

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Владимиров Владимир Валерьевич

**Создание центра оперативного контроля
телескопов Глобальной сети МАСТЕР и
исследование некоторых астрофизических
транзиентов**

01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2019

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

Научный руководитель:

– Липунов Владимир Михайлович,
доктор физико-математических наук,
профессор, Почетный профессор МГУ,
Физический факультет МГУ, профессор кафедры
астрофизики и звездной астрономии,
ГАИШ МГУ, зав. лабораторией космического мониторинга

Официальные оппоненты:

– Чугай Николай Николаевич,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник ИНАСАН

– Захаров Александр Федорович,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
ИТЭФ имени А.И. Алиханова, ведущий научный сотрудник

– Свертилов Сергей Игоревич,
доктор физико-математических наук, доцент,
Физический факультет МГУ, профессор
НИИЯФ МГУ, ведущий научный сотрудник

Защита состоится 05 сентября 2019 года в 14:00 на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу 119234, Москва, Университетский проспект, д. 13, конференц-зал.

E-mail: vladimirov@sai.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:
<http://istina.msu.ru/dissertations/211127572/>

Автореферат разослан 17 июля 2019 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

М. В. Пружинская

Общая характеристика работы

Работа посвящена созданию центра оперативного контроля телескопов-роботов Глобальной сети МАСТЕР - Мобильной Астрономической Системы Телескопов Роботов - и исследованию астрофизических транзиентов.

В начале XXI века началось создание сетей телескопов-роботов. Среди первых телескопов-роботов были телескопы ROTSE (США) [1], BOOTES (Испания) [2], TAROT (Франция) [3] и др. Уже первые годы применения новых типов астрономических средств наблюдения позволили существенно повысить эффективность классических наблюдений. Началось массовое открытие оптических двойников гамма-всплесков, сверхновых, катаклизмических переменных и других быстропеременных объектов - оптических транзиентов (ОТ).

С начала 2002 года в России развивается сеть телескопов-роботов МАСТЕР [4]. В последние 5-7 лет проект МАСТЕР стал постепенно превращаться в Глобальную сеть телескопов-роботов - географически распределенную роботизированную сеть со сложным взаимодействием отдельных узлов - роботизированных обсерваторий. Это резко повышает эффективность наблюдений, позволяя не только открывать, но и сопровождать новые объекты исследований. Такому существенному повышению эффективности наблюдений способствуют три главные особенности роботизированных телескопов.

Ключевым преимуществом роботизированных телескопов является их способность к быстрому отклику на появление нового объекта исследования. Благодаря этой способности, телескопы с небольшой апертурой и большим полем зрения, с возможностью быстрого наведения, роботизированные, с минимальным участием человека в процессе наблюдений способны получить самый ранний снимок в первые секунды после алерта, что недостижимо для крупных телескопов.

Другим важным преимуществом небольших роботизированных телескопов является большое поле зрения. Благодаря этому, широкопольные телескопы способны получить изображения с большей площади небесной сферы за меньшее число наведений. Это исключительно важно при наблюдениях больших полей ошибок, получаемых от космических гамма- и рентгеновских обсерваторий, с целью уточнения координат оптического транзиента. Космические гамма-обсерватории Swift [5] и Fermi [6] и др. на протяжении нескольких лет обеспечивают значительное количество алертов о регистрации гамма-всплесков. В последние три года МАСТЕР и другие роботизированные оптические телескопы участвуют в инспектировании полей ошибок при детектировании гравитационно-волновых импульсов лазерными интерферометрами LIGO/VIRGO [7, 8]. Кроме того, нейтринные детекторы IceCube [9, 10] и ANTARES [11] также начали публиковать алерты о транзиентных явлениях, что также подразумевает быстрое наведение и

инспектирование больших полей ошибок во всем диапазоне спектра, в том числе и в оптическом.

Но главные преимущества Глобальной сети МАСТЕР, которые отличают ее от остальных роботизированных телескопов, следующие: 1) оснащение идентичными фотометрическими и поляриметрическими модулями, 2) большая географическая распространенность телескопов сети, 3) собственное программное обеспечение автоматической обработки и анализа изображений в режиме реального времени. Благодаря этому, МАСТЕР обладает возможностью получать уникальные длинные ряды однородных непрерывных фотометрических и поляриметрических наблюдений.

При этом неизмеримо возрастают требования к надежности работы каждого узла сети, готовности в любой момент времени приступить к наблюдениям нового объекта или сменить тип наблюдений. Например, с широкополосной фотометрии перейти к поляриметрии или инспектированию областей локализации (полей ошибок) событий, регистрируемых на детекторах LIGO/Virgo, Swift, Fermi, Конус-Винд, IceCube, ANTARES, Баксанской нейтринной обсерватории и др. В результате возникла новая программно-математическая задача контроля и поддержания стабильной работы отдельных телескопов-роботов сети. Решению именно этой задачи посвящена данная диссертация.

Актуальность работы

В начале XXI века начали активно развиваться сети телескопов роботов. Сети роботов-телескопов обладают всеми преимуществами отдельно стоящих роботизированных телескопов, и, благодаря возможности быстрого наведения, большому полю зрения, с минимальным участием человека в процессе наблюдений, способны получить самый ранний снимок в первые секунды после алерта.

Однако, благодаря объединению роботизированных телескопов в большие географически распределенные сети, становится доступным совершенно новый класс наблюдений. Например, МАСТЕР - Мобильная Астрономическая Сеть Телескопов-Роботов, благодаря большой географической распространенности сети и, благодаря оснащению МАСТЕР идентичными фотометрическими и поляриметрическими модулями, обладает возможностью получать уникальные длинные ряды однородных непрерывных фотометрических и поляриметрических наблюдений.

Для достижения таких результатов становится особенно острой задача системы контроля и поддержания в рабочем состоянии всех узлов сети.

Катастрофическое изменение параметров тесной двойной системы может привести к слиянию ее компонентов или к внезапному уменьшению полуоси двойной системы. Такое изменение параметров критично для последующих стадий эволюции двойной системы, которые завершаются формированием тесной двойной системы с вырожденными компонентами - нейтронными звездами и белыми карликами. При формировании тесной

двойной системы, состоящей из двух белых карликов, их слияние в дальнейшем может привести к взрыву сверхновой типа SN Ia. А в случае формирования двойной системы, состоящей из двух нейтронных звезд, - к короткому гамма-всплеску и килоновой. Следовательно, слияние двух классических звезд главной последовательности или сверхгигантов может способствовать изучению и пониманию таких важных астрофизических явлений как гамма-всплески, а также изучению темной энергии.

Гамма-всплески с большим красным смещением в настоящее время являются одними из самых отдаленных из известных объектов во Вселенной. Изучение гамма-всплесков вносит существенный вклад в определение космологических параметров.

Цели и задачи работы

Целью данной работы является создание Центра оперативного контроля телескопов Глобальной сети МАСТЕР - Мобильной Астрономической Системы Телескопов Роботов, который использовался при обнаружении и проведении долговременных мониторинговых наблюдений Красной Яркой Новой MASTER OT J004207.99+405501.1/M31LRN2015 и при проведении инспекционных наблюдений поля ошибок гравитационно-волнового импульса GW170817 с помощью нескольких телескопов Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР МГУ.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

- Разработка и внедрение программного обеспечения, реализующего функционал Центра оперативного контроля телескопов-роботов Глобальной сети МАСТЕР. Приводится описание принципов работы основных компонентов Центра оперативного контроля.
- Создание базы данных, содержащей все метрики и вычисляемые параметры о состоянии основных узлов роботов-телескопов МАСТЕР-II.
- Создание пользовательского веб-интерфейса для оперативного отслеживания и контроля наиболее критичной информации о состоянии основных узлов роботов-телескопов МАСТЕР-II.
- Создание программ, реализующих алгоритмы самодиагностики и автономного, без участия человека, восстановления функциональности основных узлов роботов-телескопов МАСТЕР-II.
- Проведение долговременных мониторинговых наблюдений яркой красной новой MASTER M31LRN 2015. Получена оригинальная кривая блеска MASTER M31LRN 2015 на идентичных телескопах Глобальной сети МАСТЕР в обсерваториях MASTER-AMUR, MASTER-Tunka и MASTER-Kislovodsk.
- Проведены уникальные инспекционные наблюдения поля ошибок триггера LIGO/VIRGO гравитационно-волнового импульса GW170817

тремя обсерваториями Глобальной сети МАСТЕР, MASTER-SAAO, MASTER-IAC и MASTER-OAFA, в ходе которых 17 августа 2017 года в 23:59:54 UT основным телескопом обсерватории МАСТЕР-OAFA был независимо обнаружен оптический транзиент (килоновая) MASTER OTJ130948.10-232253.3/SSS17a

Новизна работы

Следующие научные результаты получены впервые:

1. Разработан и внедрен Центр оперативного контроля телескопов Глобальной сети МАСТЕР. Приводится описание принципов работы основных компонентов Центра оперативного контроля.
2. Приводится оригинальная кривая блеска яркой красной новой MASTER M31LRN 2015, полученная идентичными телескопами Глобальной сети МАСТЕР в обсерваториях MASTER-AMUR, MASTER-Tunka и MASTER-Kislovodsk в единой фотометрической системе VRI в течение первых 30 дней и без фильтров в течение 70 дней.
3. В обсерватории МАСТЕР-OAFA в Аргентине с помощью камер сверхширокого поля WFC было получено первое изображение галактики NGC 4993 17 августа 2017 г в 22:54:18 UT. Получен предел $m=15^m.5$ на яркость оптического источника (килоновой) через 10 часов после слияния. Таким образом, МАСТЕР-OAFA получил самое первое изображение галактики NGC 4993 после столкновения двух нейтронных звезд.
4. В ходе инспекции поля ошибок триггера LIGO/VIRGO гравитационно-волнового импульса GW170817 тремя обсерваториями Глобальной сети МАСТЕР, MASTER-SAAO, MASTER-IAC и MASTER-OAFA, основным телескопом обсерватории MASTER-OAFA в 23:59:54 UT был независимо обнаружен оптический транзиент (килоновая) MASTER OTJ130948.10-232253.3/SSS17a

Достоверность научных результатов

Результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах, докладывались на международных и российских конференциях, а также подтверждены независимыми наблюдениями других обсерваторий.

Практическая значимость работы

Описанный в диссертации комплекс программ Центра оперативного контроля способствовал практическому решению задач, для которых создавалась Глобальная сеть МАСТЕР: обнаружение собственного

(одновременно с гамма-) оптического излучения и оперативное исследование гамма-всплесков, обнаружение и исследование оптического послесвечения гамма-всплесков, инспекционные наблюдения больших полей ошибок, получаемых от гамма- и рентгеновских космических обсерваторий, гравитационно-волновых и нейтринных экспериментов, и долговременные мониторинговые наблюдения вновь открытых объектов исследования. Рассматриваемый комплекс программ предполагается использовать в новых пунктах глобальной сети МАСТЕР. Описание принципов работы и организация взаимодействия основных компонентов Центра оперативного контроля может быть полезным для других научных групп, создающих распределенное научное оборудование, объединенное общей задачей.

Полученная многодневная кривая блеска яркой красной новой M31LRN2015 может быть полезна для других научных групп, проводящих исследования в области катаклизмических переменных и объектов с общей оболочкой.

Положения, выносимые на защиту

1. Создание Центра оперативного контроля телескопов-роботов Глобальной сети МАСТЕР [12]
2. Открытие и получение длинных рядов фотометрии Красной Новой в M31 MASTER OT J004207.99+405501.1/M31LRN 2015 [13]
3. Инспекция поля ошибок гравитационно-волнового импульса GW170817 от слияния двух нейтронных звезд тремя телескопами-роботами МАСТЕР [14, 15]

Апробация работы и публикации

Результаты работы изложены в статьях, опубликованных в рецензируемых журналах WoS.

1. Липунов В.М., Владимиров В. В., Горбовской Е.С., Кузнецов А. С., и др., "Концепция многофункционального астрономического комплекса и динамически интегрированной базы данных в применении к многоканальным наблюдениям глобальной сети МАСТЕР", Астрономический журнал, Том 96, № 4, с. 288-304, 2019. (импакт-фактор: 0.839) [12]
2. Lipunov, V. M., ... , Vladimirov, V. V., et al., "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, pp. 2339-2350, 2017. (импакт-фактор: 4.893) [13]
3. Lipunov, V. M., ... , Vladimirov, V. V., et al., "MASTER Optical Detection of the First LIGO/Virgo Neutron Star Binary Merger GW170817", The

Astrophysical Journal Letters, Volume 850, Issue 1, article id. L1, 9 pp, 2017. (импакт-фактор: 5.572) [14]

4. Abbott, B. P., ... , Lipunov, V. M., Vladimirov, V. V., et al., "Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger", The Astrophysical Journal Letters, Volume 848, Issue 2, article id. L12, 59 pp., 2017b. (импакт-фактор: 5.572) [15]

Результаты работы были доложены на следующих российских и международных конференциях:

1. Научная конференция «Ломоносовские чтения-2018» «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., Гресс О.А., Крылов А.В., Кувшинов Д.А. 19 апреля 2018
2. Научная конференция «Ломоносовские чтения-2016» «МАСТЕР: оптическая поддержка гравитационно-волнового эксперимента LIGO при открытии первого источника гравитационных волн GW150914» Липунов В.М., Корнилов В.Г., Горбовской Е.С., Тюрина Н.В., Балануца П.В., Кузнецов А.С., Гресь О.А., Владимиров В.В. от коллаборации МАСТЕР и LIGO
3. Всероссийская конференция «Успехи Российской Астрофизики 2017: теория и эксперимент» «Мультиплет IceCube, 200 алертов ANTARES» Н.Тюрина, О.Гресс, В.Липунов, Е.Горбовской, В.Корнилов, П.Балануца, Ю.Таджмухамедова, А.Кузнецов, В.Владимиров
4. Международная конференция «BN8» «Optical transients, detected by MASTER inside LIGO/Virgo error-fields during O2» Gorbunov I., Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E., Tiurina N., Ishmuhametova Yu., Vlasenko D., Gress O., Balanutsa P., Kuznetsov A., Vladimirov V., Chazov V., Kuvshinov D.
5. XXIII международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, МГУ, 2016): устный доклад «Красная Яркая Новая в Андромеде MASTER OT J004207.99+405501.1/M31LRN 2015: открытие, кривая блеска, гидродинамика, эволюция» Владимиров В.В., Липунов В.М., Корнилов В.Г., Блинников С.И., Горбовской Е.С., Тюрина Н.В., Балануца П.В., Кузнецов А.С.
6. Международная конференция «Bursting Universe by Robots Eyes» (Москва, МГУ, 2017): устный доклад «Red Nova in M31» V.Vladimirov,

V.Lipunov, V. Kornilov, S.Blinnikov, A.Tutukov, E.Gorbovskey, N.Tiurina, P. Balanutsa, A.Kuznetsov

7. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018» (Москва, МГУ, 2018): устный доклад «Создание Центра оперативного контроля сети телескопов и Новые звезды, открытые телескопами-роботами МАСТЕР» Владимиров В.В., Липунов В.М., Корнилов В.Г., Горбовской Е.С., Тюрина Н.В., Балануца П.В., Кузнецов А.С.
8. Всероссийская конференция «Успехи Российской Астрофизики 2018: теория и эксперимент» МГУ имени М.В.Ломоносова Россия 17 декабря 2018 «Создание центра оперативного контроля телескопов Глобальной сети МАСТЕР и исследование некоторых астрофизических транзиентов» В.В.Владимиров (постерный доклад)
9. Всероссийская конференция «Успехи Российской Астрофизики 2018: теория и эксперимент» МГУ имени М.В.Ломоносова Россия 17 декабря 2018 «Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР: GRB161017A, гамма-всплески 2018, исследования областей локализации гравитационных волн LIGO/Virgo и нейтрино сверхвысоких энергий ANTARES, IceCube» Липунов В.М., Горбовской Е.С., Корнилов В.Г., Гресс О., Тюрина Н., Кузнецов А., Владимиров В., Балануца П., Зимнухов Д., Власенко Д.

Также автор диссертации является соавтором более 1000 публикаций в циркулярах GCN (The Gamma ray bursts Coordinates Network Circulars, https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3_archive.html) и ATel <http://www.astronomerstelegam.org/>

Личный вклад автора

МАСТЕР представляет собой географически распределенную роботизированную сеть со сложным взаимодействием отдельных узлов - роботизированных обсерваторий. Научным руководителем была поставлена задача в связи с неизмеримо возросшими требованиями обеспечить надежность работы каждого узла сети и их готовность в любой момент времени приступить к наблюдениям нового объекта исследования. В результате возникла новая программно-математическая задача поддержания и контроля стабильной работы отдельных роботов сети. В создании Центра оперативного контроля телескопов-роботов Глобальной сети МАСТЕР вклад соискателя является определяющим: ему принадлежит решение поставленной задачи и программная реализация соответствующих алгоритмов. В публикации [12], где диссертант является одним из ведущих

авторов, ему принадлежит основной вклад в Главу 2 («МАСТЕР как астрономический многофункциональный интеллектуальный управляемый вычислительный комплекс»), Главу 3 («Система контроля астрономического многофункционального интеллектуального управляемого вычислительного комплекса») и Главу 6 («Подтверждение эффективности наблюдений»). Относительно наблюдений (обнаружение и исследование Красной Новой и инспект гравитационно-волнового поля ошибок GW170817), результаты которых вынесены на защиту, автор принимал равноправное с соавторами соответствующих публикаций участие в решении задачи исследования, обработке и анализе данных, в интерпретации полученных результатов в части выносимых на защиту выводов и в подготовке публикаций.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей 4 главы, заключения и библиографии. В диссертации 108 страниц, включая 19 рисунков и 9 таблиц. Библиография включает 205 наименований на 18 страницах.

Во введении описывается важность создания Центра оперативного контроля Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР для максимально эффективного применения всех преимуществ роботизированной сети телескопов в научных исследованиях. 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. Поясняется, что позволяет считать полученные результаты достоверными.

В первой главе приводится обзор современных роботизированных телескопов и 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 двойник. Таким образом, получают не только уточненные координаты электромагнитного двойника, по которым затем наводятся более крупные телескопы, но и получают самые первые точки кривой блеска в белом свете и в поляроидах всего через несколько секунд после публикации триггера.

Глобальная сеть телескопов роботов МАСТЕР принимает активное участие в поисках оптических двойников всех детектируемых

коллорабацией LIGO/VIRGO [7, 8] гравитационно-волновых сигналов [22]. При исследовании GW150914 МАСТЕР проинспектировал наибольшую по площади область поля ошибок гравитационно-волнового импульса [23, 24]. МАСТЕР как роботизированная сеть телескопов показал эффективность такого рода наблюдений и успешно продемонстрировал это своим значительным вкладом в гравитационно-волновой эксперимент [25].

Телескопы-роботы также эффективны в проведении долговременных мониторинговых наблюдений новых объектов исследования в различных фотометрических фильтрах. Кривые блеска многих классов астрофизических объектов, таких как, сверхновые, новые, события приливного разрушения, катаклизмические переменные, яркие красные новые, и др. изменяются во временной шкале от нескольких часов до нескольких месяцев. Для получения кривых блеска с высоким временным разрешением необходимы долговременные многоцветные фотометрические наблюдения, которые успешно выполняются роботизированными телескопами.

Другая крупная область исследования - это проведение регулярных синоптических обзоров неба с целью обнаружения новых оптических транзиентов различной физической природы.

Во втором разделе первой главы приводится краткий обзор современных телескопов-роботов. Некоторые из них нацелены на проведение синоптических обзоров, такие как ASAS-SN [27], Pan-STARRS [26], CRTS [28] и PTF [29]. А другие, такие как ROTSE-III [1], BOOTES [2], TAROT [3], являются(являлись) преимущественно алертными системами.

Систем телескопов, которые бы на мировом уровне одновременно и проводили обзор, открывая новые объекты, и были алертными, и вели инспекционные наблюдения, решая одновременно несколько ключевых задач современной гамма-астрономии (поиск и исследование источников гамма-всплесков), гравитационно-волновой астрономии (поиск и исследование источников гравитационно-волновых импульсов), нейтринной астрономии (поиск и исследование источников нейтрино сверхвысоких энергий), радиоастрономии (поиск и исследование источников FRB), кроме Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР, нет.

В третьем разделе первой главы Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР рассматривается как многофункциональный астрономический вычислительный комплекс, описываются его ключевые особенности и преимущества.

Большая географическая распределенность телескопов Глобальной сети МАСТЕР дает огромные преимущества и позволяет проводить наблюдения, которые затруднительно или же невозможно выполнить на одиночном телескопе. Становятся доступны стратегии наблюдений, включающие в себя несколько наведений на одну область неба за короткий промежуток времени, при этом сохраняя хороший общий темп синоптического обзора.

Другое важное преимущество МАСТЕР - это оснащение телескопов идентичными фотометрическими и поляриметрическими модулями [30, 31]. Благодаря этому, МАСТЕР обладает возможностью получать уникальные длинные ряды однородных непрерывных фотометрических и поляриметрических наблюдений.

Быстрота отклика и широкое поле зрения исключительно важны при создании роботизированного астрономического вычислительного комплекса для успешного решения целого ряда астрономических задач. При исследованиях гамма-всплесков, нейтринных событий, гравитационно-волновых импульсов, сети роботизированных телескопов с возможностью быстрого наведения с минимальным участием человека в процессе наблюдений способны получить самый ранний снимок в первые секунды после алерта.

Главная особенность сети МАСТЕР - это уникальное программно-аппаратное обеспечение, которое практически в режиме реального времени получает полную информацию обо всех оптических источниках, обнаруженных на каждой экспозиции через одну-две минуты после считывания данных с ПЗС-матрицы.

Собственное программное обеспечение МАСТЕР открывает оптические транзиенты не просто анализом разницы между предыдущим и текущим изображением, но путем полной астрометрической и фотометрической идентификации всех источников на изображении. Благодаря уникальному программному обеспечению МАСТЕР уже открыто более 1500 (на декабрь 2018 года) оптических транзиентов в полностью автоматическом режиме.

Во второй главе автор докладывает о разработке и внедрении Центра оперативного контроля Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР [4]. Результаты данной главы основаны на опубликованной статье [12]. Центр оперативного контроля многофункционального астрономического комплекса призван главным образом повысить эффективность проводимых наблюдений. Для решения данной задачи требуется:

1. Обеспечить максимальную готовность всех обсерваторий к проведению наблюдений
2. Обеспечить максимальную продолжительность непрерывной работы сети телескопов-роботов
3. Минимизировать время простоя системы в случае сбоя и максимально быстро восстановить работоспособность всех узлов
4. Обеспечить работу с большими объемами данных и обработку их в реальном времени

Для выполнения поставленных задач была разработана система контроля и обеспечения непрерывной работы Глобальной сети телескопов

роботов. Логическую структуру Центра оперативного контроля можно описать следующим образом (Рисунок 1.).

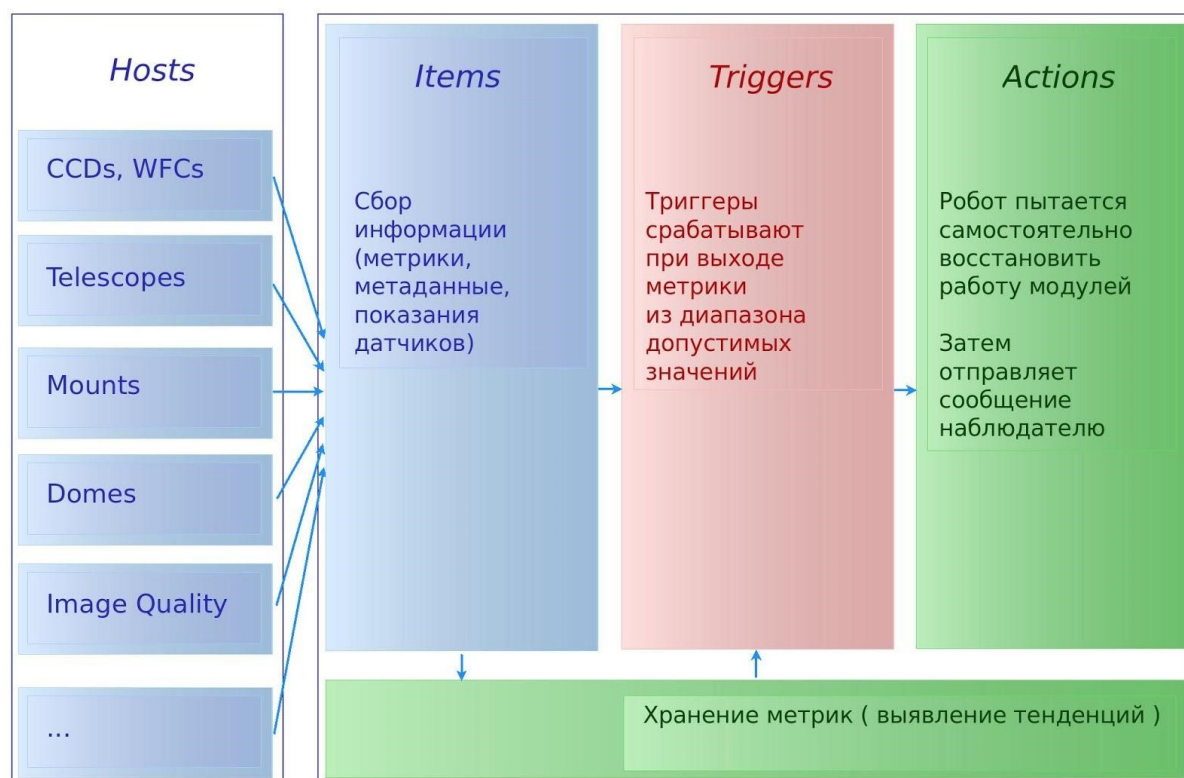


Рис. 1 Логическая схема работы Центра оперативного контроля Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР

В каждой обсерватории МАСТЕР определяется список отслеживаемых устройств. Все устройства, модули и компоненты сети телескопов и элементы программного обеспечения в данной концепции обозначаются как *Hosts*.

Состояние каждого компонента отслеживается по определенным метрикам, которые в данной концепции обозначаются как *Item*. Метрики, или критерии, отслеживаются с определенной периодичностью.

Для каждой метрики (*Item*) определяется диапазон допустимых значений. Если какой-либо параметр выходит за пределы допустимых значений, то срабатывает триггер (*Trigger*). Например, если устройство по каким-либо причинам стало недоступно, или FWHM последнего кадра стало больше допустимого, то срабатывает соответствующий триггер.

На каждый сработавший триггер назначается одно или несколько действий (*Action*). Действие может быть либо простым уведомлением наблюдателя, ответственного за данную обсерваторию, либо сложным набором команд, призванных автоматически, без участия наблюдателя, устранить проблему и привести обсерваторию снова в состояние полной готовности.

Центр оперативного контроля Глобальной сети роботов-телескопов МАСТЕР состоит из нескольких компонентов. *Основной сервер* Центра

оперативного контроля - это ядро всей системы. Здесь создаются группы хостов, хосты, критерии, триггеры, действия. Здесь собираются все метрики и показания датчиков. Проверяется, не вышли ли основные показатели обсерваторий из диапазона допустимых значений. Отслеживаются долговременные тенденции.

Модуль запуска скриптов восстановления отвечает за выполнение определенных алгоритмов, реализованных на Python или других языках программирования, призванных автоматически, без участия наблюдателя устранить проблему и снова привести модуль или обсерваторию в состояние готовности. На Рисунке 2 показано схематическое изображение компонентов основного сервера системы контроля.



Рис. 2. Компоненты основного сервера Центра оперативного контроля Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР

Важно подчеркнуть, что роботы-телескопы МАСТЕР при срабатывании триггера самостоятельно, без участия наблюдателя, выполняют ряд предустановленных команд для устранения возникшей проблемы. И только в том случае, если робот не может самостоятельно устранить проблему, он сообщает наблюдателю о том, что необходимо его вмешательство.

Центр оперативного контроля постоянно развивается и совершенствуется. Вместе с расширением роботизированной сети телескопов-роботов МАСТЕР, с появлением новых пунктов сети, возрастают и требования к Центру оперативного контроля. В дальнейшем мы рассматриваем децентрализацию системы оперативного контроля, обеспечение отказоустойчивости и высокой доступности посредством динамического дублирования основных компонентов, и постепенное опережающее увеличение производительности систем.

В третьей главе приведены технические детали открытия Яркой Красной Новой M31LRN2015 и долговременные наблюдения объекта с помощью Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР. Важно, что все наблюдательные данные для этого исследования были получены на идентичных телескопах, оборудованных одинаковыми фотометрическими модулями.

MASTER OT J004207.99+405501.1/M31N2015-01a был открыт системой авто-детектирования МАСТЕР [4] в течение обзора, проводимого обсерваторией МАСТЕР-Кисловодск 2015-01-13.63235 UT [32]. В общей сложности в день открытия с этим оптическим транзиентом было получено четыре изображения с пределом без фильтра $m_{\text{lim}} = 19^{\text{m}}.0$, а изображение сравнения с пределом $m_{\text{lim}} = 21^{\text{m}}.1$ было получено из базы изображений той же обсерватории МАСТЕР-Кисловодск (Рисунок 3).



Рис 3. Изображение с открытием MASTER OT J004207.99+405501.1/M31LRN2015. Изображение справа - это соответствующая область неба без транзиента, снятая обсерваторией МАСТЕР-Кисловодск.

Приводится оригинальная кривая блеска M31LRN2015, полученная идентичными телескопами Глобальной сети МАСТЕР, в единой фотометрической системе: VRI в течение первых 30 дней и в белом свете W в течение 70 дней (Рисунок 4). Результирующая кривая блеска достаточно хорошо согласуется с независимо полученными кривыми блеска [16]. Приводятся результаты радиационно-гидродинамического моделирования Яркой Красной Новой M31LRN2015 с расширенным параметрическим пространством для наилучшего сопоставления с полученной кривой блеска, выполненного с помощью программного продукта STELLA [34].

Моделирование показало, что наблюдаемое достаточно длинное плато (~ 50 дней), может быть достигнуто только большими массами сливающихся звезд $M_{\text{total}} = 3M_{\odot}$ и при радиусе общей оболочки $R = 10R_{\odot}$. Соответствующая энергия взрыва должна быть менее 3×10^{48} эрг, в то время как полная энергия сброшенной оболочки на три порядка ниже. Предложенная интерпретация взрыва находится в соответствии с

эволюционным сценарием, согласно которому слияние звезд является естественной стадией эволюции звезд с близкими массами.

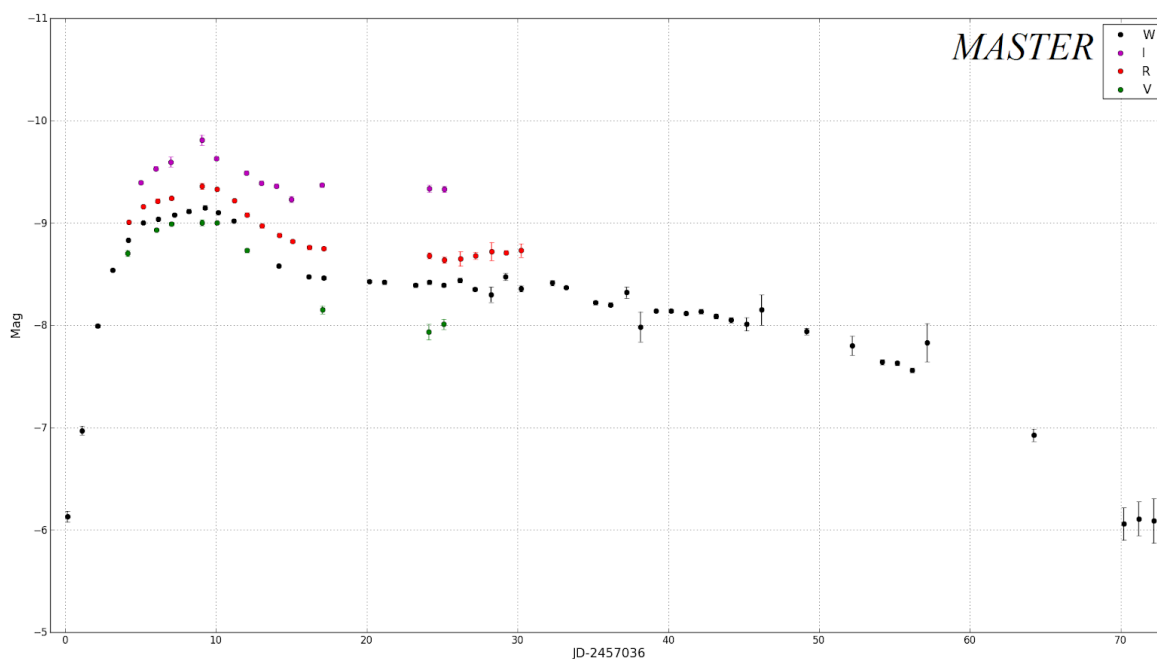


Рис. 4. Полная кривая блеска Яркой Красной Новой M31LRN2015 (MASTER ОТ J004207.99+405501.1), полученная в МАСТЕР-Кисловодск, МАСТЕР-Тунка (с идентичными инструментами, то есть в одной фотометрической системе). Принятый модуль расстояния 24.43 [33]). По вертикальной оси задана абсолютная звездная величина. Данные приведены в Таблицах 3, 4, 5, 6.

Таким образом, явление Новых может состоять из двух классов: классических термоядерных Новых и более редких явлений, Красных Новых, которые можно объяснить слиянием звездных компонент с образованием и последующим сбросом общей оболочки.

В четвертой главе приводится описание инспекционных наблюдений поля ошибок триггера LIGO/VIRGO гравитационно-волнового импульса GW170817 тремя телескопами Глобальной сети МАСТЕР.

Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР начала наблюдения поля ошибок источника G298048/GW170817 (Рисунок 5) в обсерватории МАСТЕР-SAAO в ЮАР 17 августа 2017 г 17:06:47 UT (через 0.4 дня после триггера), затем 17 августа 2017 г 20:29:26 UT наблюдения продолжились в обсерватории МАСТЕР-IAC в Испании, и позднее в МАСТЕР-OAFA в Аргентине, где с помощью камер сверхширокого поля WFC было получено первое изображение галактики NGC 4993 17 августа 2017 г в 22:54:18 UT.

Получен верхний предел $m=15^m.5$ на яркость оптического источника (килоновой) через 10 часов после слияния (см. Рисунок 6 (a, b)).

Таким образом, МАСТЕР-OAFA получил самое первое изображение галактики NGC 4993 после произошедшего в ней столкновения двух нейтронных звезд.

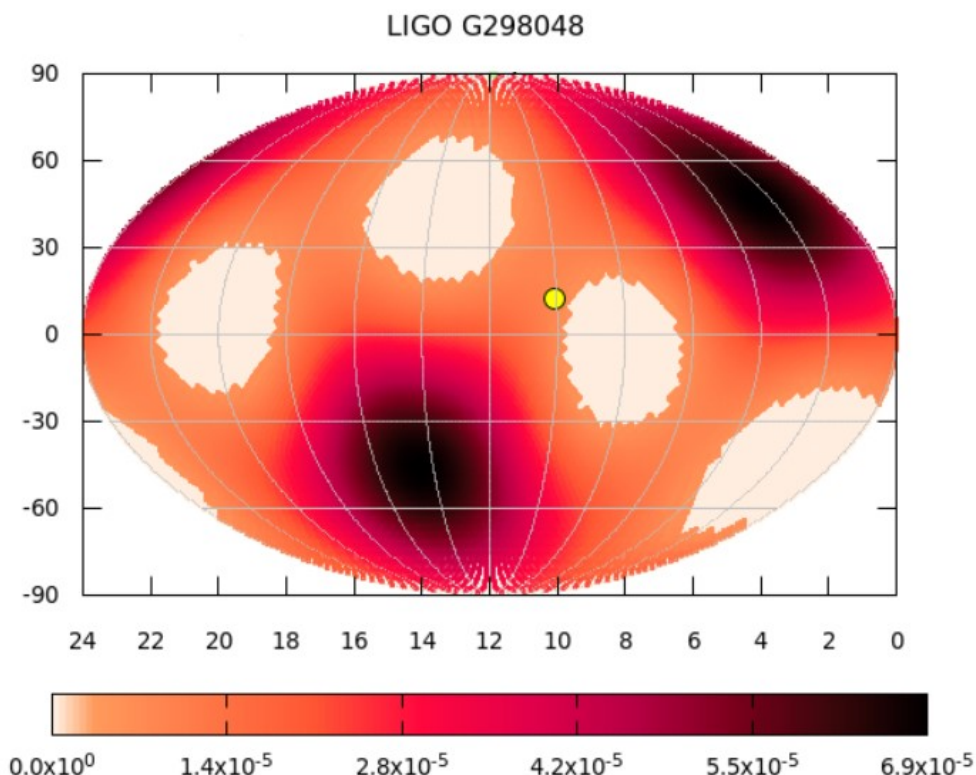


Рис. 5. Начальное поле ошибок гравитационно-волнового импульса G298048/GW170817. Желтой отметкой обозначено положение Солнца.

В ходе инспекции поля ошибок гравитационно-волнового импульса GW170817 LIGO/VIRGO телескоп МАСТЕР-OAFA получил два изображения галактики NGC 4993 в 23:59:54 UT (см. Рисунок 6 (е) и [17, 15, 18-21]), на которых в автоматическом режиме программным обеспечением МАСТЕР был независимо открыт оптический транзиент МАСТЕР ОТ J130948.10-232253.3, также открытый телескопом SWOPE и названный им SSS17a (позднее этот объект получил название AT2017gfo). Новый оптический источник был впервые опубликован в [35] и в дальнейшем наблюдался в широком диапазоне электромагнитных волн [15]. Изображения Килоновой на МАСТЕРЕ были получены через час после начала наблюдений 17 августа 2017 г 23:59:54 UT, то есть, через 11^h18^m50^s после времени срабатывания триггера LVC [18, 20, 21].

Последующие наблюдения практически однозначно показали, что 17 августа 2017 г астрономы наблюдали столкновение двух нейтронных звезд в галактике NGC 4993 и последующее оптическое послесвечение. Причем такие наблюдения проводились впервые не только на гравитационно-волновых детекторах, но и в гамма-, рентгеновском, ультрафиолетовом, оптическом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра.

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

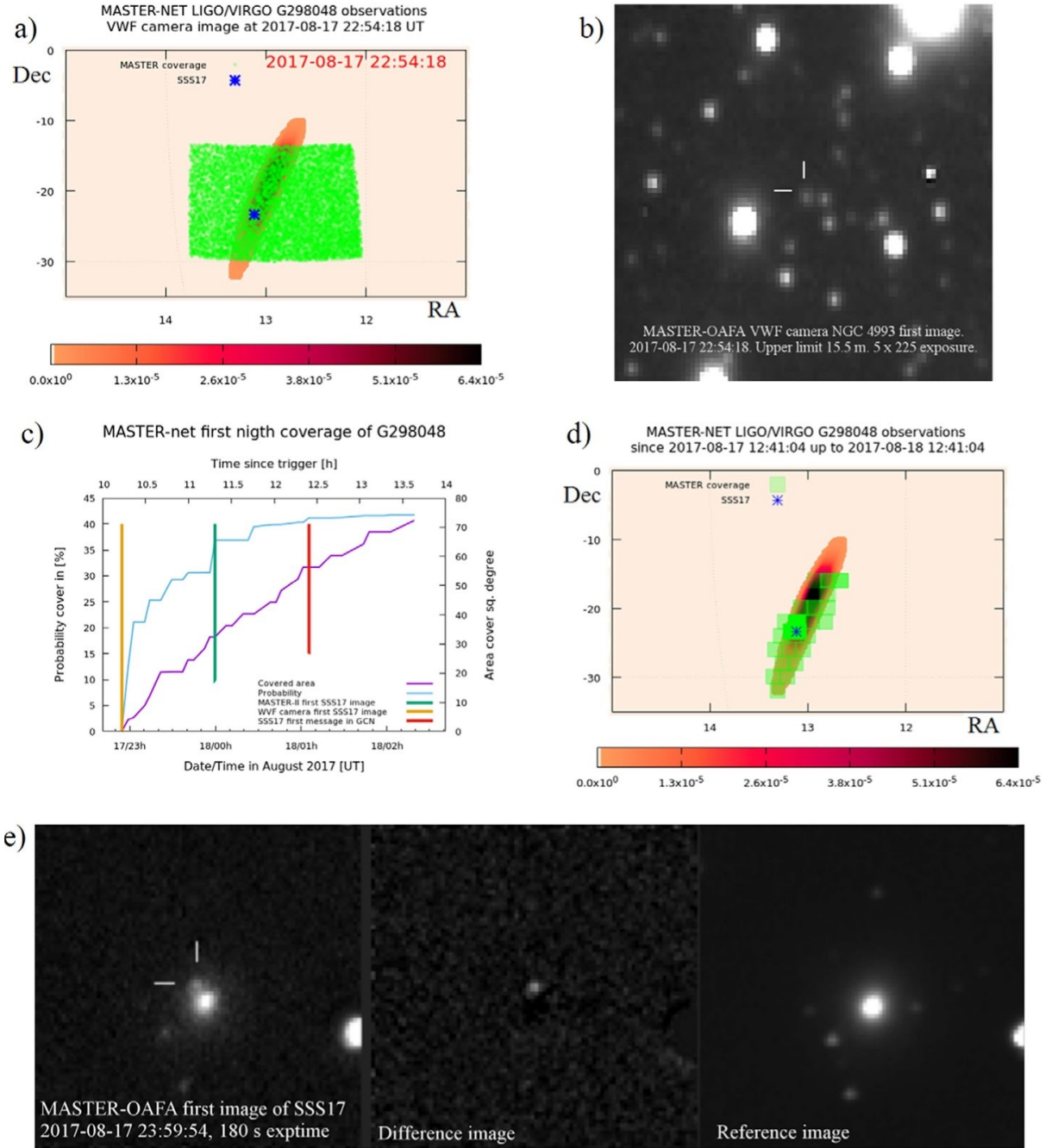


Рис. 6. а) Камеры сверхширокого поля МАСТЕР (WFC) снимали поле ошибок GW170817, начиная с 17 августа 2017 г 22:54:18 UT. Цветовая шкала показывает распределение вероятности G298048. б) первое изображение галактики NGC 4993, полученное MASTER-OAFA(WFC) [4], через 10 часов после триггера LVC GW170817 / G298048; в) динамика инспектирования Глобальной сетью телескопов-роботов МАСТЕР поля ошибок LIGO/Virgo G298048 BAYESTAR-HLV в течение первой ночи после алерта GW170817 (G298048). Голубая линия показывает увеличение покрытия области галактики NGC 4993, в которой вероятная килоновая MASTER OTJ130948.10-232253.3/SSS17a в автоматическом режиме наблюдалась камерами сверхширокого поля МАСТЕР (WFC) и главными телескопами обсерватории MASTER-OAFA, соответственно, за 2.5 и за ~1.5 часа до телеграммы SWOPE [35]. д) Инспектирование области ошибок G298048 BAYESTAR-HLV глобальной сетью телескопов-роботов МАСТЕР. Карта покрытия с пределом в 20^m.5, полученная в первую ночь телескопами МАСТЕР. е) Первое изображение килоновой MASTER OTJ130948.10-232253.3/SSS17a в NGC 4993, полученное телескопом MASTER-OAFA 17 августа 2017 г 23:59:54 UT через 40730 секунд после триггера. На левой панели показано изображение, полученное вычитанием 75% кадра сравнения.

Основные выводы

1. Разработан и внедрен Центр оперативного контроля телескопов Глобальной сети МАСТЕР. Приводится описание принципов работы основных компонентов Центра оперативного контроля.
2. Получена оригинальная кривая блеска яркой красной новой MASTER M31LRN 2015 с помощью идентичных телескопов Глобальной сети МАСТЕР в обсерваториях MASTER-AMUR, MASTER-Tunka и MASTER-Kislovodsk в единой фотометрической системе VRI в течение первых 30 дней и без фильтров в течение 70 дней.
3. В обсерватории MASTER-OAFA в Аргентине 17 августа 2017 г в 22:54:18 UT с помощью камер сверхширокого поля MASTER-WFC было получено первое изображение галактики NGC4993 после произошедшего в ней слияния нейтронных звезд, зарегистрированного гравитационно-волновыми детекторами LIGO/Virgo GW170817. Получен предел $m=15^m.5$ на яркость оптического источника (килоновой) через 10 часов после слияния. Таким образом, в MASTER-OAFA получено самое первое изображение галактики NGC 4993 после произошедшего в ней столкновения двух нейтронных звезд.
4. В ходе инспекции поля ошибок гравитационно-волнового импульса LIGO/VIRGO GW170817 тремя обсерваториями Глобальной сети МАСТЕР, MASTER-SAAO, MASTER-IAC и MASTER-OAFA, основным телескопом обсерватории MASTER-OAFA 17 августа 2017 г в 23:59:54 UT был независимо обнаружен оптический транзиент MASTER OTJ130948.10-232253.3/SSS17a

Список литературы

1. Akerlof C. W., Kehoe R. L., McKay T. A., et al., "The ROTSE-III Robotic Telescope System", *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 115, Issue 803, pp. 132-140., 2003.
2. Castro-Tirado, A. J. et al., "The Burst Observer and Optical Transient Exploring System (BOOTES)", *Astronomy and Astrophysics Supplement*, v.138, pp. 583-585, 1999.
3. Böer, M. et al., "TAROT: Observing gamma-ray bursts in progress", *Astronomy and Astrophysics Supplement*, v.138, p.579-580, 1999.
4. Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E., et al., "Master Robotic Net", *Advances in Astronomy*, vol. 2010, 2010.
5. Gehrels N., Chincarini G., Giommi P., et al., "The Swift Gamma-Ray Burst Mission", *The Astrophysical Journal*, Volume 611, Issue 2, pp. 1005-1020, 2004.

6. Atwood W. B., Abdo A. A., Ackermann M., "The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission", *The Astrophysical Journal*, Volume 697, Issue 2, pp. 1071-1102, 2009.
7. Abbott B. P., Abbott R., Adhikari R., "LIGO: the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory", *Reports on Progress in Physics*, Volume 72, Issue 7, id. 076901, 2009.
8. Degallaix et al, "Advanced Virgo Status", in *Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 467. of *The 9th LISA Symposium*, p.151, 2013.
9. Karle et al, "Neutrino Astronomy - A Review of Future Experiments", *Nuclear Physics B Proceedings Supplements*, Volume 235, pp. 364-370, 2003.
10. 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*, Volume 26, Issue 3, pp. 155-173, 2006.
11. Ageron, M., Aguilar, J. A., Al Samarai, I., Albert, A., Ameli, F. et al., "ANTARES: The first undersea neutrino telescope", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Section A, Volume 656, Issue 1, pp. 11-38, 2011.
12. Липунов В.М., Владимиров В. В., Горбовской Е.С., Кузнецов А. С. и др., "Концепция многофункционального астрономического комплекса и динамически интегрированной базы данных в применении к многоканальным наблюдениям глобальной сети МАСТЕР", *Астрономический журнал*, Том 96, № 4, с. 288-304, 2019.
13. Lipunov, V. M., Blinnikov, S., et al., "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, pp. 2339-2350, 2017.
14. Lipunov, V. M., Gorbovskey, E., et al., "MASTER Optical Detection of the First LIGO/Virgo Neutron Star Binary Merger GW170817", *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 850, Issue 1, article id. L1, 9 pp, 2017.
15. Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al., "Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger", *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 848, Issue 2, article id. L12, 59 pp., 2017b.
16. Kurtenkov, A., Tomov, T., Fabrika, S., et al., "M31N 2015-01a - A Luminous Red Nova", *The Astronomer's Telegram*, No.7150, 2015b
17. Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al., "GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral", *Physical Review Letters*, Volume 119, Issue 16, id.161101, 2017a.
18. Lipunov, V., Gorbovskey, E., Kornilov, V., et al., *GCN*, 21546, 2017a.
19. Lipunov, V., Gorbovskey, E., Kornilov, V., et al., *GCN*, 21570, 2017b.
20. Lipunov, V., Gorbovskey, E., Kornilov, V., et al., *GCN*, 21587, 2017c.
21. Lipunov, V., Gorbovskey, E., Kornilov, V., et al., *GCN*, 21687, 2017d.
22. Lipunov V. M., Kornilov V., Gorbovskey, E., et al., "First gravitational-wave burst GW150914: MASTER optical follow-up observations", *Monthly*

Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 465, Issue 3, pp. 3656-3667, 2017e.

23. Abbott B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al., "Astrophysical Implications of the Binary Black-hole Merger GW150914", *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 818, Issue 2, article id. L22, 15 pp., 2016a.

24. Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D., et al., "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", *Physical Review Letters*, Volume 116, Issue 6, id.061102, 2016b.

25. 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*, Volume 826, Issue 1, article id. L13, 8 pp., 2016c.

26. Hodapp K. W., Kaiser N., Aussel H., et al., "Design of the Pan-STARRS telescopes", *Astronomische Nachrichten*, Vol.325, Issue 6, pp. 636-642, 2004.

27. Brown P. G., Assink J. D., Astiz L., et al., "A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors", *Nature*, Volume 503, Issue 7475, pp. 238-241, 2013.

28. Drake A. J., Djorgovski S. G., Mahabal A., et al., "First Results from the Catalina Real-Time Transient Survey", *The Astrophysical Journal*, Volume 696, Issue 1, pp. 870-884, 2009.

29. Rau A., Kulkarni S. R., et al., "Exploring the Optical Transient Sky with the Palomar Transient Factory", *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 121, Issue 886, pp. 1334, 2009.

30. Kornilov V. G., Lipunov V. M., Gorbovskoy E. S., et al., "Robotic optical telescopes global network MASTER II. Equipment, structure, algorithms", *Experimental Astronomy*, Volume 33, Issue 1, pp. 173-196, 2012.

31. Pruzhinskaya M. V., Krushinsky V. V., et al., "Optical polarization observations with the MASTER robotic net", *New Astronomy*, Volume 29, pp. 65-74, 2014.

32. Shumkov V., Lipunov V. M., Gorbovskoy, E., et al., "Possible Nova in Andromeda detected by MASTER", *The Astronomer's Telegram*, No.6911, 2015.

33. Freedman W. L., Madore B. F., "An Empirical Test for the Metallicity Sensitivity of the Cepheid Period-Luminosity Relation", *The Astrophysical Journal*, v.365, p.186, 1990.

34. Blinnikov S. I., et al., "Theoretical light curves for deflagration models of type Ia supernova", *Astronomy and Astrophysics*, Volume 453, Issue 1, pp. 229-240, 2006.

35. Coulter C. D., Kilpatrick M. R., et al., *GCN*, 21529, 2017.