

УДК 520.224.7-732

## ШИРОКОУГОЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ С ПОМОЩЬЮ МНОГОКАНАЛЬНОГО ТЕЛЕСКОПА ВЫСОКОГО ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ МИНИ-МЕГАТОРТОРА (ММТ)

© 2017 Г. М. Бескин<sup>1,2\*</sup>, С. В. Карпов<sup>1,2</sup>, А. В. Бирюков<sup>3,2</sup>, С. Ф. Бондарь<sup>4</sup>,  
Е. А. Иванов<sup>4</sup>, Е. В. Каткова<sup>4</sup>, Н. В. Орехова<sup>4</sup>, А. В. Перков<sup>4</sup>, В. В. Сасюк<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань, 420008 Россия

<sup>3</sup>Государственный астрономический институт им. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

<sup>4</sup>АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Станция оптических наблюдений «Архыз», Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>5</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

<sup>6</sup>ООО «Параллакс», Казань, 420137 Россия

Поступила в редакцию 10 ноября 2016 года; принята в печать 2 декабря 2016 года

В работе описываются характеристики широкопольной 9-канальной системы оптического мониторинга неба с субсекундным временным разрешением Mini-MegaTORTORA (ММТ). Этот инструмент позволяет наблюдать области небесной сферы с размерами вплоть до 900 кв. градусов, а также проводить фотометрию в трёх цветовых полосах, близких к джонсоновским *BVR*, и поляриметрию избранных объектов или площадок размером 100–300 кв. градусов. Временное разрешение системы составляет 0.1 с при проницании около 11 зв. величины (фильтр *V*), которое при минутных экспозициях достигает 15 зв. величины. Снабженная мощным вычислительным комплексом и специализированным программным обеспечением, система проводит автоматизированный поиск, классификацию в реальном времени и исследование транзитных явлений разной природы, локализованных как в окрестностях Земли, так и далеко за пределами Галактики. В число объектов, массово обнаруживаемых при наблюдениях на ММТ, входят слабые метеоры и искусственные спутники Земли. В работе обсуждаются возможные астрономические задачи, которые можно решать с помощью ММТ, и описываются результаты первых двух лет работы инструмента. В частности, приводятся характеристики обнаруженной 25 июня 2016 г. оптической вспышки, сопровождавшей гамма-всплеск GRB 160625B.

Ключевые слова: *гамма-всплески — инструменты: разное — техники: фотометрические*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые проблему поиска и исследования быстропеременных (транзитных) во времени и пространстве оптических источников чётко сформулировал Г. Бонди в 1970 г. [1], отметив важность поисков нестационарных объектов неизвестной заранее локализации. Для их обнаружения и изучения необходимы широкоугольные инструменты (с полем зрения в сотни квадратных градусов), использующие детекторы как минимум субсекундного временного разрешения. Последнее требование обусловлено малой длительностью и/или большими скоростями изучаемых явлений.

Действительно, активность звезд типа UV Кита, кривые блеска гамма-всплесов, передние фронты вспышек сверхновых и новых звезд могут иметь особенности вплоть до 0.01 с, тогда как спутники, космический мусор, метеоры и болиды имеют скорости движения до десятков градусов в секунду. Для их наблюдения необходимо сочетание изначально взаимно противоречивых условий — достаточно высокого предела обнаружения (большой диаметр объектива), широкого поля зрения (короткий фокус) и высокого временного разрешения (небольшой размер детектора). Соотношение этих характеристик, на наш взгляд, было оптимизировано в проекте широкоугольной камеры с объективом относительно малого диаметра,

\*E-mail: beskin@sao.ru

электронно-оптическим преобразователем для эффективного укорачивания фокуса и быстрой малошумящей ПЗС-матрицей [2]. Наблюдения с первой версией прибора, FAVOR (FAst Variability Optical Registrator), созданного нами в CAO РАН, проводились в 2003–2009 г. [3]. Аналогичная по конструкции камера TORTORA (Telescopio Ottimizzato per la Ricerca dei Transienti Ottici RAPidi) [4] установлена в 2006 г. на монтировке роботического телескопа REM в обсерватории La-Silla (ESO, Чили). При диаметрах объективов 15 и 12 см (светосиле 1:1.2) и полях зрения 400–600 кв. градусов пределы обнаружения у этих инструментов близки к 10 зв. величин в  $V$ -полосе за время экспозиции 0.13 с (частота кадров использовавшейся ПЗС-матрицы — 7.5 Гц) при угловом разрешении около 1'. Обработка данных проводилась в реальном времени на основе сопоставления каждого нового фрейма с текущим средним, определенным по сотне предыдущих. При таком подходе удалось обеспечить возможность обработки и анализа в реальном времени данных, получаемых с субсекундным временным разрешением [2].

В конечном итоге на камере TORTORA была обнаружена яркая оптическая вспышка (5.5 зв. величин), сопровождавшая гамма-всплеск GRB 080319B. Была найдена её тонкая временная структура на секундной шкале, что позволило изучить связь оптического и гамма-излучения всплеска и показать сходство их кривых блеска при 2-секундном запаздывании первого относительно второго. Таким образом впервые в прямых наблюдениях были получены данные о природе многочастотного поведения гамма-всплесков и об особенностях источника их энергии [5, 6].

С помощью камер FAVOR и TORTORA также впервые массово регистрировались быстро движущиеся спутники и метеоры с яркостью на уровне 9–10 зв. величин.

Наблюдательные проявления объектов такого типа характерны и для более крупных, внезапно вошедших в атмосферу Земли, метеороидов, подобных Чебаркульскому метеориту. Эти компоненты Солнечной системы представляются особо опасными из-за неожиданности их появления и, как следствие, отсутствия информации о возможном поведении [7]. Представляется, что именно широкоугольные системы высокого временного разрешения способны регистрировать и исследовать такие быстро движущиеся и появляющиеся внезапно в земной окрестности метеороиды [8].

Успешная работа инструментов FAVOR и TORTORA позволила продолжить развитие методологии широкоугольного поиска быстрых оптических транзиентов. Прежде всего, надо было

повысить проникание инструмента как минимум на 1–2 зв. величины при сохранении или даже увеличении размера его поля зрения. Как было отмечено выше, в этом случае неизбежно использование детекторов большого формата (50–100 мм) с временным разрешением, не превышающим нескольких секунд из-за значительной продолжительности считывания. При коротких же экспозициях эти приемники имеют высокий шум считывания (10–20 электронов на пиксель), что весьма ограничивает проникающую способность инструмента. Отметим при этом, что все малошумящие панорамные приемники с высоким временным разрешением имеют размеры не более 1–5 Мегапикселей (диагональ 10–20 мм) (см., например, [www.andor.com](http://www.andor.com); [www.princetoninstruments.com](http://www.princetoninstruments.com)).

Представляется, что естественным способом развития методов широкоугольного мониторинга высокого временного разрешения является переход к многообъективным (многотелескопным) конфигурациям с уменьшением поля зрения отдельного инструмента (увеличением его углового разрешения) при сохранении (как минимум) полного поля зрения [9]. В то же время для выполнения условия доминирования шума неба над шумом приемника нужно увеличивать квантовый выход последнего и/или использовать малошумящие детекторы (ПЗС-матрицы с внутренним усилением, sCMOS-приемники). С другой стороны, принципиально важным моментом в изучении транзиентов является определение их спектральных (цветовых) характеристик и поляризации непосредственно после обнаружения. Напомним, что на гамма-телескопах измерение поляризации жесткого излучения пока практически не реализовано, а именно её уровень является критическим для выбора базисной модели генерации излучения гамма-всплесков. В силу этого обстоятельства поляризационные исследования оптических вспышек, сопровождающих гамма-эмиссию, обретают особую важность (см., например, [10]). Многоканальные инструменты позволяют проводить и многоцветную фотометрию, и поляриметрию обнаруженных транзиентов за счет быстрой (за секунды) переориентации каналов на такой объект с введением в различных каналах разных цветовых и поляризационных фильтров, обеспечивающих одновременную регистрацию излучения в  $BVR$ -полосах и его компонент с различной ориентацией плоскости поляризации. Подчеркнем, что сочетание (и быстрая смена) двух режимов — широкоугольного мониторингового с полем зрения около 900 кв. градусов, когда разные каналы (объективы) направлены на разные области неба, и узкопольного исследовательского при регистрации всеми каналами излучения одной площадки в 100 кв. градусов — требует глубокой автоматизации всего наблюдательного комплекса.

По существу он должен представлять из себя автономную интеллектуальную систему, способную самостоятельно принимать информацию о состоянии локального астроклимата, выбирать и реализовывать режим текущих наблюдений, регистрировать данные, обрабатывать их на разных временных шкалах, в том числе в реальном времени, менять режимы в зависимости от результатов наблюдений, сохранять полученную информацию и обеспечивать функционирование содержащих её баз данных. Система Мини-МегаТОРТОРА (ММТ), созданная совместно с Казанским (Приволжским) федеральным университетом, НПК СПП СОН «Архыз» и ООО «Параллакс», начавшая свою работу летом 2014 г., соответствует всем вышеназванным условиям.

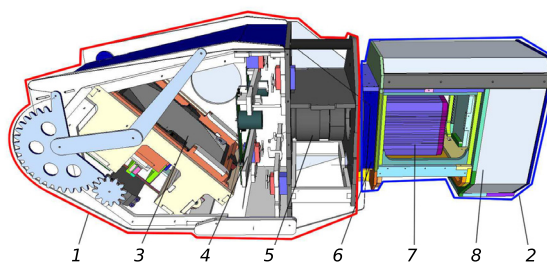
Ниже мы описываем структуру наблюдательного комплекса, его информационное обеспечение, характеристики и особенности функционирования, а также приводим некоторые результаты наблюдений, проведенных с его помощью.

## 2. ДИЗАЙН, ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ММТ

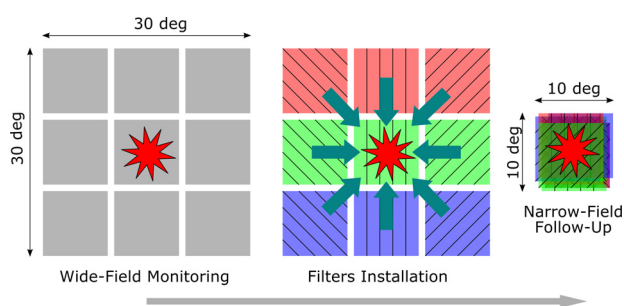
### 2.1. Структура комплекса ММТ

Система Мини-МегаТОРТОРА (ММТ-9) состоит из набора 9 отдельных каналов-объективов (рис. 1), установленных попарно на 5 экваториальных монтировках. Перед каждым объективом расположено плоское целостатное зеркало, поворачивающееся вокруг двух осей на десять градусов, что позволяет изменять расположение поля зрения каждого канала на небесной сфере в пределах  $\pm 20^\circ$ . Кроме того, каждый объектив снабжен набором цветowych и поляризационных фильтров, которые могут вводиться в световой пучок в процессе наблюдений. Это позволяет быстро переходить от широкопольного мониторинга без фильтров к узкопольным наблюдениям, когда все объективы направлены на одну область, содержащую только что обнаруженный транзиент, и регистрируют её во всех возможных комбинациях цветowych и поляризационных фильтров (см. рис. 2). Одновременное наблюдение транзиента всеми объективами в одном фильтре также возможно для повышения точности фотометрии.

Каждый объектив снабжен быстрым детектором Andor Neo sCMOS размером  $6.5 \times 6.5$  мкм с разрешением  $2560 \times 2160$  пикселей при частоте считывания до 30 Гц (в нашем случае — 10 Гц). Детекторы охлаждаются встроенными элементами Пельтье с отведением тепла жидкостным способом, что позволяет поддерживать на фотоприёмнике постоянную температуру  $-40^\circ\text{C}$ . Обладая высоким для своего класса квантовым выходом (55% на



**Рис. 1.** Отдельный канал системы широкоугольного мониторинга ММТ-9. 1 и 2 — защитный кожух, 3 — целостатное зеркало, 4 — система фильтров, 5 — объектив Canon EF 85 f/1.2, 6 — оптический корректор, 7 — детектор Andor Neo sCMOS, 8 — система подогрева и вентиляции.



**Рис. 2.** Различные режимы функционирования системы ММТ-9. Слева — режим широкопольного мониторинга в белом свете либо в одном из цветowych фильтров. Посередине — введение в световой пучок цветowych и поляризационных фильтров как первый шаг после обнаружения оптического транзиента. Справа — перенаведение всех объективов на поле, содержащее транзиент, для получения информации о нем в трех различных фотометрических полосах при трех ориентациях плоскости поляризации одновременно.

длине волны 550 нм), эти приемники имеют довольно низкий шум считывания (медианное значение стандартного отклонения — 1.2 электрона на пиксель) и пренебрежимо малый темновой ток. Все пять монтировок установлены в автоматизированном укрытии, в нижней части (техническом отсеке) которого размещен блок электропитания силовых приводов всех механических элементов комплекса ММТ, а также устройства жидкостного охлаждения каналов и системы климат-контроля на базе двух осушителей воздуха COTES CR300 (рис. 3). Кроме того, комплекс оснащен метеосистемой, позволяющей автоматически отслеживать погодные условия и принимать решение о начале и окончании наблюдений, широкоугольной камерой обзора всего неба и датчиком яркости фона ночного неба.



**Рис. 3.** Общий вид 9-канальной системы широкоугольного мониторинга высокого временного разрешения Мини-МегаТОРТОРА.

## 2.2. Характеристики системы ММТ

Одиночный канал имеет поле зрения около 100 кв. градусов, а система ММТ-9 в широкопольном мониторинговом режиме — около 900 кв. градусов. Предел обнаружения составляет около 10–11 зв. величин за 0.1 с в V-фильтре (около 15 зв. величины за 60 с). В исследовательском режиме узкого поля при наблюдениях отдельных объектов размер поля зрения уменьшается до 100 кв. градусов, а предельная звездная величина зависит от используемой комбинации спектральных и поляризационных фильтров. Так, установка одинаковых фильтров позволяет улучшить проницаемость примерно на величину за счёт сложения кадров.

## 2.3. Математическое и информационное обеспечение ММТ

Управление системой в целом и анализ получаемых при наблюдениях данных в реальном времени осуществляется программным обеспечением, в целом аналогичным использовавшемуся в камерах FAVOR и TORTORA [3, 4, 11, 12]. В то же время информационная структура системы ММТ существенно сложнее ранее реализованных версий, как по числу аппаратных элементов, так и по объему математического обеспечения. Программно-вычислительный комплекс (информационный кластер) системы Мини-МегаТОРТОРА реализован на базе 12 компьютеров, — по одному на каждый канал для сбора, анализа, хранения данных и управления наблюдениями (один в резерве) и два для общего управления сбором и хранения информации, — объединенных в быструю локальную сеть. Комплекс расположен в нескольких десятках метров от системы в отдельном отапливаемом помещении. Наблюдательные данные поступают к нему по каналу оптической связи. В информационный кластер поступают также и данные от метеосистемы, камеры обзора всего неба и датчика его яркости.

Комплекс алгоритмов и программ для текущей и апостериорной обработки данных в первую очередь позволяет автоматически обнаруживать как неподвижные, так и движущиеся транзиенты, идентифицировать их (находить в каталогах известных источников либо относить к вновь обнаруженным), определять их параметры и принимать решение о возможном переходе к исследовательскому режиму. Эти средства основаны на методе дифференциального анализа данных, т. е. количественном сравнении распределения интенсивности излучения в новом зарегистрированном кадре с усредненным по 100 предшествующим [3, 12]. Структура математического обеспечения отдельного канала представлена на рис. 4.

Основным режимом функционирования системы Мини-МегаТОРТОРА является систематический обзор небесной сферы с полем зрения около 900 кв. градусов. Он обеспечивается программным блоком автоматической планировки наблюдений, который учитывает погодные условия, положения Солнца и Луны, необходимость избегания горизонта, заданные приоритетные зоны для наблюдений (в частности, поля зрения гамма-телескопов). В процессе обзора проводится быстрая дифференциальная фотометрия и классификация обнаруженных транзиентов путем сравнения с собственными базами данных и информацией из набора каталогов. При обнаружении объекта с заданными в автоматическом планировщике наблюдений характеристиками (яркость, скорость движения, поведение на 3–4 последовательных кадрах, форма трека) за 2–3 с осуществляется переход к узкопольному исследовательскому режиму (детали приведены в следующем разделе) в разных комбинациях размеров полей зрения (от 100 до 300 кв. градусов), а также цветowych и поляризационных фильтров. Предусмотрена также смена режимов по внешним сигналам — в частности, сообщениям с космических и наземных телескопов разных диапазонов. Все эти функции осуществляются по командам программного блока управления системой в целом, структура которого показана на рис. 5.

Отметим, что в настоящее время оригинальные кадры с временным разрешением 0.1 с сохраняются в течение нескольких суток, при этом объем таких данных, накопленных за среднюю наблюдательную ночь составляет около 28 Тб. Усредненные по 100 кадрам массивы сохраняются в течение нескольких лет. В связи с этим исключительно важной составляющей программного обеспечения системы ММТ является специально разработанный комплекс апостериорной обработки накопленной информации. Его основная функция — автоматическая фотометрия на основе профиля яркости (PSF-фотометрия) плотных звездных полей [13] (на отдельном кадре может выделяться до 50 тысяч

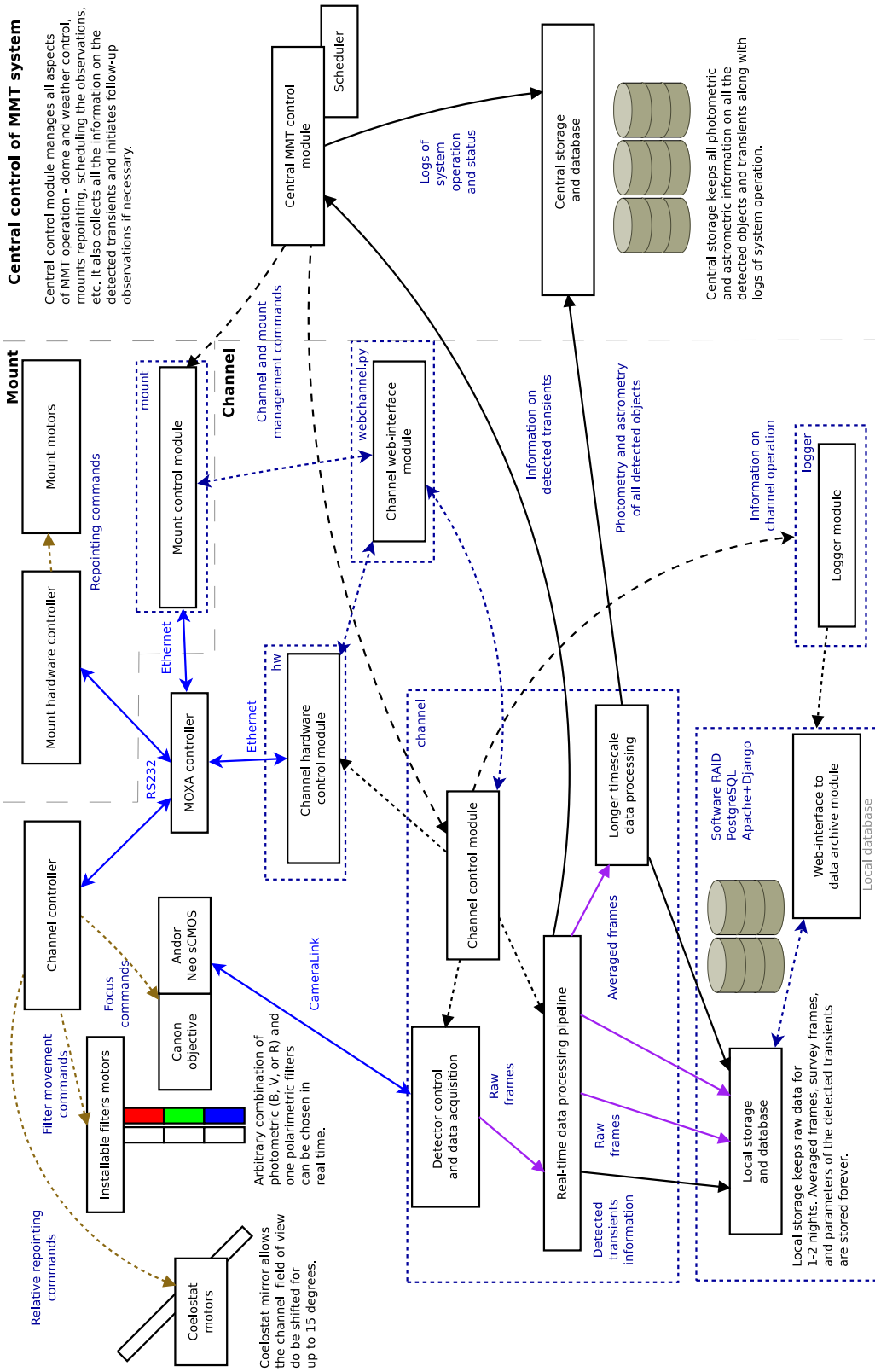


Рис. 4. Схема математического обеспечения функционирования отдельного канала системы Мини-МегаТОРТОРА.



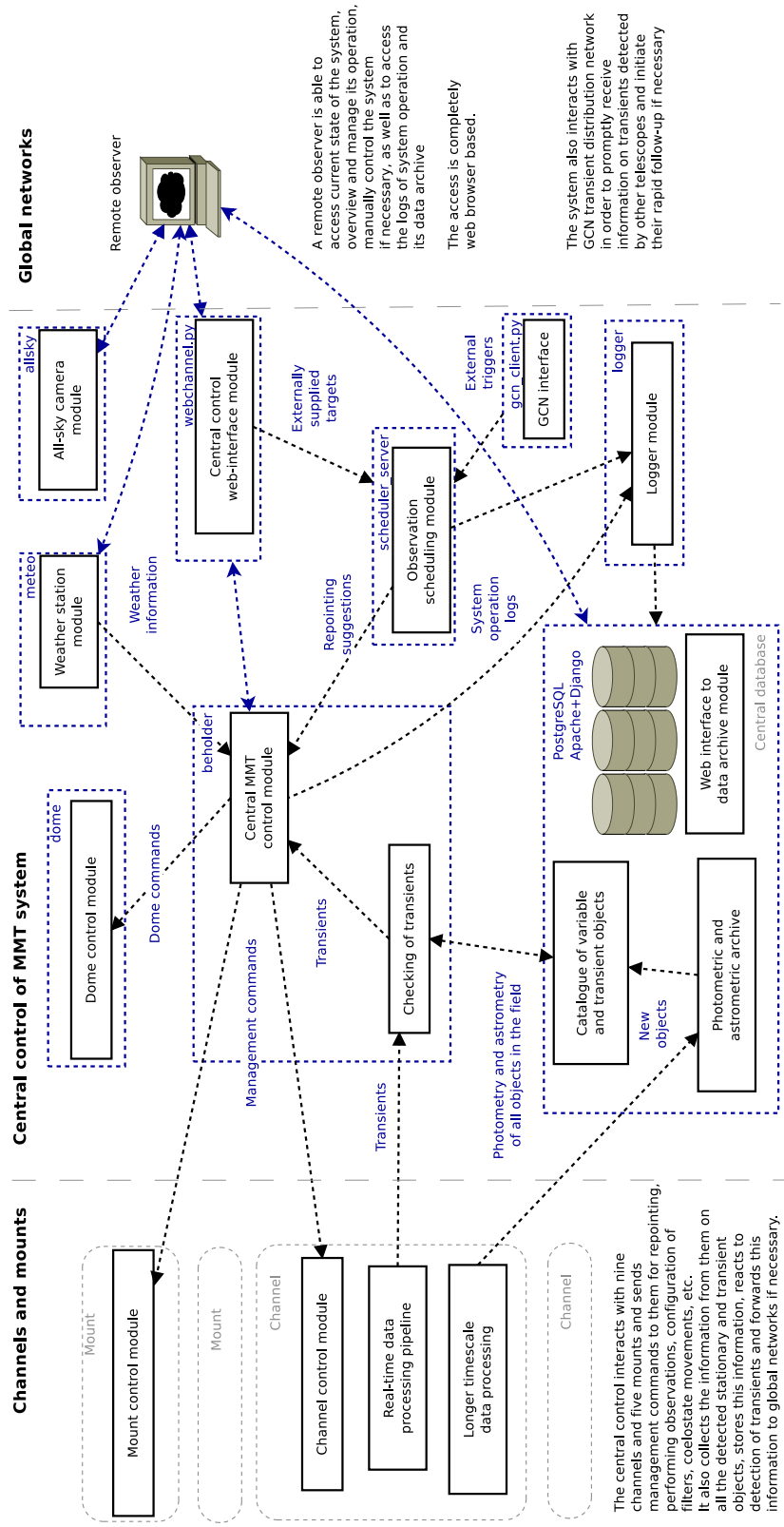


Рис. 5. Схема математического обеспечения управления системой Мини-МегаТОРТОРА в целом.

объектов, значительная часть из которых заметно перекрывается) за минимальное время. При этом учитывается изменение функции рассеяния точки по кадру из-за вариаций прозрачности, виньетирования, аберраций оптики. В настоящее время реализован первый этап этой системы обработки, и созданные алгоритмы фотометрии и калибровки уже позволяют достигать разброса отдельных измерений на уровне вплоть до 0.03–0.05 зв. величины при анализе кривых блеска с 60-секундной экспозицией на промежутках наблюдений до нескольких месяцев и лет. Продолжается работа по улучшению точности фотометрии, что требует тщательного учета неоднородности чувствительности детектора и исключения его нелинейного поведения при разных интенсивностях сигнала [13].

Информационная система комплекса выполняет также следующие задачи: поддержка баз данных для каждого типа уже известных объектов, текущее сравнение полученных характеристик с информацией из других каталогов и баз данных; поддержка базы данных для вновь обнаруженных объектов, детальное изучение их свойств, сравнение с результатами наблюдений в других диапазонах, выводы об их природе; поддержка специализированной базы данных для транзиентов, отнесенных к космическому мусору, анализ динамики этой быстроразвивающейся совокупности объектов, построение ее статистической модели и разработка методов прогнозирования ее свойств.

Доступ к программной системе реализован при помощи веб-интерфейса, что позволяет планировать и управлять наблюдениями а также получать наблюдательные данные удаленно и независимо от архитектуры используемого компьютера.

### 3. НАБЛЮДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ MINI-MEGATORTORA И НЕКОТОРЫЕ ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Начиная с июня 2014 г., система ММТ-9 ведёт регулярный мониторинг небесной сферы с целью поиска и исследования транзиентных событий различных классов. В типичном режиме работы площадки размером  $30^\circ \times 30^\circ$  наблюдаются в течение 1000 с каждая с временным разрешением 0.1 с и проницанием около 11 зв. величины; при этом осуществляется равномерное покрытие всей доступной полусферы неба за среднюю наблюдательную ночь. Для поиска долговременной переменности различных объектов (и обнаружения новых) перед каждой длительной экспозицией и после неё получают снимки той же области с экспозицией 60 с.

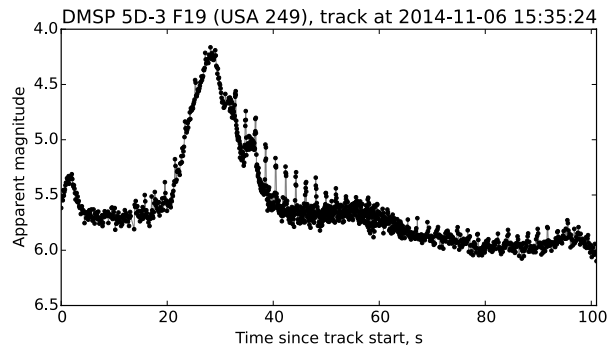


Рис. 6. Осцилляции с периодом 1.9 с и нерегулярные вариации блеска, связанные с формой и подвижностью элементов конструкции космического аппарата.

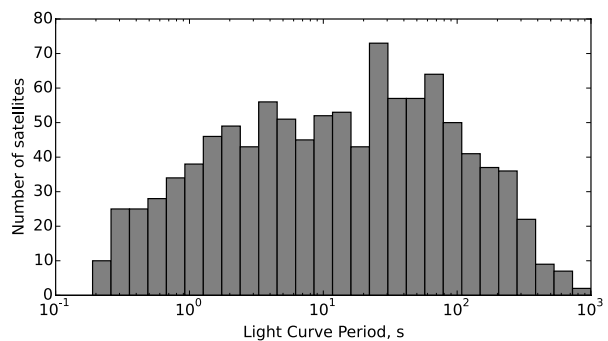


Рис. 7. Распределение периодов 5000 наблюдавшихся искусственных объектов в диапазоне от 0.2 до 1000 с.

#### 3.1. Метеоры и спутники

Подсистема анализа данных в реальном времени выделяет и классифицирует, в числе прочих транзиентных явлений, около 400 метеорных событий каждую ночь, а также несколько сотен пролётов ИСЗ и фрагментов космического мусора [14].

Высокое временное разрешение системы ММТ позволяет детально изучать кривые блеска искусственных объектов, а следовательно, исследовать их форму и внутреннюю динамику (см. рис. 7 и рис. 8).

#### 3.2. Короткие одиночные вспышки

В процессе мониторинга каждую ночь регистрируется до нескольких десятков коротких вспышек неизвестного происхождения (рис. 8). При длительности этих событий от 0.3 до 1 с и уровне блеска вплоть до 5–6 зв. величины подсистема обработки в реальном времени идентифицирует их за 0.3 с как неподвижные события. В то же время после перехода к исследовательскому (узкопольному) режиму, в котором наблюдения площадки с транзиентом продолжаются до 100 с, они, как правило, отождествляются со спутниками, поскольку

удается обнаружить их перемещение при повторных возрастаниях яркости.

Тем не менее, и после определения координат транзиентов в исследовательском режиме около 10% из них не отождествляются со спутниками из базы данных NORAD (рис. 9).

В настоящее время проводится статистический анализ выборки из 1000 вспышек неизвестного (на данный момент!) происхождения — проверяется их возможная повторяемость, проводится кросс-отождествление с существующими базами данных и каталогами. Разумеется, с высокой вероятностью большинство этих событий связано с отсутствующими в каталогах спутников искусственными объектами. Тем не менее можно допустить, что эти вспышки являются оптическими компонентами ненаблюдаемых внеосевых гамма-всплесков, проявлениями гравитационно-волновых событий в оптическом диапазоне, высокочастотными компаньонами быстрых радиоимпульсов, сигналами внеземных цивилизаций.

### 3.3. Поиск оптических компаньонов всплесков гравитационных волн

Система Mini-MegaTORTORA включена в международную кооперацию по поиску гравитационных волн — их оптических компаньонов, в частности. Для решения этой задачи в силу своего высокого временного разрешения и большого поля зрения ММТ приспособлена наилучшим образом. Последнее обстоятельство особенно важно из-за больших размеров боксов ошибок детекторов гравитационных волн, составляющих несколько сотен градусов. В то же время заранее не существует представлений о соотношении моментов генерации собственно гравитационного и электромагнитного излучения, возможно с ним связанного [15–18]. Таким образом, поиск оптических компаньонов гравитационно-волновых импульсов сводится к сканированию бокса ошибок зарегистрированного события с целью обнаружения в нем нового оптического объекта. Интенсивность этих исследований существенно возросла после первого обнаружения гравитационно-волнового импульса GW150914, по-видимому, обусловленного слиянием двух черных дыр [19]. Второй триггер, LVT 151012, был зарегистрирован 12 октября 2015 г. и, хотя он впоследствии оказался шумовым сигналом, поиски его возможного электромагнитного компаньона проводились в различных диапазонах спектра (см., например, [20]).

Результаты таких наблюдений по поиску с помощью системы ММТ оптического излучения, связанного с возможным гравитационно-волновым транзиентом LVT 151012, мы приводим ниже.

Мониторинг области локализации триггера был проведен в широкоугольном режиме без фильтров через 9 часов после получения автоматического сообщения (рис. 10)

В плохих погодных условиях (облачность) были накоплены десять 60-секундных экспозиций 900-градусной области в районе антисолнечной точки возможной локализации события. Никаких новых оптических источников обнаружено не было — верхний предел для блеска таких объектов составил 13.5 зв. величину на уровне  $5\sigma$ .

### 3.4. Поиск оптических компаньонов гамма-всплесков

С середины 2015 г. после завершения периода пробной эксплуатации системы Mini-MegaTORTORA инструмент работает как в мониторинговом, так и в исследовательском режимах. За это время было принято 89 сообщений с гамма-телескопа Swift и 250 сообщений с детектора GBM космической обсерватории Fermi. При этом в первом случае точность координат зарегистрированных гамма-всплесков составляла несколько угловых минут, а во втором — от нескольких до десятков градусов. Эта разница и обусловила различие в выборе режимов наблюдений для поиска и исследования вероятных оптических компаньонов этих гамма-всплесков.

При реакции системы на четыре обнаруженных телескопом Swift события, чьи координаты были доступны для оперативного перенаведения ММТ, вводился режим поляриметрии (в каналах устанавливались поляризационные фильтры с тремя различными ориентациями плоскости поляризации, и все каналы направлялись на область локализации всплеска), и через 30–60 с начиналось накопление данных с временным разрешением 1–5 с (было бы достаточно для определения наличия линейной поляризации в излучении объекта на уровне около 5%) в зависимости от прозрачности, стабильности изображений, уровня фона неба. Ни в одном случае не были обнаружены оптические транзиенты с блеском, превышавшим 12–13 зв. величин в полосе  $V$ .

При реакции системы на 9 сообщений с телескопа Fermi система проводила широкоугольные наблюдения областей их локализации с экспозициями 30 с после перенаведения, длительность которого варьировалась от 20 до 90 с. Проницание системы при этом составляло около 13–14 зв. величины.

Таким образом 4–5% регистрируемых на гамма-телескопах всплесков были доступны для исследований на ММТ. Для остальных сообщений либо положения всплесков были под горизонтом,



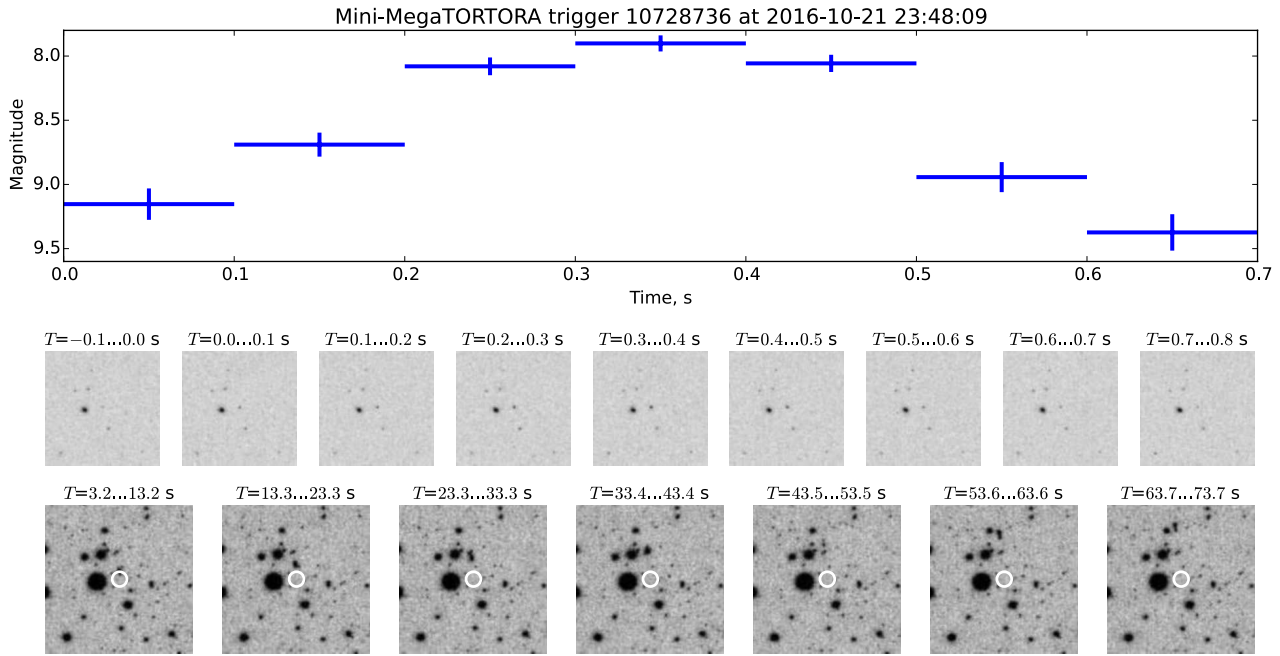


Рис. 8. Типичная субсекундная вспышка, не отождествлённая с ИСЗ из базы данных NORAD, но обнаруживающая признаки ИСЗ при наблюдениях в исследовательском (узкопольном) режиме.

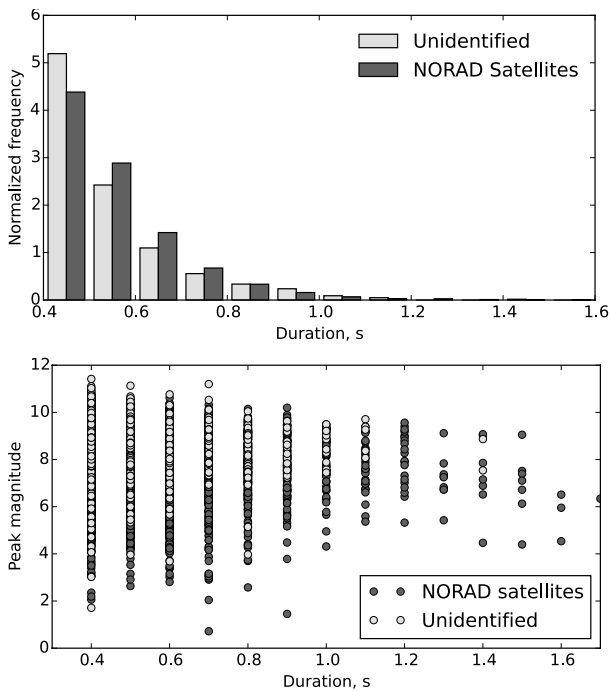


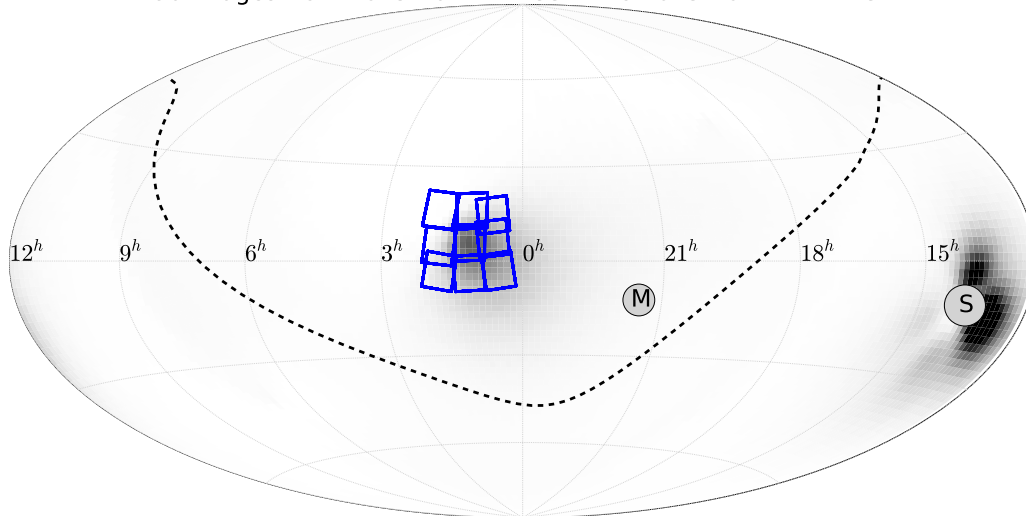
Рис. 9. Распределение по длительности и яркости 10000 одиночных вспышек, обнаруженных в мониторинговом режиме. Доля событий, неотжествляемых со спутниками из каталога NORAD, составляет около 10%.

либо слишком близко к Луне, либо наблюдения не могли проводиться из-за плохой погоды.

В единственном случае область локализации

всплеска, обнаруженного детектором GBM телескопа Fermi, GRB 151107B, наблюдалась до, в момент и после времени триггера  $T = 20:24:52$  UT 2015-11-07. Мониторинг поля зрения GBM Fermi с временным разрешением 0.1 с был начат в 20:19:23 UT ( $T-329.3$  с) и продолжался до 20:25:18 UT ( $T+25.7$  с), при этом ярчайшая часть пика гамма-всплеска пришлась на этот интервал, область локализации события полностью входила в зону мониторинга [21, 22]. Анализ данных в реальном времени показал, что в течение периода мониторинга не были зарегистрированы оптические транзиенты продолжительнее 0.3 с и ярче 11 зв. величин в полосе V. У событий с длительностью, превышающей 10 с, т.е. при сложении 100 последовательных кадров, верхняя граница блеска составила около 12 зв. величины. В 20:25:18 UT система ММТ получила сообщение по сети GCN и перерезориентировалась по первоначальным координатам гамма-всплеска, после чего, начиная с 20:25:55 UT ( $T+62.7$  с — в течение продолжающейся гамма-активности объекта), проводила мониторинг зоны его локализации (которая и после уточнения координат оставалась в поле зрения ММТ) с временным разрешением 30 с вплоть до 20:35:59 UT ( $T+666.7$  с), т. е. до затухания вспышки. Оптические транзиенты ярче 13.5 зв. величины в полосе V за это времени также обнаружены не были.

Trigger LVC\_194575 at 2015-10-22 13:33:19.942000  
90 images from 2015-10-22 22:33:24 to 2015-10-22 22:42:31



**Рис. 10.** Область мониторинга в ходе поиска оптического компаньона гравитационно-волнового триггера LVC\_194575. Пунктирной линией отмечен горизонт в момент проведения наблюдений. Кружки с буквами S и M отмечают положение Солнца и Луны, соответственно.

### 3.5. Обнаружение и исследования оптического компаньона гамма-всплеска GRB 160625B

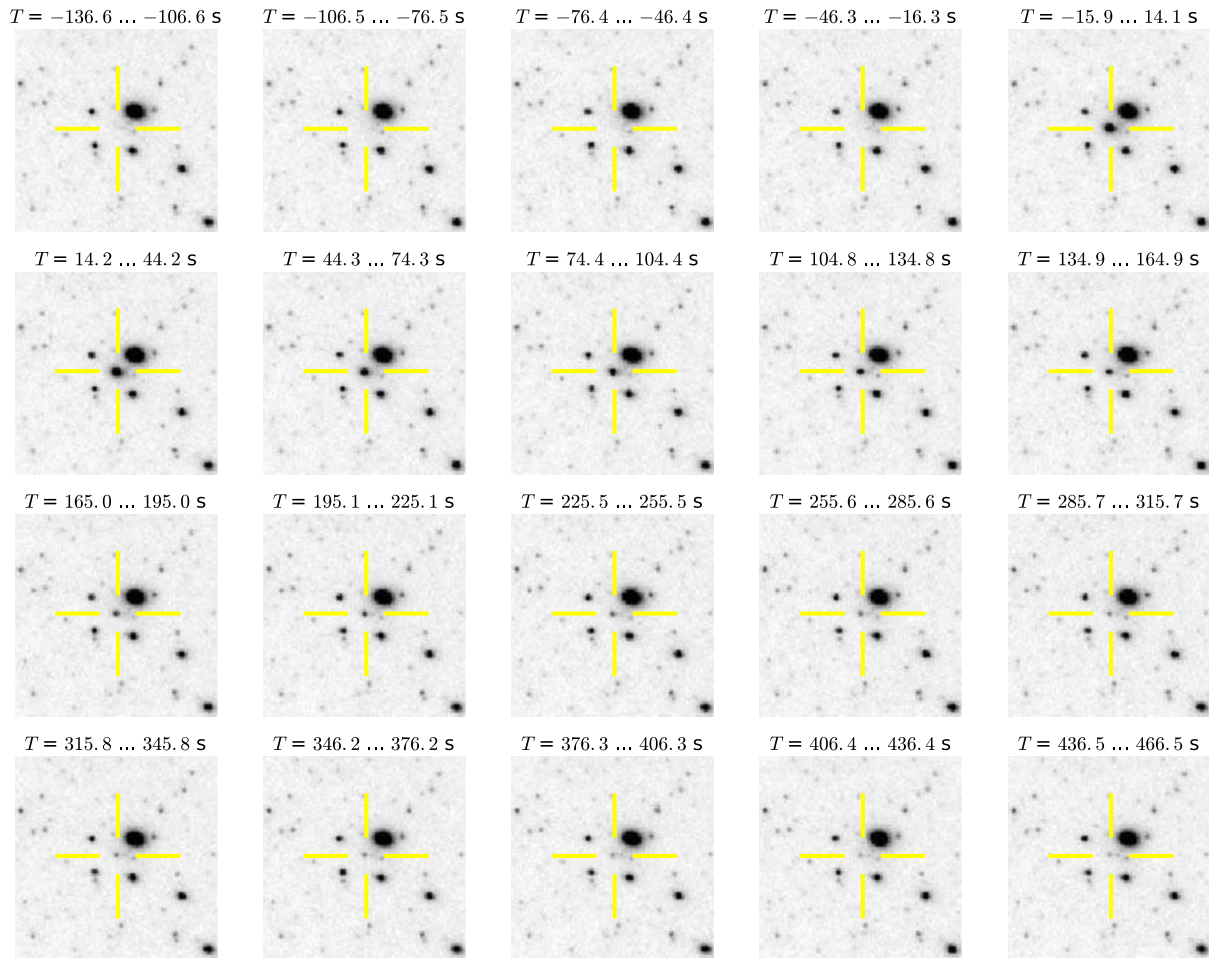
Область локализации гамма-всплеска GRB 160625B наблюдалась с помощью системы Мини-МегаТОРТОРА перед, в течение и сразу после момента LAT триггера ( $T_0 = 2016-06-25 22:43:24$ ). ММТ среагировала на триггер Fermi GBM 488587220, сгенерированный в результате регистрации прекурсора, опережающего упомянутый (второй) эпизод активности всплеска на 180 с, и начала наблюдения в момент UT 2016-06-25 22:41:07, через 52 с после GBM триггера и за 136 с до LAT триггера. Из-за большого размера бокса ошибок наблюдения проводились в широкоугольном режиме с полем зрения  $30^\circ \times 30^\circ$  при экспозиции 30 с в белом свете для достижения наилучшего проникновения. При этом было накоплено 20 кадров на интервале времени от  $T_0 - 136$  до  $T_0 + 466$  с. (рис. 12).

Система зарегистрировала [22] яркую оптическую вспышку в кадре, соответствующем моменту LAT триггера ( $T_0 - 15.9 \dots T_0 + 14.1$  s) по координатам, согласующимся с обнаруженным позднее [23] послесвечением, и звездной величиной около  $V = 8.8$ . На следующем кадре было зафиксировано некоторое поярчение приблизительно на 0.1 зв. величины, после чего блеск монотонно падал по примерно степенному закону с показателем  $-1.6$  вплоть до  $V = 12.2$  зв. величины на последнем кадре выборки. Во временном интервале, предшествовавшем LAT триггеру, не были зарегистрированы события с блеском, превышавшим  $V = 13.5$  зв. величин.

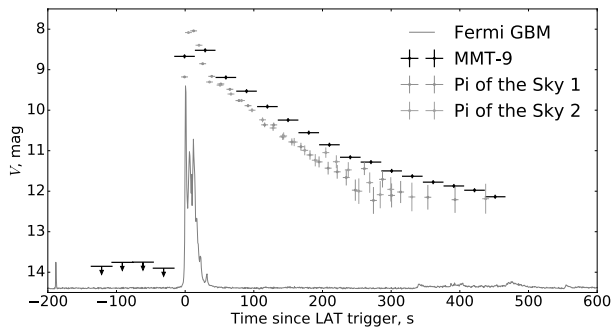
Система также среагировала на второй GBM триггер 488587880 с несколько отличающимися координатами. При этом было накоплено еще 20 кадров в интервале от  $T_0 + 1691$  до  $T_0 + 2264$  с. В этой выборке отсутствовали новые объекты ярче  $V = 13.5$  зв. величины.

Выборка кадров, накопленных в результате реакции на первое сообщение, показана на рис. 11 (размер поля 20 угл. мин. вокруг транзиента).

На оптической кривой блеска (рис. 12) выделяется начальный пик, близкий к длительности собственно гамма-всплеска, составляющей около 40 с. По-видимому здесь можно говорить о промпт-фазе излучения, которая плавно переходит в послесвечение примерно на 50 с после начала гамма-события. Такое поведение — отсутствие провала интенсивности между оптическим излучением, сопровождающим гамма-всплеск, и послесвечением — характерно для нескольких самых мощных всплесков, в том числе и для GRB 080319B (Naked-Eye Burst) [25]. На этом сходство двух объектов не заканчивается. Так, в обоих случаях уровень оптического излучения, сопровождающего гамма-всплеск, превышает плотность оптического потока в продолжении спектра, полученного в жестком диапазоне, что свидетельствует о разных механизмах генерации этих компонент. Более того — гамма-всплески опережают по времени соответствующие оптические вспышки. Сравнение кривых блеска GRB 160625B в разных диапазонах (рис. 13) позволило определить величину запаздывания оптического излучения относительно жесткой эмиссии. Статистический



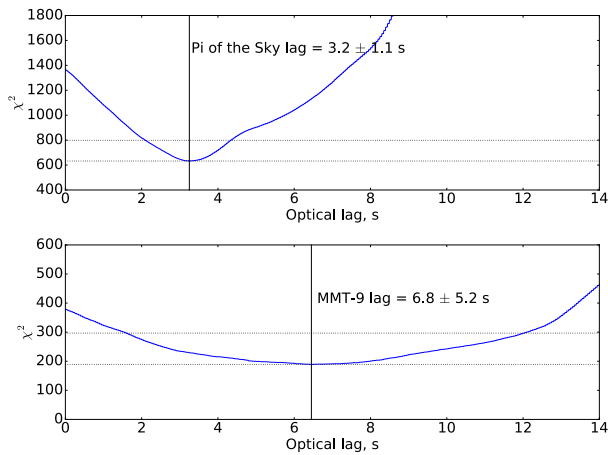
**Рис. 11.** Область локализации гамма-всплеска GRB 160625B в течение первых 20 кадров (экспозиция 30 с) ее мониторинга в белом свете. Крестом отмечен вспыхнувший объект, достигший в максимуме блеска 8.8 зв. величины.



**Рис. 12.** Кривая блеска оптической вспышки, сопровождавшей второй эпизод активности (первый — короткий прекурсор, который инициировал триггер детектора GBM — произошёл в момент времени около -180 с). Также приведены данные, полученные широкоугольной системой Pi of the Sky [24].

анализ показал, что они скоррелированы, причем гамма-излучение (во втором эпизоде активности) опережает оптическую вспышку на 2–4 с. Здесь

были использованы как данные наблюдений с системой Мини-МегаТОРТОРА, так и результаты, полученные с комплексом Pi of the Sky [24] (рис. 13). Учтя результаты измерений красного смещения объекта, которое оказалось близким к 1.4 [26], находим, что в собственной системе отсчета оптическое излучение отстаёт от гамма на 1–2 с. Отсюда, по аналогии с Naked-Eye Burst (где величина запаздывания была такой же), следует, что оптические фотоны рождаются в 10–100 раз дальше от «центральной машины», чем высокоэнергичные кванты, т.е. в разнесенных областях джета [6]. Таким образом, можно утверждать, что и в гамма-всплеске GRB 160625B реализуется нагрев электронов внутренней ударной волной, рождающейся при столкновении выброшенных в джете филаментов, с последующим синхротронным высвечиванием энергии этих частиц [27].



**Рис. 13.** Определение запаздывания оптической вспышки по отношению к гамма-всплеску GRB 160625B

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И НЕКОТОРЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Основная цель наблюдений с системой Мини-MegaТОРТОРА — обнаружение новых и исследование уже известных нестационарных объектов различной природы и локализации. Впервые в мире может быть получена непрерывно обновляющаяся динамическая картина как ближнего, так и дальнего космического пространства с субсекундным временным разрешением. В принципе, можно выделить целый набор основных направлений, в рамках которых использование ММТ может привести к новым как качественным, так и количественным результатам в исследованиях различных объектов. Коротко перечислим их.

Исследования ближнего космического пространства (НКО)

- объекты искусственного происхождения (АО) — спутники: до 500 прохождений за ночь (в зависимости от яркости система позволяет определять траекторию движения объекта с точностью до нескольких угловых секунд); космический мусор — элементы конструкций размерами 1–100 см — около 200 за ночь;
- метеоры и болиды: до 500 событий за ночь, практически непрерывный мониторинг ночного неба позволит с беспрецедентной детализацией изучить потоки спорадических метеоров и их следы, оставляемые в атмосфере.

Изучение Солнечной Системы

- астероиды: свыше сотни за год. Возможно получение долговременных, непрерывных

рядов наблюдений большого числа объектов, что позволит быстрее и точнее определять параметры орбиты;

- кометы: несколько за год.

Исследования Галактики (около 50 миллионов звезд, доступных для наблюдений)

- вспышкающие звезды (несколько сотен новых объектов);
- новые (около 50 за год);
- транзиты экзопланет (10–20 за год);
- переменные звезды (около 1 миллиона новых объектов);
- эффекты микролинзирования звезд (МАСНО) (несколько десятков событий за год).

Изучение Метагалактики

- ядра активных галактик, квазары, блазары (100 за год);
- вспышки сверхновых (около 100 за год);
- оптические компаньоны гамма-всплесков (несколько событий за год).

Практически ни один из упомянутых типов переменных объектов не исследовался на временах короче 10 с. Однако именно этот диапазон является критическим для изучения начальных фаз взрывов сверхновых и новых звезд, тонкой структуры кривых блеска оптических транзиентов, сопровождающих гамма-всплески, не говоря уже о метеорах и космическом мусоре.

Универсальность метода наблюдений и первичной обработки накопленной информации позволяет использовать одни и те же массивы данных для обнаружения и изучения объектов различных типов, решения разных астрофизических задач, всегда, тем не менее, связанных с быстропротекающими процессами.

Обработка и анализ результатов мониторинга в режиме реального времени, а также в течение долей секунды при обнаружении и идентификации транзиентов позволит информировать других исследователей о вновь вспыхнувшем источнике или опасном метеороиде, и немедленно перейти к его детальному изучению.

Основной результат реализации проекта — создание инструмента нового типа для обнаружения и изучения быстропеременных (во времени и пространстве) источников оптического излучения заранее неизвестной локализации. В конечном итоге система Мини-MegaТОРТОРА позволит построить общую выборку объектов, переменных на временах вплоть до долей секунды.

В заключении подчеркнем, что система Мини-МегаТОРТОРА, по-видимому, единственный в мире телескоп, который в силу сочетания широкого поля зрения и высокого временного разрешения в принципе способен обнаружить в реальном времени оптическое излучение, связанное с быстрыми радиовсплесками (их длительность близка к нескольким миллисекундам) [28] и гравитационно-волновыми событиями [19], — наиболее значимыми транзитным явлениями в современной астрофизике.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была поддержана грантами РФФИ (№№09-02-12053 и 12-02-00743-А), программой Президиума РАН, а также грантом Европейского Союза (283 783, проект GLORIA) и Программой повышения конкурентоспособности Казанского Государственного Университета. В части проведения наблюдений работа была поддержана грантом РНФ 14-50-00043.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Bondi, Q. J. R. Astron. Soc. **11**, 443 (1970).
2. G. M. Beskin, S. V. Karpov, S. F. Bondar, et al., Physics Uspekhi **53**, 406 (2010).
3. S. Karpov, G. Beskin, A. Biryukov, et al., Nuovo Cimento C Geophysics Space Physics C **28**, 747 (2005).
4. E. Molinari, S. Bondar, S. Karpov, et al., Nuovo Cimento B Serie **121**, 1525 (2006).
5. J. L. Racusin, S. V. Karpov, M. Sokolowski, et al., Nature **455**, 183 (2008).
6. G. Beskin, S. Karpov, S. Bondar, et al., Astrophys. J. Letters **719**, L10 (2010).
7. B. M. Shustov, Physics Uspekhi **54**, 1068 (2011).
8. G. M. Beskin, S. V. Karpov, V. L. Plokhotnichenko, et al., Physics Uspekhi **56**, 836 (2013).
9. G. Beskin, V. de-Bur, S. Karpov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **60-61**, 217 (2007).
10. D. Kopač, C. G. Mundell, J. Japelj, et al., Astrophys. J. **813**, 1 (2015).
11. I. Zolotukhin, G. Beskin, A. Biryukov, et al., Astronomische Nachrichten **325**, 675 (2004).
12. S. Karpov, G. Beskin, S. Bondar, et al., Advances in Astronomy **2010**, 784141 (2010).
13. S. Karpov et al., in preparation.
14. S. Karpov, N. Orekhova, G. Beskin, et al., arXiv:1602.07977 (2016).
15. C. W. Stubbs, Classical and Quantum Gravity **25**, 184033 (2008).
16. N. Andersson, J. Baker, K. Belczynski, et al., Classical and Quantum Gravity **30**, 193002 (2013).
17. J. Aasi, J. Abadie, B. P. Abbott, et al., Astrophys. J. Suppl. **211**, 7 (2014).
18. A. Loeb, Astrophys. J. Letters **819**, L21 (2016).
19. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, et al., Physical Review Letters **116**, 241103 (2016).
20. P. A. Evans, J. A. Kennea, D. M. Palmer, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **462**, 1591 (2016).
21. M. Stanbro and C. Meegan, GRB Coordinates Network **18570** (2015).
22. S. Karpov, G. Beskin, S. Bondar, et al., GRB Coordinates Network **18574** (2015).
23. E. Troja, N. Butler, A. M. Watson, et al., GRB Coordinates Network **19588** (2016).
24. T. Batsch, A. J. Castro-Tirado, H. Czyrkowski, et al., GRB Coordinates Network **19615** (2016).
25. G. M. Beskin, G. Oganessian, G. Greco, and S. Karpov, Astrophysical Bulletin **70**, 400 (2015).
26. D. Xu, D. Malesani, J. P. U. Fynbo, et al., GRB Coordinates Network **19600** (2016).
27. Z. Li and E. Waxman, Astrophys. J. Letters **674**, L65 (2008).
28. D. R. Lorimer, M. Bailes, M. A. McLaughlin, et al., Science **318**, 777 (2007).

## Wide-Field Optical Monitoring with Mini-MegaTORTORA (MMT-9) Multichannel High Temporal Resolution Telescope

G. M. Beskin, S. V. Karpov, A. V. Biryukov, S. F. Bondar, E. A. Ivanov, E. V. Katkova, N. V. Orekhova, A. V. Perkov, and V. V. Sasyuk

We describe the properties of Mini-MegaTORTORA (MMT-9) nine-channel wide-field optical sky monitoring system with subsecond temporal resolution. This instrument can observe sky areas as large as  $900 \text{ deg}^2$ , perform photometry in three filters close to Johnson  $BVR$  system and polarimetry of selected objects or areas with  $100\text{--}300 \text{ deg}^2$  sizes. The limiting magnitude of the system is up to  $V = 11^m$  for 0.1 s temporal resolution, and reaches  $V = 15^m$  in minute-long exposures. The system is equipped with a powerful computing facility and dedicated software pipeline allowing it to perform automatic detection, real-time classification, and investigation of transient events of different nature located both in the near-Earth space and at extragalactic distances. The objects routinely detected by MMT-9 include faint meteors and artificial Earth satellites. We discuss astronomical tasks that can be solved using MMT-9, and present the results of the first two years of its operation. In particular, we report the parameters of the optical flare detected on June 25, 2016, which accompanied the gamma-ray burst GRB 160625B.

Keywords: gamma-ray burst: individual: GRB 160625B—instrumentation: miscellaneous—techniques: photometric