-10-21 01:30:06 UT за 54 сек и начал алертные наблюдения с экспозициями 10, 20, 30, 40 сек в поляризационных фильтрах. Оптический источник MASTER OT J223034.42-331150.3 (Рис. 4.12) с яркостью 14.86m (GCN 18427) обнаружен в максимуме по кривой блеска, и присутствует на 20 изображениях, позволяя подробно прописать кривую блеска (light curve) (Рис. 4.13). Красное смещение источника  $z=2.330$  (GCN 18426, телескоп VLT Паранальской обсерватории, Чили).



Рис. 4.12: Оптический источник MASTER OTJ223034.42-331150.3 от GRB151021A

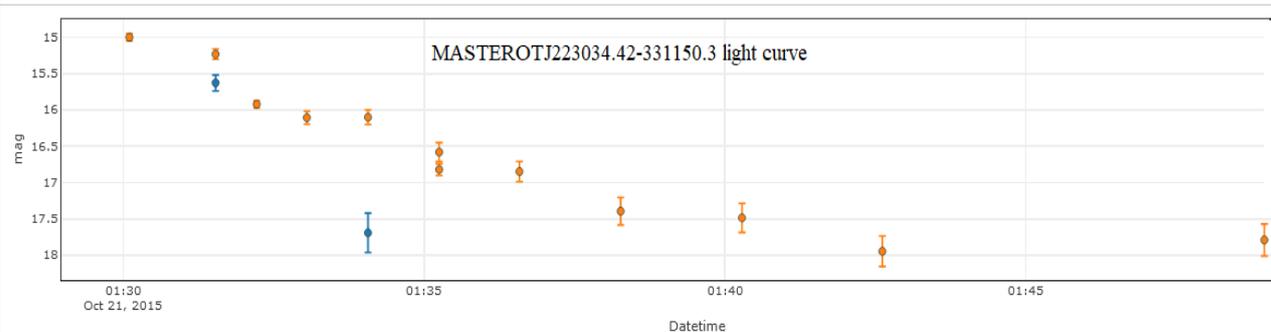


Рис. 4.13: Кривая блеска оптического источника MASTER OTJ223034.42-331150.3.

**GRB 150413A:** Гамма-всплеск GRB150413A зарегистрирован аппаратом Swift (BAT trigger 637899) 2015-04-13 13:54:58 UT, его кривая блеска в гамма-диапазоне Swift-BAT детектора показала многопиковую структуру (Рис. 4.14). Точные координаты гамма-всплеска от XRT,UVOT отсутствовали (<https://gcn.gsfc.nasa.gov/other/637899.swift>). Телескоп-робот МАСТЕР-Тунка навелся и начал первую экспозицию через 132 сек после срабатывания триггера, обнаружив источник MASTER OTJ124141.98+715028.0 (см. Рис. 4.14 и Рис. 4.15). Обнаружение источника позволило получить его кривую

блеска в поляризационных фильтрах [22], измерить его яркость 14.9m в максимуме, получить спектр на канарском 10-м телескопе GTC и измерить красное смещение  $z = 3.14$ .

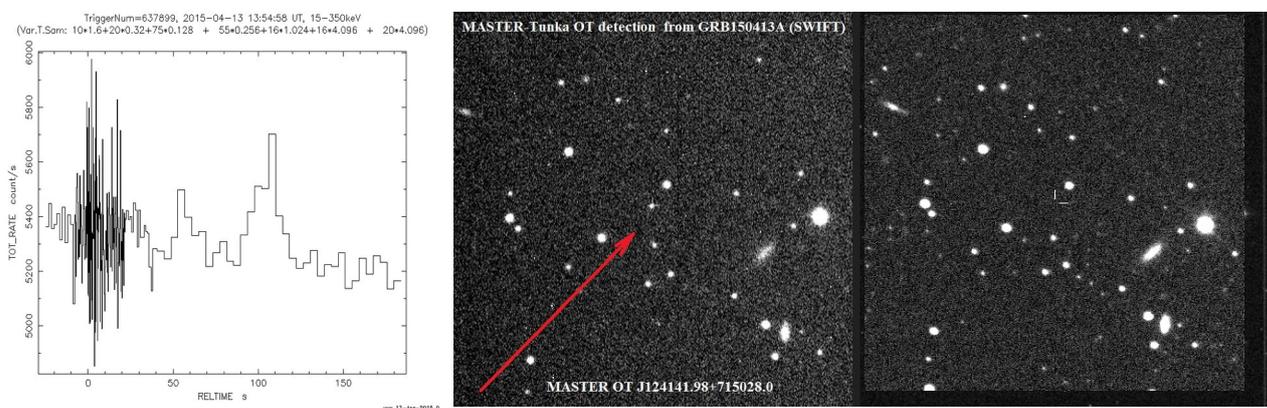


Рис. 4.14: Swift-BAT GRB 150413A, MASTER OTJ124141.98+715028.0 и опорное изображение с пределом 20.3m.

Условия проведения наблюдений на Байкальском МАСТЕРЕ – МАСТЕР-Тунка: Высота объекта в момент триггера Object: Altitude: 64 градуса. Положение Солнца Sun\_Altitude: -16.55 Azimuth: 129.88 (Dist. to Sun: 99deg., Sun coord.: (21.384039 d, 8.983517 d), положение и фаза Луны MoonAltitude: -47.82, расстояние до Луны Dist. to Moon: 112 градусов (Moon coord.: 312.801610 d, -12.978752 d) Lunar disk: 0.343064. Галактические координаты источника: gal. latitude: 45.564187 Gal. longitude: 123.830850

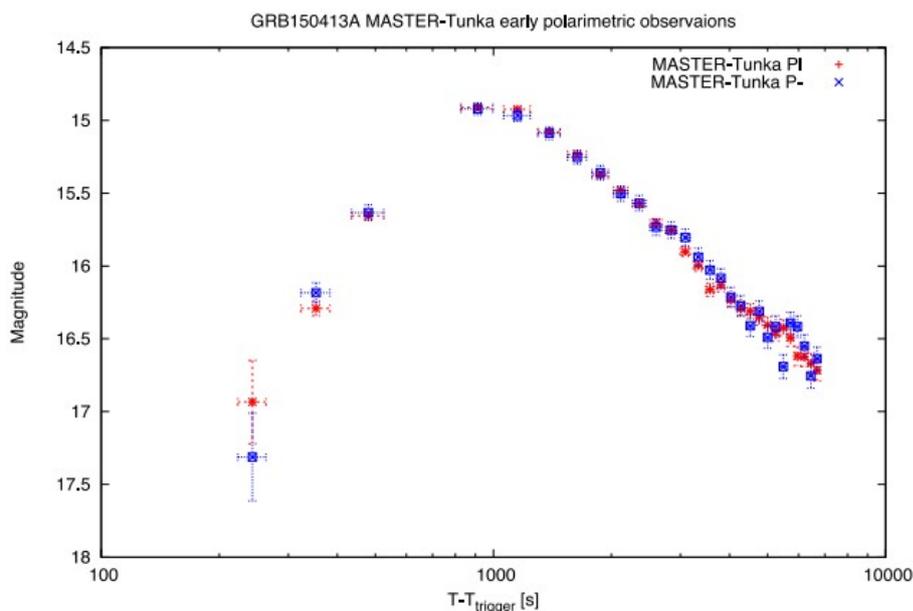


Рис. 4.15: Кривая блеска MASTER OTJ124141.98+715028.0, полученная на телескопе МАСТЕР-Тунка в двух поляризационных фильтрах, максимальный блеск источника по данным МАСТЕРа составил 14.9m.

**GRB 150301B:** Гамма-всплеск GRB150301A зарегистрирован Swift -BAT 2015-03-01 в 19:38:04 UT, его кривая блеска в гамма-диапазоне представлена на Рис. 4.16. Телескоп-робот МАСТЕР-ЮАР автоматически навелся [22] и, закончив предыдущую экспозицию, через 60 сек от триггера начал наблюдения в двух поляризационных фильтрах в 2015-03-01 19:39:23 UT с экспозицией 10 сек на первых изображениях, где был обнаружен MASTER OTJ055639.94-575810.0 (Рис. 4.16). Таким образом, объект MASTER OT 055639.94-575810.0, открытый на телескопе МАСТЕР-ЮАР в поле ошибок GRB 150301A, относится к типу оптических источников гамма-всплесков и по данным МАСТЕРа максимальный блеск источника на первом изображении объекта составил 15.26m.

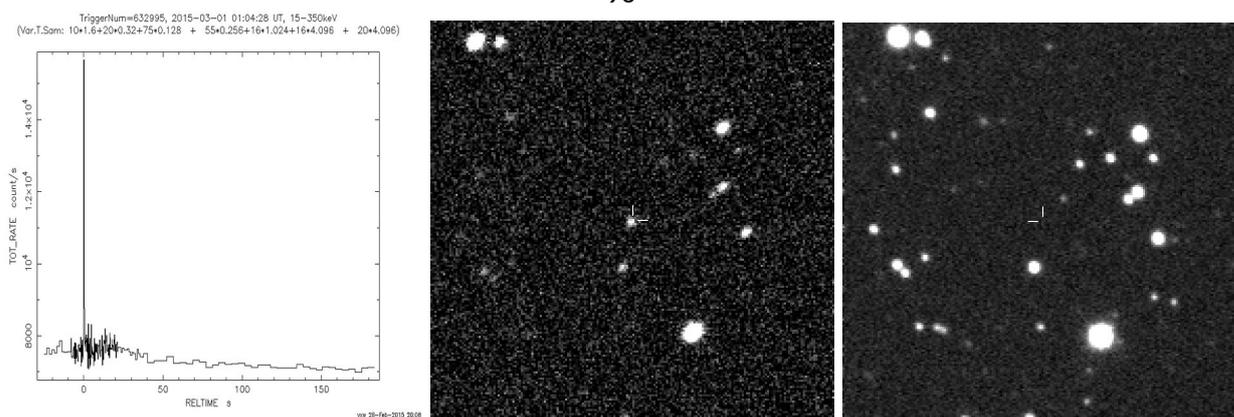


Рис. 4.16: Swift-BAT GRB 150301A, MASTER OTJ055639.94-575810.0 и опорное изображение с пределом 20.4m.

**GRB 200325B:** Гамма-всплеск зарегистрирован детектором Fermi-GBM 25 марта 2020 г. (карантин в мире) в 14:53:16 UT с радиусом поля ошибок 3.3 градуса. Несмотря на карантинные меры, все телескопы МАСТЕРа продолжали свою работу. Среди первых МАСТЕРов, наведшихся на всплеск, были МАСТЕР-Тунка и МАСТЕР-Кисловодск (Рис. 4.17), которые в результате инспекционного обзора (Рис. 4.18) алерта Fermi обнаружили в полностью автоматическом режиме оптический источник всплеска MASTER OTJ111012.51+274912.8 яркостью 16.1m на первом изображении, подтвержденный дальнейшими наблюдениями с регистрацией рентгеновского послесвечения Swift-XRT.



Рис. 4.17: Изображение MASTER OTJ111012.51+274912.8 на телескопе МАСТЕР-Тунка (в 2020-03-25 17:23:28 UT) и в Кисловодске (среднее изображение), а также опорный кадр с кисловодского МАСТЕРа с пределом 20.2m.

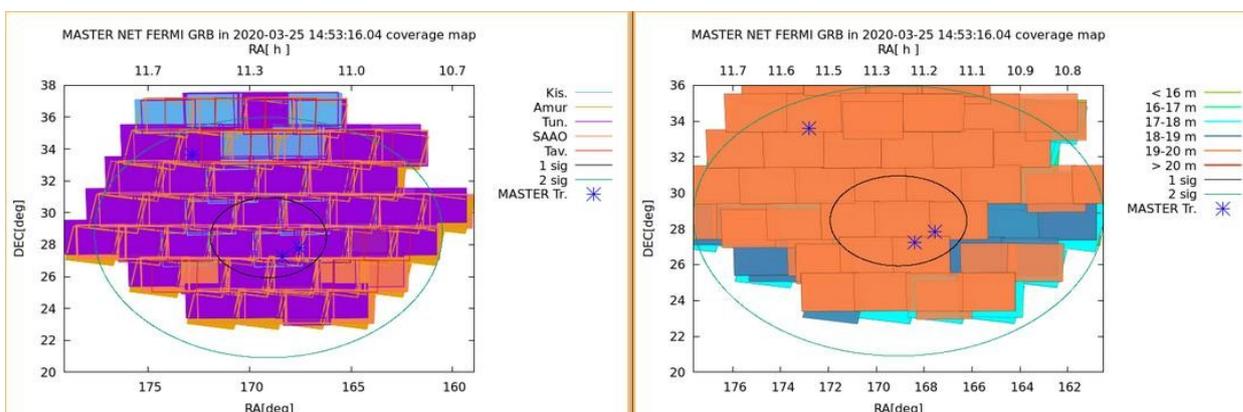


Рис. 4.18: Карта покрытия поля ошибок GRB200325B телескопами Глобальной сети МАСТЕР (слева) и карта пределов, полученных на изображениях (справа). Звездочками отмечены положения транзиентов, обнаруженных автоматическим программным обеспечением МАСТЕРа и проанализированных диссертантом, среди них представлен MASTER OTJ111012.51+274912.8, остальные не имеют отношения к всплеску и присутствуют на изображениях МАСТЕРа и в другие дни (результативность инспекционного обзора).

**GRB 200131A:** Гамма-всплеск, зарегистрированный детектором Swift (GCN 26953), чей оптический источник MASTER OTJ001222.56+510700.3 был обнаружен тункинским и канарским телескопами MASTER-Tunka (наведение за 50 сек) и MASTER-IAC (наведение за 12 сек) и опубликован МАСТЕРОм (GCN 26952, GCN 26953). Первые изображения (с  $m_{OT}=14.5$ ) получены раньше оптического Swift-UVOT (и всех, участвующих в исследовании гамма-всплесков), что дало возможность исследовать раннюю стадию развития процесса в оптическом и рентгеновском диапазоне. Карта покрытия (результативность алертных наблюдений, организованных на телескопах МАСТЕР-Кисловодск, MASTER-IAC, МАСТЕР-Тунка), изображение оптического источника MASTER OTJ001222.56+510700.3 всплеска GRB 200131A с телескопа MASTER-IAC и кадр сравнения с телескопа MASTER-Tunka приведены на Рис. 4.19.

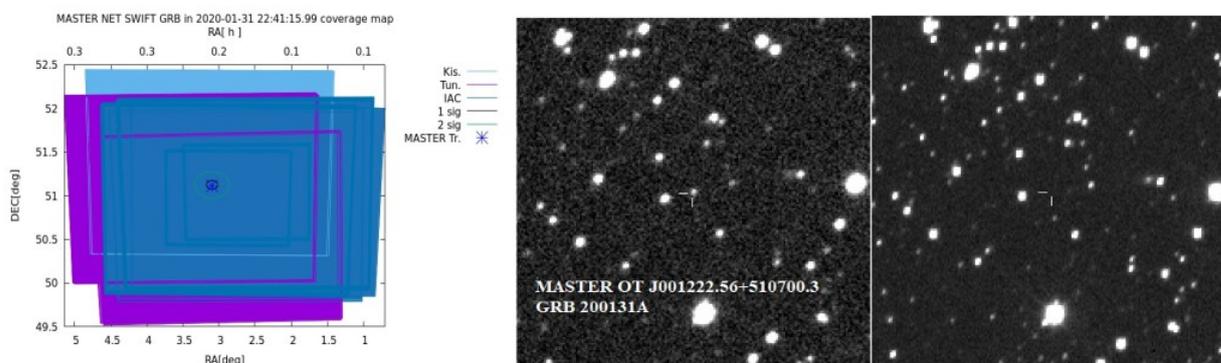


Рис. 4.19: Карта покрытия (слева), изображение MASTER OTJ001222.56+510700.3 всплеска GRB 200131A и кадр сравнения с  $m=20.5$  с телескопа MASTER-Tunka (справа).

#### 4.4 Выводы

Глобальная сеть роботов-телескопов МАСТЕР выполнила большой инспекционный обзор всех событий, зарегистрированных LIGO/Virgo в O1, O2, O3 эпохи наблюдений. Автором проанализированы десятки тысяч потенциальных источников (оптических транзиентов) с целью обнаружения электромагнитных аналогов первого события GW150914 от aLIGO.

Наблюдения МАСТЕР охватили наибольшую площадь областей ошибок этого события среди всех оптических обзорных телескопов, участвовавших в этой операции. Среди проанализированных и подтвержденных автором диссертации оптических транзиентов из GW 150914 (для которого МАСТЕР внес наибольший вклад в оптическую поддержку, получив изображения до  $20^m$  звездной величины и проанализировав их для  $\sim 5200$  град<sup>2</sup>) – MASTER OT J070747.72-68-541316.9 (сверхновая), MASTER OT J070747.72-672205.6, MASTER OT J042822.91-604158.3, не имеющих непосредственного отношения к текущему слиянию черных дыр, но представленных для демонстрации эффективности проводимого МАСТЕРом инспекционного обзора. Также обнаружены новые объекты – карликовые новые звезды MASTER OT J044914.02+464511.9 с амплитудой вспышки более 4.6m, MASTER OT J164950.45-655405.0 с амплитудой вспышки более 4.8m.

В результате проводимых МАСТЕРом инспекционных и алертных наблюдений полей ошибок источников гамма-всплесков обнаружены новые источники, являющиеся оптическими источниками всплесков MASTER OT J001222.56+510700.3 (GRB 200131A, MASTER-Tunka и MASTER-IAC), MASTER OT J111012.51+274912.8 (GRB 200325B, МАСТЕР-Тунка и МАСТЕР-Кисловодск), MASTER OT 055639.94-575810.0 (GRB 150301A, МАСТЕР-ЮАР), MASTER OT J124141.98+715028.0 (GRB 150413, MASTER-Tunka).

## Заключение

В результате выполненной оперативная оптической инспекции уникального нейтринного мультиплета IceCube IC160217 на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР внесен наибольший вклад в оптическую поддержку этого эксперимента. К анализу привлекались результаты наблюдений поля ошибок за 3 месяца – один до триггера и два после.

На телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР проведено исследование 179 полей ошибок событий, зарегистрированных на нейтринной обсерватории ANTARES, по результатам которого составлен список вероятных кандидатов источников и обнаружена оптическая переменность блазаров 5BZBJ2256-3303, PMN\_J2345-1555 и PMN\_J0328-2329.

Для демонстрации эффективности алертных и инспекционных наблюдений, проводимых на телескопах Глобальной сети МАСТЕР, приводятся результаты инспекционного обзора неба полей ошибок гравитационно-волновых событий, зарегистрированных на aLIGO в эпоху O1 и LIGO/Virgo в эпохи O2, O3, и гамма-всплесков, по результатам которых обнаружены и исследованы оптические транзиенты: MASTER OTJ044914.02+464511.9, открытый в результате инспекционных наблюдений полей ошибок гравитационно-волнового события GW151226, MASTER OTJ124141.98+715028.0, открытый на телескопе МАСТЕР-Тунка в поле ошибок GRB 150413A.

Детально восстановлен энергетический спектр и массовый состав первичных космических лучей в диапазоне энергий  $10^{14}$  –  $10^{18}$  эВ, полученных по данным Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE. Тонкая структура энергетического спектра всех частиц первичных космических лучей в диапазоне энергий  $\sim 10^{14}$  –  $5 \cdot 10^{18}$  эВ свидетельствует о резком изменении наклона спектра при энергиях  $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ и  $\sim 3 \cdot 10^{17}$  эВ. При энергии  $2 \cdot 10^{16}$  эВ обнаружена особенность в энергетическом спектре космических лучей, неизвестная ранее, т.е. до начала работы установки Тунка-133.

Исследования перспективные и будут продолжены.

## Благодарности

В заключение автор считает приятным долгом выразить благодарность и признательность научным руководителям – Почетному профессору МГУ, д.ф.м.н., профессору Липунову Владимиру Михайловичу и д.ф.м.н., профессору Будневу Николаю Михайловичу.

Автор также хотел бы поблагодарить за совместную работу, стимулирующие дискуссии и постоянную поддержку Кузьмичева Л.А., Корнилова В.Г., Гресь Т.И., Кузнецова А.С., Горбовского Е.С., Балануцу П.В., Свертилова С.И., Расторгуева А.С., Чугая Н.Н., Долгова А.Д., Калегаева В.В., Тюрину Н.В., Габовича А., Сеника В.А., Владимирова В.В., Чазова В.В., Кувшинова Д.А., Часовникова А.Р., Жиркова К.К., Тополева В.В., Власенко Д.М., Горбунова И.А. и весь коллектив МАСТЕР и астрофизического комплекса TAIGA.

Автор хотел бы выразить благодарность за поддержку Глобальной сети МАСТЕР МГУ Ректору МГУ ак. В.А.Садовничему.

Работа выполнена на Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР, включая МАСТЕР-Амур, МАСТЕР-Тунка, МАСТЕР-Кисловодск, МАСТЕР-Таврида (Россия) при поддержке Программы Развития МГУ, и MASTER-SAAO (ЮАР), MASTER-IAC (Испания), MASTER-OAFA (Аргентина), MASTER-OAGN (Мексика) и на установке Тунка-133 и Астрофизическом комплексе МГУ-ИГУ “TAIGA”.

## Список литературы

1. Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E., Shatskij N., Kuvshinov D., Tyurina N., et al. "Master Robotic Net" // *Advances in Astronomy*. – 2010. – Vol.2010. – ID349171. – DOI:10.1155/2010/349171. [Электронный ресурс]. – 2009. – URL: <https://arxiv.org/abs/0907.0827>.
2. Kornilov V. G., Lipunov V., Gorbovskoy E. et al. "Robotic optical telescopes global network MASTER II. Equipment, structure, algorithms" // *Experimental Astronomy*. – 2012 – Vol.33. – №1. – p.173.
3. Lipunov V. M., Kornilov V. G., Zhirkov K. et al. "MASTER Real Time Multimessage Observations of High Energy Phenomena" // *Universe*. – 2022. – Vol.8. – p.271.
4. Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E., Tiurina N., Kuznetsov A., Balanutsa P., Chazov V., Gress O., Kuvshinov D., Vladimirov V., Buckley D., Rebolo R., Serra-Ricart M., Podesta R., Levato H., Budnev N., Ivanov K., Tlatov A., Gabovich A., Yurkov V. "MASTER Global Robotic Net: new sites, new result" // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*. – 2018. – Vol.48. – p.42.
5. Липунов В.М., Владимиров В.В., Горбовской Е.С., Кузнецов А.С., Зимнухов Д.С., Балануца П.В., Корнилов В.Г., Тюрина Н.В., Гресс О.А., Власенко Д.М., Габович А.М., Юрков В.В., Кувшинов Д.А., Сеник В.А., "Концепция многофункционального астрономического комплекса и динамически интегрированной базы данных в применении к многоканальным наблюдениям Глобальной Сети МАСТЕР" // *Астрономический журнал*. – 2019. – Т.96. – №4. – с.288.
6. Gorbovskoy E. S., Lipunov V. M., Kornilov V. G., et al. "The MASTER-II network of robotic optical telescopes. First results" // *Astronomy Reports*. – 2013. – Vol.57. – p.233.
7. Горбовской Е. "Исследования собственного излучения гамма-всплесков при помощи сети телескопов-роботов МАСТЕР" // *Кандидатская диссертация по специальности 01.03.02 (2012)*.
8. Кузнецов А.С. "Создание динамически интегрированной базы данных роботизированной сети МАСТЕР и мониторинг исторической вспышки микроквара V404 Cyg/2023+338 2015 года" // *Кандидатская диссертация по специальности 01.03.02 (2019)*.
9. Владимиров В. "Создание центра оперативного контроля телескопов Глобальной сети МАСТЕР и исследование некоторых астрофизических транзиентов" // *Кандидатская диссертация по специальности 01.03.02 (2019)*.

10. Зимнухов Д.С. "Создание интерактивных инструментов анализа астрономических данных для исследования быстропеременных и движущихся объектов на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР" // Кандидатская диссертация по специальности 01.03.02 (2021).
11. Горбунов И.А. "Некоторые результаты роботизации многоканальных исследований Глобальной сети МАСТЕР МГУ" // Кандидатская диссертация по специальности 01.03.02 (2021).
12. Кузьмичев Л.А. "Нейтринная астрофизика" // Модель космоса: Научно-информационное издание: В 2 т. / Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. - Т. 1 : Физические условия в космическом пространстве. – Москва: КДУ, 2007. – 872 с. : Гл.1.5.6. – с.197-198.
13. Кузьмичев Л.А. Курс лекций "Нейтринная астрофизика" // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: [http://nuclphys.sinp.msu.ru/neutrino\\_astr/na7.htm](http://nuclphys.sinp.msu.ru/neutrino_astr/na7.htm)
14. E.Troja, V. Lipunov, et al. O.Gress. et al. "Significant and variable linear polarization during the prompt optical flash of GRB 160625B" // Nature. – 2017. – Vol.547. – p.425.
15. Lipunov V.M., Kornilov V., Gorbovskoy E., Buckley D.A.H., Tiurina N., Balanutsa P., Kuznetsov A., Greiner J., Vladimirov V., Vlasenko D., Chazov V., Kuvshinov D., Gabovich A., Potter S.B., Kniazev A., Crawford S., Rebolo Lopez R., Serra-Ricart M., Israelian G., Lodieu N., Gress O., et al. "First gravitational-wave burst GW150914: MASTER optical follow-up observations" // Monthly Notices of The Royal Astronomical Society. – 2017. – Vol.465. – p.3656. [Электронный ресурс]. – 2016. – URL: <https://arxiv.org/abs/1605.01607>.
16. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., et al. "Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914" // The Astrophysical Journal Letters. – 2016. – Vol.826. – №1. – L13. [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1602.08492>.
17. Lipunov V., Kornilov V., Vlasenko D., Tiurina N., Gorbovskoy E., Gress O., et al. "Optical Transients Found by MASTER during the Observation of LIGO/VIRGO S200219ac Gravitational-wave Event" // Research Notes of the AAS. – 2020. – Vol.4. – №11. – p.194.
18. Lipunov V. M., Gorbovskoy E., et al. "MASTER Optical Detection of the First LIGO/Virgo Neutron Star Binary Merger GW170817" // The Astrophysical Journal Letters. – 2017, – Vol.850. – №1. – L1. [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1710.05461>.

19. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., et al. "Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger" // *The Astrophysical Journal Letters*. – 2017. – Vol.848. – №2. – L12. [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1710.05833>.
20. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., et al., "A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant" // *Nature*. – 2017. – Vol.551. – p.85. [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1710.05835>.
21. Aartsen M., et al., Master Collaboration: Lipunov V., Gorbovskoy E., Tiurina N.V., Balanutsa P.V., Kuznetsov A., Kornilov V.G., Chazov V., Budnev N.M., Gress O.A. et al. "Multiwavelength follow-up of a rare IceCube neutrino multiplet" // *Astronomy and Astrophysics*. – 2017. – Vol.607A. – p.115. [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1702.06131>.
22. Gorbovskoy E. S., Lipunov V. M., Buckley D. A. H., Kornilov V. G., Balanutsa P. V., Tyurina N. V., Kuznetsov A. S., Kuvshinov D. A., Gorbunov I. A., Vlasenko D., Popova E., Chazov V. V., Potter S., Kotze M., Kniazev A. Y., Gress O. A., Budnev N. M., et al. "Early polarization observations of the optical emission of gamma-ray bursts: GRB 150301B and GRB 150413A" // *MNRAS*. – 2016. – Vol.455. – №3. – p.3312-3318.
23. Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E., Tiurina N., Kuznetsov A., Balanutsa P., Chazov V., Gress O., Kuvshinov D., Vladimirov V., Buckley D., Rebolo R., Serra-Ricart M., Podesta R., Levato H., Budnev N., Ivanov K., Tlatov A., Gabovich A., Yurkov V. "MASTER Global Robotic Net: new sites, new result" // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*. – 2018. – Vol.48. – p.42.
24. Gress O.A., Lipunov V.M., Dornic D., Gorbovskoy E.S., Kornilov V.G., и др. "MASTER Investigation of ANTARES and IceCube Alerts" // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*. – 2019. – Vol.51. – p.89.
25. Ageron M., Aguilar J. A., Samarai I. Al., et al., "ANTARES: The first undersea neutrino telescope" // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. – 2011. – Vol.656. – №1. – C.11. [Электронный ресурс]. – 2011. – URL: <https://arxiv.org/abs/1104.1607>.
26. Ageron M., Aguilar J. A., Samarai I. Al., et al., "The ANTARES Telescope Neutrino Alert System" // *Astroparticle Physics*. – 2012. – Vol.35. – №.8. – p.530. [Электронный ресурс]. – 2012. – URL: <https://arxiv.org/abs/1103.4477>.
27. Aartsen M. G., et al. (IceCube Collaboration) "Evidence for Astrophysical Muon Neutrinos from the Northern Sky with IceCube" // *Physical Review Letters*.

– 2015. – Vol.115. – 081102. [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: <https://arxiv.org/abs/1507.04005>.

28. Aartsen M. G., Ackermann M., Adams J., et al., "The IceCube realtime alert system" // *Astroparticle Physics*. – 2017. – Vol.92. – p.30. [Электронный ресурс]. – 2016. – URL: <https://arxiv.org/abs/1612.06028>.

29. Lipunov V. M., Gorbovskey E., Kornilov V., Krushinskiy V., Vlasenko D., Tiurina N., Balanutsa P., Kuznetsov A., Budnev N., Gress O., et al., "MASTER Optical Polarization Variability Detection in the Microquasar V404 Cyg/GS 2023+33" // *The Astrophysical Journal*. – 2016. – Vol.833. – №2. – p.198.

30. Lipunov V. M., Kuznetsov A., et al., "V404 CYG/GS 2023+338: Monitoring in the Optical with Robotic Telescopes of the MASTER Global Network during the 2015 Superburst" // *Astronomy Reports*. – 2019. – Vol.63. – p.534.

31. Lipunov V.M., Kornilov V.G., Zhirkov K., Gorbovskey E., et al. "Optical Observations Reveal Strong Evidence for High-energy Neutrino Progenitor" // *Astrophysical Journal Letters*. – 2020. – Vol.896. – L19.

32. Gorbovskey E. S., Lipunova G. V., Lipunov V. M., et al. "Prompt, early and afterglow optical observations of five  $\gamma$ -ray bursts: GRB 100901A, GRB 100902A, GRB 100905A, GRB 100906A and GRB 101020A" // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2012. – Vol.421. – №3. – p.1874. [Электронный ресурс]. – 2012. – URL: <https://arxiv.org/abs/1111.3625>.

33. Lipunov V., Simakov S., Gorbovskey E., Vlasenko D. "Smooth Optical Self-similar Emission of Gamma-Ray Bursts" // *The Astrophysical Journal*. – 2017. – Vol.845. – №1. – p.52. [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1707.00880>.

34. Ershova O. A., Lipunov V. M., Gorbovskey E. S., Tyurina N. V., Kornilov V. G., Zimnukhov D. S., Gabovich A., Gress O. A., et al. "Early Optical Observations of Gamma-Ray Bursts Compared with Their Gamma- and X-Ray Characteristics Using a MASTER Global Network of Robotic Telescopes from Lomonosov Moscow State University" // *Astronomy Reports*. – 2020. – Vol.64. – p.126.

35. Ершова О.А., Липунов В.М., Горбовской Е.С., Тюрина Н.В., Корнилов В.Г., Зимнухов Д.С., Габович А., Гресс О.А., Буднев Н.М., Юрков В.В., Владимиров В.В., Кузнецов А.С., Балануца П.В., Реболо Р., Серра-Рикарт М., Бакли Д., Подеста Р., Левато Х., Лопез К., Подеста Ф., Франсиле К., Маламачи К., Язев С.А., Власенко Д.М., Тлатов А., Сеник В., Гриншпун В., Часовников А., Тополев В., Поздняков А., Жирков К., Кувшинов Д., Балакин Ф. "Ранние оптические наблюдения гамма-всплесков на Глобальной сети

телескопов-роботов МАСТЕР МГУ в сравнении с их гамма и рентгеновскими характеристиками" // *Астрономический журнал. Наука (М.)*. – 2020. – Т.97. – №2. – С.111-144.

36. Fermi Gamma-ray Space Telescope // [Электронный ресурс]. – 2016. – URL: <https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/overview.html>.

37. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., et al. "Low-latency Gravitational-wave Alerts for Multimessenger Astronomy during the Second Advanced LIGO and Virgo Observing Run" // *The Astrophysical Journal*. – 2019. – Vol.875. – №2. – p.161. [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: <https://www.ligo.org/science/Publication-O2EMFollowup/index.php>.

38. Gehrels N., Chincarini G., Giommi P., et al. "The Swift Gamma-ray Burst Mission" // *The Astrophysical Journal*. – 2004. – Vol.611. – p.1005. [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: <https://swift.gsfc.nasa.gov/>.

39. Spiering C. "History of high-energy neutrino astronomy" // [Электронный ресурс]. – 2019. – URL: <https://arxiv.org/abs/1903.11481v1>.

40. Santander M. "The Dawn of Multi-Messenger Astronomy" // [Электронный ресурс]. – 2016. – URL: <https://arxiv.org/abs/1606.09335>.

41. Abbasi R., Ackermann M., Adams J., et al. "Follow-up of Astrophysical Transients in Real Time with the IceCube Neutrino Observatory" // *The Astrophysical Journal*. – 2021. – Vol.910. – p.4.

42. Albert A., Andre M., Anghinolfi M., et al. "ANTARES and IceCube Combined Search for Neutrino Point-like and Extended Sources in the Southern Sky" // *The Astrophysical Journal*. – 2020. – Vol.892. – p.92.

43. Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J., et al. "The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems" // *Journal of Instrumentation*. – 2017. – Vol.12. – p.P03012. [Электронный ресурс]. – 2016. – URL: <https://arxiv.org/abs/1612.05093>.

44. ASAS-SN Homepage // [Электронный ресурс]. – 2021. – URL: <https://www.astronomy.ohio-state.edu/asasn/index.shtml>.

45. Las Cumbres Observatory // [Электронный ресурс]. – 2021. – URL: <https://lco.global/>.

46. The Neil Gehrels Swift Observatory // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://swift.gsfc.nasa.gov/>.

47. RGB J0136+391 // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL:

<http://tevcat.uchicago.edu/?mode=1;id=244>.

48. The Astronomer's Telegram // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://www.astronomerstelegam.org/>.

49. GCN Circulares Archive // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: [https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3\\_archive.html](https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html).

50. The List of Optical Transients discovered by the unique russian MASTER [Global Robotic Net](#) auto-detection software // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: [http://observ.pereplet.ru/MASTER\\_OT.html](http://observ.pereplet.ru/MASTER_OT.html).

51. ASAS-SN Transients // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~assassin/transients.html>.

52. Gaia Photometric Science Alerts // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <http://gsaweb.ast.cam.ac.uk/alerts/alertsindex>.

53. The first INTEGRAL-OMC catalogue of optically variable sources // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <http://sdc.cab.inta-csic.es/omc/var/>.

54. The ROSAT All-Sky Survey Bright Source Catalogue (1RXS) // [Электронный ресурс]. – 1996. – URL: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/survey/rass-bsc/cat.html>.

55. 4XMM-DR10 // [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: [http://xmmssc.irap.omp.eu/Catalogue/4XMM-DR10/4XMM\\_DR10.html](http://xmmssc.irap.omp.eu/Catalogue/4XMM-DR10/4XMM_DR10.html).

56. 2SXPS Swift XRT Point Source Catalogue // [Электронный ресурс]. – 2019. – URL: <https://www.swift.ac.uk/2SXPS/>.

57. Swift/BAT Hard X-ray Transient Monitor // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://swift.gsfc.nasa.gov/results/transients/index.html>.

58. LAT 8-year Source Catalog (4FGL) // [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: [https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/8yr\\_catalog/](https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/8yr_catalog/).

59. The NRAO VLA Sky Survey // [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: <https://www.cv.nrao.edu/nvss/>

60. Radio Fundamental Catalog // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <http://astrogeo.org/rfc/>.

61. FRB Catalogue // [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: <http://www.frbcat.org/>.

62. Welcome to TeVCat! // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <http://tevcat.uchicago.edu/>.
63. HAWC – The High-Altitude Water Cherenkov Gamma-Ray Observatory // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://www.hawc-observatory.org/>.
64. Mukhopadhyay M., Lunardini C., Timmes F. X., Zuber K. "Presupernova Neutrinos: Directional Sensitivity and Prospects for Progenitor Identification" // *The Astrophysical Journal*. – 2020. – Vol.899. – №2. – p.153. [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2004.02045>.
65. Green D. A. "Galactic SNRs: Summary Data" // [Электронный ресурс]. – 2019. – URL: <https://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/snrs/snrs.data.html>.
66. Bishop D., "Bright Supernova – Archives" // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://www.rochesterastronomy.org/snimages/>.
67. Liu Q. Z., Paradijs J., van den Heuve E. P. J. "A catalogue of low-mass X-ray binaries in the Galaxy, LMC, and SMC (Fourth edition)" // *Astronomy and Astrophysics*. – 2007. – Vol.469. – №2. – p.807. [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/469/807>.
68. Liu Q. Z., . Mirabel I. F. "A catalogue of ultraluminous X-ray sources in external galaxies" // *Astronomy and Astrophysics*. – 2005. – Vol.429. – p.1125. [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/429/1125>.
69. Manchester R. N., Hobbs G. B., Teoh A., Hobbs M. "The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue" // *The Astronomical Journal*. – 2005. – Vol.129. – №4. – p.1993. [Электронный ресурс]. – 2003. – URL: <https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>.
70. Olausen S. A., Kaspi V. M. "The McGill Magnetar Catalog" // *The Astrophysical Journal Supplement*. – 2014. – Vol.212. – №1. – ID:6. – 22.C. [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: <http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>.
71. SKY2000 Master Catalog, Version 4 // [Электронный ресурс]. – 2002. – URL: <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/V/109>.
72. GLADE+ Galaxy Catalog // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <http://glade.elte.hu/index.html>.
73. 2MASS Redshift Survey (2MRS) // [Электронный ресурс]. – 2019. – URL: <http://tdc-www.harvard.edu/2mrs/>.

74. Veron-Cetty M.-P. and Véron P. "A catalogue of quasars and active nuclei: 12th edition" // *Astronomy & Astrophysics*. – 2006. – Vol.455. – p.773. [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <http://cdsarc.u-strasbg.fr/cgi-bin/Cat?VII/248>.
75. Roma-BZCAT Multi-Frequency Catalog of Blazars // [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/all/romabzcat.html>, <https://arxiv.org/abs/1502.07755>, <http://cdsarc.u-strasbg.fr/ftp/cats/VII/274/>.
76. GCN/AMON Notices // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: [https://gcn.gsfc.nasa.gov/amon\\_hawc\\_events.html](https://gcn.gsfc.nasa.gov/amon_hawc_events.html).
77. MASTER Net MASTER Database: Alerts // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://master.sai.msu.ru/site/master2/alert.php>.
78. Dzhilkibaev Z.-A. M., et al. (Baikal-GVD Collaboration) "The Baikal-GVD neutrino telescope: search for high-energy cascades" // *Proceedings of Science - 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC2021)*, PoS-1144. – 2021. – Vol.395. – 8C. // [Электронный ресурс]. – 2021. – URL: <https://arxiv.org/abs/2108.01894>.
79. Adrian-Martínez S., et al. "Letter of intent for KM3NeT 2.0" // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. – 2016. – Vol.43. – №8. – 084001. [Электронный ресурс]. – 2016. – URL: <https://arxiv.org/abs/1601.07459>. [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://www.km3net.org/>.
80. TNS AT2017gck // [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://www.wis-tns.org/object/2017gck>.
81. Israel F. P. "Centaurus A – NGC 5128" // *The Astronomy and Astrophysics Review*. – 1998. – Vol.8. – p.237.
82. NASA/IPAC Extragalactic Database // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <http://ned.ipac.caltech.edu/byname>.
83. Kuzmichev L., et al. (TAIGA Collab.) "Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy (TAIGA): Status, results and perspectives" // *EPJ Web of Conference*. – 2017. – Vol.145. – ID:01001.
84. Aharonian F. "On the potential of the HEGRA IACT array" // *AIP Conference Proceedings*. – 1997. – Vol.410. – p.1631. [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CT/CT.html>.
85. H.E.S.S. -- High Energy Stereoscopic System // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/HESS.shtml>.

86. Acciari V. A., Aliu E., Arlen T., et al. "Discovery of TeV Gamma-ray Emission from Tycho's Supernova Remnant" // *Astrophysical Journal Letters*. – 2011. – Vol.730. – №2. – ID:L20. – 6pp.
87. Albert J., et al. (MAGIC Collab.) "Observation of Very High Energy Gamma-Ray Emission from the Active Galactic Nucleus 1ES 1959+650 Using the MAGIC Telescope" // *Astrophysical Journal*. – 2006. – Vol.639. – p.761. [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://magic.mpp.mpg.de/>.
88. CTA – Cherenkov Telescope Array // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://www.cta-observatory.org>.
89. Amenomori M., et al. (Tibet AS $\gamma$  Collab.) "First Detection of Photons with Energy beyond 100 TeV from an Astrophysical Source" // *Physical Review Letters*. – 2019. – Vol.123. – №5. – p.051101.
90. Sinnis G. (on behalf of the Milagro and HAWC Collaborations) "Water Cherenkov technology in gamma-ray astrophysics" // *Nuclear Instruments and Methods A*. – 2010. – Vol.623. – №1. – p.410.
91. Cao, Z., Aharonian, F.A., An, Q., et al. "Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12  $\gamma$ -ray Galactic sources" // *Nature*. – 2021. – Vol.594. – №7861. – p.33.
92. Amenomori M., et al. (Tibet AS $\gamma$  Collaboration) "First Detection of Photons with Energy beyond 100 TeV from an Astrophysical Source" // *Physical Review Letters*. – 2019. – Vol.123. – p.051101.
93. Budnev N., et al. "The TAIGA experiment: From cosmic-ray to gamma-ray astronomy in the Tunka valley" // *Nuclear Instruments and Methods A*. – 2017. – Vol.845. – p.330.
94. Budnev N., et al. (TAIGA Collab.) "TAIGA—An Innovative Hybrid Array for High Energy Gamma Astronomy, Cosmic Ray Physics and Astroparticle Physics" // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2021. – Vol.84. – №3. – p.362.
95. Antokhonov B.V., Berezhnev S.F., Budnev N.M. et al. "The new Tunka-133 EAS Cherenkov array: Status of 2009" // *Nuclear Instruments and Methods A*. – 2011. – Vol.628. – p.124.
96. Prosin V.V., Berezhnev S.F., Budnev N.M., et al. "Tunka-133: Results of 3 year operation" // *Nuclear Instruments and Methods A*. – 2014. – Vol.756. – p.94.
97. Бережнев С.Ф., Буднев Н.М., Гресс О.А., и др. "Энергетический спектр и массовый состав космических лучей по данным установки Тунка-133" //

Известия РАН. Серия физическая. – 2015. – Т.79. – №3. – с.377.

98. Budnev N.M., Chiavassa A., Gress O.A., et al. "The primary cosmic-ray energy spectrum measured with the Tunka-133 array" // *Astroparticle Physics*. – 2020. – Vol.117. – p.102406.

99. Буднев Н.М., Иванова А.Л., и др. "Возможности сцинтилляционного эксперимента Tunka-Grande в изучении массового состава космических лучей" // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2015. – №2. – с.80.

100. Монхоев Р.Д., Буднев Н.М., Воронин Д.М., и др. "Поиск диффузного гамма-излучения по данным установки Tunka-Grande" // Известия РАН. Серия физическая. – 2019. – Т.83. – №8. – с.1057.

101. Budnev N., et al. (TAIGA Collab.) "The TAIGA experiment: from cosmic ray to gamma-ray astronomy in the Tunka valley" // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol.718. – p.052006.

102. Буднев Н.М., Астапов И.И., Безъязыков П.А., Борейко А.В., Бородин А.Н., Гармаш А.Ю., Гафаров А.Р., Горбунов Н.В., Гребенюк В.М., Гресс О.А., Гресс Т.И., Гринюк А.А., Гришин О.Г., Дячок А.Н., Журов Д.П., Загородников А.В., Зурбанов В.Л., Иванова А.Л., Казарина Ю.А., Калмыков Н.Н. и др. "Эксперимент TAIGA: от физики космических лучей к гамма-астрономии в Тункинской долине" // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. – 2018. – Т.49. – №4. – С.1031-1048

103. Gluzykont M., et al. "The ground-based large-area wide-angle  $\gamma$ -ray and cosmic-ray experiment HiSCORE" // *Advances in Space Research*. – 2011. – Vol.48. – p.1935.

104. Gluzykont M., et al "The HiSCORE concept for gamma-ray and cosmic-ray astrophysics beyond 10 TeV" // *Astroparticle Physics*. – 2014. – Vol.56. – p.42.

105. Астапов И.И., Барбашина Н.С., Богданов А.Г., Борейко В., Буднев Н.М., Вишневский Р., Гафаров А.Р., Гребенюк В., Гресс О.А., Гресс Т.И., Гринюк А.А., Гришин О.Г., Горбунов Н., Дьячок А.Н., Епимахов С.Н., Загородников А.В., Зурбанов В.Л., Иванова А.Л., Казарина Ю.А., Калмыков Н.Н. и др. "Прототип установки TAIGA-HiSCORE: статус и первые результаты" // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2017. – Т.81. – №4. – С.495-498.

106. Gress O., et al. (TAIGA Collab.) "The wide-aperture gamma-ray telescope TAIGA-HiSCORE in the Tunka Valley: Design, composition and commissioning" // *Nuclear Instrument and Method A*. – 2017. – Vol.845. – p.367.

107. Kuzmichev L., et al. (TAIGA Collab.) "Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy (TAIGA): Status, results and perspectives" // EPJ Web of Conferences, ISVHECRI 2016. – DOI: 10.1051/epjconf/201714501001. – 2017. – Vol.145. – ID:01001. – 8pp.
108. Кузьмичев Л.А., Астапов И.И., Безъязыков П.А., Борейко В., Бородин А.Н., Буднев Н.М., Вишневский Р., Гармаш А.Ю., Гафаров А.Р., Горбунов Н.В., Гребенюк В.М., Гресс О.А., Гресс Т.И., Гринюк А.А., Гришин О.Г., Дячок А.Н., Загородников А.В., Зурбанов В.Л., Иванова А.Л., Казарина Ю.А. и др. "Гамма-обсерватория TAIGA - статус и перспективы" // Ядерная физика. -- 2018. -- Т.81. -- No 4. -- С.469-480.
109. Porelli A., et al. (TAIGA Collab.) "TAIGA-HiSCORE detection of the CATS-LIDAR on the ISS as fast moving point source" // Proceedings of 35th International Cosmic Ray Conference – PoS(ICRC2017). – 2017. – Vol.754. – 9pp.
110. TAIGA homepage. Facility in the Tunka valley. "TAIGA-IACT" // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://taiga-experiment.info/taiga-iact>
111. Kuzmichev L., et al. (TAIGA Collab.) "TAIGA Gamma Observatory: Status and Prospects" // Physics of Atomic Nuclei. – 2018. – Vol.81. – p.497.
112. Zhurov D.P., Gress O.A., et al. (TAIGA Collab.) "TAIGA-IACT pointing control and monitoring software status" // Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference – PoS(ICRC2021). – 2021. – Vol.395. – p.690.
113. Свешникова Л.Г., и др. (TAIGA Коллаб.) "Регистрация гамма-квантов от Крабовидной туманности и блазара Маркарян 421 в области энергий более 3 – 4 ТэВ атмосферным черенковским телескопом в эксперименте TAIGA" // Известия РАН. Серия Физическая. – 2021. – Т.85. – №4. – с.529.
114. Li T. and Ma Y. "Analysis Methods for results in gamma-ray astronomy" // Astrophysical Journal. – 1983. – Vol.272. – p.317.
115. Korosteleva E.E., et al. "Measurement of Cosmic Ray Primary Energy with the Atmospheric Cherenkov Light Technique in Extensive Air Showers" // Nuclear Physics B - Proceedings Supplements. – 2007. – Vol.165. – p.74.
116. Prosin V.V., Berezhnev S.F., Budnev N.M. et al. "Results from Tunka-133 (5 years observation) and from the Tunka-HiSCORE prototype" // EPJ Web of Conference, RICAP-2014. – 2016. – Vol.121. – ID:03004. – DOI:10.1051/epjconf/201612103004.

117. Prosin V.V., Budnev N.M., Chvalaiev O.A. et al. "The Cosmic Ray Mass Composition in the Energy Range  $10^{15} - 10^{18}$  measured with the Tunka Array: Results and Perspectives" // Nuclear Physics B - Proceedings Supplements. – 2009. – Vol.190. – p.247.
118. Budnev N., Chernov D., Gress O., et al. "Tunka-25 Air Shower Cherenkov array: The main results" // Astroparticle Physics. – 2013. – Vol.50. – p.18.
119. Просин В.В., Астапов И.И., Безъязыков П.А., Борейко В., Бородин А.Н., Брюкнер М., Буднев Н.М., Вишневецкий Р., Гармаш А.Ю., Гафаров А.Р., Горбунов Н.В., Гребенюк В.М., Гресс О.А., Гресс Т.И., Гринюк А.А., Гришин О.Г., Дячок А.Н., Журов Д.П., Загородников А.В., Зурбанов В.Л. и др. // "Энергетический спектр первичных космических лучей по данным установок для регистрации черенковского света ШАЛ Тунка-133 И TAIGA-NiSCORE" // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2019. – Т.83. – №8. – С.1117-1120.
120. Панов А.Д., Адамс Дж.Х. мл., Ан Х.С. и др. "Энергетические спектры обильных ядер ПКЛ по данным эксперимента АГИС-2 – окончательные результаты" // Известия РАН. Серия Физическая. – 2009. – Т.73. – №5. – с.602.
121. Gorbunov N., Grebenyuk V., Karmanov D. et al. "Energy spectra of abundant cosmic-ray nuclei in the NUCLEON experiment" // [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: [arXiv:astro-ph/1809.05333](https://arxiv.org/abs/1809.05333).
122. Alfaro R., et al. (HAWC Collab.) "All-particle cosmic ray energy spectrum measured by the HAWC experiment from 10 to 500 TeV" // Physical Review D. – 2017. – Vol.96. – ID:122001. – 14pp. [Электронный ресурс]. – 2021. – URL: <https://arxiv.org/abs/1710.00890>, <https://arxiv.org/abs/2108.04748>.
123. Abu-Zayyad T., Aida R., Allen M. et al. "The Energy Spectrum of Ultra-High-Energy Cosmic Rays Measured by the Telescope Array FADC Fluorescence Detectors in Monocular Mode" // Astroparticle Physics. – 2013. – Vol.48. – p.16.
124. Pierre Auger Collaboration. "The Pierre Auger Observatory: Contributions to the 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC 2013)" // Proceedings of 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio De Janeiro 2013. The Astroparticle Physics Conference. [Электронный ресурс]. – 2013. – URL: <https://arxiv.org/abs/1307.5059>.
125. Калмыков Н.Н., Кузьмичев Л.А., Куликов Г.В., Просин В.В., Сулаков В.П., Фомин Ю.А. "Спектр и состав космических лучей при энергиях  $10^{15} - 10^{18}$  эВ" // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2010. – №4. – с.40.

126. Kotera K. and Lemoine M. "Inhomogeneous extragalactic magnetic fields and the second knee in the cosmic ray spectrum" // [Электронный ресурс]. – 2007. – URL: arXiv:astro-ph/0706.1891.
127. Kaung T. "Detection of cosmic rays in the PeV to EeV energy range" // [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: arXiv:astro-ph.HE/1702.08743.
128. Sveshnikova L., et al. (TAIGA Collab.) "Interpretation of cosmic ray spectrum above the knee measured by the Tunka-133 array" // Nuclear Physics B - Proceedings Supplements. – 2014. – Vol.256. – p.218.
129. Abbott B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. "Astrophysical Implications of the Binary Black-hole Merger GW150914" // The Astrophysical Journal Letters. – 2016. – Vol.818. – №2. – ID:L22. – 15 pp.
130. Gress O., et. al. "MASTER: PSN in PGC421615 and 3 dwarf nova outbursts" // ATel#8065. [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=8065>.
131. Lipunov V.M., et al. "First gravitational-wave burst GW150914: MASTER optical follow-up observations" // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2016. – Vol.465. – №3. – p.3656. [Электронный ресурс]. – 2016. – URL: <https://arxiv.org/abs/1605.01607>.
132. Gress O., et. al. "MASTER: 2 optical transients" // ATel#8087. [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: <https://www.astronomerstelegam.org/?read=8087>.
133. Ershova O. A., Lipunov V. M., Gorbovskoy E. S., Tyurina N. V., Kornilov V. G., Zimnukhov D. Gabovich S., A., Gress O. A., et al., "Early Optical Observations of Gamma-Ray Bursts Compared with Their Gamma- and X-Ray Characteristics Using a MASTER Global Network of Robotic Telescopes from Lomonosov Moscow State University" // Astronomy Reports. – 2020. – Vol.64. – p.126.
134. Gress, O. A., Lipunov, V. M., Budnev, N. M., et al., "MASTER possible optical counterpart of IceCube Alert 220220.60 / AMON NuEm-220220A" - 2022. - The Astronomer's Telegram,15231,1
135. Gress, O., Lipunov, V., Podesta, R., et al., "MASTER-OAFA: SN in S0 PGC130509 and new OT at the earliest stage of the outburst" // [Электронный ресурс]. - 2020. - The Astronomer's Telegram,13419,1
136. Gress, O., Gorbovskoy, E., Lipunov, V., et al., "MASTER: outburst detection with  $\text{amp} > 5.1\text{m}$ ." // [Электронный ресурс]. - 2019. - The

Astronomer's Telegram,13350,1

137. Gress, O., Lipunov, V., Rebolo, R., et al., "MASTER-IAC: new optical source with  $\text{ampl} > 5.5\text{m}$ ." // [Электронный ресурс]. - 2019. - The Astronomer's Telegram,13015,1

138. Gress, O., Pogrosheva, T., Balanutsa, P., et al., "MASTER: OT outbursts." - 2019. - The Astronomer's Telegram,12758,1

139. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskey, E., et al., "MASTER optical analysis of IceCube 190331A alert." // [Электронный ресурс]. - 2019. - The Astronomer's Telegram,12627,1

140. Gress, O., Lipunov, V., Tlatov, A., et al., "MASTER: OT early outburst with  $\text{ampl} > 5.3\text{mag}$ ." // [Электронный ресурс]. - 2019. - The Astronomer's Telegram,12607,1

141. Gress, O., Budnev, N., Lipunov, V., et al., "MASTER Pre-discovery Observations of the Possible Nova in M31." // [Электронный ресурс]. - 2018. - The Astronomer's Telegram,12308,1

142. Gress, O., Lipunov, V., Buckley, D., et al., "MASTER bright OT detection during Fermi GBM trigger inspection in SDSS galaxy direction." // [Электронный ресурс]. - 2018. - The Astronomer's Telegram,11935,1

143. Gress, O., Lipunov, V., Buckley, D., et al., "MASTER: new CV outburst at early stage." // [Электронный ресурс]. - 2018. - The Astronomer's Telegram,11920,1

144. Gress, O., Balanutsa, P., Lipunov, V., et al., "Master: 2 OTs." // [Электронный ресурс]. - 2017. - The Astronomer's Telegram,10762,1

145. Gress, O., Lipunov, V., Podesta, R., et al., "MASTER: PSN in Sloan galaxy." // [Электронный ресурс]. - 2017. - The Astronomer's Telegram,10688,1

146. Gress, O., Lipunov, V., Buckley, D., et al., "Master: new OT." // [Электронный ресурс]. - 2017. - The Astronomer's Telegram,10577,1

147. Gress, O., Lipunov, V., Buckley, D., et al., "MASTER-SAAO: OTs detection." // [Электронный ресурс]. - 2017. - The Astronomer's Telegram,10548,1

148. Gress, O., Pogrosheva, T., Lipunov, V., et al., "MASTER: optical

transients." // [Электронный ресурс]. - 2017. - The Astronomer's Telegram,10465,1

149. Gress, O., Tiurina, N., Lipunov, V., et al., "Three OT detected by MASTER." // [Электронный ресурс]. - 2017. - The Astronomer's Telegram,10332,1

150. Gress, O., Pogrosheva, T., Shumkov, V., et al., "MASTER: QSO flares, PSN and dwarf novae outbursts." // [Электронный ресурс]. - 2017. - The Astronomer's Telegram,10233,1

151. Gress, O., Balanutsa, P., Lipunov, V., et al., "MASTER: dwarf novae outbursts." // [Электронный ресурс]. - 2017. - The Astronomer's Telegram,10061,1

152. Gress, O., Lipunov, V., Podesta, R., et al., "MASTER-OAFA: OT detection during inspection." // [Электронный ресурс]. - 2017. - The Astronomer's Telegram,10045,1

153. Gress, O., Lipunov, V., Rebolo, R., et al., "MASTER-IAC: 2 optical transients." // [Электронный ресурс]. - 2017. - The Astronomer's Telegram,10015,1

154. Gress, O., Lipunov, V., Tlatov, A., et al., "MASTER: bright PSN in PGC054434." // [Электронный ресурс]. - 2016. - The Astronomer's Telegram,9757,1

155. Gress, O., Shumkov, V., Pogrosheva, T., et al., "MASTER: bright BLA flares detection, QSO,PSN, YSOs,OT." // [Электронный ресурс]. - 2016. - The Astronomer's Telegram,9578,1

156. Gress, O., Lipunov, V., Lopez, R. R., et al., "MASTER-IAC: very bright high amplitude OT." // [Электронный ресурс]. - 2016. - The Astronomer's Telegram,9266,1

157. Gress, O., Shurpakov, S., Pogrosheva, T., et al., "MASTER: PSN in interacting galaxy, dwarf nova and possible YSO objects." // [Электронный ресурс]. - 2016. - The Astronomer's Telegram,9204,1

158. Gress, O., Balanutsa, P., Vladimirov, V., et al., "MASTER: 6 optical transients." // [Электронный ресурс]. - 2016. - The Astronomer's Telegram,9120,1

159. Gress, O., Pogrosheva, T., Lipunov, V., et al., "Master-Iac Master-Saao 2 bright OTs." // [Электронный ресурс]. - 2016. - The Astronomer's Telegram,9078,1
160. Gress, O., Lipunov, V., Lopez, R. R., et al., "MASTER-IAC: PSN in SDSS galaxy." // [Электронный ресурс]. - 2016. - The Astronomer's Telegram,8894,1
161. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER-Kislovodsk: bright OT with 7mag amplitude." // [Электронный ресурс]. - 2016. - The Astronomer's Telegram,8730,1
162. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER-Net optical transients." // [Электронный ресурс]. - 2016. - The Astronomer's Telegram,8631,1
163. Gress, O., Vladimirov, V., Lipunov, V., et al., "MASTER: bright OTs." - 2016. - The Astronomer's Telegram,8605,1
164. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "Very Bright OT detected by MASTER-SAAO." // [Электронный ресурс]. - 2016. - The Astronomer's Telegram,8596,1
165. Gress, O., Popova, E., Lipunov, V., et al., "MASTER Net: 3 dwarf nova outbursts." - 2016. - The Astronomer's Telegram,8522,1
166. Gress, O., Balanutsa, P., Vladimirov, V., et al., "MASTER: QSO optical flare and 6mag amplitude dwarf nova outburst." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8465,1
167. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER: bright dwarf nova outburst and additional observations to PNV J01334726+3026513." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8416,1
168. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER: bright PSN in NGC5483." - 2015. - The Astronomer's Telegram,8415,1
169. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER-Tunka: bright dwarf nova outburst." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8373,1
170. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER-IAC: QSO or bright dwarf nova outburst." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8359,1
171. Gress, O., Vladimirov, V., Lipunov, V., et al., "MASTER-SAAO,

MASTER-Tunka : dwarf novae outbursts." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8346,1

172. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER: dwarf novae outbursts." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8334,1

173. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER-Net: dwarf novae outbursts." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8307,1

174. Gress, O., Balanutsa, P., Lipunov, V., et al., "MASTER: bright dwarf nova outburst and 2 OT." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8293,1

175. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER: new short optical transient." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8160,1

176. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER: blue OT and dwarf nova outburst." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8140,1

177. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER: PSN in SDSS galaxy." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8113,1

178. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER: bright PSN in UGC00402." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8112,1

179. Gress, O., Balanutsa, P., Lipunov, V., et al., "MASTER: 2 optical transients." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8087,1

180. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER: PSN in PGC2695052 during Inspect of Fermi trigger 464366002." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8075,1

181. Gress, O., Balanutsa, P., Lipunov, V., et al., "MASTER: PSN in PGC421615 and 3 dwarf nova outbursts." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8065,1

182. Gress, O., Balanutsa, P., Lipunov, V., et al., "MASTER: 4 optical transients." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8020,1

183. Gress, O., Vladimirov, V., Lipunov, V., et al., "MASTER-IAC: 3 possible dwarf nova outburst." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8013,1
184. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER-IAC: possible superluminous SN." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,8009,1
185. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER-IAC: new dwarf nova outburst." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,7991,1
186. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER-Kislovodsk: bright dwarf nova outburst." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,7972,1
187. Gress, O., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al., "MASTER: bright dwarf nova outburst." // [Электронный ресурс]. - 2015. - The Astronomer's Telegram,7970,1
188. Пресс-конференция 03.06.2020 семинар ОСА, Москва, ГАИШ МГУ. "Локализация источника космических нейтрино высоких энергий" // [Электронный ресурс]. - 2020. - URL: <http://www.pereplet.ru/lipunov/530.html#530>
189. V.M. Lipunov, V.G. Kornilov, K. Zhirkov, E. Gorbovskoy, N.M. Budnev, D.A.H. Buckley, R. Rebolo, M. Serra-Ricart, R. Podesta, N.Tyurina, O. Gress, Yu. Sergienko, V. Yurkov, A. Gabovich, P. Balanutsa, I. Gorbunov et al. "Пресс-релиз; Локализация источника космических нейтрино высоких энергий" // [Электронный ресурс]. - 2020. - URL: [http://www.pereplet.ru/lipunov/images/MASTER\\_PRESS200605.pdf](http://www.pereplet.ru/lipunov/images/MASTER_PRESS200605.pdf)
190. Калмыков Н.Н., Кузьмичев Л.А. и др. "Спектр и состав космических лучей при энергиях  $10^{15} - 10^{18}$  эВ". // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика и Астрономия. - 2010. - №4. - с.40.
191. Астапов И.И., ..., Гресс О.А., и др. "Изучение космических лучей на астрофизическом комплексе TAIGA: результаты и планы". // Журнал теоретической и экспериментальной физики. - 2022. - Т.161(4) - С.548 - 559.

192. Зимнухов Д., ..., Гресс О.А., и др. "Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР: наблюдения астероида NEA 2015 TB145" // *Астрономический журнал*. – 2019. – Т.96. – С.1031.

193. Буднев Н.М., Иванова А., Калмыков Н. "Исследования области перехода от галактических к внегалактическим космическим лучам на установках для регистрации широких атмосферных ливней". // *Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. – 2017. – Т.6. – С.3.