

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Космические угрозы вблизи Земли и их обнаружение

*Научная сессия Отделения физических наук
Российской академии наук, 27 марта 2013 г.*

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201308g.0885

27 марта 2013 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (РАН) состоялась научная сессия Отделения физических наук РАН "Космические угрозы вблизи Земли и их обнаружение".

Объявленная на web-сайте ОФН РАН www.gpad.ac.ru повестка заседания содержала следующие доклады:

1. Емельяненко В.В., Шустов Б.М. (Институт астрономии РАН, Москва). *Челябинское событие и астероидно-кометная опасность.*
2. Чугай Н.Н. (Институт астрономии РАН, Москва). *Физическая модель Челябинского явления.*
3. Липунов В.М. (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва). *Глобальная сеть оптического мониторинга МАСТЕР.*
4. Бескин Г.М. (Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Архыз, Карачаево-Черкесская Республика). *Системы широкоугольного оптического мониторинга субсекундного временного разрешения для обнаружения и исследования космических угроз.*

Статьи, написанные на основе докладов 1 и 4, публикуются ниже.

PACS numbers: 89.60.Gg, 96.30.Ys, 96.30.Za
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201308h.0885

Челябинское событие и астероидно-кометная опасность

В.В. Емельяненко, Б.М. Шустов

1. Введение

Утром 15 февраля 2013 г. примерно в 9 ч 20 мин по местному времени в районе г. Челябинска (Россия) произошёл взрыв вошедшего в атмосферу крупного метеороида. Космическое тело до входа в атмосферу не было обнаружено ни одним из средств наблюдений за космосом. Оно вошло в атмосферу под углом приблизительно 15 градусов к горизонту. С этого момента дальнейшее прохождение тела в атмосфере сопровождалось явлениями, зарегистрированными различными

средствами наблюдений. Наиболее ярким для многочисленных очевидцев события проявлением взаимодействия тела с атмосферой было сильное свечение (явление, называемое болидом), наблюдавшееся на большой территории. Явление болида регистрировалось видеокамерами в течение довольно длительного времени (до 16 с). Яркость болида быстро нарастала, и в конце его полёта наблюдалась мощная вспышка. По сообщениям очевидцев яркость освещения от вспышки заметно превышала солнечную, ощущался жар. Через несколько минут пришла мощная взрывная (ударная) волна. Из-за ударной волны (главным образом, из-за выбитых волной стёкол) пострадали люди. По данным Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС) за медицинской помощью обратилось 1613 человек. Ударная волна повредила здания (выбитые стекла, сорванные подвесные потолки, выломанные оконные петли и т.д.). Материальный ущерб был предварительно оценён в сумму от 400 млн до 1 млрд рублей.

В данном сообщении даётся краткое описание наблюдательных данных о Челябинском явлении и приводятся первые результаты научного анализа этих данных. Особое внимание уделено определению физических и динамических характеристик небесного тела. Также обсуждается значение Челябинского события для решения проблем астероидно-кометной опасности.

2. Наблюдательные данные о Челябинском явлении

Событие 15.02.2013 (Челябинский болид) выделяется в ряду других входов космических тел в атмосферу большим количеством разнообразных наблюдательных данных. Имеются данные, полученные современными средствами удалённых наблюдений: регистрации излучения спутниковой системой наблюдения, большое число зарегистрированных инфразвуковых и сейсмических сигналов, спутниковые и наземные регистрация пылевого следа в атмосфере. Но, по нашему мнению, наибольшую научную ценность имеют данные наблюдений, полученные в Челябинской области непосредственно в районе места события. Для сбора этих данных Институт астрономии РАН (ИНСАН) и Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН) организовали экспедицию в Челябинскую область, проходившую с 9 марта по 26 марта 2013 г. В состав экспедиции входили Е.Е. Бирюков (Южно-Уральский государственный университет), Д.О. Гла-

зачев (ИДГ РАН), П. Дженнискенс (Институт поиска внеземных цивилизаций (SETI), США), В.В. Емельяненко (ИНСААН), А.П. Карташова (ИНСААН), О.П. Попова (ИДГ РАН), С.А. Хайбрахманов (Челябинский государственный университет). Основными целями экспедиции были: а) проведение астрономической привязки видеозаписей Челябинского события, полученных в основном автомобильными видеорегистраторами и фотоаппаратами; б) получение данных о Челябинском событии из официальных источников; в) сбор свидетельских показаний в различных населённых пунктах.

Видеозаписи болидного явления использовались прежде всего для определения траектории космического тела в атмосфере (а в дальнейшем для определения его заатмосферной орбиты), а также важных физических деталей полёта метеороида в атмосфере: световой кривой (кривой блеска), характеризующей изменение выделения лучистой энергии со временем, структуры следа, проясняющей детали процесса разрушения тела и т.д. В настоящее время в нашем распоряжении имеется более 150 видеозаписей Челябинского явления, полученных из Интернета и в ответ на прямое обращение к очевидцам представителей Экспертной рабочей группы по космическим угрозам при Совете РАН по космосу, хотя и не все из записей представляют ценность для научного анализа. В ходе экспедиции проводилась ориентированная съёмка звёздного неба с тех же точек, с которых были сделаны снимки метеора. Естественно, что в ограниченные сроки не удалось провести астрономическую привязку всех видеозаписей, представляющихся важными для определения орбиты (в том числе, из-за погодных условий). Но и полученный материал является очень ценным, в частности, благодаря тому что астрономическая привязка была проведена для видеоданных, полученных из пунктов, расположенных на большом удалении друг от друга (от Белорецка до Верхней Пышмы).

В ходе экспедиции удалось получить важную информацию от служб правительства Челябинской области, Управления МЧС по Челябинской области и других структур о зоне разрушения, количестве повреждённых окон, числе пострадавших и т.д. Большое научное содержание имеют синхронизированные по времени записи видеокамер наружного наблюдения, расположенных кроме Челябинска в Златоусте, Кургане, Магнитогорске, Миассе, Чебаркуле. Не менее важными являются сведения, предоставленные многочисленными очевидцами событий. Участники экспедиции посетили около 50 населённых пунктов, в которых были собраны сведения о разрушениях, зрительских впечатлениях о болидном явлении и возможном выпадении метеоритного вещества. Наибольшие разрушения зафиксированы в направлении, перпендикулярном траектории движения, что указывает на цилиндрический характер распространения ударной волны.

Экспедиция не преследовала цели сбора метеоритного вещества, выпавшего на земную поверхность. Во-первых, эту задачу выполнили более ранние экспедиции под руководством В.И. Гроховского (Уральский федеральный университет) и Д.Д. Бадюкова (Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН)). Во-вторых, к моменту начала нашей экспедиции выпал полуметровый слой снега, скрывший следы выпадения метеоритного вещества. Отметим только, что большинство осколков метеорита было найдено



Рис. 1. Польша на озере Чебаркуль, возможно образованная крупным фрагментом Челябинского метеорита (фотография Э.О. Калинина от 16.02.2013).



Рис. 2. Лунка на ледяной поверхности озера Еткуль, возможно образованная осколком Челябинского метеорита (фотография Э.О. Калинина от 17.02.2013).

между посёлками Александровка и Депутатское. Согласно данным лаборатории метеоритики ГЕОХИ РАН (<http://www.meteorites.ru/menu/press/yuzhnouralsky2013.php>) Челябинский метеорит является обычным хондритом типа LL5.

Пока не найдены крупные фрагменты метеорита (наибольший обнаруженный фрагмент имеет, по свидетельству В.И. Гроховского, массу 1,8 кг). До сих пор обсуждается вопрос о том, что крупный фрагмент упал в озеро Чебаркуль, образовав прорубь диаметром 6–8 м, которая видна на фотографии, сделанной Э.О. Калининым с борта самолёта (рис. 1). Однако, несмотря на активные поиски, крупные осколки в проруби пока что не обнаружены.

К интересным и непонятным явлениям относятся также луники размером не более 15–20 см, обнаруженные Э.О. Калининым с самолёта на ледяных поверхностях озёр Аргаяш, Дуванкуль, Еткуль (рис. 2), которых не было до Челябинского события. Вблизи этих мест мелких осколков пока не обнаружено.

3. Первые результаты исследования Челябинского явления

Приведём краткие сведения о физических и динамических характеристиках космического тела и деталях

физической картины его прохождения в атмосфере, которые получены на данный момент на основе анализа наблюдательных данных. Более подробное описание методов исследования представлено в статье [1].

Анализ световой кривой болида показал, что основное выделение световой энергии происходило в течение около 6 с. За это время зафиксировано несколько вспышек яркости, среди которых явно выделяется основная (главная) вспышка, произошедшая приблизительно через 11 с после появления метеорного следа. Длительность этой вспышки составила около 2,5 с, причём за время вспышки выделилось не менее 70 % всей световой энергии болида. Естественно связать основную вспышку с главной фазой разрушения метеороида. Таким образом, взрыв (распад тела, сопровождающийся мощным выделением энергии в результате взаимодействия с атмосферой) не являлся точечным, как, например, при взрыве бомбы, а был распределённым вдоль большого (несколько десятков километров длиной) участка траектории. Это вполне объясняет приведённый в разделе 2 вывод о цилиндрическом характере ударной волны.

Обработка видеозаписей показала, что минимальное запаздывание (77 с) ударной волны по отношению к главной световой вспышке было зафиксировано в посёлке Первомайский. Вблизи этого пункта разрушение небесного тела происходило на высоте 23–24 км. Анализ видеокадров показал, что максимум яркости вспышки, соответствующий максимуму световой кривой, был достигнут в момент, когда космическое тело находилось на высоте 28–30 км в 20 км восточнее п. Первомайский.

В результате сопоставления оценок энергии по избыточному давлению, при котором разрушались стёкла в Челябинске, инфразвуковым данным и световым регистрациям спутниковой системы наблюдения, проведённого в работе [1], сделано заключение, что кинетическая энергия космического тела составляла 300–500 кт три-нитротолуола. При скорости 18,8 км s^{-1} и плотности тела 3,2 г cm^{-3} его диаметр в момент входа в атмосферу составлял от 16 до 19 м.

Мы не проводим здесь подробного обсуждения орбиты тела до его сближения с Землей, откладывая этот вопрос до окончания обработки всех наблюдений и их астрономических привязок. Отметим только, что согласно [2] и нашим предварительным оценкам, приведённым в [1], данный астероид относится к астероидам типа Аполлона.

4. Челябинское событие как иллюстрация к проблеме астероидно-кометной опасности

Челябинское событие широко обсуждается также и в контексте так называемой астероидно-кометной опасности (АКО), т.е. угрозы столкновения Земли с малыми телами Солнечной системы (астероидами и кометами) с причинением серьёзного ущерба населению планеты, вплоть до уничтожения человечества. Как отмечено в [3, 4], главное содержание проблемы АКО составляет угроза столкновений с телами размером 50–500 м, происходящих на временных масштабах существования биологического вида *Homo sapiens* (около 200 000 лет). В этом смысле Челябинское событие не относится к проблеме АКО, поскольку соответствующий метеороид не классифицируется как опасное небесное тело (ОНТ). Ущерб, нанесённый падением, не слишком велик, хотя в случае Челябинского метеорита повезло — при менее

пологой траектории входа метеороида в атмосферу последствия взрыва могли быть гораздо более катастрофичными. Более того, если бы размер тела был 50 м и выше, то шансов на везение уже не было бы. Заинтересованному читателю можно рекомендовать обсуждение метеоритной опасности в [5].

И всё же Челябинское событие является убедительной иллюстрацией реальности проблемы АКО. В связи с этим в обществе возникает много вопросов, связанных с обнаружением тел, подобных челябинскому, и возможными мерами противодействия. Не вдаваясь здесь в подробное обсуждение этих вопросов, дадим краткий комментарий.

Обнаружение. В истории есть лишь один случай, когда метеороид наблюдался относительно задолго (за 20 ч) до его входа в атмосферу Земли [6]. Метеороид имел размер 3–5 м, и входов метеороидов таких размеров в течение года может быть несколько. Всё это означает, что метеороид, получивший астероидное обозначение 2008 TC3, был обнаружен случайно, хотя и в рамках системного обзора. На больших расстояниях такие тела размером менее 20 м нельзя обнаружить из-за ограниченности проникающей силы современных обзорных телескопов (см. [7]). На малых расстояниях трудность обнаружения обусловлена слишком малым временем, имеющимся в распоряжении для обнаружения объекта.

Что касается Челябинского метеороида, то его нельзя было обнаружить с помощью *всех* существующих у человечества средств. Оптический диапазон исключался, поскольку небесное тело приближалось к Земле со стороны Солнца. Угол от Солнца составлял всего 15 градусов. Такой объект нельзя обнаружить в оптическом диапазоне не только с Земли, но и с помощью космического аппарата, расположенного на околоземной орбите, поскольку величина критического угла избегания (угловый радиус вокруг Солнца, в область которого оптический телескоп, за исключением специальных солнечных инструментов, направлять нельзя из-за угрозы его непоправимого повреждения) составляет 30–35 градусов (по данным различных космических проектов). Радиотехнические средства контроля ближнего космоса также не могут быть эффективными. Причины просты: во-первых, дальность действия таких систем 5–10 тыс. км, что при скоростях ОНТ 20–30 км s^{-1} означает подлётное время не более нескольких минут (слишком мало для реагирования), а во-вторых, эти системы не могут одновременно наблюдать в таком широком диапазоне скоростей (ввиду частотных ограничений каналов). Обсуждаемый в настоящее время выход — создание быстрых среднеапертурных систем обнаружения как наземного (см., например, описание системы ATLAS (Asteroid Terrestrial-impact Last System) <http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/ATLAS/>), так и космического базирования. Предложение о создании в России системы заблаговременного обнаружения (при времени упреждения не менее одного месяца) относительно крупных тел (размером более 50 м) и обнаружения метеороидов и фрагментов космического мусора в околоземном пространстве подробно описано в [8], где обсуждается проект концепции национальной (федеральной) программы противодействия космическим угрозам.

Противодействие. Высокая скорость метеороида и малое время подлёта исключают возможность применения ракетных средств отражения. Другие средства (на-

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, вывоз 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. Юрьевичем, 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 помочь 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. Bogovicka 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. Фортов 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. Плохотников, 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 быстродвижущихся 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 быстродвижущимся 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. Плохотников. 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

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		Активные ядра галактик, сверхновые		
> 1000 с	Переменные звёзды, MACHO-события				

* Жирным шрифтом выделены классы объектов, на постоянной основе исследуемые широкопольными экспериментами, такими как ASAS (All Sky Automated Survey), LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research), MACHO (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 (транзиентных) 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 широкогородильные 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 достичнуть 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 монтировке 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 GRB 080319B. 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 быстров 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 страж" (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 наблюдаются 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 полусфера за несколько ночей. Тем не менее ясно, что эти прекрасные инструменты не смогут обнаруживать внезапно появляющиеся в произвольном месте быстродвижущиеся 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 быстродвижущиеся, 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 широкоугольного 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 малошумящие 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 (шеести

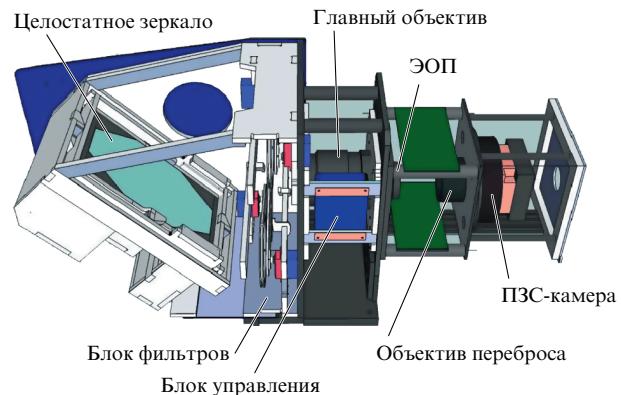


Рис. 1. Отдельный канал системы регистрации. Несколько (шесть или девять) таких каналов составляют базовый блок.

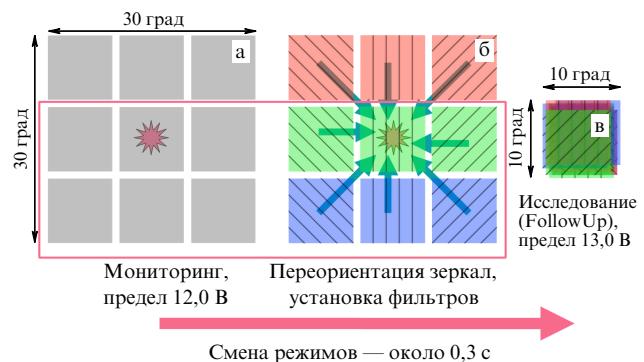


Рис. 2. Различные режимы функционирования базового блока. (а) Режим широкопольного мониторинга в белом цвете или в одном из цветовых фильтров. (б) Введение в световой пучок цветовых и поляризационных фильтров как первый шаг после обнаружения оптического транзиента. (в) Переориентация всех объективов 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 широкоугольного 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 пикселов
D/F	1/1,2	Усиление	40 000	Масштаб	30"–40" на 1 пиксель
Поле зрения	10 × 10 град.	Масштабирование	1/1	Экспозиция	0,128–10 с
		Квантовый выход	30 % на 4500 Å	Размер пикселя	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 ММТ-6 и ММТ-9 в широкопольном мониторинговом режиме имеют поля зрения около 600 и 900 кв. град. соответственно. Пределы обнаружения в В-полосе для ММТ-6 составляют 11,5 зв. вел. за 0,13 с (14 и 16,5 зв. вел. за 13 и 1300 с), а для ММТ-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 проницание, 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 ММТ-6 планируется на конец лета 2013 г.; прибор, по-видимому, будет установлен на территории метеостанции вблизи поселка Мазагон (Испания), где регистрируется около 300 ясных ночей в году. Система ММТ-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

Девятikanальная 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.

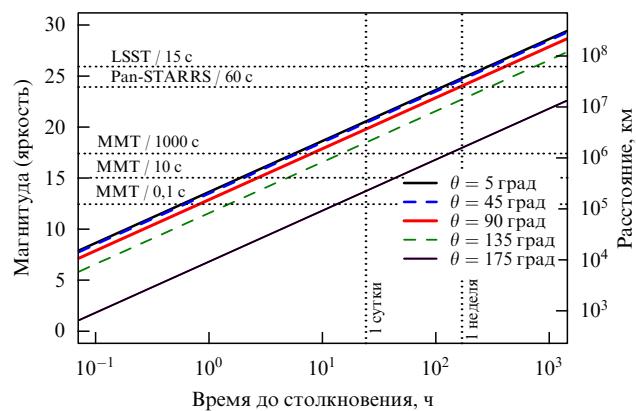


Рис. 3. Связь между блеском объекта типа Челябинского метеорита (диаметр 20 м, типичное для хондритов альбедо 0,08), имеющего гелиоцентрическую скорость 30 км с^{-1} (параметр θ определяет угол пересечения траектории метеорита орбиты Земли), со временем, оставшимся до столкновения. Горизонтальные линии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

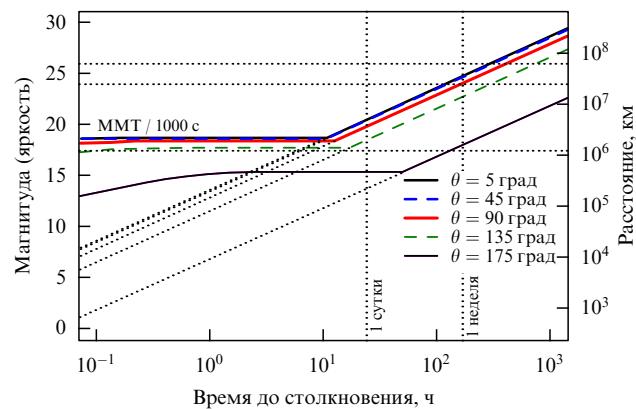


Рис. 4. То же, что и рис. 3, но с учётом "размазывания" изображения объекта по кадру за время экспозиции из-за его движения в картинной плоскости. Для синуса угла между скоростью объекта и направлением на наблюдателя выбрано предельное значение, равное отношению размера Земли к расстоянию до метеорида (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 пиксель (его поверхностной яркости) и проницанию 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

Таблица 3. Параметры телескопа SAINT

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

исследование любых других быстропротекающих 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 транзиентных (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 транзиента 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. 5. Один из девяти каналов базового модуля телескопа SAINT.

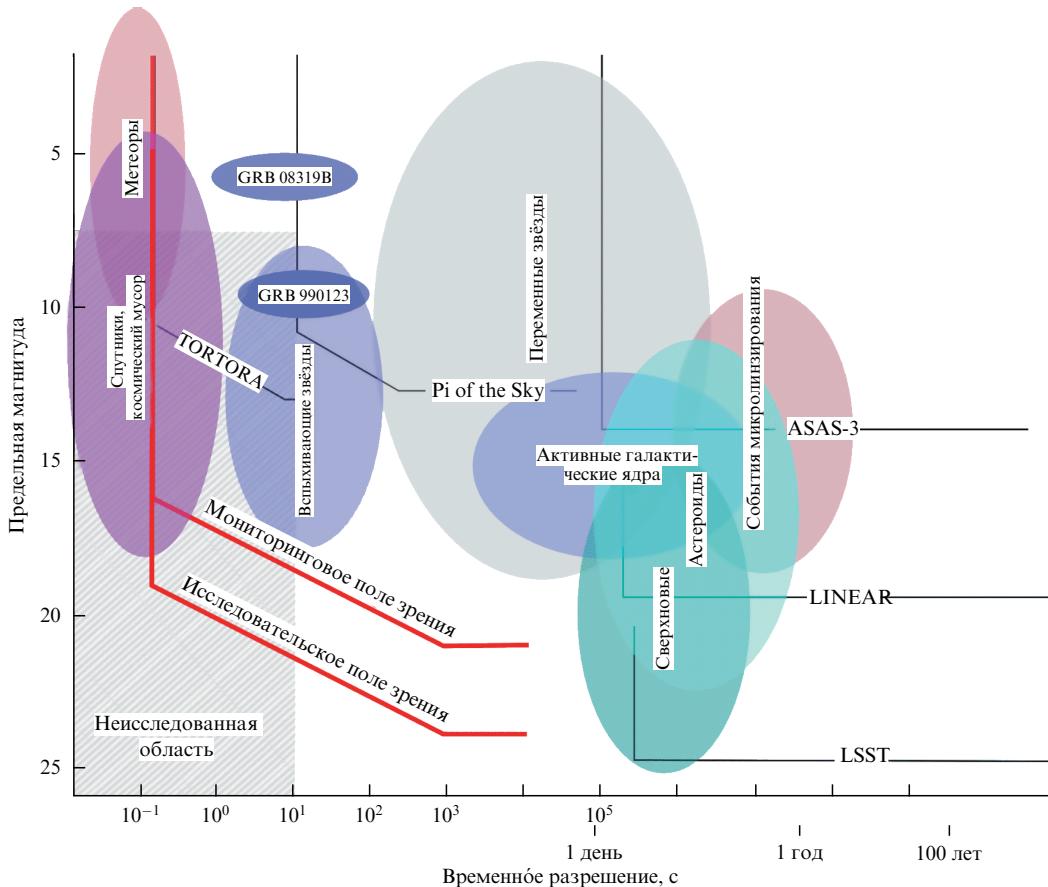


Рис. 6. Эффективность телескопа SAINT для наблюдений объектов различных классов в сравнении с эффективностью других инструментов, как функционирующих в настоящее время (ASAS-3, LINEAR, Pi of the Sky, FAVOR/TORTORA), так и разрабатываемых (LSST).

- 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 (МАЧНО) (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 проницания (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 дает 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 быстропротекающими 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. булл.* **64** 322 (2009) [Plokhotnichenko V L et al. *Astrophys. Bull.* **64** 308 (2009)]