

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Горбунов Игорь Андреевич

**Некоторые результаты роботизации
многоканальных исследований Глобальной сети
МАСТЕР МГУ**

01.03.02 – “Астрофизика и звездная астрономия”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре экспериментальной астрономии физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова с использованием оборудования Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР МГУ (Программа развития МГУ) лаборатории космического мониторинга Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель — *Корнилов Виктор Геральдович, кандидат физико-математических наук, доцент*

Официальные оппоненты — *Бескин Григорий Меерович, доктор физико-математических наук, САО РАН, ведущий научный сотрудник, руководитель группы релятивистской астрофизики*

Июдин Анатолий Федорович, доктор физико-математических наук, доц., НИИЯФ МГУ, Отдел космических наук, Лаборатория космической рентгеновской и гамма-астрономии, заведующий лабораторией

Чугай Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, ИНАСАН, Отдел нестационарных звезд и звездной спектроскопии, главный научный сотрудник

Защита диссертации состоится «9» сентября 2021г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: fundphys@protonmail.com

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27). С информацией о регистрации участия в защите и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»:

<https://istina.msu.ru/dissertations/381889798/>

Автореферат разослан 5 августа 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук

М.В. Пружинская

1 Введение

Диссертационная работа “Некоторые результаты роботизации многоканальных исследований Глобальной сети МАСТЕР МГУ” посвящена исследованию астрофизических источников высоких энергий в гравитационно-волновой, нейтринной, гамма-астрономии и обеспечению проведения многоканальных наблюдений на телескопах Глобальной сети МАСТЕР МГУ. В работе представлен анализ астроклиматических характеристик мест установки телескопов-роботов МАСТЕР [1-7], обсуждается важность обеспечения высокого фотометрического качества широкопольных изображений, получаемых на них, включая создание системы контроля качества изображений, обеспечение ее автономной работы, выбор схемы фокусировки, создание программного комплекса математического сопровождения автоматического контроля качества для возможности проведения алертных и инспекционных наблюдений областей неопределенности (полей ошибок) источников гравитационных волн, гамма-всплесков и нейтрино высоких и сверхвысоких энергий телескопами-роботами Глобальной сети МАСТЕР МГУ, что обеспечивает оперативное обнаружение и исследование астрофизических источников событий, регистрируемых детекторами LIGO/Virgo, IceCUBE, ANTARES и др. [8-21].

2 Общая характеристика работы.

Роботизированные оптические обсерватории являются ключевыми инструментами исследований быстропротекающих явлений на масштабах времени от долей секунд до нескольких часов. В первую очередь это относится к нестационарным процессам взрывного характера, протекающим при образовании или во время активной фазы эволюции релятивистских звёзд: чёрных дыр, нейтронных звезд и белых карликов. Еще в конце прошлого века, автоматические небольшие телескопы положили начало массовому исследованию сверхновых звёзд, которое привело к открытию ускоренного расширения

Вселенной [22] и полуавтоматические телескопы среднего диаметра позволили открыть десятки тысяч малых тел Солнечной системы [23-26]. Однако только полностью роботизированные системы позволили наблюдать раннее оптическое излучение самых мощных, короткоживущих явлений и объектов во Вселенной - гамма-всплесков [8-11]. С другой стороны, начиная с середины прошлого десятилетия, крупные физические эксперименты, посвященные регистрации метагалактических нейтрино высоких энергий и источников гравитационных волн научились не только регистрировать Вселенную в абсолютно новых каналах, но и оперативно, практически в реальном времени, поставлять информацию ("алерты") о возможных координатах объекта и тем самым позволили провести первые многоканальные наблюдения, которые фактически привели к становлению двух новых наук: гравитационно-волновая астрономия [12-16] и внегалактическая нейтринная астрономия [17-19]. Таким образом, наблюдательная оптическая астрономия столкнулась с широким кругом наблюдений нового типа, требующих создания универсальной полностью роботизированной обсерватории. Именно с этой целью последние 20 лет в России и за рубежом началось строительство распределённых по широтам и долготам сетей полностью роботизированных телескопов. Здесь следует уточнить понятие "полностью роботизированных телескопов" или "телескопов-роботов" или "роботизированных сетей".

Телескоп-робот должен уметь без непосредственного участия человека автоматически:

1. Управлять обсерваторией, принимая во внимание астрономические (положение Солнца и Луны) и погодные условия в каждый момент времени.
2. Производить съёмку калибровок и площадок неба.
3. Проводить обработку изображений (то есть "наброс" астрометрической сетки и первичную фотометрию всех объектов на кадре) в реальном времени (то есть за время меньшее времени затраченного на получение кадра)

4. Отождествлять известные и выделять новые объекты на изображениях, отсутствующие во всех известных на момент наблюдений оптических каталогах и представлять результат “удаленному ответственному наблюдателю” в оперативной базе данных, так называемых, кандидатов в оптические транзиенты (ОТ), доступной для анализа через интернету круглосуточно.
5. В некоторых случаях робот обязан уметь отправлять короткие телеграммы или алерты другим роботизированным системам, публикующим результаты наблюдения. С такой программой сперва появились сети ROTSE (США), BOOTES (Испания), TOROT (Франция) [27-29] и др. Однако, все эти сети использовали разную идеологию развития и пришли к разным результатам. Например, телескопы BOOTES достаточно автоматизированы, имеют быстрые монтировки, но обладая малым полем зрения (несколько десятков угловых минут) несмотря широкий размах долгот и широт размещения могут “работать” только по объектам с хорошо определенными координатами. Из-за этого сеть BOOTES не принимает участия в оптической поддержке по локализации гравитационно-волновых или нейтринных экспериментов. Сеть автоматических телескопов ROTSE была первой и самой эффективной в 2000-е годы системой в области ранних наблюдений гамма-всплесков, однако с 2015 года по ряду причин прекратила свою работу. Эффективность ее определялась большим полем зрения (1.8 градуса) и хорошей программой оперативного реагирования на внешние алерты (сообщения о срабатывании триггера). Проблемой этой сети стало отсутствие эффективного математического обеспечения обработки наблюдения в реальном времени при проведении собственного обзора, тем не менее, в алертном режиме ROTSE сделал целый ряд важных открытий.

Имеется так же класс другого подхода к наблюдению оптических транзиентов, основанный на использовании уже имеющихся старых инструментов с некоторой автоматизацией самого процесса наведения, съемки и обработки. Это такие проекты как Каталина (обзор

CRTS), Palomar Transient Factory (PTF, iPTF) и современная модификация - проект Цвикки (ZTF) [30-32]. Такие телескопы не могут проводить оперативные алертные наблюдения, но обладая отличным математическим обеспечением в части обработки изображений в быстром режиме и поиска транзиентов участвуют в собственных обзорах и инспекциях больших полей ошибок в гравитационно-волновой, нейтринной, и гамма-астрономии. В России в 2002 году возникла идея создания универсальной (алертной, обзорной и инспекционной одновременно) Мобильной Астрономической Системы Телескопов Роботов - МАСТЕР [4]. Первоначально, проект был направлен на одну из самых технически трудных в тот момент задач оптической астрономии - регистрация собственного оптического излучения гамма-всплесков, то есть излучения, присутствующего в момент развития самого гамма-всплеска. В течении первых шести лет были проведены алертные и обзорные наблюдения, в процессе которых был создан пакет программ первого поколения отвечающих за автоматизацию управления павильоном, получения изображений и их астрометрическую и фотометрическую обработку [5]. В результате был разработан первый российский полностью роботизированный телескоп МАСТЕР-II [1, 2], который послужил основой создания российского сегмента Глобальной сети МАСТЕР МГУ (благодаря поддержке Программы развития МГУ и поддержке ОАО "Московское Объединение "Оптика"). Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ (далее – МАСТЕР) сочетает все лучшие качества упоминаемых выше сетей и установок. МАСТЕР представляет собой сеть следующего (второго) за ROTSE поколения телескопов-роботов. Во-первых, телескопы-роботы МАСТЕР способны проводить поляризационные и/или широкополосные наблюдения гамма-всплесков на самой ранней стадии появления излучения [8-11,33]. Во-вторых, сеть МАСТЕР имеет хорошее распространение по земному шару и главное, в-третьих, - эффективную программу обработки широкополосных изображений за время меньшее следующей экспозиции с полным отождествлением всех стационарных и движущихся объектов вплоть до автоматического написания телеграмм и алертов. Конечно, такой универсализм предполагает жесткие требования к стабильности и

быстроте работы всех узлов телескопов-роботов. И здесь был решен целый ряд новых научных и экспериментальных задач, таких как: создание первых версий автоматической обработки изображений (Белинский, 2008 "Робот-телескоп МАСТЕР: система автоматической обработки изображений и результаты наблюдений некоторых транзиентных объектов"), управления и создания универсального программно-математического комплекса поиска транзиентов (Горбовской 2012 "Исследования собственного излучения гамма-всплесков при помощи сети телескопов-роботов МАСТЕР"), роботизация сети в части создания объединенной базы данных (Кузнецов, 2019 г. "Создание динамически интегрированной базы данных роботизированной сети МАСТЕР и мониторинг исторической вспышки микроквазара V404 Cyg/2023+338 2015 года") и системы контроля работы счетно-электронных средств роботизированной сети (Владимиров, 2019 "Создание центра оперативного контроля телескопов Глобальной сети МАСТЕР и исследование некоторых астрофизических транзиентов"). При выборе мест установки телескопов-роботов МАСТЕР использовались результаты анализа климатических и астроклиматических параметров (в частности, исследования по программе В.Г.Корнилова MASS(multi-aperture scintillation sensor) и DIMM (Differential Image Motion Monitor) [34-36]. В настоящей диссертации главный упор делается на решение проблемы стабильности качества получаемых изображений на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ в части погодных, астроклиматических, фокусировочных, программно-математических узлов, обеспечивающих максимально возможный предел чувствительности в каждый текущий момент экспозиции. Именно решение этой задачи, в частности, позволило МАСТЕРу получить отличные независимые изображения Килоновой 17 августа 2017 года MASTER OT J130948.10-232253.3/SSS17a (LIGO/Virgo GW170817), провести уникальную фотометрию и осуществить независимую локализацию источника гравитационных волн GW170817, а также впервые определить постоянную Хаббла по измерению гравитационно-волнового импульса; а также открыть и интерпретировать падение оптической мощности сверхмассивной чёрной дыры (блазара TXS0506+056) телескопом-

роботом МАСТЕР-Таврида (МГУ, Крым, Россия) через 73 секунды (наведение за 27 секунд) после регистрации нейтрино высокой энергии ($>100\text{ТэВ}$) антарктической установкой IceCube.

3 Актуальность темы и степень ее разработанности.

В последние годы крупные физические эксперименты, посвященные регистрации метagalacticких нейтрино высоких энергий (IceCube, ANTARES, Баксанская нейтринная обсерватория) и источников гравитационных волн (LIGO/Virgo) начали оперативно автоматически обрабатывать детектируемые события и поставлять информацию ("алерты") о вероятных координатах их источников в режиме, близком к реальному времени. Это позволило провести первые многоканальные наблюдения, которые фактически привели к становлению двух новых наук: гравитационно-волновая астрономия и внегалактическая нейтринная астрономия. В России наибольший вклад в оптическую поддержку гравитационно-волновых и нейтринных экспериментов вносят телескопы-роботы Глобальной сети МАСТЕР МГУ, позволяя Московскому университету проводить исследования астрофизических источников высоких энергий на своем оборудовании на мировом уровне.

4 Цели и задачи работы.

Целью работы является обеспечение стабильного качества изображений при проведении оперативных многоканальных астрофизических исследований совместно с крупными физическими установками регистрации гравитационно-волновых сигналов от астрофизических источников (LIGO/Virgo) и регистрации нейтрино высоких и сверхвысоких энергий от астрофизических источников (ANTARES, IceCUBE и др). При этом решается задача отождествления новых источников информации о Вселенной с известными и гипотетиче-

скими астрофизическими объектами. Для достижения поставленной цели и решения основной задачи был проведен анализ погодных и астроклиматических характеристик места установки телескопов-роботов. С целью обеспечения стабильного качества изображений был проведен анализ схемы фокусировки, разработан и создан комплекс программно-математического обеспечения автономной работы и комплекс контроля качества изображений для телескопов-роботов Глобальной сети МАСТЕР МГУ.

5 Научная новизна.

Были разработаны и внедрены оригинальные устройства автоматического удержания качества изображений, что позволило осуществить первую в истории независимую локализацию источника гравитационных волн (GW170817); обнаружено падение оптической мощности сверхмассивной чёрной дыры (блазара TXS0506+056) телескопом-роботом МАСТЕР-Таврида (МГУ, Крым) через 73 секунды после регистрации нейтрино высокой энергии ($>100\text{ТэВ}$) антарктической установкой IceCube.

6 Практическая значимость.

Определяется возможностью обнаружения и оперативного исследования любых транзиентных объектов, обнаруживаемых программным обеспечением МАСТЕР на широкопольных изображениях, полученных телескопами-роботами Глобальной сети МАСТЕР МГУ в режиме реального времени по результатам проводимого инспекционного и алертного обзоров областей неопределенности (полей ошибок) источников гравитационных волн и нейтрино высоких и сверхвысоких энергий. С помощью разработанного диссертантом программного комплекса контроля качества изображений и обеспечения автономной работы на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ осуществляется непрерывный контроль дальнего и околоземно-

го пространства. Это позволяет оперативно проводить наблюдения, выделять оптический источник, анализировать его фотометрию, распределение энергии в различных диапазонах, делать выводы о процессах, происходящих в источнике, и оперативно публиковать результаты исследований астрофизических источников высоких энергий на телескопах МАСТЕР. Для достижения таких результатов становится особенно острой задача автоматического контроля и обеспечения фотометрического качества изображений, и вклад диссертанта в решение этой задачи трудно переоценить.

7 Объект и предмет исследования.

Объектом исследования являются астроклиматические условия в местах установки телескопов Глобальной сети МАСТЕР, а также блазар TXS 0506+056 и источник гравитационных волн GW170817.

8 Методология диссертационного исследования.

Методологией диссертационного исследования является использование накопленных многолетних данных контроля и управления телескопами Глобальной сети МАСТЕР с целью извлечения из них информации об астроклиматических характеристиках мест установки этих телескопов; а также рассмотрение изменения фотометрического сигнала от блазара TXS 0506+056 во время регистрации нейтринного триплета IceCube-170922A.

9 Положения, выносимые на защиту.

1. Проведенный анализ накопленных многолетних метеоданных и астроклиматических параметров в 8 пунктах северного и южного полушария позволяет определить основные астроклиматиче-

ские характеристики мест установки телескопов Глобальной сети МАСТЕР и его модификаций.

2. Разработанная конструкция для роботизации фокусирующего узла телескопа-робота МАСТЕР в Аргентине позволяет достигнуть высокого качества изображений на диффузном фоне галактики. Эффективность конструкции подтверждается первой в истории независимой локализацией источника гравитационных волн от сливающихся двойных нейтронных звезд.
3. Обеспечение высокого фотометрического качества изображений на телескопе-роботе МАСТЕР-Таврида позволяет наблюдать быструю оптическую переменность источников. Наблюдения такой переменности от блазара TXS 0506+056 во время нейтринного события IceCube-170922A указывают на их генетическую связь.

10 Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных изданиях, 10 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных “Scopus” и “Web of Science”, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. Lipunov V. M.; Kornilov V. G.; Zhirkov K. Gorbovskey E.; Budnev N. M.; Buckley D.; Rebolo R.; Serra-Ricart M.; Podesta R.; Tyurina N.; Gress O.; Sergienko Y.; Yurkov V.; Gabovich A.; Balanutsa P.; **Gorbunov I.**; Vlasenko D.; Balakin F.; Topolev V.; Pozdnyakov A.; Kuznetsov A.; Vladimirov V.; Chasovnikov A.; Kuvshinov D.; Grinshpun V.; Minkina E.; Petkov V.; Svertilov S. I.; Lopez C.; Podesta F.; Levato H.; Tlatov A.; Van Soelen B.; Razzaque S.; Böttcher M.
"Optical Observations Reveal Strong Evidence for High-energy Neutrino Progenitor"
ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, Volume: 896, Issue: 2,

Article Number: L19, DOI: 10.3847/2041-8213/ab96ba, Published:
JUN 2020

(импакт-фактор: 6.825 WoS)

2. Hu Y. -D.; Oates S. R.; Lipunov V. M. Zhang B. B.; Castro-Tirado A. J.; Jeong S.; Sánchez-Ramírez R.; Tello J. C.; Cunniffe R.; Gorbovskoy E.; Caballero-García M. D.; Pandey S. B.; Kornilov V. G.; Tyurina N. V.; Kuznetsov A. S.; Balanutsa P. V.; Gress O. A.; **Gorbunov I.**; Vlasenko D. M.; Vladimirov V. V.; Budnev N. M.; Balakin F.; Ershova O.; Krushinski V. V.; Gabovich A. V.; Yurkov V. V.; Gorosabel J.; Moskvitin A. S.; Burenin R. A.; Sokolov V. V.; Delgado I.; Guziy S.; Fernandez-García E. J.; Park I. H.

"Multiwavelength observations of GRB 140629A.

A long burst with an achromatic jet break in the optical and X-ray afterglow"

ASTRONOMY & ASTROPHYSICS, Volume: 632, Article Number:
A100, DOI: 10.1051/0004-6361/201834959, Published: DEC 10 2019

(импакт-фактор 5.203 WoS)

3. Abbott B. P.; Abbott R.; Abbott T. D. and 1311 more ... Lipunov V. M.; Gorbovskoy E.; Kornilov V. G.; Tyurina N.; Balanutsa P.; Vlasenko D.;

Gorbunov I.; Podesta R.; Levato H.; Saffe C.; Buckley D. A. H.; Budnev N. M.; Gress O.и др.

"A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant"

NATURE, Volume: 551, Issue: 7678, Pages: 85-88, DOI: 10.1038/nature24471,
Published: NOV 2 2017

(импакт-фактор: 54.637 WoS)

4. Lipunov V. M.; Gorbovskoy E.; Kornilov V. G.; . Tyurina N.; Balanutsa P.; Kuznetsov A.; Vlasenko D.; Kuvshinov D.; **Gorbunov I.**; Buckley D. A. H.; Krylov A. V.; Podesta R.; Lopez C.; Podesta F.; Levato H.; Saffe C.; Mallamachi C.; Potter S.; Budnev N. M.; Gress O.; Ishmuhametova Yu.; Vladimirov V.; Zimnukhov D.; Yurkov V.; Sergienko Yu.; Gabovich A.; Rebolo R.; Serra-Ricart M.; Israelyan G.; Chazov

V.; Wang Xiaofeng; Tlatov A.; Panchenko M. I.
"MASTER Optical Detection of the First LIGO/Virgo Neutron Star
Binary Merger GW170817"
ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, Volume: 850, Issue: 1,
Article Number: L1, DOI: 10.3847/2041-8213/aa92c0, Published: NOV
20 2017
(импакт-фактор: 6.825 WoS)

5. Abbott B. P.; Abbott R.; Abbott T. D. и др. Lipunov V. M.; Gorbovskoy E. S.; Kornilov V. G.; Tyurina N. V.; Balanutsa P. V.; Kuznetsov A. S.; Vlasenko D. M.; Podesta R. C.; Lopez C.; Podesta F.; Levato H. O.; Saffe C.; Mallamaci C. C.; Budnev N. M.; Gress O. A.; Kuvshinov D. A.; **Gorbunov I. A.**; Vladimirov V. V.; Zimmukhov D. S.; Gabovich A. V.; Yurkov V. V.; Sergienko Yu. P.; Rebolo R.; Serra-Ricart M.; Tlatov A. G.; Ishmuhametova Yu. V.; MASTER Collaboration и др.

"Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger"
ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, Volume: 848, Issue: 2,
Article Number: L12, DOI: 10.3847/2041-8213/aa91c9, Published:
OCT 20 2017
(импакт-фактор: 6.825 WoS)

6. Lipunov V. M.; Blinnikov S.; Gorbovskoy E.; Tutukov A.; Baklanov P.; Krushinski V.; Tiurina N.; Balanutsa P.; Kuznetsov A.; Kornilov V.; **Gorbunov I.**; Shumkov V.; Vladimirov V.; Gress O.; Budnev N. M.; Ivanov K.; Tlatov A.; Gabovich A.; Yurkov V.; Sergienko Yu.; Zalozhnykh I.

"MASTER OT J004207.99+405501.1/M31LRN 2015 luminous red
nova in M31: discovery light curve hydrodynamics and evolution"
MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY,
Volume: 470, Issue: 2, Pages: 2339-2350, DOI: 10.1093/mnras/stx1107,
Published: SEP 2017
(импакт-фактор: 4.957 WoS)

7. Kornilov V.; Kornilov M.; Voziakova O.; Shatsky N.; Safonov B.; **Gorbunov I.**; Potanin S.; Cheryasov D.; Senik V.

"Night-sky brightness and extinction at Mt Shatdzhatmaz"
MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY,
Volume: 462, Issue: 4, Pages: 4464-4472, DOI: 10.1093/mnras/stw1839,
Published: NOV 11 2016
(импакт-фактор: 4.957 WoS)

8. 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.; Ivanov K. I.; Yazev S. A.; Tlatov A. G.; Senik V. A.; Dormidontov D. V.; Parhomenko A. V.; Krushinski V. V.; Zalozhnych I. S.; Castro-Tirado R. Alberto; Sánchez-Ramírez R.; Sergienko Yu. P.; Gabovich A.; Yurkov V. V.; Levato H.; Saffe C.; Mallamaci C.; Lopez C.; Podest F.; Vladimirov V. V

"Early polarization observations of the optical emission of gamma-ray bursts: GRB 150301B and GRB 150413A"
MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY,
Volume: 455, Issue: 3, Pages: 3312-3318, DOI: 10.1093/mnras/stv2515,
Published: JAN 21 2016
(импакт-фактор: 4.957 WoS)

9. Kornilov V.; Safonov B.; Kornilov M.; Shatsky N.; Voziakova O.; Potanin S.; **Gorbunov I.**; Senik V.; Cheryasov D.
"Study on Atmospheric Optical Turbulence above Mount Shatdzhatmaz in 2007-2013"

Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume: 126,
Issue: 939, Pages: 482-495, DOI: 10.1086/676648, Published: MAY 2014
(импакт-фактор: 4.695 WoS)

10. В.Г.Корнилов, М.В.Корнилов, Н.И.Шатский, О.В.Возякова, **И.А.Горбунов**, Б.С.Сафонов, С.А.Потанин, Д.В.Черясов, В.А.Сеник
"Метеорологические условия в Кавказской обсерватории ГАИШ МГУ по результатам кампании 2007-2015 годов"

Письма в *Астрономический журнал*, Том 42, номер 9, стр 678-693,
2016 год
(импакт-фактор: 1.055 WoS)

Прочие публикации:

1. Lipunov V.; Kornilov V.; Chasovnikov A.; Tiurina N.; Vlasenko D.; Gorbovskoy E.; **Gorbunov I.**; Balanutsa P.; Cheryasov D.; Pozdnyakov A.; Gabovich A.; Gress O. A.; Buckley D.; Podesta R.; Rebolo R.; Serra M.; Balakin F.; Topolev V.; Zhirkov K.; Kuznetsov A.; Vladimirov V.; Senik V.; Podesta F.; Francile C.; Budnev N. M.; Sergienko Yu.; Tlatov A.; Grinshpun V.; Minkina E.; Ershova O.; Kuvshinov D.; Yurkov V.
"MASTER Optical Observation of LIGO/VIRGO S200302c Event",
Research Notes Of The American Astronomical Society, Volume: 4,
Number: 12, DOI: 10.3847/2515-5172/abd188, Published: December 2020.
2. Lipunov V.; Kornilov V.; Vlasenko D.; Tiurina N.; Gorbovskoy E.; **Gorbunov I.**; Balanutsa P.; Balakin F.; Chasovnikov A.; Gabovich A.; Gress O. A.; Cheryasov D.; Buckley D. A. H.; Podesta R.; Rebolo R.; Serra M.; Topolev V.; Zhirkov K.; Pozdnyakov A.; Kuznetsov A.; Vladimirov V.; Senik V.; Podesta F.; Francile C.; Budnev N. M.; Sergienko Yu.; Tlatov A.; Grinshpun V.; Minkina E.; Yurkov V.
"MASTER Optical Observation of LIGO/VIRGO S200224ca Error-box"
Research Notes Of The American Astronomical Society, Volume: 4,
Number: 12, DOI: 10.3847/2515-5172/abcf4c, Published: December 2020.
3. Lipunov V.; Kornilov V.; Gorbovskoy E.; Vlasenko D.; Tiurina N.; Gress O.; **Gorbunov I.**; Balanutsa P.; Pozdnyakov A.; Buckley D.; Podesta R.; Rebolo R.; Serra M.; Balakin F.; Chasovnikov A.; Topolev V.; Zhirkov K.; Kuznetsov A.; Vladimirov V.; Senik V.; Cheryasov D.; Gabovich A.; Zimnukhov D.; Kuvshinov D.; Podesta

F.; Francile C.; Budnev N.; Sergienko Yu.; Tlatov A.; Grinshpun V.; Pogrosheva T.; Shumkov V.; Minkina E.; Yurkov V.
"MASTER Follow-up Observations of LIGO GW170104 Event"
Research Notes Of The American Astronomical Society, Volume 4,
Number: 11, DOI: 10.3847/2515-5172/abccc2, Published: November
2020.

4. Lipunov V.; Kornilov V.; Gorbovskoy E.; Vlasenko D.; Tiurina N.; Gress O. A.; **Gorbunov I.**; Balanutsa P.; Pozdnyakov A.; Buckley D.; Podesta R.; Rebolo R.; Serra M.; Balakin F.; Chasovnikov A.; Topolev V.; Zhirkov K.; Kuznetsov A.; Vladimirov V.; Gabovich A.; Zimnukhov D.; Kuvshinov D.; Podesta F.; Francile C.; Budnev N. M.; Sergienko Yu.; Tlatov A.; Cheryasov D.

"Optical Transients Detected by MASTER during LIGO/VIRGO
O2 Set Event"
Research Notes Of The American Astronomical Society, Volume 4,
Number: 11, DOI: 10.3847/2515-5172/abccc1, Published: November
2020.

5. Lipunov V.; Kornilov V.; Vlasenko D.; Tiurina N.; Gorbovskoy E.; Gress O. A.; **Gorbunov I.**; Balanutsa P.; Cheryasov D.; Pozdnyakov A.; Buckley D.; Podesta R.; Rebolo R.; Serra M.; Balakin F.; Chasovnikov A.; Topolev V.; Zhirkov K.; Kuznetsov A.; Vladimirov V.; Senik V.; Gabovich A.; Podesta F.; Francile C.; Budnev N.; Sergienko Yu.; Tlatov A.; Grinshpun V.; Minkina E.; Yurkov V.

"Optical Transients Found by MASTER during the Observation of
LIGO/VIRGO S200219ac Gravitational-wave Event"
Research Notes Of The American Astronomical Society, Volume: 4,
Number: 11, DOI: 10.3847/2515-5172/abc6ad, Published: November
2020.

11 Достоверность и апробация полученных результатов

Подтверждается публикациями диссертанта в ведущих научных журналах, в том числе в Nature [16], и апробацией результатов работы на международных и всероссийских конференциях. Горбунов И.А. является соавтором ~ 1500 публикаций, включая реферируемые циркуляры GCN (http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html) и циркуляры ATel (<http://www.astronomerstelegam.org>) по результатам наблюдений гравитационно-волновых алертов LIGO/Virgo, гамма-всплесков (Swift, Fermi и др.), нейтрино сверхвысоких энергий (IceCube, ANTARES) и обнаружения оптических быстропеременных источников.

Статей, ссылающихся на публикации автора ~ 2500 . Индекс Хирша Горбунова И.А. равен 7 (WoS, ИСТИНА).

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались в докладах на следующих конференциях и семинарах:

1. 2021 "Некоторые результаты роботизации многоканальных исследований Глобальной сети МАСТЕР МГУ" (Устный доклад)
Горбунов И.А. Общественный семинар астрофизиков имени Я.Б.Зельдовича (ОСА) ГАИШ МГУ, Москва, Россия, 26 марта 2021г.
2. 2020 "МАСТЕР: ранние наблюдения гамма-всплесков" (Устный доклад)
Авторы: Горбовской Е., Липунов В.М., Корнилов В.Г., Тюрина Н., Е Минкина, О Ершова, Балануца П., Буднев Н., Гресс О., Балакин Ф., Жирков К., Владимиров В., Часовников А., Кузнецов А., Тополев В., Горбунов И., Габович А., Поздняков А.П., Ершова О., Гриншпун В.Г., Сергиенко Ю.П., Сенник В., Юрков В.
УСПЕХИ РОССИЙСКОЙ АСТРОФИЗИКИ 2020: Теория и Эксперимент, МГУ ГАИШ, Москва, Россия, 18 декабря 2020
3. 2020 Локализация источника нейтрино высоких энергий (Устный доклад)

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, Москва, Россия, 5 июня 2020

4. “Многоканальные наблюдения МАСТЕР в 2020г.”

В.М.Липунов, Корнилов В.Г., Горбовской Е., Тюрина Н., Балануца П., Власенко Д., Часовников А., Тополев В., Владимиров В., Кузнецов А., Гресь О., Габович А., Буднев Н.М., Горбунов И., Жирков К., Поздняков А., Балакин Ф., Юрков В., Тлатов А., Сеник В.А., Макаров А.В., Минкина Е., Гриншпун В.

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

5. 2019 Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР: достижения 2019г. в гравитационно-волновой астрономии, гамма-астрономии, нейтринная астрономии (Устный доклад)

Авторы: Липунов В.М., Корнилов В.Г., Горбовской Е.С., Тюрина Н.В., Горбунов И.А., Владимиров В.В., Габович А., Балануца П.В., Гресь О., Сеник В., Кузнецов А.С., Часовников А.Р., Жирков К., Поздняков А., Тополев В., Буднев Н., Юрков В., Минкина Е., Ершова О., Сергиенко Ю.П.

УСПЕХИ РОССИЙСКОЙ АСТРОФИЗИКИ 2019: Теория и Эксперимент, МГУ имени М.В.Ломоносова, ГАИШ, Россия, 16 декабря 2019

6. 2019 MASTER follow-up of LIGO/VIRGO O1, O2 observing runs (Устный)

Авторы: Власенко Д.М., Липунов В.М., Корнилов В.Г., Горбовской Е.С., Поздняков А.П., Тюрина Н.В., Владимиров В.В., Горбунов И.А., Кузнецов А.С., Балануца П.В., Гресь О.А., Буднев

Н.М., Габович А.М., Юрков В.В., Сеник В.А., Тлатов А.Г.
The VI Workshop on robotic autonomous observatories Astrorob-
2019, Малага, Испания, 30 сентября - 6 октября 2019

7. 2019 Исследование гамма-всплесков, наблюдавшихся в 2017-2019гг. телескопами-роботами Глобальной сети МАСТЕР МГУ (Стендовый доклад)
Авторы: Минкина Е.М., Липунов В.М., Тюрина Н.В., Горбовской Е.С., Владимиров В.В., Баланца П., Горбунов И., Кузнецов А., Грес О., Буднев Н., Габович А., Юрков В. Тлатов А.Г.
УСПЕХИ РОССИЙСКОЙ АСТРОФИЗИКИ 2019: Теория и Эксперимент, МГУ имени М.В.Ломоносова, ГАИШ, Россия, 16 декабря 2019
8. “Исследование областей локализации быстрых радио-вспышек FRB телескопами-роботами Глобальной сети МАСТЕР” (Стендовый доклад)
Авторы: Жирков К., Липунов В.М., Корнилов В.Г., Тюрина Н.В., Горбовской Е.С., Горбунов И.А., Владимиров В., Кузнецов А.С., Власенко Д.
УСПЕХИ РОССИЙСКОЙ АСТРОФИЗИКИ 2019: Теория и Эксперимент, МГУ имени М.В.Ломоносова, ГАИШ, Россия, 16 декабря 2019
9. 2019 МАСТЕР: исследование областей локализации нейтрино сверхвысоких энергий, регистрируемых IceCube, ANTARES (Стендовый доклад)
Авторы: Гресс О.А., Липунов В.М., Корнилов В.Г., Горбовской Е.С., Тюрина Н.В., Владимиров В., Баланца П., Буднев Н., Власенко Д., Горбунов И.А., Габович А.М., Юрков В.В.
УСПЕХИ РОССИЙСКОЙ АСТРОФИЗИКИ 2019: Теория и Эксперимент, МГУ имени М.В.Ломоносова, ГАИШ, Россия, 16 декабря 2019
10. 2019 Поиск оптических транзиентов телескопами-роботами Глобальной сети МАСТЕР МГУ (Стендовый доклад)

Авторы: Ершова Ольга, Горбовской Е., Липунов В.М., Корнилов В.Г., Тюрина Н.В., Гресь О., Балануца П., Владимиров В., Зимнухов Д., Горбунов И.А., Кузнецов А.С., Часовников А., Поздняков А., Жирков К., Гриншпун В., Власенко Д., Габович А., Юрков В., Черясов Д., Буднев Н., Язев С.

УСПЕХИ РОССИЙСКОЙ АСТРОФИЗИКИ 2019: Теория и Эксперимент, МГУ имени М.В.Ломоносова, ГАИШ, Россия, 16 декабря 2019

11. 2018 Научная конференция "Ломоносовские чтения-2018" секция астрономии и геофизики
Доклад "МАСТЕР и гравитационно-волновой эксперимент LIGO/Virgo: открытие Килоновой." Липунов В.М., Корнилов В.Г., Горбовской Е.С., Тюрина Н.В., Балануца П.В., Кузнецов А.С., Горбунов И.А., Владимиров В.В., Зимнухов Д.С., Чазов В.В., Грес О.А., Крылов А.В., Кувшинов Д.А. МГУ имени М.В.Ломоносова, ГАИШ, Россия, 19 апреля 2018
12. 2018 Optical transients, detected by MASTER inside LIGO/Virgo error-fields during O2 (Стендовый)
Авторы: Gorbunov I., Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskey E., Tiurina N., Vlasenko D., Gress O., Balanutsa P., Kuznetsov A., Vladimirov V., Chazov V., Kuvshinov D. Marcel Grossman meeting MG15, г. Рим, Италия, 1-7 июля 2018
13. 2016 Properties of circumstellar matter around RW Aur A deduced from visible light photometry and polarimetry during dimming in 2014-2016 (Устный)
Авторы: Сафонов Б.С., Черясов Д.В., Додин А.В., Kirchshlager F., Ламзин С.А., Возякова О.В., Шаховской Д.Н., Горбунов И.А. Cosmic Dust 9, г. Сендаи, Япония, 15-19 августа 2016
14. 2015 Контроль оптики 2.5 метрового телескопа ГАИШ МГУ (Устный)
Авторы: Потанин С.А., Белинский А.А., Возякова О.В., Горбунов И.А., Додин А.В., Корнилов В.Г., Корнилов М.В., Ламзин

С.А., Маланчев К.Л., Саввин А.Д., Сафонов Б.С., Черепашук А.М., Черясов Д.В., Шатский Н.И.

Настоящее и будущее малых и средних телескопов (The Present and Future of Small and Medium Size Telescopes), пос.Нижний Архыз, Россия, 19-22 октября 2015

12 Личный вклад автора

1. Исследование астроклимата (по программам В.Г.Корнилова MASS-DIMM, МАСТЕР, Глава 3)
2. Запуск телескопов в КГО (Глава 3), Аргентине (Глава 4), Крыму (Глава 5), и ЮАР (Глава 1,2), на Байкале и на Канарских островах (Глава 1, 2)
3. Разработка и создание устройств обеспечения качества изображения (фокусеры, контроллеры, обратная связь с блоком обработки изображений, Глава 2)
4. Создание программного комплекса математического сопровождения автоматического контроля качества широкопольных изображений с телескопов-роботов Глобальной сети МАСТЕР МГУ, обеспечившего обнаружение килоновой (Глава 4) и обнаружение и интерпретацию падения оптической мощности сверхмассивной чёрной дыры (блазар TXS0506+056) телескопом-роботом МАСТЕР-Таврида (МГУ, Крым, Россия) через 73 секунды после регистрации нейтрино сверхвысоких энергий (>100 ТэВ) антарктической установкой IceCube. Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ решает одновременно несколько главных задач современной астрофизики, что обеспечивает МГУ и России сохранение лидирующих позиций в мире астрофизики высоких энергий [1-16,18-21,33]. МАСТЕР получает каждую ночь сотни изображений размером 4 кв.градуса каждое, и задача обеспечения автоматического контроля и поддержания качества изображений, решаемая диссертантом, является одной из ключевых.

Относительно наблюдений транзиентных источников, результаты которых вынесены на защиту, автор принимал равноправное с соавторами соответствующих публикаций участие в постановке задач исследования, обработке и анализе данных, в интерпретации полученных результатов, формулировке выводов и подготовке публикаций. При этом его участие в поддержке качества изображений представленных в диссертации открытий является решающим.

13 Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей 5 глав, заключения, библиографии и приложения. В диссертации 155 страниц, включая 33 рисунка и 8 таблиц. Библиография включает 150 наименований.

Введение описывает важность обеспечения высокого фотометрического качества широкопольных изображений, получаемых на телескопах-роботах МАСТЕР, включая создание системы контроля качества изображений, обеспечение ее автономной работы, выбор схемы фокусировки, создание программного комплекса математического сопровождения автоматического контроля качества для возможности проведения алертных и инспекционных наблюдений областей неопределенности (полей ошибок) источников гравитационных волн и нейтрино высоких и сверхвысоких энергий телескопами-роботами Глобальной сети МАСТЕР МГУ, что обеспечивает оперативное обнаружение и исследование астрофизических источников событий, регистрируемых детекторами LIGO/Virgo, IceCUBE, ANTARES и др. Обсуждается цель и актуальность диссертационной работы, её новизна и практическая значимость, 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, описывается личный вклад автора в проделанную работу, проводятся критерии достоверности полученных резуль-

татов.

Первая глава рассматривает основные проблемы многоканального поиска в оперативной транзиентной астрономии, особенности многоканальных астрономических данных, особенности гравитационно-волновой астрономии и внегалактической нейтринной астрономии. В главе также приводятся основные достижения Глобальной сети МАСТЕР МГУ в многоканальной астрономии. Приводится пример взаимодействия детекторов нейтринной обсерватории IceCUBE в Антарктиде и телескопов-роботов Глобальной сети МАСТЕР МГУ при исследовании области ошибок события IC170922A.

Во второй главе представлен обзор по современным роботизированным астрономическим системам: обзорным - ASAS-SN, Pan-STARRS, CRTS, PTF, KAIT, Zwicky; алертным - BOOTES, TAROT, ROTSE-III; и универсальной - Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР МГУ. Приводятся важнейшие характеристики телескопов-роботов, описываются основные научные задачи, в решении которых особенно эффективны сети телескопов-роботов, в первую очередь это инспекционные наблюдения больших полей ошибок, получаемых от космических рентгеновских и гамма-обсерваторий Swift [5] и Fermi [6], гравитационно-волновых экспериментов LIGO/VIRGO [7, 8], детекторов нейтрино IceCube [9, 10] и ANTARES [11]. Основная задача при проведении инспекционных наблюдений - как можно быстрее, в первые секунды, навестись на поле ошибок и локализовать возможный оптический источник события. Таким образом, получаются не только уточненные координаты электромагнитного источника, по которым затем наводятся более крупные телескопы, но и получаются самые первые точки на кривой блеска в белом свете и в поляроидах всего через несколько секунд после публикации триггера.

Третья глава представляет результаты анализа астроклиматических условий, выполненные по программе В.Г.Корнилова соискателем с соавторами, и в пунктах расположения Глобальной сети МАСТЕР МГУ.

В четвертой главе приводятся результаты работы системы контроля качества изображений на примере проведенных на телескопах МАСТЕР алертных наблюдений области неопределенности из-

мерений координат источника (поля ошибок error-box) гравитационно-волнового импульса, зарегистрированного детекторами LIGO/Virgo 17 августа 2017г. от сливающихся нейтронных звезд GW170817, позволивших независимо [14-16] обнаружить Килоновую MASTER OT J130948.10-232253.3/SSS17a MASTER-OAFA в результате проводимого инспектирования поля ошибок LIGO/Virgo GW170817, начиная с максимума распределения вероятности, получить изображения галактики NGC4993 на сверхширокопольных камерах в 2017-08-17 22:54:18 (до начала наблюдений Swope), а в 23:59:54 получить первое изображение Килоновой MASTER OT J130948.10-232253.3/SSS17a, благодаря исследованию которой [14-16] впервые была определена постоянная Хаббла по измерению гравитационно-волнового импульса [16]. Приводится область распределения вероятности нахождения источника гравитационно-волнового импульса GW170817 ([15]), и первые изображения Килоновой [14] (координаты отмечены звездочкой), обнаруженной независимо (до публикации GCN21529) на 6 телескопах: Swope, DLT40, VISTA (в трех фильтрах), MASTER, DECam (в двух фильтрах), LasCumbres.

Пятая глава рассматривает ранние оптические наблюдения в автоматическом режиме (включающем в себя автоматическое удержание качества фокусировки изображений), телескопами MASTER события (алерта), зарегистрированного детекторами нейтринной обсерватории IceCube (Антарктида) 22 сентября 2017г.

Заключение описывает основные результаты диссертационной работы и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

14 Основные выводы

- Проведен анализ климатических и астроклиматических параметров (по программам исследования астроклимата В. Г.Корнилова MASS-DIMM, MASTER), в том числе для мест установки телескопов-роботов Глобальной сети MASTER МГУ.
- Для обеспечения максимально высокого качества изображений,

получаемых на телескопах МАСТЕР, диссертантом разработан и создан аппаратный и программный комплекс контроля качества изображений и обеспечения автономной работы (для телескопов-роботов МАСТЕР). Это позволяет осуществлять непрерывный контроль дальнего и околоземного пространства, оперативно проводить наблюдения, выделять новый оптический источник на изображении, определять его координаты, получать и анализировать его фотометрию, распределение энергии в различных диапазонах, делать выводы о процессах, происходящих в источнике и оперативно публиковать результаты исследований астрофизических источников высоких энергий на телескопах МАСТЕР, в том числе выделять источник на диффузном фоне галактики во время первого в истории события локализации гравитационных волн.

- Разработаны и внедрены оригинальные устройства автоматического удержания качества изображений, что позволило открыть и интерпретировать падение оптической мощности сверхмассивной чёрной дыры (блазара TXS0506+056) телескопом-роботом МАСТЕР-Таврида (МГУ, Крым) через 73 секунды после регистрации нейтрино высокой энергии ($>100\text{ТэВ}$) антарктической установкой IceCube. Обеспечение высокого фотометрического качества наблюдения нейтринного события IceCube-170922A и наблюдательные фотометрические свидетельства в пользу блазара TXS 0506+056, как источника метагалактического нейтрино высоких энергий.

15 Список литературы

1. *Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskey E., et al., "Master Robotic Net", Advances in Astronomy, 2010, 30L (2010)*
2. *Kornilov V. G., Lipunov V. M., Gorbovskey E. S., et al., "Robotic optical telescopes global network MASTER II. Equipment, structure, algorithms Experimental Astronomy, 33, 1, 173-196, 2012.*

3. *Липунов В. и др., "Концепция многофункционального астрономического комп-лекса и динамически интегрированной базы данных в применении к многоканаль-ным наблюдениям глобальной сети МАСТЕР* *Астрономический журнал, 96(4), 288(2019)*
4. *Lipunov V. "Mobile Astronomical Systems of the Telescope-Robots (MASTER) near the Moscow" Bulletin of the American Astronomical Society, 35, 766 (2003)*
5. *Lipunov V., Krylov A., Kornilov V. et al. "MASTER: The Mobile Astronomical System of Telescope-Robots" Astronomische Nachrichten, 325 (6), 580-582 (2004)*
6. *Lipunov V., Kornilov V., Krylov A. et al. "The Master Mobile Astronomical System. Optical Observations of Gamma-Ray Bursts" Astrophysics, 48, 389 (2005)*
7. *Gorbovskey E.; Lipunov, V. M.; Kornilov, V. G.; et al. "The MASTER-II net-work of robotic optical telescopes. First results, "Astronomy Reports, 57, 233(2013)*
8. *Troja E., Lipunov V., Mundell C. et al., "Significant and variable linear polariza-tion during the prompt optical flash of GRB 160625B." Nature, 547, 425 (2017)*
9. *Sadovnichy V., Panasyuk M., Svertilov S. et al. "Prompt and Follow-up Multi-wavelength Observations of the GRB 161017A" ApJ, 861, 48S (2018)*
10. *Lipunov V. et al. "The optical identification of events with poorly defined locations: the case of the Fermi GBM GRB140801A" MNRAS, 455, 712 (2016)*
11. *Ershova O. et al. "Early Optical Observations of Gamma-Ray Bursts Compared with Their γ and X-Ray Characteristics Using MASTER Global Network of Robotic Tele-scopes from Lomonosov Moscow State University " 2020, Astronomy Reports,, 64,126*

12. Abbott B. et al., "Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914 *The Astrophysical Journal Letters*, 826, 13 (2016)
13. Lipunov V. M., Kornilov V., Gorbousov, E., et al., "First gravitational-wave burst GW150914: MASTER optical follow-up observations *MNRAS*, 465, 3656 (2017)
14. Abbott, B. P., et al., "Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger *The Astrophysical Journal Letters*, 848, 12 (2017)
15. Lipunov, V et al., "MASTER Optical Detection of the First LIGO/Virgo Neutron Star Binary Merger GW170817 *The Astrophysical Journal Letters*, 850,. L1 (2017)
16. Abbott, B. P.; Abbott, R.; Abbott, T., et al., "A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant " *Nature*, 551, 85A (2017)
17. IceCube Collaboration: Achterberg A, Ackermann M, Adams J, Ahrens J, Andeen K, Atlee DW, Baccus J, Bahcall JN, Bai X, et al., "First year performance of the IceCube neutrino telescope *Astroparticle Physics*, 26, 3, 155 (2006)
18. Gress O., Lipunov V., Dornic D. et al. "MASTER Investigation of ANTARES and IceCube Alerts" *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* , 51, 89 (2019)
19. Lipunov, V. M.; Kornilov, V. G.; Zhirkov, K. et al." Optical Observations Reveal Strong Evidence for High-energy Neutrino Progenitor" *ApJ*, 896L, 19L (2020)
20. Lipunov, V. M.; Gorbousov, E. S.; Kornilov, V. G." SHOK—The First Russian Wide-Field Optical Camera in Space" *Space Science Reviews*, 214, 6L (2018)

21. Sadovnichii V. et al. "*Lomonosov*" Satellite—Space Observatory to Study Extreme Phenomena in Space" *ApJ*, 861, 48S (2018)
22. Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G., et al., "Measurements of Omega and Lambda from High-Redshift Supernovae", *Astrophysical Journal*, 517, 565 (1999).
23. Vigh, H. E. M.; Stokes, G. H.; Shelly, F. et al. "Recent Results from the Lincoln Near Earth Asteroid Research (LINEAR) Project" *DPS*, 29, 0302V (1997)
24. Burgett W.S. et al." *The First Pan-STARRS Asteroid Search Campaign: Astro-nomical Discovery Program for High Schools Students*" *AAS*, 21821503B (2011)
25. Tonry, John "ATLAS: An Asteroid Warning System" *Tfa.confE*, 24T (2011)
26. Chyba Rabeendran, Amandin; Denneau, Larry "A Two-stage Deep Learning Detection Classifier for the ATLAS Asteroid Survey" *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 133(1021), id.034501 (2012)
27. Akerlof C. W., Kehoe R. L., et al., "*The ROTSE-III Robotic Telescope System* *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 115, 803, 132-140 (2003)
28. Castro-Tirado, A. J. et al., "*The Burst Observer and Optical Transient Exploring System (BOOTES)*", *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 138, 583 (1999)
29. Böer, M. et al., "*TAROT: Observing gamma-ray bursts in progress*", *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 138, 579-580 (1999)
30. Drake A. et al. "*CRTS:an open optical transient survey.*" *Bulletin of the American Astronomical Society*, 43, id.334.17 (2011)

31. *Bellm, E. et al. "An Overview of the The Intermediate Palomar Transient Factory Surveys" AAS, 229, id.313.01B (2017)*
32. *Bellm E. et al. "The Zwicky Transient Facility: System Overview, Performance, First Results" Publications of the Astronomical Society of the Pacific 131(995),018002(2019)*
33. *Hu Y. D.; Oates S. R.; Lipunov V. M. Zhang B. B.; Castro-Tirado A. J.; Jeong S.; Sánchez-Ramírez R.; Tello J. C.; Cunniffe R.; Gorbousov E.; Caballero-García M. D.; Pandey S. B.; Kornilov V. G.; Tyurina N. V.; Kuznetsov A. S.; Balanutsa P. V.; Gress O. A.; Gorbunov I.; Vlasenko D. M.; Vladimirov V. et al. "Multiwavelength observations of GRB 140629A. A long burst with an achromatic jet break in the optical and X-ray afterglow" Research Notes of the American Astronomical Society Astronomy and Astrophysics, 632A,100H (2020)*
34. *Kornilov V.; Kornilov M.; Voziakova O.; Shatsky N.; Safonov B.; Gorbunov I.; Potanin S.; Cheryasov D.; Senik V. "Night-sky brightness and extinction at Mt Shat-dzhatmaz "Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society, 462, 4464K (2016)*
35. *Kornilov V. G.; Kornilov M. V.; Shatsky N. I.; Vozyakova O. V.; Gorbunov I. A.; Safonov B. S.; Potanin S. A.; Cheryasov D. V.; Senik V. A. "Meteorological conditions at the Caucasus Observatory of the SAI MSU from the results of the 2007-2015 campaign" Astronomy Letters, 426,16K (2016)*
36. *Kornilov V.; Safonov B.; Kornilov M.; Shatsky N.; Voziakova O.; Potanin S.; Gorbunov I.; Senik V.; Cheryasov D. "Study on Atmospheric Optical Turbulence above Mount Shatdzhatmaz in 2007-2013" Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 126, 482K (2014)*