

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Кузнецов Артем Сергеевич
Создание динамически интегрированной базы данных
роботизированной сети МАСТЕР и мониторинг исторической вспышки
микровозара V404 Cyg/2023+338 2015 года

01.03.02 — Астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

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

Научный руководитель — *Липунов Владимир Михайлович — доктор физико-математических наук, профессор, Почётный профессор МГУ, зав. лабораторией космического мониторинга ГАИШ*

Официальные оппоненты — *Захаров Александр Фёдорович — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник ИТЭФ имени А.И. Алиханова*

Хоперсков Александр Валентинович — доктор физико-математических наук, профессор, ИМИТ ВолГУ, зав. кафедрой информационных систем и компьютерного моделирования

Цветков Дмитрий Юрьевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ГАИШ МГУ

Защита диссертации состоится 5 сентября 2019 года в 14 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: akuznetsov@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»: <https://istina.msu.ru/dissertations/211127496/>

Автореферат разослан 17 июля 2019 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

М.В. Пружинская

Общая характеристика работы.

Данная диссертация посвящена анализу международного опыта использования роботов-телескопов и внутренних потребностей проекта МАСТЕР (Мобильная Астрономическая Сеть Телескопов-Роботов) [1–6] в части программного обеспечения, после которого было выявлено, что для успешной работы телескопов в режиме сети, необходима постоянная синхронизация действий, а также возможность быстрого совместного анализа данных, получаемых всеми обсерваториями и, как следствие, необходимость в централизованном хранении и анализе этих данных. Для этого было предложено усовершенствовать комплекс компьютерных программ проекта МАСТЕР, чтобы обеспечить полную роботизацию обсерваторий сети и оперативный доступ к результатам наблюдений каждой обсерватории (база данных объектов – фотометрия, астрометрия; база данных изображений). Итоговым программным продуктом, удовлетворяющим современным нуждам сети роботов-телескопов МАСТЕР стала созданная Кузнецовым Артемом Сергеевичем динамически интегрированная база данных (ДИБД)[7]. Внедрение и успешное функционирование ДИБД и центрального планировщика позволили провести широкополосный и поляризационный мониторинг исторической вспышки микроквазара V404 Cyg/2023+338 2015 года[8,9].

На базе полученных в ходе работы результатов, Кузнецовым А.С. были опубликованы двадцать две статьи (с коллективом соавторов), изданные в рецензируемых научных журналах. На защиту выносятся результаты, обнародованные в трёх из них. Также автором опубликовано более тысячи четырёхсот электронных циркуляров ATel (The Astronomer's Telegram) и GCN (The Gamma-ray Coordinates Network), включая электронные циркуляры по результатам наблюдения гравитационно-волновых алертов LIGO/Virgo, гамма-всплесков (Swift, Fermi и др.) и нейтрино сверхвысоких энергий (IceCube, ANTARES).

Актуальность диссертационной работы.

Современное состояние технологического прогресса как в части материальной базы, так и в части программного обеспечения, определяет новый высокотехнологичный этап развития астрономии как науки. Применение передовых методов сбора и обработки информации, необходимой для исследования космоса в целом, и его объектов в частности, даёт астрофизикам возможность аккумулировать большие данные и оперативно обмениваться ими в рамках различных проектов, единовременно задействовать в исследованиях телескопы нескольких обсерваторий и сотрудничать на максимально результативном уровне.

Одним из самых эффективных инструментов исследования нестационарных и кратковременных транзиентных явлений, происходящих в нашей Вселенной, являются телескопы-роботы. Они используются в ряде крупных исследовательских программ по всему миру, в том числе, для наблюдения и изучения собственного оптического излучения гамма-всплесков (GRB) – самых мощных взрывов в известной нам Вселенной; для исследования областей локализации источников гравитационных волн; для поиска Сверхновых и Новых звёзд; открытия новых экзопланет (за пределами Солнечной системы), комет, астероидов и т.д. К наиболее важным свойствам таких телескопов относятся широкопольность, время наведения по алерту, скорость обработки наблюдений и предельная звёздная величина, что позволяет обеспечить эффективное исследование максимальной площади области локализации быстропеременных явлений за наименьший промежуток времени. Ввиду непредсказуемости большинства транзиентных явлений и случайности их распределения на небесной сфере, эти характеристики роботов-телескопов повышают вероятность обнаружения и качество изучения источников алертов. Для решения актуальных задач современной астрофизики в Московском Университете учёными под руководством профессора В.М. Липунова в 2002 году была создана Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР, которая, благодаря своим преимуществам внесла наибольшие вклады в исследования первого гравитационно-волнового события GW150914[10,11] и триплета нейтрино IceCube [12]; обнаружила поляризацию собственного оптического излучения гамма-всплеска

GRB160625B[13]; провела исследование областей локализации быстрых радиовспышек в оптическом диапазоне[14]; за последние несколько лет обнаружила свыше 1600 вспышек, удалённых на расстояния до миллиарда световых лет, в том числе, первый оптический источник, связанный с источником гравитационных волн – Килоновую GW170817[15,16], яркую красную Новую MASTER OT J004207.99+405501.1 / M31LRN 2015[17], затменный поляр MASTER OT J061451.70-272535.5, оптические источники гамма-всплесков, сотни карликовых Новых, Сверхновых различных типов, систем типа ϵ -Aur, а также обнаружила потенциально опасные астероиды[18–25].

География размещения идентичного оборудования, сделала телескопы-роботы сети МАСТЕР наиболее эффективной исследовательской системой в мире. К 2019 году обсерватории МАСТЕР расположены в России, Испании, Южной Африке и Аргентине. Глобальный статус проекта определяет перечень приоритетных целей, в том числе, создание роботизированной сети и единой базы данных, что является практической необходимостью для занятия передовых позиций на международной арене среди других аналогичных проектов, и для успешного взаимодействия с партнёрами (международные коллаборации МАСТЕР и LIGO/Virgo, МАСТЕР и IceCube, МАСТЕР и ANTARES, МАСТЕР и Swift, Fermi, MAXI, Integral и другие). К ним же относятся и крупнейшие наземные, и космические телескопы, которые проводят спектральные и другие исследования открываемых сетью МАСТЕР объектов: 10.4-м телескоп GCT (Большой Канарский Телескоп, Испания), 10-м телескоп SALT (ЮАР), 4.2-м WHT (Канары, Испания), 3.6-м NTT (ESO, Chile), 9.2-м HET (США), гамма-обсерватории Swift и ИНТЕГРАЛ (ЕС, Россия, США), 6-м БТА САОРАН (Россия), 2.1-м Guillermo Haro (Мексика), 1.8-м Copernico telescope (Италия) и другие.

Цель работы

Цель работы заключается в создании и внедрении в эксплуатацию программных инструментов для анализа результатов фотометрической и астрометрической обработки широкопольных изображений по всем телескопам

Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР МГУ. С помощью созданных соискателем программных решений анализа данных (динамически интегрированная база данных[7]) были проанализированы уникальные широкополосные и поляризационные наблюдения исторической вспышки микроквара V404 Cyg/GS2023+338[9], полученные на телескопах-роботах МАСТЕР в июне-июле и декабре 2015 года, и обнаружен эпизод переменной поляризации оптического излучения V404 Cyg/GS2023+338[8].

Новизна работы

Проект Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР не имеет аналогов в России на сегодняшний день. Весь комплекс управляющих программ был создан впервые и позволяет осуществлять полностью автономные (без участия человека) наблюдения. Вся обработка результатов наблюдений проводится непосредственно на каждой обсерватории МАСТЕР (центральных серверах), что даёт возможность оперативно обнаруживать новые объекты и публиковать результаты их фотометрии вне зависимости от пропускной способности интернет-каналов обсерваторий. И результаты обработки, и непосредственно изображения доступны по интернету любому авторизованному пользователю.

Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР предназначена для изучения широкого круга явлений и объектов, таких как источники собственного оптического излучения гамма-всплесков, оптические источники гравитационных волн (Килоновая), вспышки квазаров, вспышки Сверхновых, Новых, карликовых новых звёзд различных типов, системы типа ε -Aur, звезды типа R CrB, кометы, астероиды (включая потенциально-опасные) и др. С учётом этой специфики в МАСТЕР впервые создан пакет программ обработки астрономических данных, позволяющий в реальном времени решать следующий комплекс задач:

- определять абсолютные координаты и блеск всех объектов, попавших в кадр размером 4 кв. градусов (и до 1000 кв. градусов в случае камер сверхширокого поля);
- классифицировать объекты по типам (звезды, галактики, астероиды и т.д.);

- обнаруживать транзиентные объекты;
- проводить первичную классификацию транзиентных объектов.

Созданная центральная база данных МАСТЕР содержит в себе результаты всех наблюдений и используется для изучения любых типов объектов во Вселенной.

Примером эффективного функционирования комплекса управляющих и обрабатывающих программ являются наблюдения собственного излучения и послесвечений гамма-всплесков, открытия большого числа оптических транзиентов, сверхновых звёзд, астероидов и т.д. в ходе регулярного обзора, каждой из обсерваторий сети, все звёздное небо было осмотрено несколько раз. По запросу астрономам предоставляется доступ к архивным данным. Архив, в свою очередь, постоянно пополняется.

Положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Создание динамически интегрированной базы данных (ДИБД) роботизированной сети МАСТЕР[7].
2. Уникальные широкополосные и поляризационные наблюдения исторической вспышки микроквазара V404 Cyg/GS2023+338 2015 года[9].
3. Обнаружение третьего эпизода переменной поляризации оптического излучения V404 Cyg/GS2023+338[8].

Личный вклад автора

Успешное функционирование роботизированной сети МАСТЕР достигается благодаря уникальному программному обеспечению, которое условно можно разделить на три части: комплекс программ, отвечающих за управление процессом наблюдений, система обработки получаемых телескопом изображений, и, наконец, система выделения неотожествлённых объектов и их астрономическая классификация. Все эти узлы опираются на базу данных, содержащую полную информацию как о текущем статусе обсерватории, так и обо всей истории

наблюдений. Руководителем (проф. Липунов В.М.) перед автором (Кузнецов А.С.), была поставлена задача объединения локальных баз данных каждой обсерватории МАСТЕР в общую централизованную базу данных, содержащую полную информацию о Глобальной сети телескопов-роботов МАСТЕР. Такая база позволяет телескопам МАСТЕР работать в «команде», зная о целях и задачах «соседей», а также помогая им своими архивными наблюдениями. Руководителем и автором было введено новое понятие «Динамически интегрированная база данных» (ДИБД) – это база, содержащая всю доступную информацию обо всех наблюдениях сети, поддерживающая непрерывный обмен данными с каждым узлом сети и предоставляющая оперативный доступ к центральному архиву для авторизованных пользователей.

В создание и развитие ДИБД автор внёс решающий вклад (выносится на защиту в положении 1 «Создание динамически интегрированной базы данных (ДИБД) роботизированной сети МАСТЕР» (опубликовано в Главе 4 «Обработка наблюдений, «BIG DATA» и распределённые БД»[7])), определив и автоматизировав технические процессы в работе сети за счёт написания и реализации соответствующих программных алгоритмов, что позволило сформировать и поддерживать в актуальном состоянии ДИБД и решать поставленные перед проектом МАСТЕР задачи.

Благодаря проделанной при написании диссертации работе, было достигнуто повышение эффективности функционирования сети МАСТЕР за счёт внедрения постоянно совершенствующегося программного обеспечения и создания уникальной базы данных. Доступ к базе позволяет учёным анализировать снимки, полученные сразу с 8 телескопов в заданной ретроспективе, а также осуществлять синхронизацию исследований с учёными из других проектов, что, в том числе, и обеспечило возможность мониторинга исторической вспышки микроквара V404 Cyg/2023+338 2015 года.

Автор равноправно (с соавторами соответствующих публикации) участвовал в интерпретации полученных результатов и обнаружении трёх эпизодов переменной поляризации оптического излучения V404 Cyg/GS2023+338 и внёс решающий вклад в части выносимых на защиту выводов (выносится на защиту в

положениях 2 и 3 «Уникальные широкополосные и поляризационные наблюдения исторической вспышки микроквазара V404 Cyg/GS2023+338 2015 года» и «Обнаружение третьего эпизода переменной поляризации оптического излучения V404 Cyg/GS2023+338», опубликовано в [8,9]).

С момента прихода в проект МАСТЕР (с 2007 года по настоящий момент), автор постоянно участвует в поддержании функциональности всех пунктов сети, получении и интерпретации новых научных результатов сетью МАСТЕР.

Апробация работы и публикации

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается публикациями в ведущих научных журналах и их апробацией на международных и всероссийских конференциях.

Результаты работы по теме диссертации отражены в двадцати двух статьях, изданных в рецензируемых журналах. Положения, выносимые на защиту опубликованы в трёх из них.

Научные статьи, опубликованные в журналах WoS:

1. Lipunov V.M., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. MASTER optical polarization variability detection in the Microquasar V404 Cyg/GS2023+33 // The Astrophysical Journal. 2016. № 2 (833). С. 1–12. // Импакт-фактор: 5.402
2. Липунов В.М., ... Кузнецов А.С. [и др.]. Концепция многофункционального комплекса и динамически интегрированной базы данных в применении к многоканальным наблюдениям глобальной сети МАСТЕР // Астрономический журнал. 2019. № 4 (96). С. 288–304. // Импакт-фактор: 0.839
3. Липунов В.М., ... Кузнецов А.С. [и др.]. V404 CYG / GS 2023 + 338 : Мониторинг в оптическом диапазоне на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР во время супервспышки 2015 г. // Астрономический Журнал. 2019. № 7 (96). С. 531–546. // Импакт-фактор: 0.839

Иные научные статьи, опубликованные в журналах WoS:

4. Aartsen M.G., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. “Multiwavelength follow-up of a rare IceCube neutrino multiplet” // *Astronomy and Astrophysics*. 2017. том 607, стр. 115I. // Импакт-фактор: 4.902
5. Abbott B.P., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. ”Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave transient GW150914” // *Astrophysical Journal Letters*. 2016. Том 826. // Импакт-фактор: 5.572
6. Abbott B.P., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. “Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger” // *Astrophysical Journal Letters*. 2017. № 2 (848). // Импакт-фактор: 5.572
7. Gorbovskey E., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. Transient detections and other real-time data processing from MASTER-VWF wide-field cameras // *Advances in Astronomy*. 2010. (2010). // Импакт-фактор: 1.307
8. Gorbovskey E.S., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. Early polarization observations of the optical emission of gamma-ray bursts: GRB 150301B and GRB 150413A // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2016. № 3 (455). С. 3312–3318. // Импакт-фактор: 4.893
9. Gorbovskey E.S., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. Prompt, early and afterglow optical observations of five γ -ray bursts: GRB 100901A, GRB 100902A, GRB 100905A, GRB 100906A and GRB 101020A // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2012. № 3 (421). С. 1874–1890. // Импакт-фактор: 4.893
10. Kornilov V.G., ... Kuznetsov. A.S. и др. Robotic optical telescopes global network MASTER II. Equipment, structure, algorithms // *Experimental Astronomy*. 2012. № 1 (33). // Импакт-фактор: 1.907
11. Lipunov V., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. Discovery of an unusual bright eclipsing binary with the longest known period: TYC 2505-672-1/MASTER OT J095310.04+335352.8 // *Astronomy and Astrophysics*. 2016. (588). // Импакт-фактор: 4.902
12. Lipunov V., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. Master robotic net // *Advances in Astronomy*. 2010. (2010). // Импакт-фактор: 1.307
13. Lipunov V.M., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. 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. 2017. № 2 (470). // Импакт-фактор: 4.893

14. Lipunov V.M., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. MASTER Optical Detection of the First LIGO/Virgo Neutron Star Binary Merger GW170817 // Astrophysical Journal Letters. 2017. № 1 (850). // Импакт-фактор: 5.572

15. Lipunov V.M., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. The optical identification of events with poorly defined locations: The case of the Fermi GBM GRB 140801A // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2016. № 1 (455). С. 712–724. // Импакт-фактор: 4.893

16. Lipunov V.M., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. First gravitational-wave burst GW150914: MASTER optical follow-up observations // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2017. № 3 (465). // Импакт-фактор: 4.893

17. Lipunov V.M., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. The first gravitational-wave burst GW150914, as predicted by the scenario machine // New Astronomy. 2017. (51). // Импакт-фактор: 0.926

18. Oknyansky V.L., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. The curtain remains open: NGC 2617 continues in a high state // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2017. № 2 (467). // Импакт-фактор: 4.893

19. Pruzhinskaya M.V., ... Kuznetsov. A.S. [и др.]. Optical polarization observations with the MASTER robotic net // New Astronomy. 2014. (29). // Импакт-фактор: 0.926

20. Tyurina N. ... Kuznetsov. A.S. [и др.], MASTER prompt and follow-up GRB observations // Advances in Astronomy. 2010. (2010). // Импакт-фактор: 1.307

21. Горбовской Е.С., ... Кузнецов А.С. [и др.]. Сеть Роботизированных Оптических Телескопов Мастер-II. Первые результаты // Астрономический журнал. 2013. № 04 (90). С. 267–321. // Импакт-фактор: 0.839

22. Липунов В.М., ... Кузнецов А.С. [и др.]. Оптические наблюдения гамма-всплесков, открытие сверхновых 2005bv, 2005ee, 2006ak и поиск транзиентов на телескопе-роботе “МАСТЕР” // Астрономический журнал., 2007. № 12(84). С. 1110–1134. // Импакт-фактор: 0.839

На июнь 2019 года, всего статей, ссылающихся на публикации автора 1348, из них в реферируемых журналах опубликованы 1265. Автор диссертации является

соавтором более 1400 электронных публикаций в циркулярах GCN (The Gamma-ray Coordinates Network, http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html/) и ATel (The Astronomers Telegram <http://www.astronomerstelegam.org>). По данным WoS индекс Хирша равен 13.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Массовое открытие оптических транзиентов на сети МАСТЕР. // Ломоносовские чтения - 2013. Секция астрономии и геофизики (ГАИШ МГУ, Россия, 2013)
2. Fast optical transient detection by MASTER Global Robotic Net on the example of FERMI alerts // The International Workshop on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts (KChR, Nizhnij Arkhyz (SAO), KBR, Terskol (BNO), October, 7 - 14, 2015, Россия, 2015)
3. Optical Transients discovered by MASTER // MULTIFREQUENCY BEHAVIOUR OF HIGH ENERGY COSMIC SOURCES - XI (Палермо, 2015)
4. МАСТЕР -Глобальная сеть телескопов-роботов//Международный авиационно-космический салон МАКС-2015 (Московская обл., г. Жуковский, Россия, 2015)
5. Сверхновые, оптические источники гамма-всплесков и другие транзиенты, открытые на сети телескопов МАСТЕР в 2014г. // Физика Космоса. 44международная студенческая научная конференция (2015г) (Коуровская обсерватория УрФУ, Россия, 2015)
6. Супер-робот Глобальной сети космического мониторинга МАСТЕР // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2015» (Москва, Россия, 2015)
7. Фотометрические исследования ярких сверхновых в ГАИШ МГУ // Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА-2015) (г. Москва, Институт космических исследований РАН, Россия, 2015)
8. NGC 2617 в активном состоянии (принята в MNRAS) // Успехи Российской Астрофизики 2016: теория и эксперимент (Москва, ГАИШ МГУ, Россия, 2016)

9. The curtain is still open: NGC 2617 remains in a high state // Актуальные проблемы внегалактической астрономии XXXIII (г. Пушино, Россия, 2016)
10. Обнаружение поляризации собственного оптического излучения гамма-всплесков GRB 150301B и GRB150413A на телескопах МАСТЕР МГУ. // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2016» (МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 2016)
11. Первый поиск оптических транзиентов в области локализации гравитационно-волнового события LIGO GW150914 телескопами Глобальной сети МАСТЕР // Общественный семинар астрофизиков имени Якова Борисовича Зельдовича 2016 (МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ, Россия, 2016)
12. MASTER socket system: GRB, LIGO, IceCube, ANTARES events // Международная конференция "Bursting Universe by Robots Eyes" (Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга (ГАИШ) МГУ, Россия, 2017)
13. MASTER: LIGO follow-up investigation // Международная конференция "Bursting Universe by Robots Eyes" (Взрывающаяся Вселенная глазами роботов) (ГАИШ МГУ, Россия, 2017)
14. Second historical burst of V 404 Cyg // Международная конференция "Bursting Universe by Robots Eyes" (ГАИШ МГУ, Россия, 2017)
15. Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР // IV "Молодёжная школа «Космическая наука»" (Казань, Россия, 2017)
16. Гравитационно-волновая астрономия: обнаружение килоновой LIGO GW170817 на телескопах Глобальной сети МАСТЕР МГУ // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018» (Россия, 2018)
17. Динамически интегрированная база данных роботизированной сети МАСТЕР и мониторинг исторической вспышки микроквара V404 Cyg/2023+338 2015 года // УСПЕХИ РОССИЙСКОЙ АСТРОФИЗИКИ 2018: Теория и Эксперимент (МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 2018)

Структура и обзор диссертации

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей три главы, заключения и библиографии. В диссертации сто восемьдесят четыре страницы, включая двадцать шесть рисунков, семь таблиц, а также одно приложение. Библиография включает в себя сто тринадцать наименований на десяти страницах.

Во **введении** автор рассматривает влияние современных технологий в целом, и глобальной сети интернет в частности, на развитие автономной работы робототелескопов Глобальной сети МАСТЕР. Ставятся приоритетные задачи, решение которых поможет повысить эффективность и результативность исследований, проводимых телескопами-роботами Глобальной сети МАСТЕР за счёт минимизации негативного влияния человеческого фактора на функционирование системы. Определяется актуальность диссертационной работы, её цель, новизна и практическая значимость. Далее формулируются положения, выносимые на защиту, приводится список работ, опубликованных на основании данных, полученных в результате написания диссертации, раскрывается личный вклад автора.

Первая глава представляет собой анализ проектного опыта исследовательских команд со всего мира, в которых применялись телескопы-роботы. Информация структурирована в соответствии с качественными и количественными характеристиками проектов, а именно: число задействованных телескопов-роботов (от одного и более), сложность их взаимодействия между собой (автономные, сеть телескопов-роботов телескопов, роботизированная сеть телескопов), вовлеченность в интернациональные проекты. Подробно раскрывается информация о следующих МАСТЕР - единственная глобальная сеть телескопов-роботов, управляемая единым программным обеспечением, которое позволяет вести синхронное наблюдение на всех телескопах одновременно, распределять между ними задачи и отслеживать деятельность всех аппаратов единовременно.

Вторая глава посвящена созданию нового программного обеспечения для сети МАСТЕР, а именно динамически интегрированной базы данных (ДИБД).

На данный момент проект Глобальная роботизированная сеть телескопов МАСТЕР является международной и объединяет восемь телескопов (рисунок 1). Вся обработка результатов наблюдений проводится, непосредственно на каждой обсерватории (центральных серверах), что позволяет оперативно обнаруживать новые объекты и публиковать результаты их фотометрии. И результаты обработки, и непосредственно изображения доступны по интернету любому авторизованному пользователю.

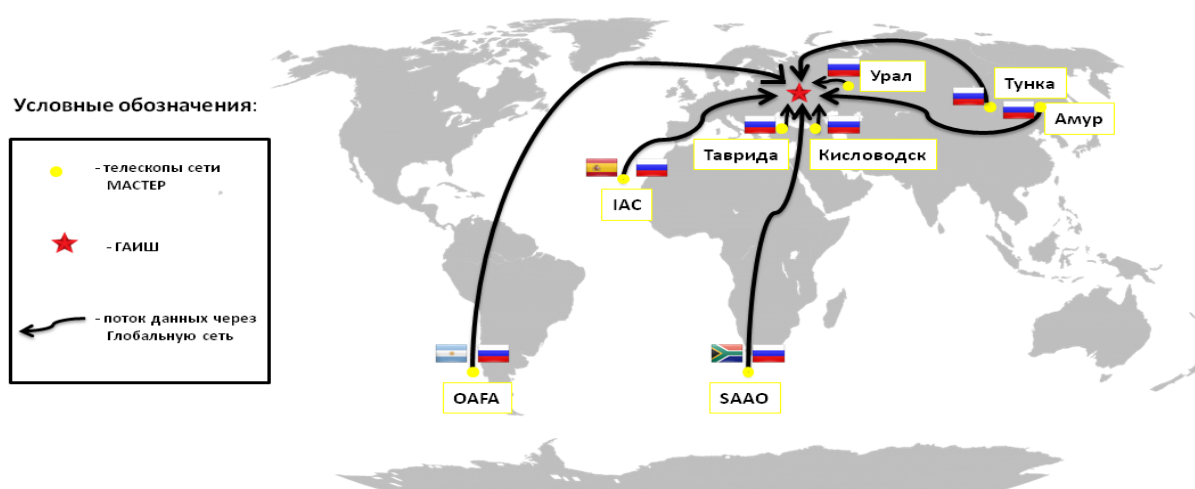


Рисунок 1. Карта-схема передачи данных с телескопов Глобальной роботизированной сети МАСТЕР в центральную базу данных, февраль 2019 г.

Анализ особенностей функционирования собственного программного обеспечения МАСТЕР, последующая его модернизация и дообработка некоторых частей информационной системы сыграли решающую роль в переходе проекта от формата сети роботов-телескопов к роботизированной сети. Объединение роботов-телескопов МАСТЕР в единую сеть, в ходе реализации практической части данной работы, сделало возможным более эффективно использовать наблюдательное время каждой обсерватории, что даёт неоспоримое конкурентное преимущество для проведения астрономических исследований и занимать лидирующие позиции в мировой науке.

Современная астрономия столкнулась с проблемой систематизации, хранения и обработки огромных массивов данных, в которых может содержаться не теряющая своей актуальности информация. Оптимизация процесса

взаимодействия человека и обработки этой информации, создание интуитивно понятного каждому учёному интерфейса на базе алгоритмов, отвечающих целям и задачам проекта МАСТЕР, это одна из приоритетных задач, решение которой, после анализа международного опыта было предложено и реализовано автором. Создание центральной базы, то есть объединённого архива данных, поступающих с восьми обсерваторий Глобальной сети роботов-телескопов МАСТЕР, нивелировало негативные факторы обособленности каждого отдельного телескопа (ввиду особенностей их географического положения).

Предложенная автором Динамически Интегрированная База Данных (ДИБД) представляет собой усовершенствованный процесс накопления и обмена информацией между всеми узлами сети. Фактически это все восемь обсерваторий-хранилищ и центральная база, размещённая в городе Москве в ГАИШ МГУ. ДИБД повышает оперативность работы астрономов как непосредственно во время запланированных наблюдений, так и внеплановых, при получении алертов о событии, произошедшем всего несколько секунд назад. Также единое информационное пространство ДИБД, благодаря постоянному самоанализу, позволяет оптимизировать поиск объектов в большом квадрате ошибок, составлять индивидуальный план обзора для каждого телескопа в реальном времени, и пр.

Центральный планировщик МАСТЕР - это часть программного обеспечения динамически интегрированной базы данных, а точнее некоторый программный алгоритм, предназначенный для осуществления совместного скоординированного управления наблюдениями сети телескопов роботов. Работа данной программы основана на универсальной авторской методике определения приоритета и очереди наблюдений. На данный момент для расчёта приоритета съёмки используется 24 независимых параметра, параметра разделённых на шесть условных групп. Функционирование ДИБД и Центрального планировщика позволили провести широкополосный и поляризационный мониторинг исторической вспышки V404 Cyg роботизированной сетью МАСТЕР.

В **третьей главе** автор описывает функционирование ДИБД на примере мониторинга (широкополосного и поляризационного) исторической вспышки v404 Cyg роботизированной сетью МАСТЕР.

15 июня 2015 года космическая обсерватория Swift, впервые за последние 26 лет, обнаружила признаки возобновления рентгеновской активности V404 Cyg. Позднее Swift и INTEGRAL многократно генерировали алерты о возрастающей активности источника в течение нескольких недель (также сообщения о новых вспышках были получены в конце декабря 2015 года). Телескопы Глобальной роботизированной сети МАСТЕР первыми навелись и начали наблюдения V404[9]. В ходе реализации практической части данной диссертации, был проведён эффективный мониторинг исторической вспышки микроквара V404 Cyg 2023+338 в 2015 году. В автоматическом режиме, в течение нескольких недель, наблюдения производили все обсерватории сети МАСТЕР согласованно. Одним из результатов мониторинга является полученная, уникальная по продолжительности, кривая блеска объекта (рисунок 2) – это более 2000 наблюдательных точек на протяжении июня-июля и декабря 2015 года.

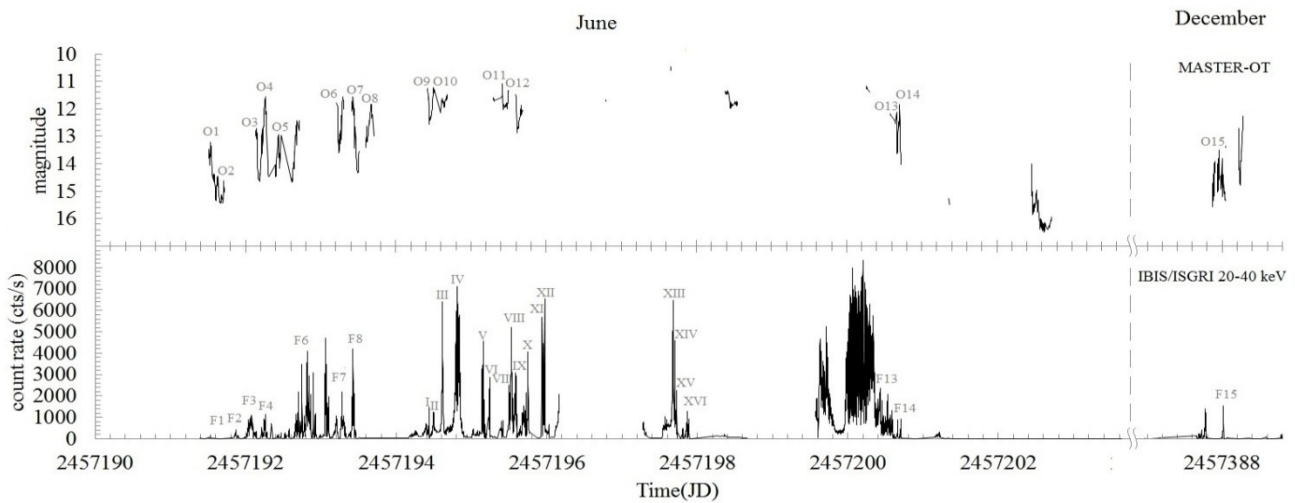


Рисунок 2. Полная кривая блеска V404 Cyg по данным МАСТЕР в белом свете (0.8R + 0.2B), в сравнение с рентгеновскими данными, полученными с помощью прибора IBIS ISGR INTEGRAL[13, 14]

Это, в свою очередь, позволило обнаружить не только постоянную поляризационную составляющую в самую раннюю эпоху вспышки, но и найти доказательства переменности поляризации в разных случаях. На рисунке 3 представлен третий эпизод переменной поляризации оптического излучения V404 Cyg/GS2023+338[8].

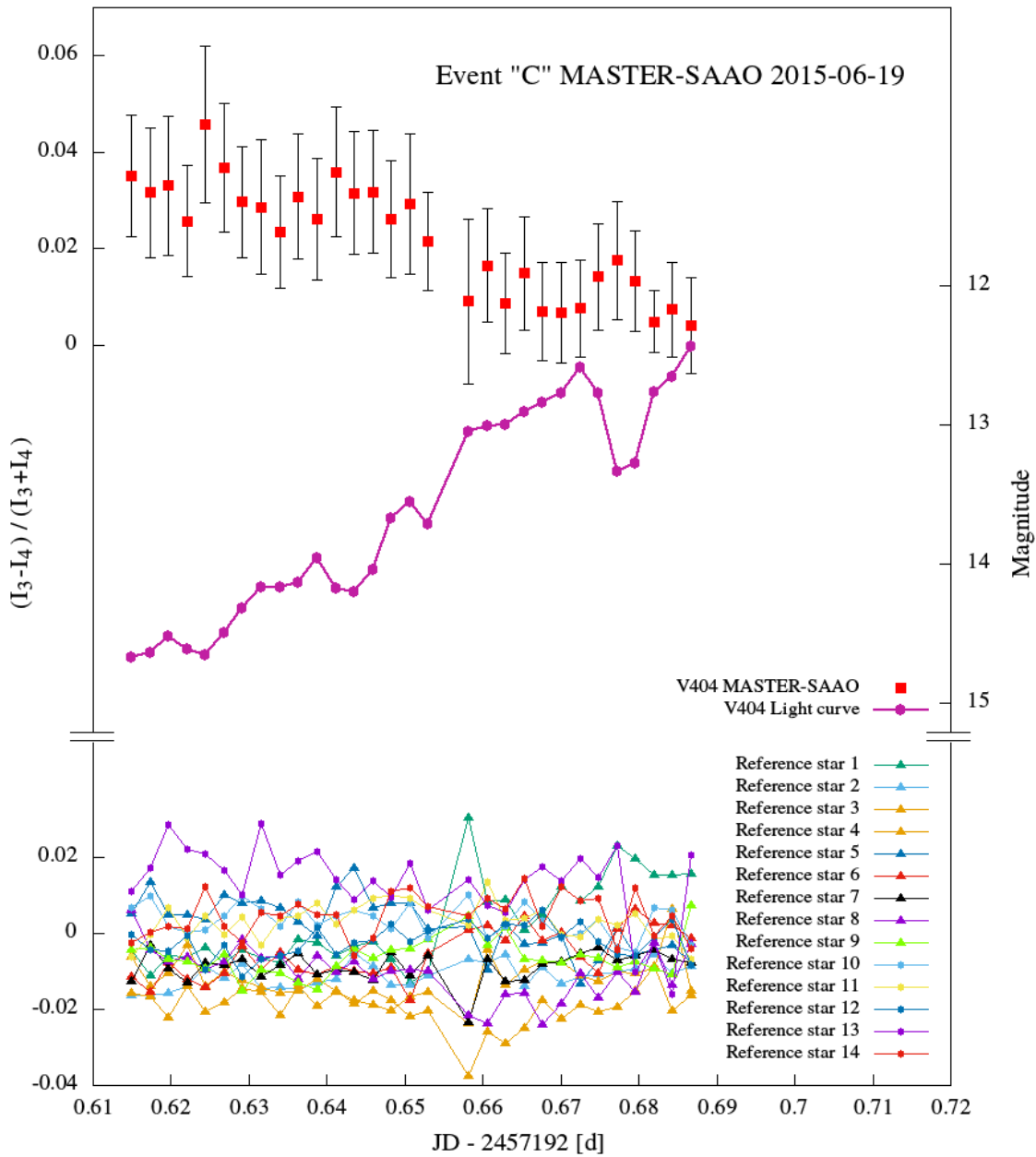


Рисунок 3. Изменение поляризации V404 Cyg относительно звёзд фона.

Обнаружены 15 вспышек оптического излучения (O1-O15, рисунок 2), для 12 из которых замечена корреляция оптического и рентгеновского излучения (таблица 1). А также замечена корреляция оптического потока с рентгеновским и подтверждены сверхдлинные задержки оптического излучения, относительно рентгеновского потока.

Таблица 1 - Временная задержка между оптическим и рентгеновским излучением в течение наблюдения V404 Cyg

Событие	Время начала, JD	Время окончания, JD	Задержка, с	Ошибка, с	Орбитальная фаза
O3	2457192,20180	2457192,27582	548	30	0.68
O4	2457192,43367	2457192,44253	0	60	0.71
O5	2457192,61250	2457192,68402	0	60	0.74
O6	2457193,23712	2457193,30505	1620	27	0.84
O7	2457193,41121	2457193,50707	270	28	0.86
O9	2457194,42741	2457194,44379	0	60	0.02
O10	2457194,46551	2457194,50805	175	37	0.02
O11	2457195,40562	2457195,50537	90	90	0.18
O12	2457195,59382	2457195,61970	123	31	0.20
O13	2457200,64412	2457200,66900	0	60	0.98
O14	2457200,67877	2457200,72596	0	60	0.98
O15	2457387,93431	2457388,04285	0	60	0.68

Основные выводы

В настоящий момент развитие Глобальной роботизированной сети МАСТЕР продолжается. Ключевую роль в этом процессе представляет собой разработанная и внедрённая, в рамках данной работы, динамически интегрированная база данных (ДИБД), именно введение её постоянную эксплуатацию позволило сделать качественный скачок от сети роботов телескопов к роботизированной сети.

В результате, проделанной диссертантом работы:

1. Создана динамически интегрированная база данных роботизированной сети МАСТЕР. Благодаря её внедрению удалось добиться существенного увеличения эффективности работы сети, а также стала возможной работа центрального планировщика сети, способного в реальном времени составлять и

координировать наиболее результативный план наблюдений для каждого телескопа сети.

2. В автономном режиме проведены широкополосные и поляризационные наблюдения исторической вспышки микроквазара V404 Cyg/GS2023+338 2015 года. В результате получены уникальные научные данные – более 2000 фотометрических и поляризационных измерений, обнаружены 15 вспышек оптического излучения, а также замечена корреляция оптического потока с рентгеновским и подтверждены сверхдлинные задержки оптического излучения, относительно рентгеновского потока.
3. Обнаружен третий эпизод переменной поляризации оптического излучения V404.

Используемая литература

1. Lipunov V. et al. Master robotic net // Adv. Astron. 2010. Vol. 2010, № Article ID 349171.
2. Lipunov V.M. et al. MASTER: The Mobile Astronomical System of Telescope-Robots // Astron. Nachrichten. 2004. Vol. 325, № 6–8. P. 580–582.
3. Lipunov V.M. et al. The Master Mobile Astronomical System. Optical Observations of Gamma-Ray Bursts // Astrophysics. 2005. Vol. 48, № 3. P. 389–399.
4. Kornilov V.G. et al. Robotic optical telescopes global network MASTER II. Equipment, structure, algorithms // Exp. Astron. 2012. Vol. 33, № 1.
5. Горбовской Е.С. et al. Сеть Роботизированных Оптических Телескопов Мастер-II. Первые Результаты // Астрономический Журнал. 2013. Vol. 90, № 04. P. 267–321.
6. Lipunov V. et al. MASTER Global Robotic Net: new sites and new result // Rev. Mex. Astron. y Astrofis. Conf. Ser. 2016. Vol. 48. P. 42–47.
7. Липунов В.М. et al. Концепция многофункционального комплекса и Динамически интегрированной базы данных в применении к многоканальным наблюдениям глобальной сети МАСТЕР // Астрономический журнал. 2019. Vol. 96, № 4. P. 288–304.

8. Lipunov V.M. et al. MASTER optical polarization variability detection in the Microquasar V404 Cyg/GS2023+33 // *Astrophys. J. IOP Publishing*, 2016. Vol. 833, № 2. P. 1–12.
9. Липунов В.М. et al. V404 CYG / GS 2023 + 338 : Мониторинг в оптическом диапазоне на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР во время супервспышки 2015 г. // *Астрономический Журнал*. 2019. Vol. 96, № 7. P. 531–546.
10. Abbott B.P. et al. Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave transient GW150914 // *Astrophys. J. Lett.* 2016. Vol. 826, № 1.
11. Abbott B.P. et al. Supplement: “Localization and Broadband Follow-up of the Gravitational-wave Transient GW150914” (2016, *ApJL*, 826, L13) // *Astrophys. Journal, Suppl. Ser.* 2016. Vol. 225, № 1.
12. Aartsen M.G. et al. Multiwavelength follow-up of a rare IceCube neutrino multiplet // *Astron. Astrophys.* 2017. Vol. 607.
13. Troja E. et al. Significant and variable linear polarization during the prompt optical flash of GRB 160625B // *Nature*. Nature Publishing Group, 2017. Vol. 547, № 7664. P. 425–427.
14. Gorbovskoy E. et al. MASTER PSN Discovery During FRB181228 Error Line Inspection // *Astron. Telegr.* 2018. Vol. 12338. P. 1.
15. Abbott B.P. et al. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger // *Astrophys. J. Lett.* 2017. Vol. 848, № 2.
16. Lipunov V.M. et al. MASTER Optical Detection of the First LIGO/Virgo Neutron Star Binary Merger GW170817 // *Astrophys. J. Lett.* 2017. Vol. 850, № 1.
17. Lipunov V.M. et al. MASTER OT J004207.99+405501.1/M31LRN 2015 luminous red nova in M31: Discovery, light curve, hydrodynamics and evolution // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2017. Vol. 470, № 2.
18. Липунов В.М. et al. Оптические наблюдения гамма-всплесков, открытие сверхновых 2005bv, 2005ee, 2006ak и поиск транзиентов на телескопе-роботе “МАСТЕР” // *Астрономический журнал*. М.: М., 2007. Vol. 84, № 12. P. 1110–1134.
19. Gorbovskoy E.S. et al. Prompt, early and afterglow optical observations of five γ -

- ray bursts: GRB 100901A, GRB 100902A, GRB 100905A, GRB 100906A and GRB 101020A // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2012. Vol. 421, № 3. P. 1874–1890.
20. Gorbovskoy E.S. et al. Early polarization observations of the optical emission of gamma-ray bursts: GRB 150301B and GRB 150413A // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2016. Vol. 455, № 3. P. 3312–3318.
 21. Lipunov V. et al. Smooth Optical Self-similar Emission of Gamma-Ray Bursts // *Astrophys. J.* IOP Publishing, 2017. Vol. 845, № 1. P. 52.
 22. Sadovnichy V.A. et al. Prompt and Follow-up Multi-wavelength Observations of the GRB 161017A // *Astrophys. J.* 2018. Vol. 861, № 1. P. 48.
 23. Lipunov V. et al. Discovery of an unusual bright eclipsing binary with the longest known period: TYC 2505-672-1/MASTER OT J095310.04+335352.8 // *Astron. Astrophys.* 2016. Vol. 588.
 24. Breytenbach H. et al. Discovery, observations, and modelling of a new eclipsing polar: MASTER OT J061451.70-272535.5 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* Oxford University Press, 2019. Vol. 484, № 3. P. 3831–3845.
 25. Singh M. et al. Observational properties of a Type Ib Supernova MASTER OT J120451.50+265946.6 in NGC 4080. Oxford University Press, 2019. Vol. 5452. P. 5438–5452.