

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

Государственный астрономический институт им.
П.К. Штернберга

На правах рукописи

Белинский Александр Александрович

**Робот-телескоп МАСТЕР: система автоматической
обработки изображений и результаты наблюдений
некоторых транзиентных объектов**

Специальность 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Липунов Владимир Михайлович (ГАИШ МГУ)

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук Тутуков Александр Васильевич, ИНАСАН
- доктор физико-математических наук Свертилов Сергей Игоревич, НИИЯФ МГУ

Ведущая организация: ГАО РАН

Защита состоится 18 декабря 2008 года в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д501.001.86 в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга МГУ по адресу: 119992, г. Москва, Университетский пр-т, дом 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАИШ МГУ.

Автореферат разослан 18 ноября 2008 года.

Ученый секретарь диссертационного совета



к.ф.-м.н. С.О. Алексеев

Общая характеристика работы

Создание роботизированных обсерваторий – одно из самых актуальных и быстро развивающихся направлений современной астрономии. Автоматизированные астрономические комплексы, обладающие широким полем зрения и способностью быстро наводиться в любую точку неба незаменимы при поиске транзиентных феноменов на небе (гамма-всплесков, вспышек сверхновых и новых звезд и т.п.), когда невозможно заранее предугадать в какой момент и куда следует наводить телескоп.

На сегодняшний день в разных странах создано несколько десятков телескопов-роботов, каждый из которых, как правило, предназначен для решения определенного класса задач. Например, автоматическая система ROTSE-III создана, прежде всего, для обнаружения оптического послесвечения гамма-всплесков, система КАИТ предназначена исключительно для поиска сверхновых звезд, а главной задачей комплекса робот-телескопов SuperWASP является обнаружение новых экзопланет.

Работа автоматических астрономических систем обеспечивается комплексом программного обеспечения, который позволяет управлять робот-телескопом и его укрытием, обеспечивать, как минимум, первичную обработку получаемых изображений, а затем хранить соответствующую информацию. Программное обеспечение каждого автоматизированного астрономического комплекса имеет свою специфику, определяемую решаемой задачей, т.е. не может быть универсальным.

Робот-телескоп МАСТЕР (<http://observ.pereplet.ru>), был создан коллективом сотрудников Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ под руководством профессора В.М. Липунова и установлен в 30 км от Москвы. Главным элементом системы МАСТЕР является телескоп модифицированной системы Рихтера-Слефогта на автоматизированной монтировке. Диаметр телескопа – 355 мм, фокусное расстояние – 920 мм. В ньютоновском фокусе телескопа установлена камера с

размером ПЗС-приемника 4096x4096 пикселей, размер одного пикселя составляет 9 мкм, что обеспечивает поле зрения системы около 6 квадратных градусов. Управляемая компьютером монтировка позволяет наводиться в заданную точку неба со скоростью 5 градусов/сек. Телескоп находится в помещении, крыша которого открывается и закрывается по команде компьютера, анализирующего поступающую от метеодатчиков информацию.

В отличие от большинства существующих робот-телескопов, система МАСТЕР создавалась для решения широкого круга астрономических задач, что обусловило необходимость работы телескопа в двух режимах. В режиме обзора телескоп последовательно наводится на различные области неба, заранее выбранные по определенному принципу, и получает серию изображений каждой области с экспозицией 45 сек. Такой режим позволяет исследовать переменность блеска и перемещение по небу различных астрономических объектов, например, обнаруживать вспыхнувшие сверхновые или выявлять астероиды. Второй режим – это режим алертных наблюдений, когда телескоп максимально быстро перенаводится на определенную область. Это необходимо, главным образом, для регистрации и последующего изучения оптического послесвечения гамма-всплесков, информация о которых поступает на управляющий компьютер телескопа по сети интернет от международной сети наблюдения гамма-всплесков (GCN, <http://gcn.gsfc.nasa.gov>). Для системы МАСТЕР алертный режим является приоритетным: основное время ведутся наблюдения в режиме обзора, которые немедленно прерываются при получении алертного сообщения.

Функционирование системы МАСТЕР невозможно без программного обеспечения, которое условно можно разделить на три части: 1) комплекс программ, обеспечивающих управление телескопом и куполом башни; 2) система обработки получаемых телескопом изображений; 3) хранение полученных данных. Два последних блока программного обеспечения были созданы автором и описываются в данной диссертации. Особенности разработанного программного обеспечения отражают специфику системы

МАСТЕР, созданную, как уже отмечалось, для решения широкого круга задач. Комплекс программ *для обработки изображений* призван решать следующие задачи в режиме реального времени: определять абсолютные координаты и блеск всех объектов попавших в кадр площадью 6 квадратных градусов; классифицировать объекты по типам (звезды, галактики, астероиды и т.д.); обнаруживать транзитные объекты и проводить их первичную классификацию.

Комплекс программ *для хранения данных* должен сразу же после первичной обработки сохранить информацию о блеске и координатах всех попавших в кадр астрономических объектах, формируя соответствующую базу данных. Особенность этой базы данных в том, что поступающая информация сразу же должна использоваться для обработки новых изображений, и в этом смысле хранение информации – составная часть обработки. Кроме информации об объектах, в базе данных должны храниться исходные изображения, обеспечивая возможность при необходимости заново обработать старые наблюдения.

В качестве примера, иллюстрирующего эффективность работы программных комплексов обработки и хранения данных, в диссертации приведены результаты наблюдений, в ходе которых было обнаружено оптическое послесвечение нескольких гамма-всплесков и открыты сверхновые звезды различных типов.

Актуальность работы

Изучение природы гамма-всплесков, подтверждение существования и выявление природы т.н. всплесков – сирот, а также накопление информации о параметрах большого количества сверхновых звезд типа Ia («стандартные свечи») – проблемы, которые являются одними из самых актуальных в современной астрофизике, и их решение невозможно без использования робот-телескопов. Вместе с тем, автоматические системы с широким полем зрения

могут помочь в решении многих других астрономических задач: слежение за уже известными астероидами и поиск новых астероидов и комет, в том числе, потенциально опасных для Земли, массовое изучение переменности блеска звезд, обусловленное их нестационарностью либо прохождением по их диску экзопланет или микролинзированием.

После распада Советского Союза ГАИШ МГУ лишился наблюдательных баз, которые теперь принадлежат другим государствам. Создание автоматической системы МАСТЕР, установленной на территории России, не только частично компенсировало эту потерю, но и позволило астрономам ГАИШ выйти на мировой уровень в области обзорных (поисковых) наблюдений. Установка в 2009 г. робот-телескопов нового поколения МАСТЕР-2, которые будут использовать описанное в диссертации программное обеспечение, на обсерваториях ГАИШ (вблизи г. Кисловодска) и Уральского Государственного университета еще больше расширит возможности Российских астрономов в этой области.

Цели работы

1. Разработка программного обеспечения для обработки потока астрономических изображений с ПЗС-камер робот-телескопа МАСТЕР в режиме реального времени.
2. Создание базы данных, содержащей все полученные с помощью робот-телескопа изображения, а так же информацию о всех астрономических объектах которые хоть раз попали в кадр. База должна иметь удобный пользовательский интерфейс и быть легко доступной через интернет для пользователей. Пополнение базы должно происходить в режиме реального времени по мере поступления новой информации.
3. Изучение оптического послесвечения гамма-всплесков по алертным сигналам с космических аппаратов.

4. Обнаружение сверхновых звезд и других астрономических объектов, координаты и/или блеск которых меняются с течением времени.

Новизна работы

Система МАСТЕР предназначена для изучения широкого круга явлений и объектов: от метеоров до оптического послесвечения гамма-всплесков. С учетом этой специфики нами впервые создан пакет программ, позволяющий в реальном времени решать следующий комплекс задач:

- определять абсолютные координаты и блеск всех объектов попавших в кадр размером 6 кв. градусов;
- классифицировать объекты по типам (звезды, галактики, астероиды и т.д.);
- обнаруживать транзитные объекты;
- проводить первичную классификацию транзитных объектов.

Для изучения любых типов объектов создана и поддерживается база данных, в которой собраны результаты всех наблюдений. С помощью описанного в диссертации программного обеспечения были, в частности, обнаружены и изучены несколько сверхновых звезд и источников гамма-всплесков.

Достоверность научных результатов.

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

Практическая значимость работы

Описанный в диссертации комплекс программ для обработки данных позволил практически решать задачи, для которых была создана система

МАСТЕР, установленная в Подмоскowie: обнаружение и оперативное исследование транзистентных объектов. Созданная и постоянно пополняемая текущими наблюдениями база данных содержит информацию, которая может быть использована любым астрономом для изучения самых разных астрономических объектов. Рассматриваемый комплекс программ для обработки и хранения данных предполагается использовать в робот-телескопах МАСТЕР-2, которые в 2009 г. будут установлены в обсерваториях ГАИШ МГУ и Уральского Государственного университета.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Комплекс программ для обработки изображений, получаемых робот-телескопом МАСТЕР, который позволяет:
 - в реальном времени определять абсолютные координаты и блеск всех объектов попавших в кадр площадью 6 квадратных градусов;
 - классифицировать объекты по типам (звезды, галактики, астероиды и т.д.);
 - обнаруживать транзистентные объекты;
 - проводить первичную классификацию транзистентных объектов.
2. Программное обеспечение, позволившее создать базу данных, содержащую информацию о всех объектах на всех изображениях, полученных на робот-телескопе МАСТЕР (свыше 500 млн. объектов до 19,5^m).
3. Обнаружение оптического послесвечения гамма-всплесков GRB 030329, GRB 050824, GRB 060926 с помощью робот-телескопа МАСТЕР.
4. Открытие сверхновых звезд 2005bv, 2005ee, 2006ak, 2008gy.

Личный вклад автора

Для обеспечения работы системы МАСТЕР необходимо программное обеспечение, которое условно можно разделить на три части: комплекс

программ, обеспечивающих управление телескопом и куполом башни, система обработки получаемых телескопом изображений, и, наконец, хранение полученных данных. В создание комплекса программ, обеспечивающих обработку и хранение данных, автор внес определяющий вклад: ему принадлежит постановка задачи и программная реализация соответствующих алгоритмов. Что касается наблюдений транзитных источников, результаты которых вынесены на защиту, то здесь вклад автора состоит в обработке наблюдательного материала и равноправное (с соавторами соответствующих публикаций) участие в интерпретации полученных результатов.

Структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, трех глав и Заключения. Она содержит 95 страниц печатного текста, 34 рисунка, 15 таблиц и список литературы, включающий 130 наименований.

В первой части **Введения** описано, для каких целей создаются робот-телескопы, описаны основные характеристики существующих телескопов этого типа, и проводится сравнение системы МАСТЕР с отечественными и зарубежными аналогами. Объясняется, в чем состоит специфика программного обеспечения, обеспечивающего функционирование робот-телескопа МАСТЕР. Во второй части Введения сформулированы цели и задачи работы, а также положения, выносимые на защиту, обоснована актуальность темы диссертации, указано, в чем состоит новизна работы и пояснено, что позволяет считать полученные результаты достоверными.

Глава I состоит из четырех разделов. В первом разделе содержится описание пакета программ, предназначенных для первичной обработки изображений, получаемых с ПЗС-камеры робот-телескопа МАСТЕР. В процессе этой обработки, кроме стандартных процедур редукции (вычитание

подложки, темнового тока и т.п.) производится определение координат и блеска всех объектов, попавших в кадр. Точность определения координат при этом $\approx 1''$, а блеска – не хуже 0.2^m . Описано, как происходит последующая фильтрация артефактов (космические частицы и т.п.) и идентификация уже известных астрономических объектов. Последующая обработка зависит от типа наблюдений. В разделе I.2 описано, как производится обработка наблюдений при поиске оптического послесвечения гамма-всплесков (наблюдения в т.н. алертном режиме), а в разделе I.3 – обзорных наблюдений (поиск сверхновых, например). Существенно, что обработка производится в реальном времени. В алертном режиме, например, информация о потенциальном транзиентном источнике выдается менее чем через минуту после получения кадра, который содержит 5-10 тысяч астрономических объектов, блеск и координаты которых также определяются.

После того, как первичная обработка завершена, информация о блеске и координатах всех попавших в кадр астрономических объектов немедленно заносится в базу данных, описанию организации и пользовательского интерфейса которой посвящен раздел I.4 диссертации. Информация об объектах используется в дальнейшем для обработки последующих изображений при поиске транзиентных источников, а также позволяет исследовать переменность блеска и/или координат любого астрономического объекта. Кроме того, в базе данных хранятся исходные изображения, что позволяет при необходимости заново обработать старые наблюдения – примеры такого рода обработки приведены в третьей главе диссертации. На данный момент база данных робот-телескопа МАСТЕР содержит свыше 80 тысяч исходных изображений, а также информацию о блеске и координатах примерно 100 млн. астрономических объектов. Текущий объем базы данных – более 4 терабайт.

Во **второй главе** приведены некоторые результаты наблюдений на робот-телескопе МАСТЕР в алертном режиме. Обработка этих наблюдений по

описанной в первой главе методике позволила исследовать оптическое послесвечение гамма-всплесков GRB 030329, GRB 050824 и GRB 060926. Для гамма-всплеска GRB 030329 по наблюдениям, непрерывно продолжавших 8,5 часов построена кривая блеска и определен ее наклон.

В случае гамма-всплеска GRB 050824 нам удалось первыми обнаружить оптическое послесвечение (через 92 сек. после получения алерта), а у гамма-всплеска GRB060926 (первое изображение получено системой МАСТЕР через 76 сек после получения алерта) обнаружено возрастание оптического блеска в районе 500-й секунды. Во всех случаях полученные нами данные были подтверждены наблюдениями других групп. Кроме того сообщается о нескольких десятках алертных наблюдений гамма-всплесков, которые не привели к обнаружению оптического транзиента – для этих наблюдений приведена оценка верхнего предела блеска.

В **третьей главе** диссертации приведены некоторые результаты наблюдений на робот-телескопе МАСТЕР в режиме обзора. В ходе этих наблюдений были открыты сверхновые звезды 2005bv (тип Ia), 2005ee (яркая сверхновая II типа), 2006ak (тип Ia), 2006X (тип Ia), 2008gy (тип пока не определен). Зарегистрировано более десяти тысяч известных астероидов, и на примере трансеплутонового астероида 2003 UB313 показана возможность определения координат небесных тел с точностью 0,2". В этой главе также приведены результаты наблюдений экзопланеты TrES-2, в ходе которых блеск затмеваемой ею звезды был определен с точностью 0.016^m.

Сообщается также об обнаружении нескольких неотожествленных транзиентных источников, природу которых определить не удалось.

В **Заключении** подводятся итог выполненным исследованиям и намечены перспективы дальнейшего развития программно-аппаратного комплекса робот-телескопов типа МАСТЕР.

Апробация работы и публикации

Результаты работы были доложены на 2 международных и 3 российских конференциях:

1. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2004 (г. Москва, 3-10 июня 2004)
2. Robotic Astronomy (г. Потсдам, 12-15 июля 2004)
3. JENAM-2004 (г. Гранада, 14-17 сентября 2004)
4. Астероидно-кометная опасность – 2005 (г. С.-Петербург, 3-7 октября 2005)
5. Научная сессия МИФИ-2008 (г. Москва, 21-27 января 2008)

Результаты работы изложены в 5 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах:

1. V.M. Lipunov, A. V. Krylov, V. G. Kornilov, G. V. Borisov, D. A. Kuvshinov, **A. A. Belinsky**, M. V. Kuznetsov, S. A. Potanin, G. A. Antipov, N. V. Tyurina, E. S. Gorbovskoy, I. Chilingaryan, MASTER: The Mobile Astronomical System of Telescope-Robots, *Astronomische Nachrichten* 2004, 325, 580-582
2. V. M. Lipunov, V. G. Kornilov, A. V. Krylov, G. V. Borisov, D. A. Kuvshinov, **A. A. Belinski**, E. S. Gorbovskoy, G. A. Antipov, N. V. Tyurina, V. M. Vitrischak, S. A. Potanin and M. V. Kuznetsov, The Master Mobile Astronomical System. Optical Observations of Gamma-Ray Bursts, *Astrophysics* (Publisher: Consultants Bureau, An Imprint of Springer Verlag New York LLC), 2005, V.48(3), 389 – 399
3. V. M. Lipunov, V. G. Kornilov, A. V. Krylov, D. A. Kuvshinov, E. S. Gorbovskoy, N. V. Tyurina, **A. A. Belinsky**, G. V. Borisov, A. V. Sankovich, Observations of gamma-ray bursts and a supernovae search at the robotic telescope MASTER, *Astronomical & Astrophysical Transactions*, 2007, V.26, P.79
4. В.М.Липунов, В.Г.Корнилов, Е.С.Горбовской, А.В.Крылов, Н.В.Тюрина, Д.А.Кувшинов, **А.А.Белинский**, П.А.Грицык, А.В.Санкович, В. В.

Владимиров, "Оптические наблюдения гамма-всплесков, открытие сверхновых звезд 2005bv, 2005ee, 2006ak и поиск транзиентов на телескопе-роботе МАСТЕР", *Астрономический журнал*, 2007, т.84, N12, с. 1110-1134

5. В.М.Липунов, В.Г.Корнилов, Е.С.Горбовской, А.В.Крылов, Н.В.Тюрина, Д.А.Кувшинов, **А.А.Белинский**, П.А.Грицык, А.В.Санкович, В. В. Владимирова, "Открытие оптической вспышки гамма-всплеска GRB060926 телескопом-роботом МАСТЕР: образование предельно-вращающейся черной дыры.", *Письма в Астрономический журнал*, 2008, т.34, № 3, с. 167-173

Кроме того, автор диссертации является соавтором свыше 80 электронных публикаций в циркулярах GCN (The Gamma ray bursts Coordinates Network Circulars, http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3_archive.html), в двух циркулярах IAU (<http://cfa-www.harvard.edu/iau/cbat.html>) и двух циркулярах СВЕТ (<http://www.cfa.harvard.edu/iau/cbet/RecentCBETs.html>).