

пример, мощное лазерное оружие) достаточной мощности для разрушения такого массивного тела пока только рассматриваются в рамках различных научно-исследовательских работ. Единственный разумный способ уменьшения ущерба при выявлении угрозы (близкого, на масштабе нескольких часов, столкновения) — это применение технологий МЧС, оповещение, вывод людей в безопасную зону, выключение опасных установок, остановка опасных производств и т.д. И конечно, необходимо продолжать фундаментальные исследования различных аспектов воздействия на опасные небесные тела. В связи с этим новое значение приобретают работы по столкновениям естественных небесных тел (см., например, [9]), а также столкновениям космических аппаратов с малыми небесными телами (см., например, [10]).

5. Заключение

1. С астрономической точки зрения Челябинское событие является типичным случаем вхождения астероида в атмосферу Земли. Необычность данного события состоит в том, что оно впервые в современной истории произошло в плотно населённой местности, привело к заметным разрушениям и было зарегистрировано с помощью многочисленных средств наблюдений, включая видеокамеры.

2. Челябинское событие является убедительной иллюстрацией реальности проблемы астероидно-кометной опасности. Необходимо развивать средства заблаговременного обнаружения опасных малых тел. В мире этим занимаются серьёзно, и Россия не может остаться в стороне от общего развития.

3. Для эффективной работы необходима программа федерального уровня. Проект концепции такой программы представлен в [8].

Благодарности

Авторы выражают благодарность правительству Челябинской области во главе с губернатором М.В. Юревичем, оказавшему всемерную поддержку нашей экспедиции по сбору данных о Челябинском событии, сотрудникам Центра управления в кризисных ситуациях Главного управления МЧС России по Челябинской области, оказавшим огромную помощь в сборе фактических материалов о последствиях Челябинского явления, генеральному директору компании "Интерсвязь" Э.О. Калинину, предоставившему записи видеокамер наружного наблюдения и фотоматериалы съёмок местности с самолёта, и многочисленным очевидцам события, которые сообщили сведения о том, что произошло в небе над Челябинском 15 февраля 2013 г., и предоставили свои видеозаписи.

Работа поддержана грантами Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 гг. и Программы 22 Президиума РАН "Фундаментальные процессы исследований и освоения Солнечной системы".

Список литературы

1. Емельяненко В В и др. *Астрон. вестник* **47** 262 (2013) [Emel'yanenko V V et al. *Solar Syst. Res.* **47** (4) (2013)]
2. Borovicka J, Spurny P, Shrbeny L, *Electronic Telegram*, No. 3423 (Cambridge, MA: Central Bureau Electronic Telegrams, Intern. Astronomical Union, 2013)

3. Шустов Б М, Рыхлова Л В (Ред.) *Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра* (М.: Физматлит, 2010)
4. Шустов Б М *УФН* **181** 1104 (2011) [Shustov B M *Phys. Usp.* **54** 1068 (2011)]
5. Зеленый Л М, Захаров А В, Ксанфомалити Л В *УФН* **179** 1118 (2009) [Zelenyi L M, Zakharov A V, Ksanfomality L V *Phys. Usp.* **52** 1056 (2009)]
6. Boattini A et al., *Bull. Am. Astron. Soc., DPS Meeting* Vol. 41, No. 9.02TC3 (2008) (Washington, DC: American Astronomical Soc., 2009) 09.02
7. Шустов Б М, Нароенков С А, Емельяненко В В, Шугаров А С *Астрон. вестник* **47** 312 (2013) [Shustov B M *Solar Syst. Res.* **47** (4) (2013)]
8. Шустов Б М и др. *Астрон. вестник* **47** 327 (2013) [Shustov B M et al. *Solar Syst. Res.* **47** (4) (2013)]
9. Фортгов В Е и др. *УФН* **166** 391 (1996) [Fortov V E et al. *Phys. Usp.* **39** 363 (1996)]
10. Клумов Б А и др. *УФН* **175** 767 (2005) [Klumov B A et al. *Phys. Usp.* **48** 733 (2005)]

PACS numbers: 89.60.Gg, 95.55.Cs, 96.30.Ys

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201308i.0888

Системы широкоугольного оптического мониторинга субсекундного временного разрешения для обнаружения и исследования космических угроз

Г.М. Бескин, С.В. Карпов, В.Л. Плохотниченко, С.Ф. Бондарь, А.В. Перков, Е.А. Иванов, Е.В. Каткова, В.В. Сасюк, Э. Шерер

1. Введение

В настоящей статье обсуждаются возможности использования многообъективных оптических телескопов, оснащённых детекторами высокого временного разрешения, для обнаружения и изучения быстро движущихся космических тел естественного и искусственного происхождения. Рассматриваются два варианта инструментов такого типа (шесть и девять каналов), использующих стандартные светосильные объективы малого диаметра (70 мм), панорамные детекторы высокого временного разрешения и экваториальные монтировки. Системы функционируют в двух режимах: мониторинговом (поля зрения 600 и 900 квадратных градусов) и исследовательском (поле зрения 100 кв. град.), в котором все объективы наблюдают одно поле с обнаруженным при мониторинге быстро движущимся объектом. Изменение ориентации объективов за несколько долей секунды обеспечивается поворотами плоских зеркал, расположенных перед объективами, а измерение цвета и поляризации — набором фильтров и поляроидов. Описываются особенности конструкции прототипов приборов, их

Г.М. Бескин, С.В. Карпов, В.Л. Плохотниченко. Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская Республика, РФ. E-mail: beskin@sao.ru
С.Ф. Бондарь, А.В. Перков, Е.А. Иванов, Е.В. Каткова. Станция оптических наблюдений "Архыз" Научно-производственной корпорации "Системы прецизионного приборостроения", Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская Республика, РФ
В.В. Сасюк. Общество с ограниченной ответственностью "Параллакс", Казань, РФ
Э. Шерер. Национальный университет Ирландии, Голуэй, Ирландия

© Г.М. Бескин, С.В. Карпов, В.Л. Плохотниченко, С.Ф. Бондарь, А.В. Перков, Е.А. Иванов, Е.В. Каткова, В.В. Сасюк, Э. Шерер 2013

Таблица 1. Классы оптических транзиентов* по их длительности и локализации

Время	Околоземное пространство	Галактика	Внегалактика и космологические расстояния
< 0,1 с	Метеоры, спутники, космический мусор, высокоатмосферные явления	Новые, вспыхивающие звёзды, покрытия звёзд	Гамма-всплески, близкие сверхновые
1 с	Высокоорбитальные спутники		
10 с			
100 с	Астероиды	Переменные звёзды, МАСНО-события	Активные ядра галактик, сверхновые
> 1000 с			
* Жирным шрифтом выделены классы объектов, на постоянной основе исследуемые широкопольными экспериментами, такими как ASAS (All Sky Automated Survey), LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research), MACNO (Massive Compact Halo Objects) и др.			

характеристики, параметры обнаруживаемых опасных объектов. Обсуждаются перспективы развития систем такого типа, в частности, возможность создания комплекса из нескольких сотен телескопов диаметром 40 см и полем зрения 1 кв. град.

Поиск и исследование быстропеременных (транзистентных) во времени и пространстве оптических объектов и явлений относятся к числу довольно новых направлений в астрономии. Впервые эту проблему отчётливо сформулировал Г. Бонди [1] в 1970 г., отметив необходимость обнаружения и изучения нестационарных объектов неизвестной заранее локализации. В наблюдениях такого рода необходимо использовать весьма широкоугольные инструменты (с полем зрения в несколько сотен квадратных градусов), оснащённые панорамными детекторами по крайней мере субсекундного временного разрешения. Последнее требование обусловлено малой длительностью (вплоть до 0,01 с) транзиентов (вспышки звёзд типа UV Кита, гамма-всплески (gamma-ray burst — GRB), передние фронты вспышек сверхновых и новых звёзд) и/или большими скоростями (до нескольких десятков градусов в секунду) их движения (спутники, космический мусор, метеоры и болиды) [2].

В таблице 1 оптические транзиенты классифицированы по их локализации и длительности. Для примера отметим два в определённом смысле "противоположных" класса оптических транзиентов: природные и искусственные объекты, представляющие опасность для человечества, и вспышки, связанные с космическими гамма-всплесками.

Ясно, что сочетание хорошего предела обнаружения (большой диаметр объектива), широкого поля зрения (короткий фокус) и высокого временного разрешения (небольшой размер детектора) изначально противоречиво, поэтому приходится искать разумный компромисс при выборе этих параметров. Представляется, что его удалось достигнуть в проекте широкопольной камеры с объективом относительно малого диаметра, электронно-оптическим преобразователем для эффективного сокращения фокуса и быстрой малошумящей ПЗС-матрицей (ПЗС — прибор с зарядовой связью) [2]. Прототип такой системы, FAVOR (FAst Variability Optical Registrator), введённый в строй в 2003 г., расположен недалеко от 6-метрового телескопа БТА (Большой телескоп азимутальный) Специальной астрофизической обсерватории РАН [3, 4]. Аналогичная по конструкции камера TORTORA (Telescopio Ottimizzato per la Ricerca dei Transienti Ottici RAPidi) [5] установлена в

2006 г. на монтажке роботического телескопа REM (Rapid Eye Mount) [6] в обсерватории Ла Силла (Европейская южная обсерватория, Чили). При диаметрах объективов 12–15 см (светосиле 1:1,2) и полях зрения 400–800 кв. град. пределы обнаружения этих систем близки к 10–11 звёздным величинам в В-полосе за время экспозиции 0,13 с (частота кадров ПЗС-матрицы 7,5 Гц).

Именно такие характеристики камеры TORTORA позволили обнаружить и детально исследовать оптическое излучение 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 её параметров с таковыми в гамма-диапазоне [7–9].

С помощью камер FAVOR и TORTORA также впервые удалось зарегистрировать быстро движущиеся спутники и метеоры с яркостью на уровне 9–10 зв. вел. [10]. В определённом смысле их обнаружение моделирует регистрацию и движущихся, внезапно вошедших в атмосферу Земли метеороидов, подобных Челябинскому метеориту. Космические тела такого типа представляются наиболее опасными ввиду практической невозможности их раннего обнаружения и прогноза поведения, хотя ущерб от их падения и будет носить лишь локальный характер.

Действительно, астероидно-кометная опасность в первую очередь связывается с воздействием на Землю крупных космических тел, размеры которых превышают несколько сотен метров. В частности, проводимая с начала 1990-х годов программа "Космическая стража" (Spaceguard Survey) (США) позволила каталогизировать свыше 8000 сближающихся с Землёй объектов, размеры которых превышают 1 км. Среди них более 1000 потенциально опасных тел — в основном это астероиды, комет — около 70 [11]. В то же время выборка даже таких крупных объектов далека от полноты — несколько десятков из них пока не обнаружено. Намного хуже ситуация со 100-метровыми и 50-метровыми телами — более 90 % (10 000) и 99 % (100 000) соответственно нам вообще неизвестны [11]. Практически не прогнозируемо и появление вблизи Земли фрагментов распавшихся долгопериодических комет, имеющих большие скорости. Хотя число последних невелико, последствия их внезапного появления могут быть катастрофическими.

Наконец, подчеркнём, что около половины неизвестных объектов, движение которых не отслеживается непрерывно, вообще не наблюдаемы в ночное время. Их

можно частично регистрировать только космическими приборами. Однако сейчас в мире нет оптических телескопов, оптимизированных для систематического обнаружения относительно небольших опасных объектов (50–100 м диаметром) (см., например, [11]). По-видимому, несколько таких инструментов будет введено в эксплуатацию после 2015 г. Речь идёт прежде всего о четырёх телескопах диаметром 1,8 м проекта Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System) и 8-метровом телескопе LSST (Large Synoptic Survey Telescope) [12, 13]. Эти инструменты с полями зрения около 9 кв. град. при экспозициях в 30 и 15 с будут иметь пределы обнаружения около 24–25 зв. вел. и будут способны проводить обзор небесной полусферы за несколько ночей. Тем не менее ясно, что эти прекрасные инструменты не смогут обнаруживать внезапно появляющиеся в произвольном месте быстро движущиеся объекты.

Для решения такой задачи необходимы инструменты с полем зрения в несколько сотен (лучше тысяч!) квадратных градусов (в идеале необходимо наблюдать одновременно всю небесную полусферу) и высоким временным разрешением. Более того, такой прибор должен быть способен практически в режиме реального времени получить максимум информации о зарегистрированном объекте — измерить его скорость, цвета, поляризацию, определить параметры переменности. Всё это необходимо для прогнозирования эволюции тела — не только его механического движения, но и физических свойств (массы, плотности, состава, степени устойчивости).

Представляется, что создаваемые нами многоканальные системы высокого временного разрешения Mini-MegaTORTORA (естественное продолжение проектов FAVOR и TORTORA) способны регистрировать и исследовать быстро движущиеся, появляющиеся внезапно опасные метеороиды.

2. Многоканальная широкоугольная мониторинговая система Mini-MegaTORTORA

После получения положительного опыта эксплуатации систем FAVOR и TORTORA стала понятна необходимость дальнейшего развития методики широкопольного поиска быстрых оптических транзиентов. Речь шла об улучшении проницания системы, как минимум, на 2–3 звёздных величины при сохранении или даже увеличении размера её поля зрения. Этого можно достичь за счёт использования многообъективных (или многотелескопных) конфигураций и уменьшения поля зрения отдельного инструмента и, следовательно, увеличения его углового разрешения [14]. Для снижения существенного вклада шумов считывания ПЗС-матриц необходимо либо увеличить их квантовый выход и коэффициент усиления электронно-оптического преобразователя (ЭОП), либо использовать мал шумящие детекторы (матрицы с внутренним усилением либо приёмники на основе sCMOS (scientific Complementary Metal-Oxide Semiconductor)). Другим важным направлением развития является измерение цветов и поляризации обнаруженных транзиентов как можно скорее после их регистрации.

Проект прибора именно такого рода мы начали разрабатывать при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в 2009–2011 гг. Система Mini-MegaTORTORA (MMT) состоит из набора (шести

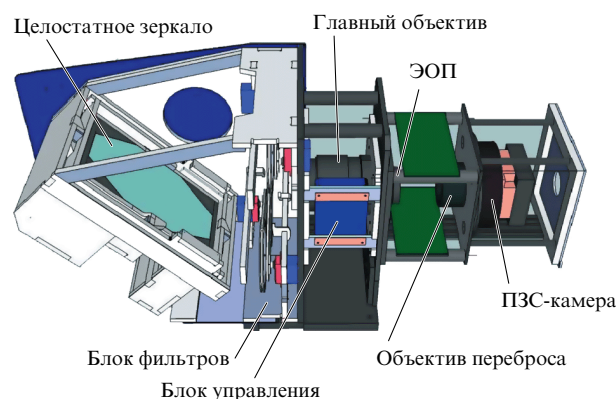


Рис. 1. Отдельный канал системы регистрации. Несколько (шесть или девять) таких каналов составляют базовый блок.

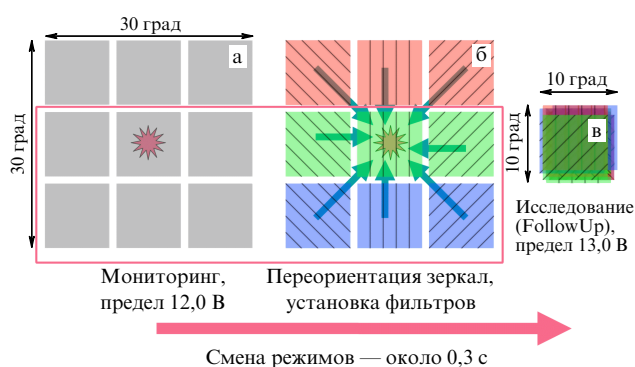


Рис. 2. Различные режимы функционирования базового блока. (а) Режим широкопольного мониторинга в белом цвете или в одном из цветовых фильтров. (б) Введение в световой пучок цветовых и поляризационных фильтров как первый шаг после обнаружения оптического транзиента. (в) Перенаведение всех объективов на поле, содержащее транзиент, для получения информации о нём в трёх различных фотометрических полосах при трёх ориентациях плоскости поляризации (показанных различными направлениями штриховки) одновременно. Точное время, необходимое для перехода от одного режима к другому, зависит от аппаратной конфигурации, но ожидается, что оно не превысит 0,3 с. (В — "синяя" звёздная величина.)

или девяти) отдельных каналов-объективов (рис. 1), установленных попарно на экваториальных монтировках. Перед каждым объективом расположено плоское зеркало, которое изменяет ориентацию по двум направлениям на $\pm 20^\circ$ и тем самым расположение поля зрения каждого канала. Кроме того, каждый объектив снабжён набором цветовых и поляризационных фильтров, которые могут вводиться в световой пучок в процессе наблюдений. Это позволяет быстро переходить от широкопольного мониторинга без фильтров к узкопольным наблюдениям, при которых все объективы направляются на одну область (например, на область, содержащую только что обнаруженный транзиент) и регистрируют её с использованием всех возможных комбинаций цветовых и поляризационных фильтров (рис. 2). Также возможно одновременное наблюдение транзиента всеми объективами в одном фильтре с целью повышения точности фотометрии за счёт суммирования их данных.

Каждый объектив снабжён быстрым детектором (быстрая матрица, оснащённая ЭОП, или sCMOS). Технические параметры канала с оснащённой ЭОП быстрой

Таблица 2. Технические параметры отдельного канала Mini-MegaTORTORA

Главный объектив		ЭОП		ПЗС-матрица	
Диаметр D	71 мм	Фотокатод	GaAs	Модель	SONY 2/3" IXL285 interline
Фокусное расстояние F	85 мм	Диаметр	17,5 мм	Размеры	1388 × 1036 пикселей
D/F	1/1,2	Усиление	40 000	Масштаб	30"–40" на 1 пиксел
Поле зрения	10 × 10 град.	Масштабирование	1/1	Экспозиция	0,128–10 с
		Квантовый выход	30 % на 4500 Å	Размер пиксела	6,45 мкм

матрицей приведены в табл. 2. Управление системой в целом и анализ получаемых ею данных осуществляются в реальном времени программным обеспечением, аналогичным использовавшемуся в камерах FAVOR и TORTORA [3–5].

В настоящее время завершается изготовление и пробная эксплуатация 6-канальной версии (MMT-6) с комбинированным детектором и 9-канального варианта (MMT-9) с детектором Neo sCMOS компании Andor; схема прибора при этом упрощается — она не содержит ЭОП и объектива переброса.

Отдельный канал обладает полем зрения около 100 кв. град., а полноценные системы MMT-6 и MMT-9 в широкопольном мониторинговом режиме имеют поля зрения около 600 и 900 кв. град. соответственно. Пределы обнаружения в В-полосе для MMT-6 составляют 11,5 зв. вел. за 0,13 с (14 и 16,5 зв. вел. за 13 и 1300 с), а для MMT-9 — 12 зв. вел. за 0,1 с (14,5 и 17 зв. вел. за 10 и 1000 с соответственно). В режиме узкого поля при наблюдениях отдельных объектов размер поля зрения уменьшается до 100 кв. град., а проникание, которое зависит от выбора комбинации спектральных и поляризационных фильтров, лежит в диапазоне 10,5–13,5 зв. вел. за 0,13 или 0,10 с, достигая 18 зв. вел. за 1000–1300 с.

Введение в строй системы MMT-6 планируется на конец лета 2013 г.; прибор, по-видимому, будет установлен на территории метеостанции вблизи поселка Мазагон (Испания), где регистрируется около 300 ярких ночей в году. Система MMT-9, которая изготавливается в сотрудничестве с Приволжским федеральным университетом (Казань) и компанией "Параллакс", будет введена в эксплуатацию в Астрономической обсерватории имени В.П. Энгельгардта (Казань) в 2014 г.

3. Возможности систем Mini-MegaTORTORA при обнаружении опасных метеороидов

Деятиканальная система Mini-MegaTORTORA в течение ночи средней длительности (8–9 ч) обозревает небесную полусферу полтора раза, т.е. половина неба наблюдается дважды с интервалом 6 ч. Движущиеся транзиенты, локализованные в этой области, могут быть обнаружены и по собственному движению. Тем не менее основным способом выделения вновь появившихся объектов является сравнение положения любого видимого объекта с координатами всех источников из всех каталогов. Специализированное математическое обеспечение позволяет провести эту процедуру за 0,2–0,4 с и перейти за такое же время в исследовательский режим для измерений цвета и поляризации транзиента. Анализ совокупности этих данных позволит сделать выводы о состоянии поверхности объекта, его массе, плотности, вращении, степени стабильности.

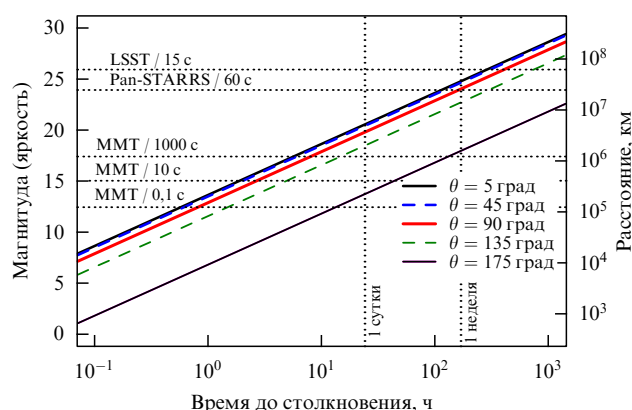


Рис. 3. Связь между блеском объекта типа Челябинского метеорита (диаметр 20 м, типичное для хондритов альбедо 0,08), имеющего гелиоцентрическую скорость 30 км с^{-1} (параметр θ определяет угол пересечения траекторией метеорита орбиты Земли), со временем, оставшимся до столкновения. Горизонтальные линии соответствуют пределам обнаружения различных мониторинговых систем (указаны также их времена экспозиции).

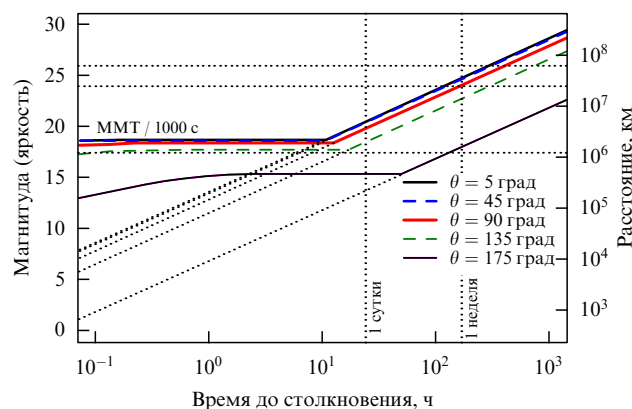


Рис. 4. То же, что и рис. 3, но с учетом "размазывания" изображения объекта по кадру за время экспозиции из-за его движения в картинной плоскости. Для синуса угла между скоростью объекта и направлением на наблюдателя выбрано предельное значение, равное отношению размера Земли к расстоянию до метеороида (при больших углах объект пролетает мимо). Горизонтальная часть зависимости уже не соответствует конкретной траектории объекта, а ограничивает область его возможных траекторий. Звёздная величина на этом участке соответствует потоку от объекта на пиксел (его поверхностной яркости) и прониканию инструмента, способного обнаружить объект на заданном расстоянии. Положение излома, определяемое временем экспозиции, для всех случаев (горизонтальные пунктирные линии на рис. 3), кроме приведённого на рис. 4, находится существенно ниже предела обнаружения соответствующих инструментов.

Используя оценку параметров Челябинского метеорита, мы получили зависимость блеска объекта до входа в атмосферу от времени подлёта (рис. 3, 4). В итоге

оказалось, что сталкивающийся с Землёй метеороид может быть обнаружен на расстоянии до 1 млн км при экспозиции 1000 с и на расстоянии до 100 тыс. км при экспозиции 0,1 с; при этом время с момента обнаружения объекта до входа его в атмосферу Земли лежит в диапазоне от 0,5 ч до недели, в зависимости от того, направлена ли скорость объекта навстречу движению Земли или его движение является догоняющим.

Таким образом, система ММТ вполне способна обнаруживать опасные космические тела с диаметром, превышающим 10 м. Разумеется, при времени до столкновения на шкале часы – дни невозможно изменить траекторию движения объекта, однако возможно определить область падения и принять меры по защите людей. Ясно, что обнаружение будет тем более вероятным, а прогноз — более точным, чем большее число систем проводит мониторинг. В этом случае будут минимизированы погодные и временные (восход Солнца) факторы, а также появится возможность определения расстояния до объекта при триангуляции.

4. Многоканальный оптический телескоп SAINT

Естественным развитием концепции многоканальных мониторинговых систем высокого временного разрешения является проект многоэлементной сети, состоящей из оптических телескопов малого размера, способных быстро менять ориентацию и функционировать как независимо, так и синхронно. В определённой степени такая система является аналогом радиотелескопов VLA (Very Large Array), ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), SKA (Square Kilometre Array), не претендуя, однако, на использование в режиме интерференции.

Мы полагаем, что многоканальный оптический телескоп SAINT (Small Aperture Imaging Network Telescope) может быть весьма эффективным для обнаружения опасных космических тел любых размеров уже на больших расстояниях от Земли (в отличие от систем Mini-MegatORTORA), конкурируя с Pan-STARRS и LSST. В то же время SAINT, обладающий высоким временным разрешением и способностью работать как в мониторинговом, так и исследовательском (узкопольном) режимах, может превзойти эти телескопы при обнаружении и изучении внезапно появляющихся быстро движущихся объектов. Кроме того, SAINT может проводить поиск и



Рис. 5. Один из девяти каналов базового модуля телескопа SAINT.

Таблица 3. Параметры телескопа SAINT

Диаметр канала	40 см
Эффективный диаметр телескопа	867 см
Светосила	0,5
Угловой размер пиксела на небе	1,7 угл. с
Число каналов	470
Поле зрения канала	1,1 кв. град.
Полное поле зрения	506,6 кв. град.
Предельное проникание в В-фильтре для одного канала на временных шкалах:	
0,1 с	16,8
10 с	19,3
1000 с	21,8
Предельное проникание в В-фильтре для всех каналов на временных шкалах:	
0,1 с	20,1
10 с	22,6
1000 с	25,1

исследование любых других быстротекающих явлений в ближнем и дальнем космическом пространстве при решении чисто астрофизических задач.

SAINT состоит из нескольких сотен (примерно 500) малых телескопов (диаметром 40 см) с полем зрения около 1 кв. град., его полное поле зрения около 500 кв. град., а временное разрешение 0,1 с. Один из возможных вариантов параметров системы приведён в табл. 3. Каждый из каналов устанавливается на отдельной экваториальной монтировке (рис. 5), имеющей максимально возможную скорость перенаведения (в идеале — до 30–40 град. с⁻¹).

В режиме мониторинга телескоп аккумулирует информацию обо всех стационарных и транзитных (во времени и пространстве) источниках оптического излучения, локализованных на небесной полусфере (20000 кв. град.), вплоть до 22 зв. вел. за одну ночь наблюдений, — каждое поле размером около 500 кв. град. наблюдается в течение 15 мин единожды за ночь.

При обнаружении оптического транзита все телескопы комплекса за несколько долей секунды переориентируются на область его локализации для детального исследования (поляризационного, фотометрического, спектроскопического). В этом (исследовательском) режиме SAINT является эквивалентным телескопу с 8-метровым диаметром и может использоваться для решения широкого круга стандартных астрофизических задач.

Основная цель процесса мониторинга — обнаружение новых и исследование уже известных нестационарных объектов различной природы с разной локализацией. Впервые в мире может быть получена непрерывно обновляющаяся динамическая картина как ближнего, так и дальнего космического пространства с субсекундным временным разрешением.

Изучаемые объекты относятся к следующим категориям (здесь мы уточняем данные табл. 1).

- Ближнее космическое пространство:

- объекты искусственного происхождения: спутники (примерно 10 000 прохождений за ночь), космический мусор — обломки конструкций размерами 1–100 см (около 2000 за ночь);

- метеоры (порядка 100 000 за ночь).

- Солнечная система:

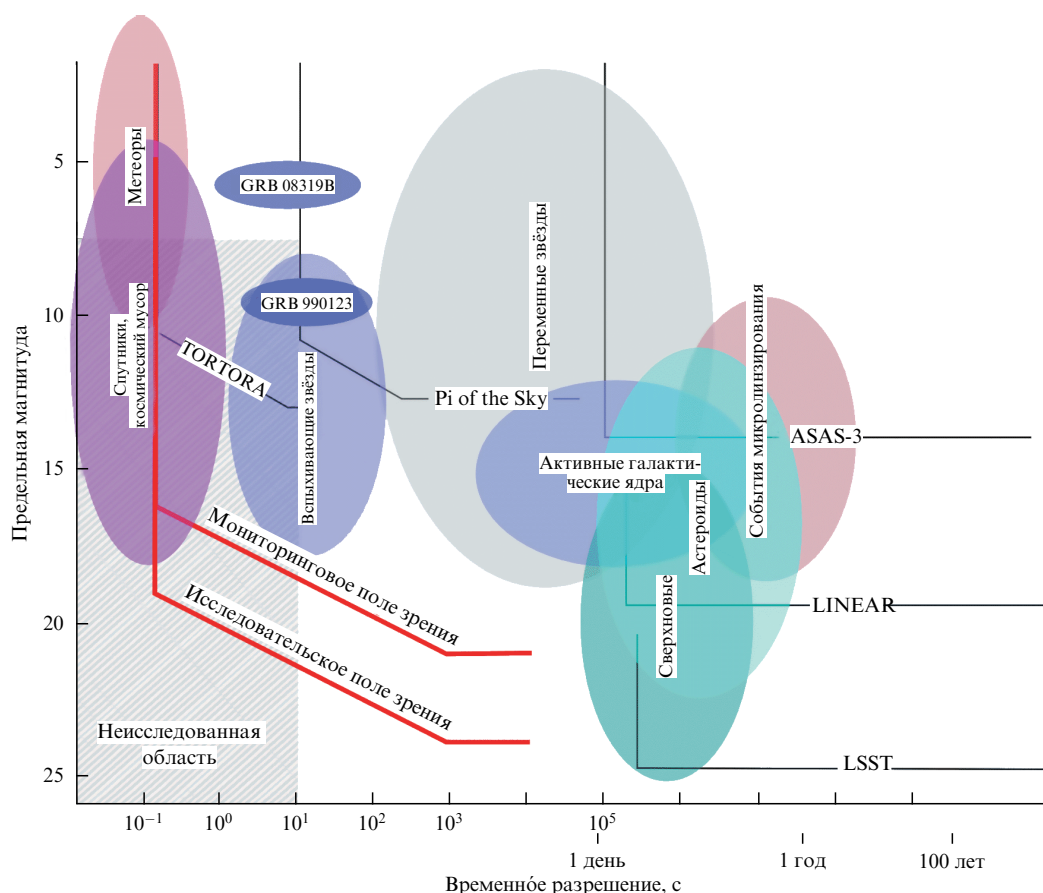


Рис. 6. Эффективность телескопа SAINT для наблюдений объектов различных классов в сравнении с эффективностью других инструментов, как функционирующих в настоящее время (ASAS-3, LINEAR, Pi of the Sky, FAVOR/TORTORA), так и разрабатываемых (LSST).

- астероиды ($\approx 50\,000$ новых за год);
- кометы (≈ 1000 за год).
- Наша Галактика (около 500 млн звёзд, доступных для наблюдений):
 - вспыхивающие звёзды (около 5000 новых объектов);
 - новые (≈ 100 за год);
 - покрытия звёзд экзопланетами (10–20 систем за год);
 - переменные звёзды (порядка 10 млн новых объектов);
 - эффекты микролинзирования звёзд (МАСНО) (около 100 событий за год).
- Метагалактика:
 - ядра активных галактик, квазары, блазары (порядка 3 000 000);
 - вспышки сверхновых (примерно 10 000 за год);
 - оптические компаньоны гамма-всплесков (около 10 вспышек за год).

Принципиальные отличия системы SAINT от других оптических инструментов:

- предельно высокое временное разрешение (0,1 с), сочетающееся с большим полем зрения (500 кв. град.) и достаточно глубоким пределом проникновения (16–17 зв. вел. за 0,1 с). Практически ни один из упомянутых типов переменных объектов такой яркости не исследовался на временах менее 10 с. Однако именно этот диапазон является критическим для изучения начальных фаз взрывов сверхновых и новых звёзд, тонкой структуры кривых блеска оптических транзиентов, сопровож-

дающих гамма-всплески, не говоря уже о метеорах и космическом мусоре;

- универсальность метода наблюдений и первичной обработки накопленной информации, что даст возможность использовать одни и те же массивы данных для обнаружения и изучения объектов различных типов, решения разных астрофизических задач, всегда, тем не менее, связанных с быстротекущими процессами;

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

- возможность перехода за несколько долей секунды к режиму детального исследования объекта, в котором все малые телескопы ориентированы на одну область (1 кв. град.), что увеличивает чувствительность системы на 3 зв. вел. и позволяет определять спектральные и поляриметрические характеристики транзиента. С этой целью каждый телескоп снабжён набором фильтров BVR (Blue Visible Red) и различно ориентированными поляроидами либо многомодовым фотоспектрополяриметром [15].

Предлагаемый проект телескопа не имеет аналогов среди существующих оптических инструментов.

Комплекс алгоритмов и программ для текущей и апостериорной обработки данных должен позволять автоматически обнаруживать как неподвижные, так и

движущиеся транзиенты, идентифицировать их (находить в каталогах источников либо относить к впервые обнаруженным), определять параметры и принимать решение о возможном переходе к исследовательскому режиму. Апостериорный анализ позволит суммировать последовательные кадры, доводя предел обнаружения в исследовательском режиме до 25 зв. вел. за 1000 с, идентифицировать объекты разных типов, определять параметры их переменности (рис. 6).

Информационная система комплекса также осуществляет:

- поддержку баз данных для каждого типа уже известных объектов, текущее сравнение полученных характеристик с информацией из других каталогов и баз данных;
- поддержку базы данных для впервые обнаруженных объектов, детальное изучение их свойств, сравнение с результатами наблюдений в других диапазонах, выводы об их природе;
- поддержку специализированной базы данных для транзиентов, отнесённых к космическому мусору, анализ динамики этой быстро эволюционирующей совокупности объектов, построение её статистической модели и выбор методов определения свойств данной совокупности объектов.

В информационном плане SAINT является автономной роботизированной системой, способной выполнять широкий круг изначально сформулированных задач в оптимальном режиме, учитывая изменение условий внешней среды и полученные в ходе своего функционирования результаты.

Из таблицы 4 видно, что SAINT по эффективности превосходит все обзорные инструменты, сравнимые с ним по цене. Исключением является запланированный для ввода в строй в конце 2021 г. широкопольный телескоп LSST, однако его стоимость на порядок выше.

Основной результат реализации проекта — создание инструмента нового типа для обнаружения и исследования быстропеременных (во времени и пространстве) источников оптического излучения с заранее неизвестной локализацией. В конечном итоге будет построена общая выборка объектов, переменных на временах вплоть до нескольких долей секунды. В дальнем космосе будут обнаружены и исследованы сотни тысяч нестационарных объектов известной природы и тысячи — неизвестной.

По существу, речь идёт о создании универсальной системы контроля космического пространства, способной решать задачи по обеспечению глобальной космической безопасности.

Таблица 4. Сравнение эффективности различных телескопов (D_{eff} — эффективный диаметр, A — эффективная площадь, Ω — площадь поля зрения)

Телескоп	D_{eff} , м	Ω , кв. град.	$A\Omega$
LINEAR	1,0	2,0	1,5
SDSS *	2,5	3,9	6,0
CFHT **	3,6	1,0	8,0
"Subaru"	8,1	0,2	8,8
Pan-STARRS	3,6	7,0	60
LSST	6,5	9,6	190
SAINT	0,4–8,7	1,1–506,6	81,1

* Sloan Digital Sky Survey.

** Canada-France-Hawaii Telescope.

Благодарности. Работа поддержана грантами РФФИ (04-02-17555, 06-02-08313, 09-02-12053 и 12-02-00743-А), INTAS (04-78-7366), CRDF (RP1-2394-MO-02), грантом Progetti Pluriennali 2003 Болонского университета, программой Президиума РАН и грантом Европейского Союза (283 783, проект GLORIA). Г.М.Б. также благодарит за поддержку фонд Cariplo и Landau Network-Centro Volta. С.В.К. благодарит фонд "Династия" за поддержку грантом для молодых учёных.

Список литературы

1. Bondi H *Quart. J. R. Astron. Soc.* **11** 443 (1970)
2. Бескин Г М и др. *УФН* **180** 424 (2010) [Beskin G M et al. *Phys. Usp.* **53** 406 (2010)]
3. Zolotukhin I et al. *Astron. Nachrichten* **325** 675 (2004)
4. Karpov S et al. *Nuovo Cimento C* **28** 747 (2005)
5. Molinari E et al. *Nuovo Cimento B* **121** 1525 (2006)
6. Zerbi F M et al., in *Gamma-ray Bursts in the Afterglow Era* (Eds E Costa, F Frontera, J Hjorth) (Berlin: Springer, 2001) p. 434
7. Karpov S et al. *GRB Coordinates Network, Circular* **7452** 1 (2008)
8. Racusin J L et al. *Nature* **455** 183 (2008)
9. Beskin G et al. *Astrophys. J.* **719** L10 (2010)
10. Багров А В и др., в сб. *Околоземная астрономия — 2007. Тезисы докладов междунар. конф., п. Терскол, Кабардино-Балкарская Республика, 3–7 сентября 2007 г.* (Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2007) с. 48
11. Шустов Б М *УФН* **181** 1104 (2011) [Shustov B M *Phys. Usp.* **54** 1068 (2011)]
12. Chambers K C *Bull. Am. Astron. Soc.* **41** 270 (2009)
13. Ivezić Ž et al. *Serb. Astron. J.* (176) 1 (2008)
14. Beskin G et al. *Bull. Special Astrophys. Observatory* **60–61** 217 (2007)
15. Плохотниченко В Л и др. *Астрофиз. бюл.* **64** 322 (2009) [Plohotnichenko V L et al. *Astrophys. Bull.* **64** 308 (2009)]