

УДК

## **ММТ-9 - МНОГОКАНАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГОВЫЙ ТЕЛЕСКОП С СУБСЕКУНДНЫМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ**

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

<sup>1</sup>САО РАН, <sup>2</sup>НПК СПП СОН «Архыз», <sup>3</sup>ООО «Параллакс», <sup>4</sup>Казанский  
(Приволжский) Федеральный Университет

### **Аннотация**

В работе описываются характеристики созданной в КФУ широкопольной 9-канальной системы оптического мониторинга неба с субсекундным временным разрешением Mini- MegaTORTORA (ММТ). Установленная в САО РАН недалеко от 6-м телескопа БТА, эта система позволяет проводить наблюдения небесной сферы с полем зрения вплоть до 900 квадратных градусов в BVR цветовых полосах, близких к джонсоновским, а также измерять поляризацию. Временное разрешение системы составляет 0.1 сек при проницании около 11 звёздной величины (фильтр V), при увеличении времени экспозиции соответствующим образом улучшается проницание. Снабженная мощным вычислительным комплексом и программным обеспечением, система проводит автоматизированный поиск, классификацию в реальном времени и исследование транзиентных 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 первого года работы системы.

## Abstract

Here we describe the novel 9-channel wide-field optical monitoring system with sub-second temporal resolution, Mini-MegaTORTORA (MMT), which is in operation now at Special Astrophysical Observatory on Russian Caucasus. The system is able to observe the sky simultaneously in either wide (~900 square degrees) or narrow (~100 square degrees) fields of view, either in clear light or with any combination of color (Johnson B, V or R) and polarimetric filters installed, with exposure times ranging from 100 ms to 100 s. The system data analysis pipeline performs automatic detection of rapid transient events, both near-Earth and extragalactic. The objects routinely detected by MMT include faint meteors and artificial satellites. We present first results of MMT operation and discuss its applicability to various tasks of near- Earth astronomy.

### 1. Введение

Впервые проблему поиска и исследования быстропеременных (транзиентных) во времени и пространстве оптических источников отчетливо сформулировал Г.Бонди в 1970 году (Bondi, 1970), отметив важность поисков нестационарных объектов неизвестной заранее локализации. Для их изучения необходимы широкоугольные инструменты (с полем зрения в сотни квадратных градусов), использующие детекторы как минимум субсекундного временного разрешения. Малая длительностью (вплоть до 0.01 с) транзиентов (вспышки звезд типа UV Кита, гамма-всплески, передние фронты вспышек сверхновых и новых звезд) и/или большие скорости (до десятков градусов в секунду) их движения (спутники, космический мусор, метеоры и болиды) определяет необходимость второго условия.

Для осуществления широкопольного мониторинга высокого временного разрешения необходимо сочетание изначально взаимно противоречивых требований - достаточно высокого предела обнаружения (большой

диаметр объектива), широкого поля зрения (короткий фокус) и высокого временного разрешения (небольшой размер детектора). Необходимо достижение разумного компромисса. Соотношение этих условий было оптимизировано в проекте широкопольной камеры с объективом относительно малого диаметра, электронно-оптическим преобразователем для эффективного сокращения фокуса и быстрой малошумящей ПЗС-матрицей (Бескин и др., 2010). Первая версия прибора, FAVOR (FAst Variability Optical Registrator), начала наблюдения в 2003 году поблизости от 6-м телескопа БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН (Karpov et al., 2005). Аналогичная по конструкции камера TORTORA (Telescopio Ottimizzato per la Ricerca dei Transienti Ottici RAPidi) (Molinari et al., 2006) установлена в 2006 г. на монтажке роботического телескопа REM в обсерватории La-Silla (ESO, Чили). При диаметрах объективов 15 и 12 см (светосиле 1:1.2) и полях зрения 400-800 кв.град. пределы обнаружения этих систем близки к 10-11 зв. вел. в В-полосе за время экспозиции 0.13 с (частота кадров ПЗС-матрицы – 7.5 Гц).

В конечном итоге камера TORTORA обнаружила оптическое излучение, синхронное с гамма-эмиссией, у самого яркого из известных на данный момент гамма-всплеска GRB080319B. При этом впервые была открыта переменность транзиента такого типа на секундной временной шкале и проведено сопоставление ее параметров с таковыми в гамма-диапазоне (Racusin et al., 2008; Beskin et al., 2010).

С помощью камер FAVOR и TORTORA также впервые удавалось регистрировать быстродвижущиеся спутники и метеоры с яркостью на уровне 9-10 зв.вел. (Багров и др., 2007).

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 (Шустов, 2011). Представляется, что разработанные нами многоканальные системы высокого временного разрешения Mini-MegaTORTORA (естественное развитие проектов FAVOR и TORTORA) способны регистрировать и исследовать такие быстродвижущиеся и появляющиеся внезапно в земной окрестности опасные метеороиды.

## **2. Многоканальная широкоугольная мониторинговая система Mini-MegaTORTORA**

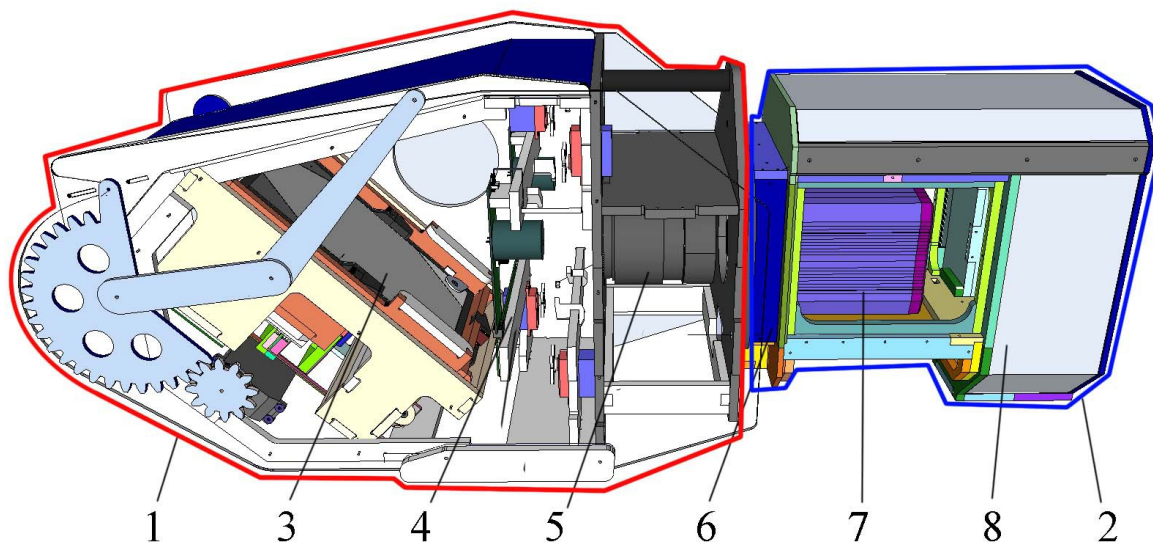
Опыт эксплуатации камер FAVOR и TORTORA позволил определить направления дальнейшего развития методологии широкоугольного поиска быстрых оптических транзиентов. Прежде всего, надо повысить пропускание инструментов как минимум на 2–3 звездных величины при сохранении или даже увеличении размера их поля зрения. Для этого необходимо перейти к многообъективным (многотелескопным) конфигурациям с уменьшением поля зрения отдельного инструмента (увеличением его углового разрешения) при сохранении (как минимум) полного поля зрения (Бескин и др., 2007). С другой стороны, для соблюдения условия доминирования шума неба относительно шума приемника нужно увеличивать его квантовый выход и/или использовать малошумящие детекторы (матрицы с внутренним усилением, sCMOS-приемники). Вторым важным направлением развития является измерение цветов и поляризации обнаруженных транзиентов сразу после их регистрации. Именно такой класс приборов мы разрабатываем в настоящее время, и Mini-MegaTORTORA является их прототипом.

Система Mini-MegaTORTORA (ММТ-9) состоит из набора 9 отдельных каналов-объективов (Рис. 1), установленных попарно на 5 экваториальных монтировках. Перед каждым объективом расположено плоское зеркало, поворачивающееся вокруг двух осей на десять градусов,

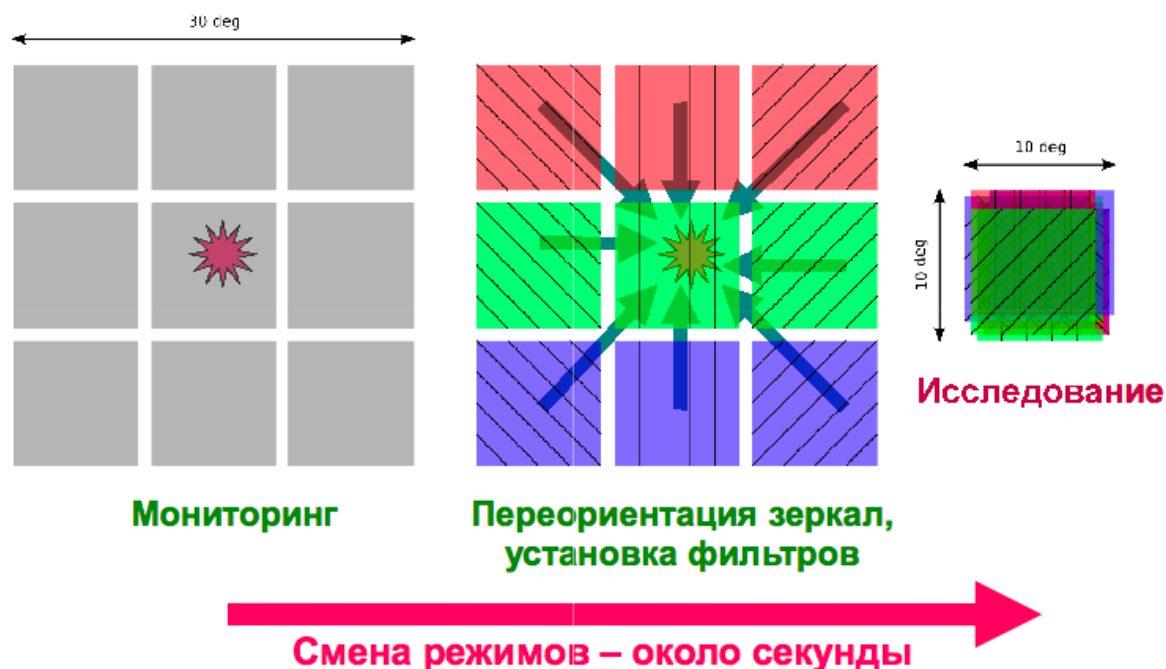
тем самым меняя расположение поля зрения каждого канала на небесной сфере в пределах  $\pm 20$  градусов. Кроме того, каждый объектив снабжен набором цветowych и поляризационных фильтров, которые могут вводиться в световой пучок в процессе наблюдений. Это позволяет быстро переходить от широкопольного мониторинга без фильтров к узкопольным наблюдениям, когда все объективы направлены на одну область, содержащую только что обнаруженный транзиент, и регистрируют ее 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 детектором с высоким временным разрешением Andor Neo sCMOS. Управление системой в целом и анализ получаемых с неё данных в реальном времени осуществляется программным обеспечением, аналогичным использовавшемуся в камерах FAVOR и TORTORA (Zolotukhin et al., 2004; Karpov et al., 2005, Molinari et al., 2006).

Одиночный канал имеет поле зрения около 100 кв.град, а система MMT-9 в широкопольном мониторинговом режиме – около 900 квадратных градусов. Предел обнаружения составляет около 10-11 зв.вел. за 0.1 секунды в V фильтре (около 14 величины за 60 секунд). В исследовательском (follow-up) режиме узкого поля при наблюдениях отдельных объектов размер поля зрения уменьшается до 100 квадратных градусов, а предельная звездная величина зависит от выбора комбинации спектральных и поляризационных фильтров и лежит в диапазоне 12.5 зв.вел. за 0.1 секунды, потенциально достигая 16 зв. вел. при сложении кадров за 1000 секунд.



*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 цвете либо в одном из цветных фильтров. Посередине — введение в световой пучок цветных 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 (показанных различными направлениями штриховки) одновременно.*

Система ММТ-9 была изготовлена в сотрудничестве с Казанским (Приволжским) Федеральным Университетом и ООО «Параллакс» и введена в эксплуатацию в июне 2014 года. Она расположена недалеко от 6-м телескопа БТА в САО РАН (см. Рисунок 3).



*Рис. 3. Общий вид системы ММТ-9, установленной в САО РАН и работающей с июня 2014 года.*

### **3. Наблюдения с помощью Mini-MegaTORTORA**

Начиная с июня 2014 года, система ММТ-9 ведёт регулярный мониторинг небесной сферы с целью поиска и исследования транзиентных событий различных классов. В типичном режиме работы площадки размером 30x30 градусов наблюдаются в течение 1000 секунд каждая с временным разрешением 0.1 секунды; при этом осуществляется

равномерное покрытие всей доступной полусферы неба за ночь. 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, информация о которых сохраняется в специализированных базах данных (Орехова и др., 2015; Каткова и др., 2015).

*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 РФФИ 14-50-00043.

### *Литература*

1. Bondi H. *Q. J. R. Astron. Soc.*, 11:443, 1970.
2. Бескин, Г. и др. *УФН*, 2010, 180, 4, 424
3. Karpov S. et al. *Nuovo Cimento C*, 28:747–750, July 2005.
4. Molinari E. et al. *Nuovo Cimento B*, 121(12):1525–1526, 2006.
5. Racusin J. L. et al. *Nature*, 455:183–188, sep 2008.
6. Beskin G. et al. *ApJ*, 719:L10–L14, August 2010.
7. Багров А.В. и др., в сб.: «Околосемная астрономия – 2007», Тез. докл. междунар. конф., п. Терскол, Кабардино-Балкарская Республика, 3-7 сентября 2007 г., Нальчик, Изд-во КБНЦ РАН, 2007, с. 48.
8. Шустов, Б.М., *УФН*, 2011, 181, 10, 1104
9. Бескин Г. и др., *Бюллетень САО*, 60–61:217–225, 2007.
10. Орехова Н. и др., *настоящий том*.
11. Каткова Е. и др., *настоящий том*.