

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 и астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в лаборатории космического мониторинга Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга МГУ имени М. В. Ломоносова на Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР (Программа развития МГУ) и на установках TAIGA-HiSCORE, Тунка-133.

Научные руководители

- *Липунов Владимир Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, Почетный профессор МГУ*
- *Буднев Николай Михайлович, доктор физико-математических наук*

Официальные оппоненты

- *Расторгуев Алексей Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Физический факультет кафедра экспериментальной астрономии, заведующий*
- *Чугай Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, Институт астрономии Российской академии наук, отдел нестационарных звезд и звездной спектроскопии, главный научный сотрудник*
- *Долгов Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, физический факультет, лаборатория космологии и физики элементарных частиц, заведующий*

Защита диссертации состоится « 13 » октября 2022 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.013.1(МГУ.01.02) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: mr.grol08@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/471184614/>

Автореферат разослан «12» сентября 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук

О.М. Белова

Общая характеристика работы.

Работа посвящена многоканальным исследованиям на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ [1-6] астрофизических источников высоких энергий во Вселенной [1-29]: мультиплета нейтрино IC160217 [11], полей ошибок алертов нейтринной обсерватории АНТАРЕС (ANTARES), кандидатов в их возможные источники [3,12], исследованию оптических транзиентов, обнаруженных на широкопольных изображениях телескопов МАСТЕР [3, 12] в результате инспекции гравитационно-волновых алертов и областей гамма-всплесков; а также исследованию на установках Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE энергетического спектра первичных космических лучей [16-22, 30]. 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 [30]. 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 π -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 [30-32]. 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 [30].

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 работы.

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;

- 2) обнаружить миллисекундный пульсар внутри поля ошибок нейтринного

события ANTARES-150901.32;

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

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

5) обнаружить оптические источники десятков гамма-всплесков [1-5, 8-9, 14-15, 25-29] на ранней стадии;

б) 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 (МАСТЕР – лидер по ранним наблюдениям [15]) 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 [13, 23, 24, 29]. Из всех частиц сверхвысоких энергий по Вселенной свободно перемещаются только нейтрино, они были найдены, а вот где и как они

рождаются – до сих пор оставалось загадкой [13, 23, 24, 29]. В 2015 г. нейтринные детекторы перешли на режим автоматической передачи информации о срабатывании триггера в течение сроков от суток до первой минуты после регистрации, поэтому необходимо иметь возможность в течение первой минуты наводиться в любую точку неба по сигналу с нейтринных детекторов и осуществить быстрый обзор [23-29]. 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) [13, 23, 24, 29]. Во время работы обнаружены 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). 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 (как показатель эффективности проводимого обзора).

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) [33]; 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.

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 роботизированные телескопах, как это реализовано в программном комплексе на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ [1-5, 15, 25-29], 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 [1-5, 15, 23-29].

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 [1-5, 15, 25-29].

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) [1-5, 15, 25-29]). Достоверность обнаруженных объектов, эффективность выбранной методологии обнаружения объектов и их фотометрия подтверждаются наблюдениями других научных групп и последующими 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 высокоэнергетических 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 [1-33]. 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 [23-29]. 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, свидетельствующую 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 MASTER, в результате инспектирования поля ошибок гравитационно-волнового события GW151226, является непериодической 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 MASTER-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 ± 0.01 при энергиях меньших $2 \cdot 10^{16}$ эВ, до -2.99 ± 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 автора равен 27 (ADS).

Количество цитирования работ автора 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., et al. " 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., Gorbovskoy 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., Gorbovskoy E., Tiurina N., Kuznetsov A., Balanutsa P., Chazov V., Gress O., Kuvshinov D., Vladimirov V., Buckley D., Rebolo R., et al. "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., Корнилов В., Жирков К., Горбовской Е., Бакли Д., Реbolo Р., Сьерра-Рикарт М., Подеста Р., Тюрина Н., Гресь О., Сергиенко Ю., 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., Попова Е., Астапов И., Барабашина Н., Богданов А., Борейко В., Буднев Н., Воронин Д., Вишневский Р., Гресс О. 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., Astapov I., Bezyazeev P., Bogdanov A., Boreyko V., Brueckner M., Chiavassa A., Chvalaev O., Lubsandorzhiev N., Mirgazov R., Lubsandorzhiev B., Lenok V., Kuzmichev L., Kunas M., 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 мультитплета 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).

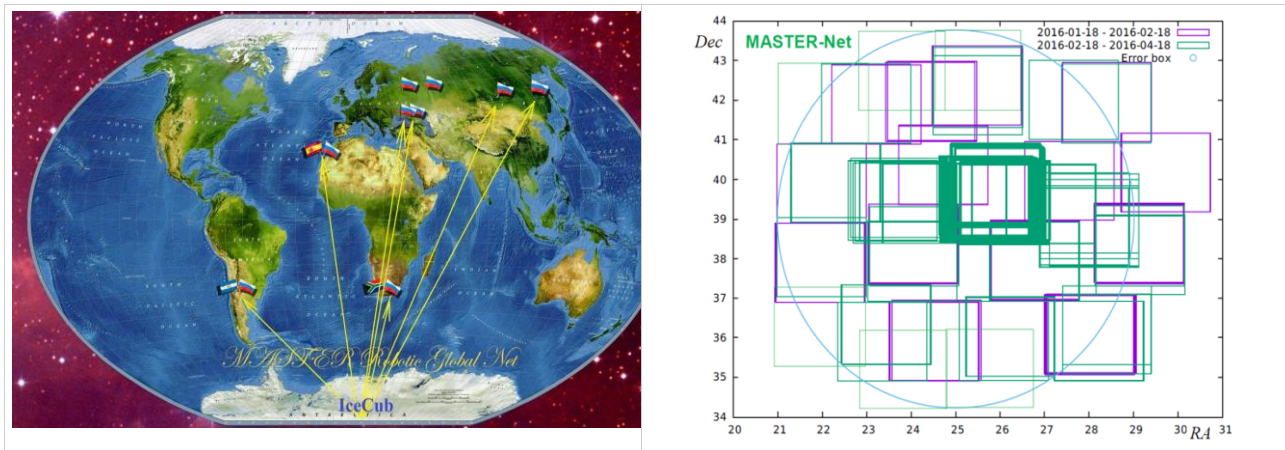


Рис. 1. Взаимодействие телескопов-роботов Глобальной сети МАСТЕР и IceCube в исследовании IC160217 и карта покрытия МАСТЕРом его поля ошибок.

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 шурфах километровой глубины установки IceCube. Обычное событие на детекторе – регистрация пролета одного нейтрино, но 17.02. 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, самая крупная попытка наблюдений в новой области физики, – нейтринной внегалактической астрономии. Россия была представлена Глобальной сетью МАСТЕР, которая внесла наибольший вклад в оптическую поддержку IC160217.

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.

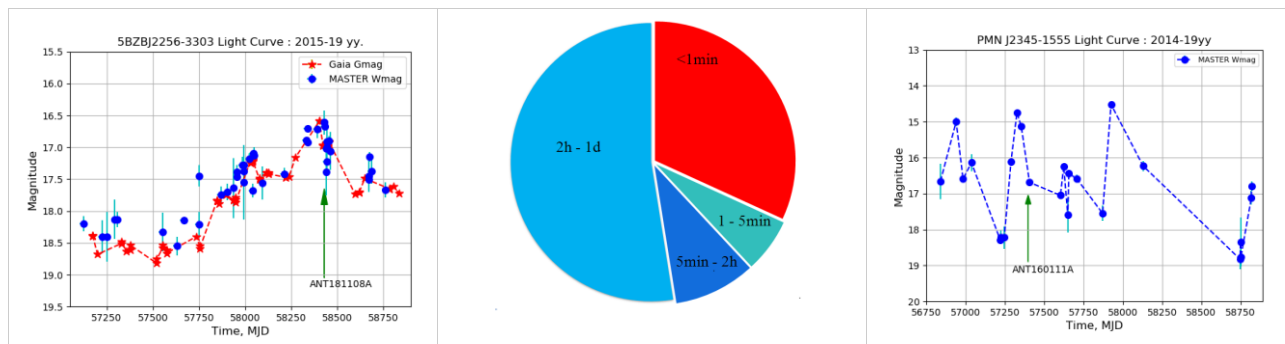


Рис. 2. Переменность в оптическом диапазоне по данным, полученным на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ, с использованием данных Gaia, для блазаров 5BZBJ 2256-3303 (слева) и PMNJ2345-1555 (справа), находящихся внутри полей ошибок нейтринных событий ANT181108A и ANT160111A; и диаграмма начала алертных наблюдений (середина).

В *Главе 3* представлены результаты исследования черенковского света широких атмосферных ливней (ШАЛ), поток которых пропорционален энергии первичной частицы (Рис. 3). 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 θ 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 15%. Энергетический порог установки TAIGA-HiSCORE при регистрации гамма-излучения составляет ~40 ТэВ, для космических лучей ~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.

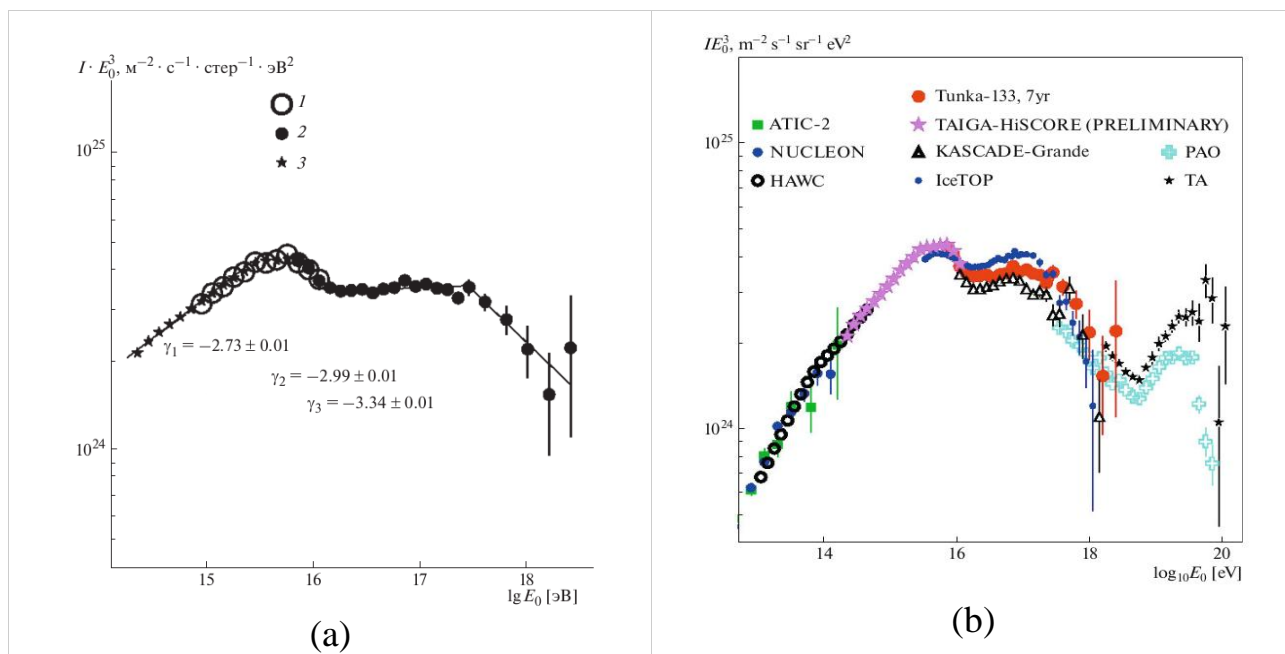


Рис. 3. (а) Дифференциальный энергетический спектр, полученный на установках: (1) - Тунка-25, (2) — Тунка-133, (3) - TAIGA-HiSCORE. (б) Энергетический спектр первичных космических лучей по данным Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE в сравнении с результаты других экспериментов (PAO - Pierre Auger Observatory, TA - Telescope Array).

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

Список литературы.

1. Lipunov V., Kornilov V. et al. "Master Robotic Net" // *Advances in Astronomy*. – 2010. – Vol.2010. – ID349171. – DOI:10.1155/2010/349171
2. Kornilov V., Lipunov V. et al. "Robotic optical telescopes global network MASTER II. Equipment, structure, algorithms" // *Experimental Astronomy*. – 2012 – Vol.33. – p.173.
3. Lipunov V. M., Kornilov V. G. et al. "MASTER Real Time Multimessage Observations of High Energy Phenomena" // *Universe*. – 2022. – Vol.8. – p.271.
4. Липунов В.М., ..., Гресс О.А., и др. "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.
5. Troja E., Lipunov V., et al. Gress O. et al. "Significant and variable linear polarization during the prompt optical flash of GRB 160625B" // *Nature*. – 2017. – Vol.547. – p.425.
6. Lipunov V.M., Kornilov V., Gorbovskey E., ..., 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.

7. Abbott B....Gress O.et al. "Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914" // The Astrophysical Journal Letters. – 2016. – Vol.826. – №1. – L13.
8. 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.
9. Abbott B. ..Gress O.et al. "Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger" // The Astrophysical Journal Letters. – 2017. – Vol.848. – №2. – L12.
10. Abbott B. ..Gress O.et al. "A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant" // Nature. – 2017. – Vol.551. – p.85.
11. Aartsen M. ..Gress O. et al., Master Collaboration: Lipunov V., ..., Gress O.A. et al. "Multiwavelength follow-up of a rare IceCube neutrino multiplet" // Astronomy and Astrophysics. – 2017. – Vol.607A. – p.115.
12. 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.
13. Lipunov V.M., Kornilov V.G. ..Gress O. et al. "Optical Observations Reveal Strong Evidence for High-energy Neutrino Progenitor" // Astrophysical Journal Letters. – 2020. – Vol.896. – L19.
14. Lipunov V., Simakov S., Gorbovskoy E., Vlasenko D. "Smooth Optical Self-similar Emission of Gamma-Ray Bursts" // The Astrophysical Journal. – 2017. – Vol.845. – №1. – p.52.
15. Ershova O. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Буднев Н.М., ..., Гресс О.А., 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.
19. 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.
20. Кузьмичев Л.А., Астапов И.И., Безъязыков П.А., Борейко В., Бородин А.Н., Буднев Н.М., ..., Гресс О.А., и др. "Гамма-обсерватория TAIGA - статус и перспективы" // Ядерная физика. -- 2018. -- Т.81. -- No 4. -- С.469-480.
21. Просин В.В., ..., Гресс О.А., и др. // "Энергетический спектр первичных космических лучей по данным установок для регистрации черенковского света ШАЛ Тунка-133 И TAIGA-HiSCORE" // Известия Российской академии наук.

Серия физическая. – 2019. – Т.83. – №8. – С.1117-1120.

22. 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.

23. 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>

24. 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 et al. Пресс-релиз "Локализация источника космических нейтрино высоких энергий" // [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: http://www.pereplet.ru/lipunov/images/MASTER_PRESS200605.pdf

25. Горбовской Е. "Исследования собственного излучения гамма-всплесков при помощи сети телескопов-роботов МАСТЕР" // Кандидатская диссертация по специальности 01.03.02 (2012).

26. 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).

27. Владимиров В . "Создание центра оперативного контроля телескопов Глобальной сети МАСТЕР и исследование некоторых астрофизических транзиентов" // Кандидатская диссертация по специальности 01.03.02 (2019).

28. 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).

29. Горбунов И .А. " Некоторые результаты роботизации многоканальных исследований Глобальной сети МАСТЕР МГУ " // Кандидатская диссертация по специальности 01.03.02 (2021).

30. Кузьмичев Л.А. Курс лекций "Нейтринная астрофизика" // [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/neutrino_astr/na7.htm

31. Amenomori M., et al. (Tibet ASy Collab.) "First Detection of Photons with Energy beyond 100 TeV from an Astrophysical Source" // Physical Review Letters.– 2019. – Vol.123. – №5. – p.051101.

32. Cao, Z., Aharonian, F.A., An, Q., et al. " Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources" // Nature. – 2021. – Vol.594. – №7861. – p.33.

33. 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.

