

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Физический факультет
Кафедра астрофизики

Е. С. Горбовской

**Поиск оптических транзиентов и
синхронные оптические наблюдения на
камерах сверхширокого поля МАСТЕР
VWF.**

Допущен к защите
Заведующий кафедрой
академик РАН
А.М. Черепашук
“ ”декабря 2008 года

Дипломная работа
студента 632 группы
Е.С. Горбовского
Научный руководитель
профессор, д. ф-м н.
В.М. Липунов

Москва 2008

Содержание

1 Введение: поисковые робот-телескопы.	2
1.1 Широкополюсные робот телескопы.	2
1.2 Сверхширокополюсные телескопы.	2
1.3 Робот телескопы системы МАСТЕР	4
2 Первичная обработка в широких полях: астрометрия и фотометрия	8
2.1 Выделение звезд и инструментальная фотометрия.	11
2.2 Выбор проекции	12
2.2.1 Преобразование сфера->плоскость (s2p).	12
2.2.2 Преобразование плоскость->сфера (p2s).	13
2.3 Калибровка звездной величины	13
2.4 Автоматическое определение предельной звездной величины кадра . .	15
2.5 Вспомогательные процедуры преобразования координат	17
2.5.1 Полная процедура преобразования линейных координат в эква- ториальные.	17
2.5.2 Полная процедура преобразования экваториальных координат в линейные.	17
2.5.3 Приведение на сфере в точку (0,0).	17
3 Автоматическая классификация и анализ астрономических транзи- ентов.	18
3.1 Выделение объектов и передача информации на сервер.	18
3.2 Первичный анализ астрономических транзиентов.	19
3.3 Схема совпадений и определение высот.	21
3.4 Анализ полосок.	22
4 Наблюдения собственного излучения гамма-всплесков.	23
4.1 О значимости синхронных наблюдений	25
4.2 Энергетические калибровки фотометрической полосы установки MASTER- VWF4.	26
4.3 Синхронные наблюдения гамма-всплесков на сверхширокополюсной уста- новке MASTER VWF4 Кисловодск	27
4.3.1 Гамма всплеск GRB081102	27
4.3.2 Гамма всплеск GRB081130B	29
4.3.3 История наблюдений гамма всплеск GRB081215	31
5 Универсальная модель "центральной машины" космологических гамма-всплесков всех типов	34
6 Заключение	40

1 Введение: поисковые робот-телескопы.

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

1.1 Широкопольные робот телескопы.

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

Оптические схемы, размер поля зрения, характеристики приемников и типы монтажных конструкций значительно варьируются у различных систем робот-телескопов, что связано с различными классами решаемых задач. Так система ROTSE-III представляет собой телескоп с диаметром зеркала 450 мм и полем зрения около 4 квадратных градусов. Он установлен на монтировке, которая обеспечивает наведение на объект со скоростью порядка $20^\circ/\text{сек}$. Указанные характеристики робот-телескопа позволяют ему быстро наводиться в область ошибок гамма-всплесков и обнаруживать их сравнительно слабые оптические послесвечения. Основу системы КАИТ составляет телескоп системы Ричи-Кретьена с диаметром зеркала 760 мм и полем зрения порядка $10'$. Скорость наведения на объект у этого телескопа сравнительно небольшая, поскольку поиск сверхновых производится в режиме последовательного просмотра заранее выбранных областей неба, зато предел обнаружения у данной системы существенно лучше, чем у системы ROTSE-III. Что касается системы SuperWASP, то она состоит из 8 камер с фотографическими объективами диаметром 110 мм, которые установлены на общей монтировке, но смотрят в разные стороны, охватывая в сумме область около 475 квадратных градусов. Ясно, что для поиска экзопланет эта система, вообще, не нуждается в монтировке, обеспечивающей сколь-нибудь быстрое наведение.

1.2 Сверхширокопольные телескопы.

Однако же особое место среди автоматизированных телескопов занимают сверхширокопольные камеры с полями зрения сотни и даже тысячи квадратных градусов. С помощью современных приемников излучения (ПЗС-матриц) и оптических систем невозможно сделать сверхширокопольную систему с большой апертурой (действительно либо необходим гигантский приемник либо оптическая система с диаметром в разы больше чем фокус что практически невозможно), поэтому сверхширокопольные камеры это небольшие установки с апертурами от 5 до 15 см. Так например в польской системе Pi of the Sky предназначенной для поиска оптических транзиентов ис-

Таблица 1: Сравнительные характеристики сверхширокопольных систем

Проект	Поле зрения	зрения	Рабочая позиция	экс-позиция	Предельная звездная величина
WIDGET	44° x 44° x 3		5 sec		10 ^m
RAPTOR	40° x 40°		60 sec		12 ^m
Pi of the Sky	22° x 22°		10 sec		11.5 ^m
Yatsugatake Cameras	85x70		8		5 ^m
FAVOR	16x24		0.13		11.5 ^m
TORTORA	24x32		0.13		10.5 ^m
MASTER-VWF(1)	18°x25° или 28° x 45°		0.3 - 10 sec		12 ^m (5-сек) 9.5 ^m (0.3сек)
MASTER-VWF(4)	4x28°x42°		0.3 - 10 sec		11.5 ^m (5сек) 9.5 ^m (0.3сек)

пользуются два светосильных $f/d = 1.2$ 70-ти миллиметровых объектива. Все сверхширокопольные камеры предназначены для регистрации разного рода оптических транзиентов. Большая часть оптических транзиентов имеет околоземное происхождение: метеоры и искусственные спутники земли (далее ИСЗ), однако же сверхширокопольные камеры могут дать важнейшую информацию о собственном излучении космологических гамма-всплесков. В качестве яркого примера можно привести фантастически удачное наблюдение собственном излучения гамма-всплеска GRB080319B в русско-итальянском эксперименте TORTORA [Racusin, Karov et al., 2008] и польского "Pi of the Sky"[Cwiok et al. 2007]. Ввиду того что все транзиентные явления сильнопеременны, съемка таких явлений ведется с достаточно большой частотой порядка нескольких секунд и даже меньше. Поэтому важной характеристикой системы является наличие или отсутствия временных промежутков в работе. Имеются примеры как тех так и других систем, так WIDGET [Onda et al. 2006] использует камеры Argee Alta со значительным временем считывания и не может работать в скоростном режиме, в экспериментах МАСТЕР VWF [Липунов и др, 2007], TORTORA и др. используются ПСЗ-матрицы считывающие без временных промежутков, что позволяет работать на "высоких скоростях". Так в эксперименте TORTORA GRB080319B был снят с разрешением в 7 кадров в секунду. Сравнительные характеристики сверхширокопольных систем представлены в таблице 1.1.

Работа автоматических астрономических систем обеспечивается комплексом программного обеспечения, который позволяет управлять робот-телескопом и его укрытием, обеспечивать, как минимум, первичную обработку получаемых изображений, а затем хранить соответствующую информацию. Программное обеспечение каждого автоматизированного астрономического комплекса имеет свою специфику, определяемую решаемой задачей, т.е. не может быть универсальным. Тем более универсальные методы не работают в сверхшироких полях, где многие методы классической астрономии разбиваются о кривизну поля, количество обрабатываемой информации и пр.

Таблица 2: Телескопы и приемники системы МАСТЕР.

Оптическая система	Диаметр, мм	Свето-сила	ПЗС камера	Поле зрения	Формат, пикс
<i>Домодедово</i>					
1 Рихтер-Слефогт	355	F/2.6	Apogee U16	2.4° × 2.4°	16
2 Рихтер-Слефогт	200	F/2.6	Sony LCL 902K	1° × 0.7°	0.4
3 Камера Райта	200	F/4	SBIG ST-10XME	1° × 0.7°	3.2
<i>Кисловодск</i>					
4 Камера Флюгге	280		Apogee U16M	2.9° × 2.9°	0.4
5 4 x Nikkor	50	F/1.4	4 x Prosilica GE4000	100° × 42°	11
<i>Иркутск</i>					
6 Nikkor	50	F/1.2	Imperix GE4000	42° × 24°	11

1.3 Робот телескопы системы МАСТЕР

Первым телескопом-роботом такого типа в России стала система МАСТЕР (Мобильная Астрономическая Система Телескопов Роботов), разработанная и испытанная студентами, аспирантами и преподавателями ГАИШ МГУ с 2002 года (<http://observ.pereplet.ru>). Детально телескоп МАСТЕР описан в статье [Липунов и др, 2007] и диссертации А.Белинского и здесь мы не будем подробно останавливаться на его описании обратив внимание лишь на основные параметры представленные в таблице 2 необходимые для описания общих (со сверхширокими полями) методов обработки.

Главной целью нашего сверхширокопольного эксперимента МАСТЕР VWF является непрерывный мониторинг неба для обнаружения всех, не содержащихся в астрономических каталогах, объектов. Основными задачами являются:

- Наблюдения собственного излучения гамма-всплесков, синхронно с космическими гамма-обсерваториями
- Поиск звездоподобных транзиентов неизвестной природы, всплесков-сирот.
- Регистрация метеоров и определение их основных параметров – яркость (фотометрия), скорость (астрометрия) и высота сгорания в атмосфере земли (триангуляция).
- Регистрация ИСЗ и определение их основных параметров – астрометрия, скорость, блеск и высота над поверхностью земли.

Для выполнения этой задачи, полностью роботизированный комплекс МАСТЕР VWF4, включающий 4 камеры сверхширокого поля (полное поле зрения 4000 квадратных градусов), установлен сейчас на Кавказской Горной Астрономической Обсерватории МГУ под Кисловодском (2075 м) табл. 2:5. А так же на бызе ВНИИВТРИ под Иркутском установлен комплекс МАСТЕР VWF1, с 1 камерой в 1000 квадратных градусов. Установки разработаны в ГАИШ МГУ и произведены Московским Объединением «ОПТИКА». В Кисловодске камеры установлены на параллактических монтировках попарно и разнесены на 702 метра друг от друга (см рис 1). Каждая



Рис. 1: Оборудование системы МАСТЕР установленное в горах на Кавказской Горной Астрономической Обсерватории МГУ под Кисловодском. Слева направо:1) восточная и западная камеры северной установки МАСТЕР-VWF4,2) опорная башня и укрытие разработанные В.Корниловым и Н.Шацким южной установки МАСТЕР-VWF4 (оба табл. 2 : 5);3) опорная башня шипокопального телескопа МАСТЕР-2 табл. 2 : 4

из установок снабжена автоматизированным укрытием, двумя быстрыми и мощными (11 Мегапикселей) ПЗС камерами Prosilica GE 4000 с объективами Nikkor диаметром 50мм (светосила $f/1.2$). Камера позволяет производить непрерывную съемку с частотой от 150 миллисекунд до 60 секунд. В Иркутске в таком же укрытии и на такой же монтажке установлена камера Imperix GE4000 с объективом Nikkor 50мм $f/1.2$.

Установки работают полностью в автономном режиме: ночью при благоприятных погодных условиях (текущая метеосводка каждые 3 секунды обновляется со специальной метеостанции "Boltwood Cloud Sensor" которой оборудована каждая обсерватория) камеры самостоятельно начинают наблюдения. Полученные кадры сохраняются и после обработки закладываются в специальное хранилище. Из-за воистину огромных потоков данных (до 700 Gb в ночь) удается хранить их лишь несколько дней, после основная часть данных стирается и остаются только вырезки кадров с интересующими нас объектами (метеорами, спутниками и кандидатами в оптические транзиенты) а так же синхронные с гамма-всплесками кадры. Наиболее старые кадры автоматически стираются когда для новых нужна память. Сразу же после прихода сигнала о гамма-всплеске все установки перенаводятся в область всплеска, если только эта область уже не была в кадре. При ухудшении погодных условий или окончании ночи съемка прекращается, и крыши установок закрываются.

В Кисловодске база между установками (702 метра) позволяет определять параллакс метеоров и восстанавливать их высоту по результатам астрометрической обработки.

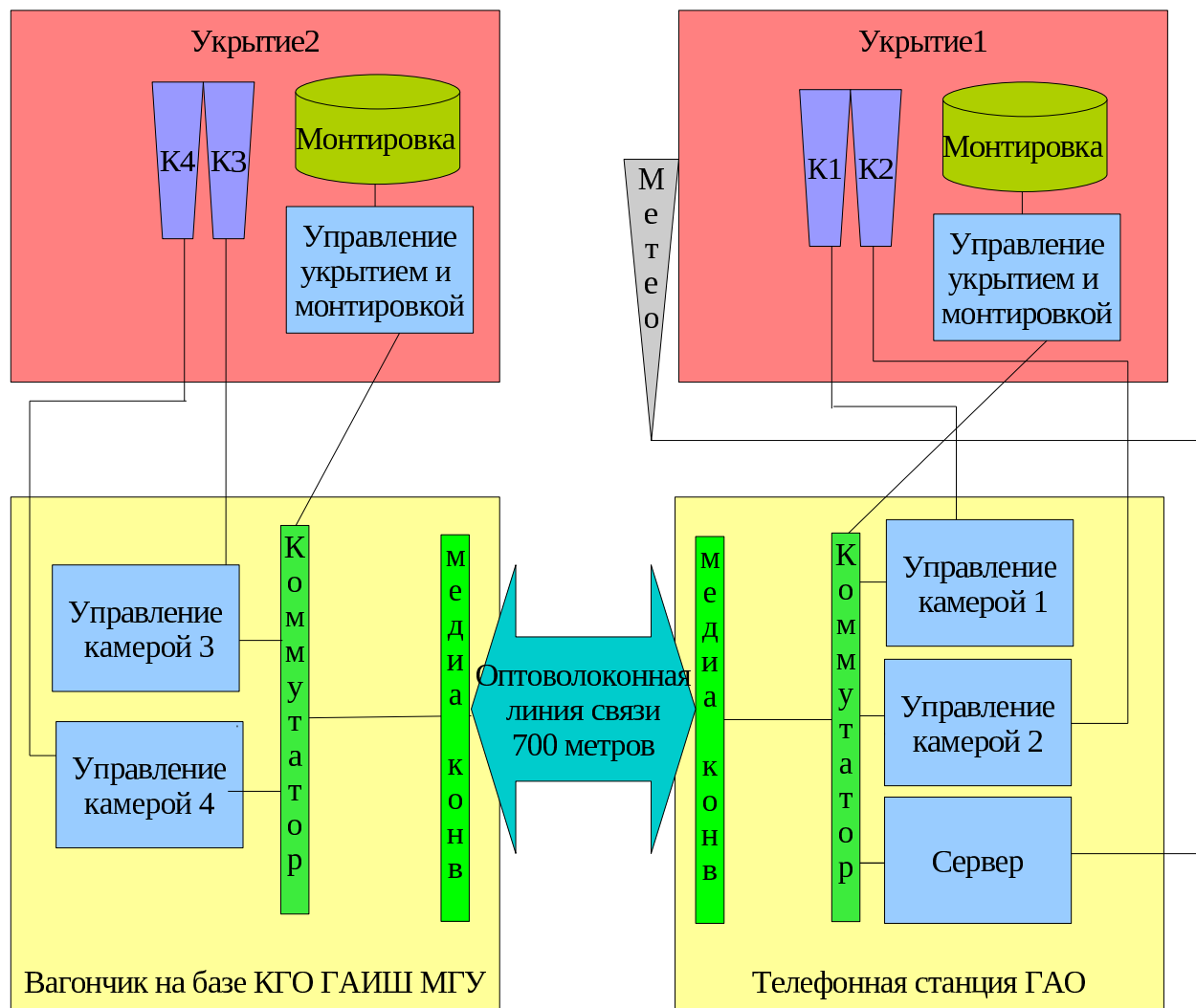


Рис. 2: Принципиальная схема расположения оборудования в эксперименте МАСТЕР VWF4.

Весь комплекс МАСТЕР VWF4 поддерживается 7-ю компьютерами (см. рис. 2):

- 4 шт. – снимающих с камерой Prosilica GE 4000
- 2 шт. – управляющих укрытием и монтировкой
- 1 шт. – большой четырехядерный сервер последнего поколения, предназначенный для обработки, хранения и демонстрации в Web полученных данных.

Как видим система представляет собой довольно сложный инженерный комплекс, который требует разработки мощного программного обеспечения отвечающего за управление, наблюдения и обработку кадров. Еще раз подчеркну, что суточный поток данных в зависимости от экспозиции может достигать нескольких Терабайт данных (при очень коротких экспозициях порядка 0.2 сек), что требует высокой оптимизации программ и мощных носителей и интерфейсов. При экспозиции 5 секунд предел кадра достигает 11.5-12 звездной величины, в зависимости от погодных условий. При

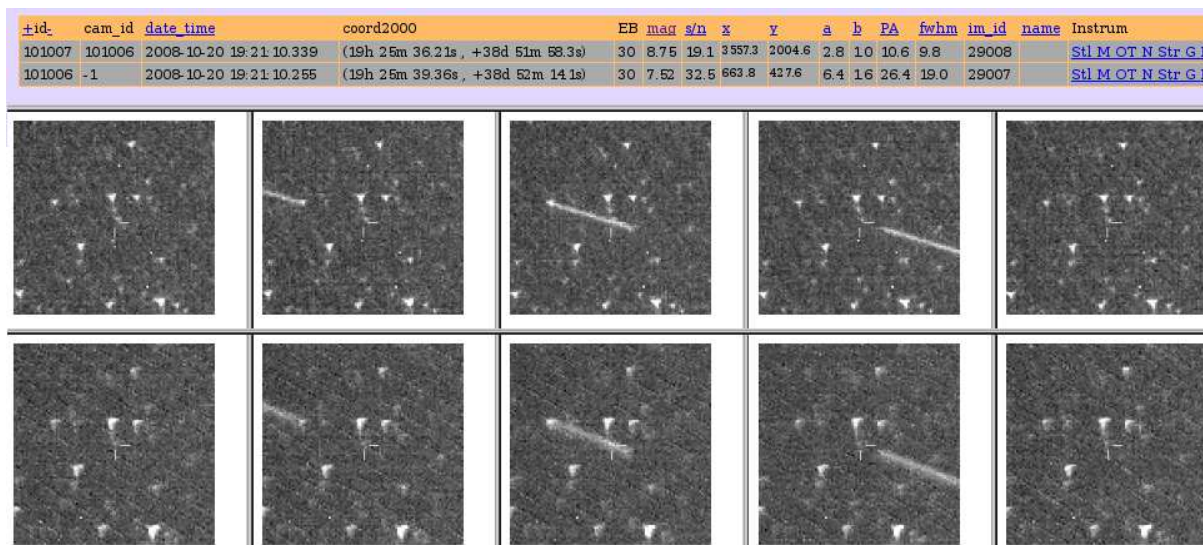


Рис. 3: Осколок американского военного спутника USA114Deb обнаруженный системой МАСТЕР в web-интерфейсе системы. Верхний ряд снимков с северной камеры, нижний с южной. Даже глазом заметен параллакс (на центральном кадре внизу звезда поля попадает в перекрестье а сверху стоит выше). Определенная методом параллакса высота(дальность) составляет 4000 ± 200 километров

этом на одном кадре оказывается порядка 10-15 тысяч объектов. Конечно, такой поток данных не может храниться, а должен обрабатываться практически в реальном масштабе времени.

Для этого был разработан и адаптирован программный пакет, позволяющий в реальном времени определять координаты всех объектов и их фотометрические характеристики (профиль, звездную величину) см. ниже. Точность определения координат на МАСТЕР VWF оказывается около $15''$. Особую проблему для поиска астрономических объектов представляют собой Искусственные спутники Земли (ИСЗ), имитирующие собой звезды, вспышки и метеоры. С целью «очистки» кадров, система снабжена постоянно обновляемой базой данных эфемерид ИСЗ и разработана программа их отождествления в реальном времени. Кроме чисто фильтрационной задачи, такая опция позволяет следить за появлением новых ИСЗ, разрушением известных ИСЗ и не только контролировать космический мусор, но и процесс его образования. Иногда удается зарегистрировать неизвестный или потерянный ранее объект. Например, 20 октября 2008 года нами зарегистрирован осколок американского военного спутника USA114Deb см. рис 3.

За осень 2008г. в поле зрения Кисловодской и Иркутской установки попало 4 алерта ¹ (GRB081029 (Swift trigger №333010), GRB081102, GRB081130B и GRB081215), правда только 2 из оказались них удачными. В случае GRB081029 Swift среагировал на Суг X-1, а в случае GRB081215 автоматика комической обсерватории FERMI перепутала реальный и отраженный от Земли сигнал и через несколько дней координаты всплеска были очень серьезно пересмотрены. В случае же всплесков GRB081102

¹Алерт - автоматическое сообщение с координатами гамма-всплеска, приходящее по специальному сокетному соединению из международного центра сбора информации о гамма-всплесках GCN (The Gamma ray bursts Coordinates Network).

и GRB081130B получены высокие верхние пределы.

Более подробно эти и другие результаты представлены в соответствующих главах.

В следующей главе мы рассмотрим общие приемы первичной обработки изображений. В ней будут рассмотрены методы астрометрии и фотометрии в широких полях. Поскольку основные идеи в данной главе схожи как для широких так и для сверхшироких полей в ней будут затронуты не только сверхширокопольные камеры (1000 кв. градусов), но и телескопы типа МАСТЕР (6 кв. градусов). Третья глава целиком посвящена поиску и анализу транзиентов со сверхширокопольных камер. В четвертой главе изложены результаты наблюдения собственного излучения гамма-всплесках на сверхширокопольных камерах, а так же вкратце изложена предложенная нами теоретическая модель центральной машины гамма всплесков в основу которой положена спиар-парадигма.

2 Первичная обработка в широких полях: астрометрия и фотометрия

. Рассмотрим подробно методы астрометрии и фотометрии в широких полях. Отождествление области и привязка координатной сетки для обрабатываемого изображения производится с помощью таблицы линейных координат на изображении, построенной программой выделения объектов, и астрометрического каталога Tycho 2, содержащего точные координаты большинства звезд до $11^m.5$. Программа, которая позволяет решать поставленную задачу, должна удовлетворять высоким требованиям по скорости обработки (10-15 сек. и меньше) при количестве звезд на поле порядка 10000, обеспечивать высокую вероятность отождествления (более 99 %), быть пригодной для использования в самых разных полях от узких (десятки квадратных минут) до сверхшироких (тысячи квадратных градусов), допускать некоторую свободу параметров телескопа, т.к. в течение года из-за изменения типичных температур или при переюстировке фокусное расстояние и другие параметры телескопа могут изменяться, не быть критически чувствительной к изначальным координатам центра кадра, допуская его задание лишь в пределах поля зрения.

Все известные (из числа доступных) программ автоматического наброса координатной сетки оказались малоприспособны для робот-телескопов МАСТЕР и тем более сверхширокопольных камер, поскольку они, как правило, создавались для классических, длиннофокусных инструментов и либо не «справлялись» со значительными искажениями в фокальной плоскости, присущими широкопольным системам, либо требовали весьма точных значений входных параметров изображения. Последнее приводило к тому, что коррекцию этих параметров приходилось делать раз в несколько ночей, иначе вероятность удачного отождествления поля падала до неприемлемых значений.

Поэтому было принято решение написать собственную программу, в основе которой лежит алгоритм поиска подобных треугольников среди ярких звезд изображения и каталога (см.ниже).

- Из таблицы выделенных на изображении объектов выбираются некоторое (как показала практика оптимально 30) наиболее ярких, но не содержащих перекопленных пикселей;

- Из каталога Tycho 2 выбираются наиболее яркие звезды внутри области, соответствующей обрабатываемому изображению, плюс 10% площади. Количество выбираемых звезд равно количеству перекопленных звезд на изображении плюс 30 объектов; для этих звезд рассчитываются координаты в выбранной проекции на плоскость изображения с учетом его центра и масштаба;
- На основе полученного на первом шаге списка выделенных объектов строится список всех возможных треугольников и попарно сравнивается с аналогичным списком треугольников, составленных из звезд каталога;
- Если для треугольников, выделенных на изображении, найдены подобные треугольники, составленные из звезд каталога, программа переходит к следующему шагу. В противном случае из каталога выбираются звезды для площадки с центром, смещенным на расстояние, заданное во входных параметрах программы, и процедура повторяется. Программа будет проверять площадки, смещая их центры по спирали относительно исходного центра до тех пор, пока не будет найдено наперед заданное количество пар подобных треугольников;
- По найденным парам подобных треугольников уточняется масштаб и поворот изображения, а также положение его центра. Затем заново рассчитываются координаты звезд каталога. После этого проводится сравнение всех звезд каталога, попавших в кадр, с объектами, выделенными на изображении. При этом учитывается соотношение блеска отождествляемых звезд и звезд каталога, чтобы избежать ложных отождествлений;
- Используя отождествленные звезды методом наименьших квадратов рассчитываются коэффициенты уравнений перехода от линейных координат объектов к сферическим. Учет оптических aberrаций телескопа производится с помощью кубических полиномов;
- Коэффициенты кубических полиномов используются для расчета сферических координат всех объектов изображения; В заголовке таблицы объектов, выделенных на обрабатываемом изображении, добавляется информация о коэффициентах преобразования линейных координат в сферические, а в саму таблицу добавляются столбцы, содержащие сферические координаты каждого объекта.

Опыт показал, что текущая реализация программы Astrom обеспечивает хорошую привязку самых разных изображений – от полученных при неблагоприятных погодных условиях и содержащих всего несколько сотен звезд (довольно типичная ситуация при алертных наблюдениях), до изображений областей в Млечном Пути, полученных в хорошую наблюдательную ночь и содержащих десятки тысяч объектов. Среднеквадратичная ошибка определения координат объектов для большинства изображений основного телескопа системы МАСТЕР, полученных при нормальных погодных условиях, как правило, порядка $1/2$ секунды (масштаб 2.1" на пиксель) и порядка 17-18 секунд для сверхширокопольных камер (масштаб 36" на пиксель), что вполне достаточно для решения поисковых задач (см рис. 2).

Кроме того, для последовательных кадров одной и той же области со сверхширокопольных камер, имеется режим "быстрой" астрометрии с использованием информации с предыдущих кадров, позволяя сделать рабочее время менее 1 секунды.

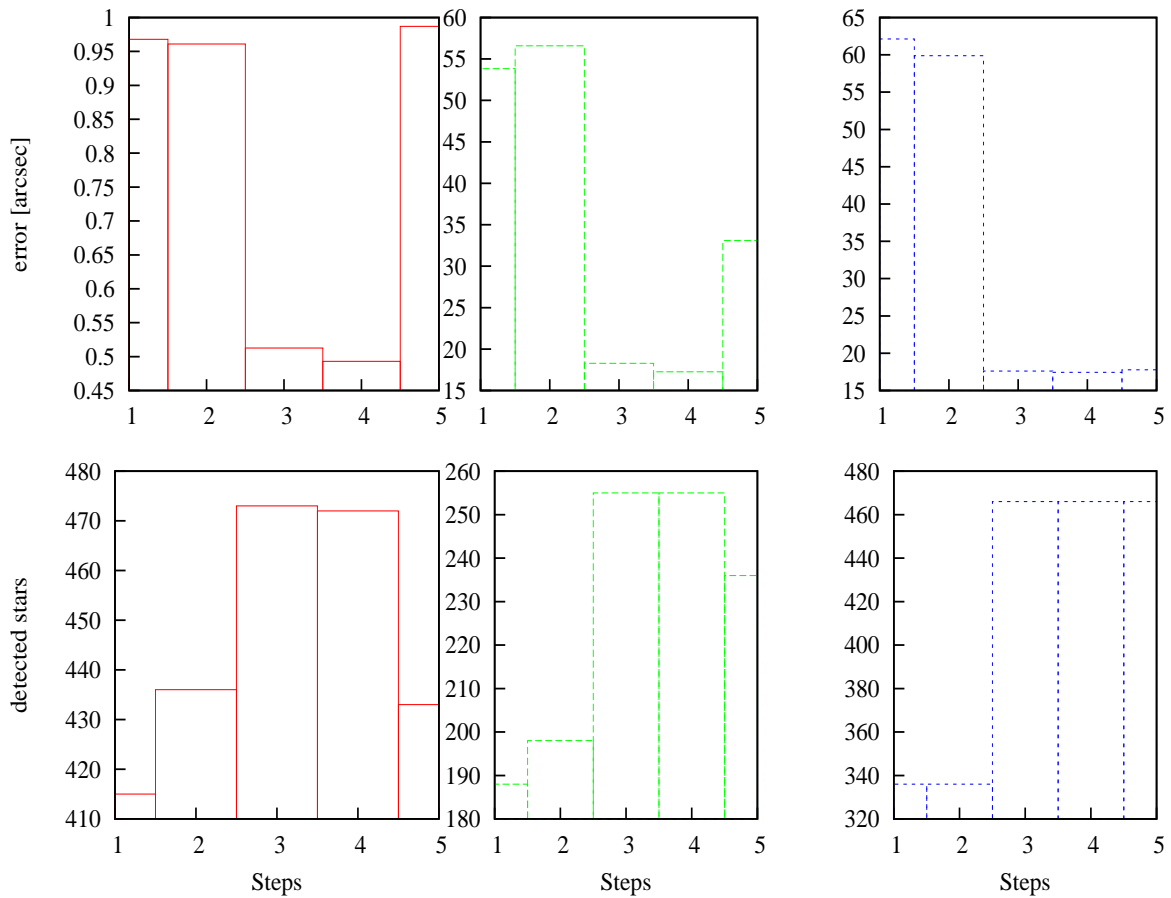


Рис. 4: Зависимость средней ошибки (верх) и количество отождествленных звезд (низ) от степени используемого полинома. Увеличение степени окончательного полинома может как существенно улучшить, так и испортить итоговое преобразование, поэтому очень важно выбрать нужную степень полинома. Зависимости приведены для 3 разных оптических систем. Красная (левая) Rigtter-Slefogt (MASTER) поле зрения 6° , средняя Nikon 50 mm f/1.2 поле зрения 1000° , правая Nikon 50 mm f/1.4 поле зрения 1000° . Взяты произвольные кадры различных областей неба. На глаз видно, что оптимальной является 3-4 степень (отождествляется 95-99 процентов звезд с минимальной средней ошибкой). При более детальном анализе 3 степень показывает несколько лучший результат. Что логично, ибо большинство известных aberrаций (например дисторсия) зависят именно от 3 степени радиального расстояния.

Кроме того для более точного определения координат отдельных объектов (гамма-всплесков, сверхновых звезд, астероидов, спутников и пр), был создан специальный режим работы программы, в котором определенное для всего изображения преобразование координат используется для отождествления объектов в окрестности интересующего нас объекта, а затем рассчитывается локальное преобразование координат этой области, используя 10-25 ближайших звезд с хорошо определенными координатами. Опыт показал, что в этом режиме программа позволяет в 2-3 раза улучшить точность определение координат.

2.1 Выделение звезд и инструментальная фотометрия.

Основой для программы выделения объектов на изображениях послужил программный пакет SExtractor, написанный Эмануэлем Бертин (Emmanuel Bertin) для проекта TERAPIX. Программа SExtractor написана на языке С и имеет достаточно высокую производительность. Для работы с изображениями, получаемыми на системе МАСТЕР, была произведена адаптация программы, заключающаяся в решении следующих основных задач:

- определение оптимального размера блоков, на которые следует разбивать кадр, для минимизации времени обработки всего изображения без потери информации;
- определить и описать инструментальный профиль типичного объекта для основного телескопа системы МАСТЕР, который используется на этапе фильтрации реальных объектов от космических частиц и прочих артефактов;
- определить все параметры телескопа и ПЗС-камеры, от которых зависят характеристики объектов, выводимые в выходную таблицу программы.

Одним из важнейших параметров для программы выделения объектов на изображении является граничное значение отношения сигнал/шум. Это значение напрямую влияет на время выполнения программы. Для первичного выделения объектов в системе МАСТЕР было выбрано значение $S/N=2$. На следующих этапах обработки из полученного списка может выбираться лишь подмножество объектов со значениями S/N более высокими, о чем будет сказано отдельно. Выделение объектов происходит по следующему алгоритму:

- строится карта фона и карта среднеквадратичных ошибок фона обрабатываемого изображения;
- карта фона вычитается из изображения, и последовательным сканированием полученного изображения выделяются объекты с отношением сигнал/шум, превосходящим значение, заданное во входных параметрах;
- производится разделение двойных объектов и выделение объектов на фоне протяженных источников, например галактик;
- полученный список объектов, если указано во входных параметрах, фильтруется путем сравнения с заданной моделью стандартного (для нашего телескопа) изображения звезды;
- определяются точные линейные координаты объектов;
- выполняется фотометрическая обработка объектов; в зависимости от входных параметров выполняется либо апертурная фотометрия с одним или несколькими размерами апертуры, либо с адаптивным размером апертуры, подбираемым самой программой для каждого объекта;
- возможно построение контрольного изображения с вычтенным фоном и помеченными выделенными объектами;

- формируется выходная таблица объектов.

Выходная таблица объектов сохраняется в виде файла в файловом хранилище.

2.2 Выбор проекции

Это важная задача, с которой приходится столкнуться. Действительно, обзоры ведутся на плоских приемниках (ПЗС матрицы, фотопластинки), а искомые координаты необходимо получать на небе, т.е. на сфере. Для решения этой задачи приходится прибегать к проекциям.

Кроме того, в силу неравномерности шкалы прямого восхождения при разных склонениях, приходится искать преобразование $(X, Y) \rightarrow (Ra, Dec)$ сперва около точки $(0, 0)$, а уже затем перемещать его в точку $(RaC, DecC)$;

В астрономических приложениях наиболее удобными являются 3 проекции: синусоидальная, тангенциальная и стереографическая, более подробно они рассмотрены ниже. В целом синусоидальная проекция самая простая, стереографическая самая сложная. Чем меньше поле зрения тем более легкую проекцию можно использовать. К сверхшироким полям (например MASTER VWF $S_{field} = 1000^\circ$) применима только стереографическая проекция. Просто к широким полям $S_{field} \sim 5 - 10^\circ$ наиболее применима тангенциальная. На полях до градуса лучше использовать синусоидальную проекцию.

Выбор проекции в первую очередь связан с особенностями оптической системы телескопа. Некоторые оптические системы (например Nikkor f/1.2) могут строить изображения, заметно отличающиеся от стандартных проекций, и тогда требуется вводить дополнительное исправляющее преобразование.

2.2.1 Преобразование сфера->плоскость (s2p).

1) Тангенциальная проекция

$$\begin{aligned} \cos(c) &= \sin(\phi_0) \cdot \sin(\phi) + \cos(\phi_0) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\lambda - \lambda_0) \\ x &= \frac{\cos(\phi) \cdot \sin(\lambda - \lambda_0)}{\cos(c)} \\ y &= \frac{\cos(\phi_0) \cdot \sin(\phi) - \sin(\phi_0) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\lambda - \lambda_0)}{\cos(c)} \end{aligned} \quad (1)$$

2) Стереографическая

$$\begin{aligned} k &= \frac{2R}{1 + \sin(\phi_0) \cdot \sin(\phi) + \cos(\phi_0) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\lambda - \lambda_0)} \\ x &= k \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\lambda - \lambda_0) \\ y &= k \cdot (\cos(\phi_0) \cdot \sin(\phi) - \sin(\phi_0) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\lambda - \lambda_0)) \end{aligned} \quad (2)$$

3) Синусоидальная

$$x = (\lambda - \lambda_0) \cdot \cos(\phi); \quad y = \phi; \quad (3)$$

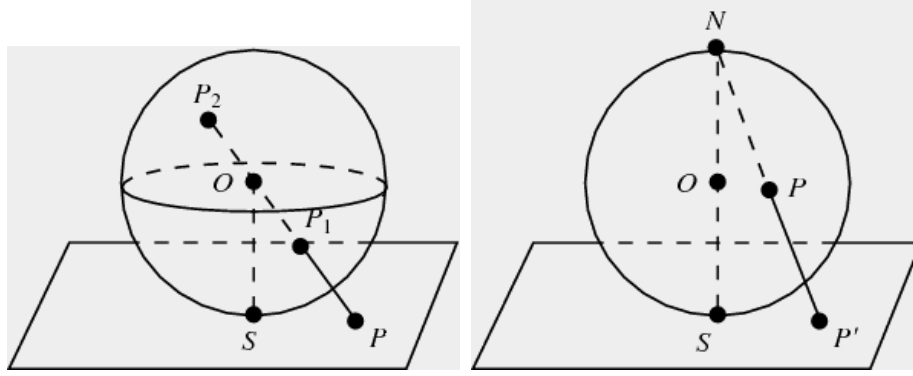


Рис. 5: Тангенциальная проекция (слева) и стереографическая (справа) проекции со сферы на плоскость.

2.2.2 Преобразование плоскость->сфера (p2s).

1) Тангенциальная проекция

$$\begin{aligned}
 \rho &= \sqrt{x^2 + y^2} & c &= \arctan(\rho) \\
 \phi &= \arcsin\left(\frac{\cos(c) \cdot \sin(\phi_0) + y \cdot \sin(c) \cdot \cos(\phi_0)}{\rho}\right) \\
 \lambda &= \lambda_0 + \arctan\left(\frac{x \cdot \sin(c)}{\rho \cdot \cos(\phi_0) \cdot \cos(c) - y \cdot \sin(\phi_0) \cdot \sin(c)}\right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

2) Стереографическая

$$\begin{aligned}
 \rho &= \sqrt{x^2 + y^2} & c &= 2 \cdot \arctan(\rho/2 \cdot R) \\
 \phi &= \arcsin(\cos(c) \cdot \sin(\phi_0) + y \cdot \sin(c) \cdot \cos(\phi_0)/\rho) \\
 \lambda &= \lambda_0 + \arctan\left(\frac{x \cdot \sin(c)}{\rho \cdot \cos(\phi_0) \cdot \cos(c) - y \cdot \sin(\phi_0) \cdot \sin(c)}\right)
 \end{aligned} \tag{5}$$

3) Синусоидальная

$$\phi = y; \quad \lambda = \lambda_0 + x/\cos(\phi); \tag{6}$$

2.3 Калибровка звездной величины

Как уже было сказано выше практически все широкополные (а тем паче сверхширокополные) системы работают в "белом свете" т.е. без фильтров определенной полосы. Таким образом встает вопрос калибровки фотометрической полосы в которой производятся измерения. Ясно что кривая чувствительности матрицы и кривая пропускания объектива будут каким-то образом ограничивать те длины инструментальную фотометрическую полосу. Таким образом встает задача используя опорные звездные величины из фотометрических каталогов наиболее правдоподобно описать инструментальную звездную величину.

Для этого строятся цветовые диаграммы где по одной из осей откладывается разность инструментальной звездной величины и величины в каком-нибудь модельного фильтра (или комбинации фильтров) от какого-либо показателя цвета. При этом чем

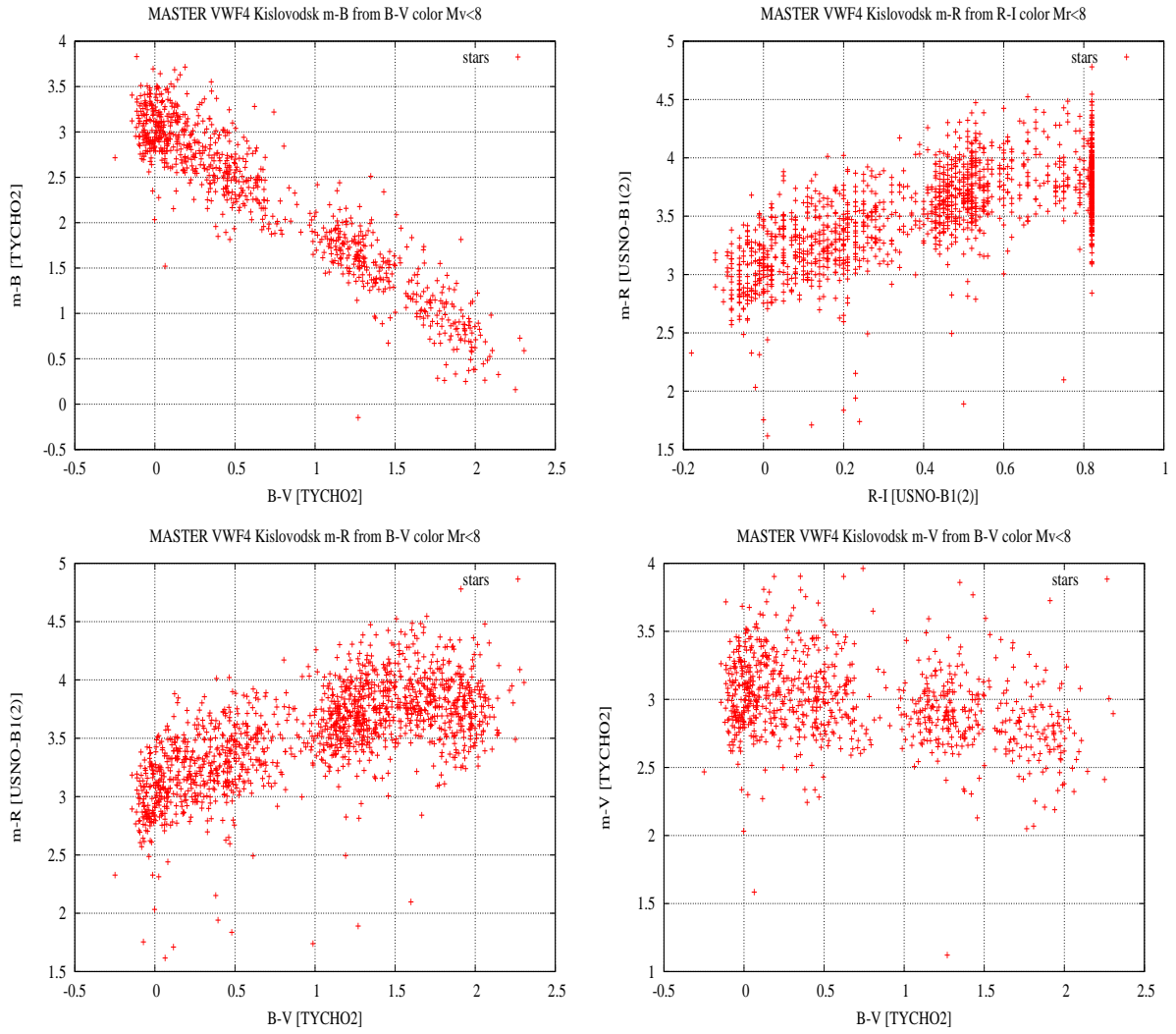


Рис. 6: Цветовые диаграммы, предназначены для калибровки инструментального фильтра. На графиках $m = 2.5 \lg(F_{inst})$ а нуль пункт инструментальной звездной величины, не имеет здесь никакого значения и пока что не может быть определен, т.к. на данном этапе не понятно относительно чего калиброваться. Стоит так же подчеркнуть что ширина полос имеет естественную природу связанную с наличием в поле звезд разных спектральных классов, а не с плохой точность измерений.

ближе модельный фильтр к инструментальному тем более горизонтальным будет выглядеть облако точек на графике. Таким образом выбор модельного фильтра будет сводится к минимизации отклонений от среднего на такой цветовой диаграмме.

На рис. 6 приведены соответствующие цветовые диаграммы для системы MASTER VWF-4 состоящей (в фотометрическом плане) из объектива Nikkor 50 mm f/1.4 и ПЗС матрицы Prosilica GE4000. Инструментальная фотометрическая полоса очень хорошо описывается фильтром V_{TYCHO2} . Для сравнения инструментальная звездная величина телескопа МАСТЕР, состоящего из телескопа модифицированной системы Рихтера-Слефогта и ПЗС камеры Apogee Alta U16

$$m_{MASTER} = 0.89 \cdot R_{USNO-A2.0} + 0.11 \cdot B_{USNO-A2.0}. \quad (7)$$

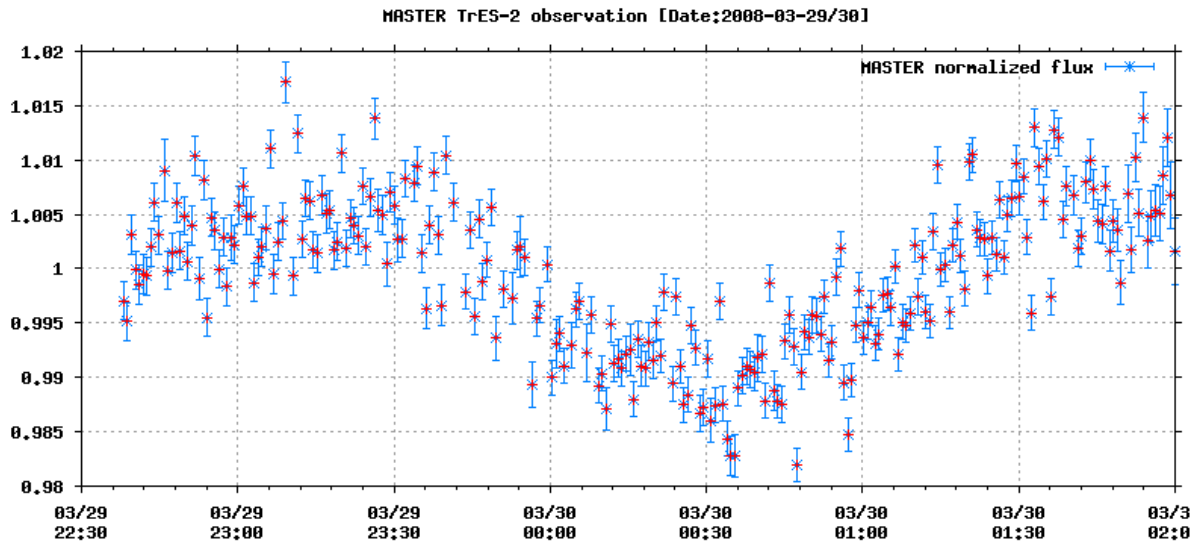


Рис. 7: Иллюстрация точности относительных фотометрических измерений на телескопе МАСТЕР. На рисунке приведен 3.5 часовой мониторинг затмения звезды GSC 03549-02811 $V = 11.5^m$ экзопланетой TrES-2. Величина падения блеска в минимуме составляет $\Delta m_{tres2} \sim 1.3\%$. Любопытно что падение блеска для экзопланеты HD41004B составляет аж 8.8% что позволяет видеть затмения и на сверхширокопольных камерах.

Средняя абсолютная точность фотометрических измерений на сверхширокопольных камерах при этом составляет $\Delta m_{abs} \sim 0.25 - 0.35^m$, а для широкопольных инструментов типа МАСТЕР $\Delta m_{abs} \sim 0.07 - 0.1^m$. Заметим что относительная точность измерений заметно выше. Для сверхширокопольных камер составляет $\Delta m_{rel} 3 - 5\%$, а для широкопольных телескопов $\Delta m_{rel} 0.4 - 0.6\%$. В качестве иллюстрации см. рис. 7

2.4 Автоматическое определение предельной звездной величины кадра

Очень важной частью современных автоматических обзоров неба, является автоматическое определение предела на полученных изображениях. Естественно, что в любом автоматическом обзоре и контроль качества должен быть автоматизирован. Своего рода объективным контролем качества получаемых изображений и может служить автоматический предел. Кроме того знание предела кадра необходимо при наблюдениях гамма-всплесков. К процедуре определения предела кадра можно подойти очень формально, и назвать предельной величиной кадра звездную величину самого слабого объекта на этом кадре. Однако такой подход имеет ряд недостатков. Во-первых, при работе с низким порогом выделения большинство самых слабых объектов это шум. Если же на кадре есть облака, тогда реальных слабых объектов не видно вовсе и практически все объекты на пределе видимости это некие случайные флуктуации яркости в облаках. Кроме того их (ложных объектов) довольно много и часть из них отождествляется с реальными звездами, так что даже использование

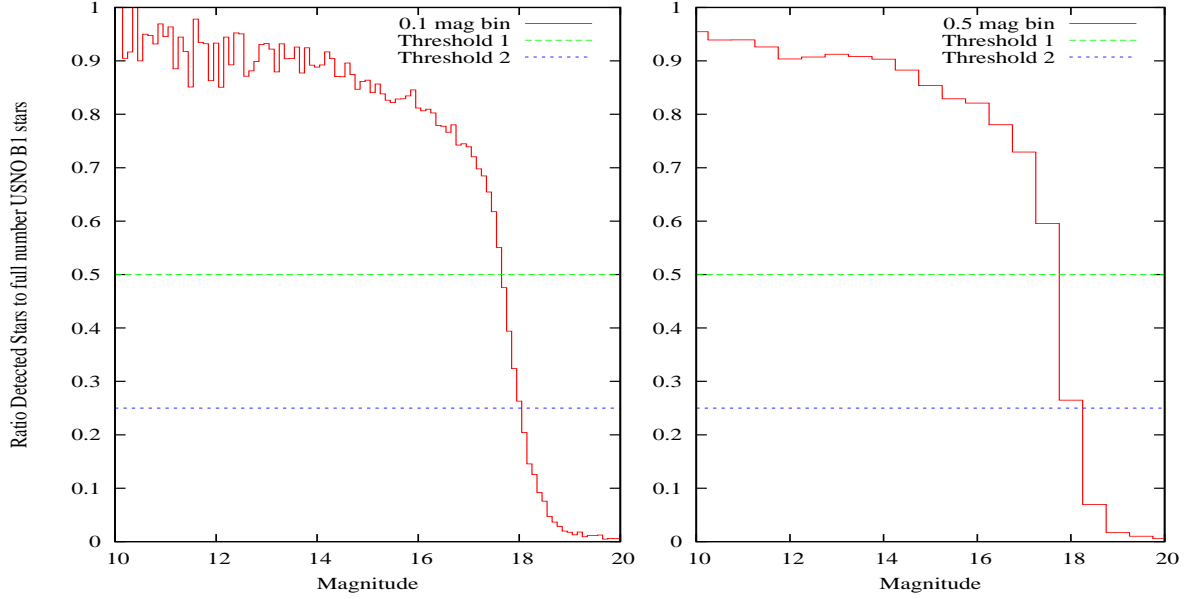


Рис. 8: Зависимость числа отождествленных звезд от звездной величины. Прямыми линиями проведены пороги $\sigma_{lim} = 50\%$ и $\sigma_{lim} = 25\%$. На левом графике усреднение производилось в пределах 0.1^m на правом в пределах 0.5^m . Видно что правый (более грубый) график выглядит более сглажено, что уменьшает вероятность случайного преждевременного выхода за порог. Таким образом удобно грубо определять предел по графику с большим шагом и затем уточнять его по более точной кривой.

только отождествленных с каталогом звезд не выправляет положение. Во-вторых, такой подход характеризует предел только в локальной области кадра и не характеризует его целиком, тогда как для контроля качества важна характеристика кадра в целом.

Для решения этих затруднений удобно поступать следующим образом. Все звезды из опорного каталога, попадающие на исследуемую площадку, разбиваются в зависимости от своей яркости на группы с заданным шагом по звездной величине. Для каждой группы звезд вычисляется отношение числа отождествленных звезд из опорного каталога к полному числу таких звезд (см. рис. 8) и строится соответствующая гистограмма. Следуя по гистограмме слева направо заметим, что когда средняя звездная величина текущей группы будет приближаться к предельной, отношение резко скользнет вниз. Этот загиб не составляет труда найти (скажем, исследуя численную производную данной функции), однако на практике проще и быстрее выбрать некий порог, по достижению которого и будет определяться предел на кадре. Эмпирически было установлено, что при пороге $\sigma_{lim} = 25\%$ предел соответствует объектам с $S/N \approx 9 - 11\sigma$, а при $\sigma_{lim} = 50\%$ объектам с $S/N \approx 14 - 15\sigma$.

Стоит отметить, что для надежной работы данного метода предельная звездная величина опорного каталога должна быть заведомо больше чем предел исследуемого кадра. В противном случае из-за недостатка звезд данной величины в самом каталоге метод становится не применим. Тем не менее для большинства современных широкопольных обзоров вполне достаточно каталога USNO-B1, а для сверхширокопольных камер даже каталога ГУСНО-2 (что очень удобно).

2.5 Вспомогательные процедуры преобразования координат

Во многих вспомогательных программах (просмотр изображений, отдельное сохранение определенной области, программе анализа "полосок" от метеоров и спутников) недостаточно координат звезд, записанных в каталог. Приходится вычислять где на кадре находится область с заранее заданными экваториальными координатами или наоборот, какие экваториальные координаты имеет та или иная точка на кадре. Для их реализации полезно более детально рассмотреть 3 процедуры

2.5.1 Полная процедура преобразования линейных координат в экваториальные.

Заметим что как и в любую математическую формулу должны входить величины одной системы единиц. В случае блоков (p2s) и (p2s) это угломерные величины: радианы. Поэтому важно описать, несмотря на простоту, процедуру приведения пиксельных координат изображения в радианы на плоскости.

Для этого требуется знать 3 величины: опорный пиксел (международное обозначение CRPIX) [в формулах (X_0, Y_0)], и примерные значения масштаба изображения (CDELTA)[$Scale$] и экваториальных координат опорного пикселя (CRVAL) [(α_0, δ_0)].

$$\begin{aligned}(x_0, y_0) &= (X, Y) - (X_0, Y_0) && \text{приведение } X, Y \text{ к точке } (0,0) \\(x_m, y_m) &= poli[(x_0, y_0), A] && \text{применение прямого } (A_{ij}) \text{ полинома} \\(\xi, \eta) &= (x_m, y_m) \cdot Scale && \text{преобразование пикс. координат в угловые} \\(\alpha, \delta) &= p2s[(\xi, \eta), (\alpha_0, \delta_0)] && \text{переход к реальной нулевой точке}\end{aligned} \tag{8}$$

2.5.2 Полная процедура преобразования экваториальных координат в линейные.

В данном случае мы решаем задачу обратную. Найти где на матрице находится место с наперед заданными координатами. Такая задача возникает, когда нужно визуально посмотреть конкретную область неба или определить место, где произошло какое-то открытое не нами событие (например вспыхнул гамма-всплеск). Исходными данными теперь являются (α, δ) , а искомыми (X, Y) .

$$\begin{aligned}(\xi, \eta) &= s2p[(\alpha, \delta), (\alpha_0, \delta_0)] && \text{переход к реальной нулевой точке} \\(x_m, y_m) &= (\xi, \eta) / Scale && \text{преобразование пикс. координат в угловые} \\(x_0, y_0) &= poli[(x_m, y_m), B] && \text{применение обратного полинома } (B_{ij}) \\(X, Y) &= (x_0, y_0) + (X_0, Y_0) && \text{приведение } X, Y \text{ к точке } (0,0)\end{aligned} \tag{9}$$

2.5.3 Приведение на сфере в точку (0,0).

Для первичного отождествления на сфере необходимо преобразовать каталожные координаты так, чтобы их центр находился в точке (0,0). Ввиду того, что геометрия на сфере сложнее плоской, простое преобразование из серии $\alpha_m = \alpha - \alpha_{center}$ в данном случае не годится. Однако в рамках введенных нами функций очень удобно

это сделать с помощью одинаковой проекции на плоскость и обратно. Формально это можно записать так. Обозначим искомые координаты как (α^0, δ^0) .

$$\begin{aligned}(\xi, \eta) &= s2p[(\alpha, \delta), (\alpha_0, \delta_0)] \\ (\alpha^0, \delta^0) &= p2s[(\alpha, \delta), (0^o, 0^o)]\end{aligned}\tag{10}$$

3 Автоматическая классификация и анализ астрономических транзиентов.

3.1 Выделение объектов и передача информации на сервер.

После того как закончена первичная обработка изображения, о которой говорилось выше, начинается поиск и классификация транзиентов. Все транзиентные явления на кадрах можно разделить на 2 существенно различающиеся по методам обработки класса: звездоподобные объекты и полосы. К полоскам относятся все быстро движущиеся по небу объекты: низкие и средние ИСЗ и метеоры, а к звездоподобным - все транзиенты имеющие звездную или внегалактическую природу (новые звезды, всплески-сироты, вспышки на звездах), а так же высокоорбитальные ИСЗ (см, например, рис. 19, о котором пойдет речь ниже). Со звездообразными объектами работать намного проще, так как программа выделения объектов и инструментальной фотометрии (SExtractor, описанная выше) предназначена для выделения и анализа именно такого рода объектов. Поэтому все основные параметры звездоподобных объектов (поток и звездная величина, FWHM, координаты (X,Y), большая и малая полуоси (a,b)) определяются очень надежно.

С выделением же "полосатых" объектов возникают большие трудности. Во-первых, без тонкой настройки дополнительных внутренних параметров (отвечающих, например, за объем и распределение машинной памяти) SExtractor вообще отказывался выделять достаточно яркие полосы: следы от болидов и ярких спутников, принимая такие полосы чаще всего за дефекты кадры, либо вообще не замечая (см. рис 9). Задача осложнялась тем, что изменение параметров памяти сильно сказывается на другом очень критичном параметре - времени обработки кадра. Кроме того любая полоса дает заметный вклад в определение фона при малом размере области его определения, выгодной для выделения звезд (з звездоподобные объекты эффективно маскируются при определении фона). Тем не менее (см. рис 9) после тонкой настройки всех параметров удалось не только выделить полосы с кадра, но и добиться высокой скорости работы (порядка 2.5 секунд вместо 5 стандартными параметрами).

Несмотря на это полностью выделить полосу с кадра методами SExtractor, а уж тем более произвести ее качественную фотометрию невозможно, и для этого необходимо было разработать свою программу анализа полосок, рассмотренную ниже.

Кроме того заметим, что сервис выделения объектов с изображений реализован таким образом, что может физически выполняться для каждой камеры как на сервере, так и, для уменьшения нагрузки на сервер, на управляющем компьютере каждой камеры (см. рис. 2). При этом при передаче с управляющего компьютера на сервер полученный каталог объектов будет иметь однозначно высший приоритет перед закладываемыми в базу изображениями.

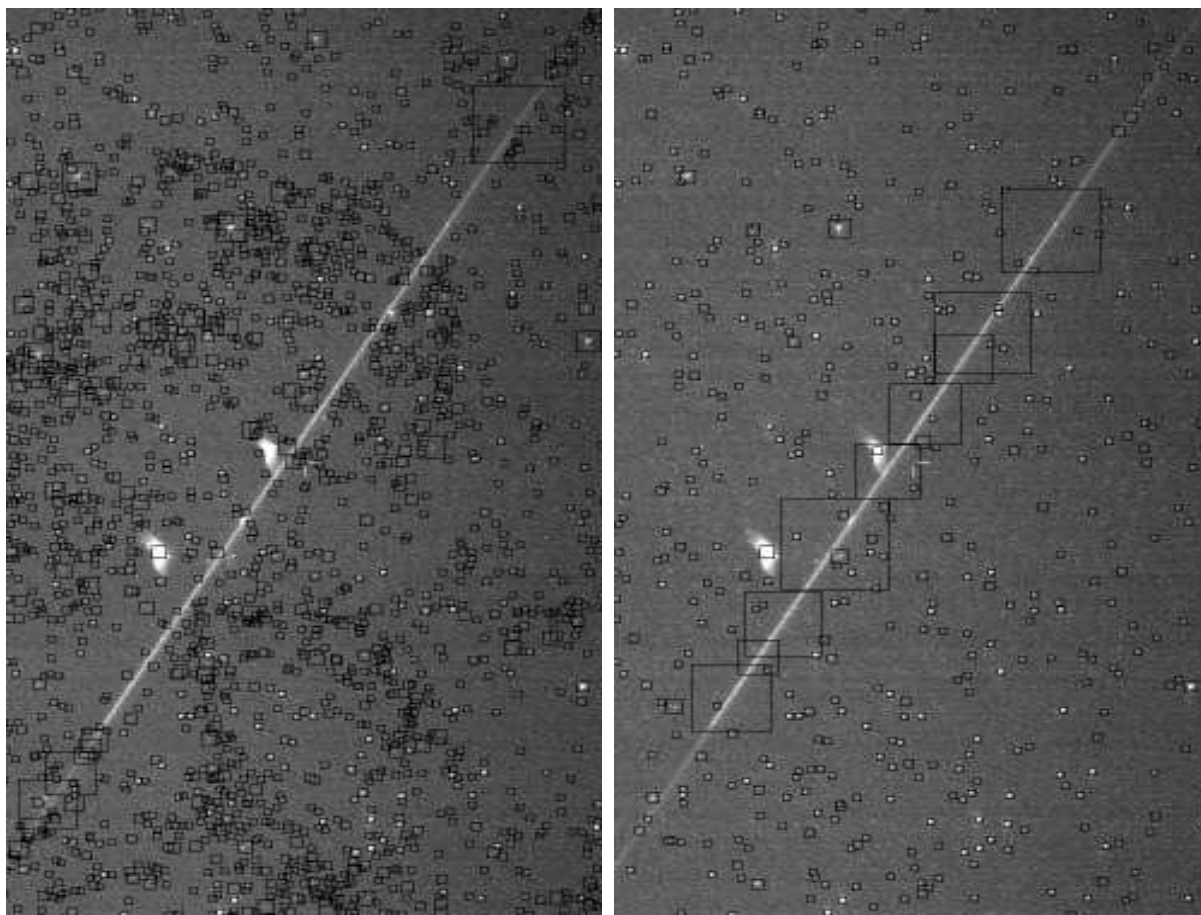


Рис. 9: Снимок размером 50 на 90 с болидом на борту. Черными квадратами обозначены выделенные на кадре объекты. Сторона квадрата соответствует fwhm объекта. На левом рисунке кадр со стандартными доп. параметрами выделения и максимально мягкими основными параметрами (порог выделения $S/N > 1.5$), без каких-либо фильтров. Результат: выделены все звездоподобные объекты, куча слабого мусора, горячие пиксели и просто случайный шум, - все, кроме болида. На правом кадре выделение с усовершенствованными дополнительными и разумными основными параметрами выделения, используемыми сейчас. На болиде выделено несколько ярких, продолговатых объектов, шума заметно меньше. После правильной настройки удалось добиться как выделения нескольких ярких, продолговатых объектов на полосках, так и с использованием фильтров избавиться от большого числа заведомо ложно выделенных звезд при сохранении слабых реальных объектов.

3.2 Первичный анализ астрономических транзиентов.

Следующим этапом после выделения является астрометрия и калибровка фотометрии, подробно описанные в предыдущей главе. Таким образом после выделения объектов, астрометрии и калибровки фотометрии мы получаем каталог выделенных на кадре объектов, привязанных к небесным координатам и с откалиброванной фотометрией. Далее для поиска оптических транзиентов используются все не отождествленные объекты (корреляция проводится как по координатам, так и по звездным величинам: обычно $\Delta S = 40 - 50''$ а $\Delta m = 1.5^m$, что позволяет регистрировать как

+id	cam_id	date_time	coord2000	EB	mag	alt	z	r	a	h	PA	fwhm	in_id	name
461478	461477	2008-10-20 19:00:40.253	(19h 34m 52.30s, +40d 53m 33.5s)	30	9.30	11.1	536.0	270.6	3.8	0.8	53.1	10.0	29007	AUREOLE 1 <0572
470085	470084	2008-10-28 01:24:00.328	(22h 26m 47.41s, +22d 53m 47.8s)	30	8.84	11.8	216.9	2364.6	2.8	0.6	-50.0	7.8	29005	AUREOLE 3 <1284
473613	473612	2008-10-28 02:31:26.383	(10h 06m 38.14s, +01d 42m 37.3s)	30	7.68	27.2	192.8	1418.9	8.3	1.2	-34.6	18.8	29005	BREEZE-M DEB <37492U>06006A
478461	478460	2008-11-02 01:33:40.231	(22h 57m 18.23s, +27d 06m 32.8s)	30	6.24	16.9	228.1	1282.9	6.9	1.3	35.7	16.9	29005	BREEZE-M R/B <37633U>02062B
475435	475434	2008-11-01 00:37:00.245	(22h 14m 27.89s, +25d 26m 02.1s)	30	8.88	10.2	585.5	2402.5	3.0	0.7	-4.4	8.7	29005	BX-1 <33392U>08
469951	469950	2008-10-28 01:20:20.326	(22h 20m 22.21s, +33d 34m 27.1s)	30	8.62	11.8	323.0	2503.9	3.1	0.8	-26.2	9.3	29005	CALIPSO <29108U
477339	477338	2008-11-01 02:15:55.241	(22h 20m 36.57s, +24d 09m 56.8s)	30	7.08	10.1	480.3	707.3	3.5	0.8	79.9	10.1	29005	CBERS 1 DEB <31583U>99057F
468988	468987	2008-10-24 19:48:20.286	(00h 00m 00.00s, +00d 00m 00.0s)	30	0.00	23.5	3853.0	2297.5	3.2	0.5	-81.1	7.6	29005	CBERS 2B <32062
478256	478254	2008-11-01 21:28:55.369	(01h 39m 31.48s, +16d 22m 33.9s)	30	9.49	15.4	141.2	95.0	2.8	0.7	-79.7	8.3	29007	CHANDRAYAAN-1 <33406U>06062A
474509	474508	2008-10-30 01:19:55.296	(22h 50m 52.33s, +25d 20m 02.8s)	30	8.14	13.2	349.0	1771.6	4.5	0.8	78.9	11.2	29005	CLUSTER II-FM5 <26463U>00045A
464326	464325	2008-10-28 00:23:25.421	(00h 00m 00.00s, +00d 00m 00.0s)	30	0.00	12.4	3390.2	2388.3	3.2	0.5	66.1	7.8	29007	COSMOS (GLONAS <33380U>06046C
480765	480764	2008-11-02 02:27:25.483	(00h 09m 34.58s, +23d 52m 00.6s)	30	8.71	10.5	170.8	2214.4	4.5	0.7	-32.9	10.4	29007	COSMOS 1013 <10030U>78056A

Рис. 10: Внешний вид Web-интерфейса транзиентных объектов. На кадре представлен фрагмент спутниковой базы данных. Трек от спутника автоматически отождествляется с расчетным. Определяются профили яркости, координаты и скорости (см. рис. 14). Все не отождествленные спутники попадают в отдельную таблицу для дальнейшего исследования (см., например, рис3).

транзиенты вспышки на звездах и в какой-то мере защищает от ложных отождествлений с заведомо более слабыми и многочисленными звездами). Для фильтрации шума не отождествленные с каталогом объекты сравниваются с объектами нескольких (обычно 2-3) предыдущих кадров. Если объект не был найден ни в каталоге ни на одном из предыдущих кадров, он считается кандидатом в транзиенты. Затем все кандидаты в транзиенты пропускаются через ряд специальных фильтров. Например, если у объекта малая полуось $b > 4 - 5$ пикс. (при типичных значениях $b \sim 0.7 - 2$ пикс.) это на 95% след от облака, а если $fwhm < 1$ пикс. - горячий пиксель или частица. Также в обязательном порядке для всех транзиентов устанавливается

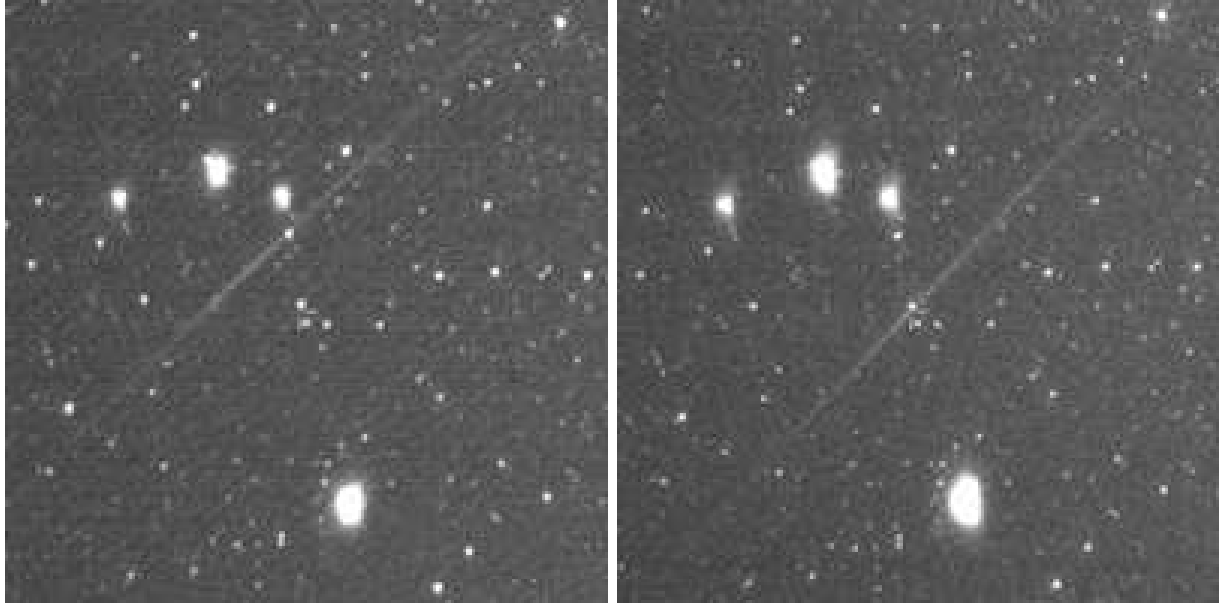


Рис. 11: Параллакс в случае спутников. На снимках представлена область неба размером 5° на 5° с северной и южной камер эксперимента МАСТЕР VWF4. Отчетливо виден параллакс метеора. Высота, определенная методом триангуляции $H_{meteor} = 72 \pm 2$ км.

триггерный порог, заведомо больший чем порог выделения, так как из-за случайных флуктуаций слабые звезды постоянно то выделяются, то нет. Сейчас рабочим триггерным порогом является $S/N > 10\sigma$.

После прохождения всех фильтров происходит предварительная классификация транзиентов. Вначале происходит отождествление всех кандидатов с каталогом спутников и все отождествленные объекты заносятся в базу данных спутников. Оставшиеся объекты разделяются на звездообразные и "полосатые". Если отношение полуосей объекта $a/b > 3$, он считается полоской, иначе - звездоподобным. Все звездоподобные объекты идут на схему совпадений и полоски предварительно разделяются на кандидаты в метеоры и неизвестные ИСЗ. Если по данным с 3-х последних кадров объект и еще 2 других из числа кандидатов в транзиенты по одному с предыдущего и позапредыдущего кадров лежат на одной прямой, то все трое считаются кандидатами в неизвестный ИСЗ, а остальные считаются кандидатами в метеоры.

3.3 Схема совпадений и определение высот.

Все описанные выше процедуры производятся отдельно для каждой из 4-х камер в режиме реального времени. Если камеры в настоящий момент работают в разведенном (алертном) режиме, то обработка в реальном времени на этом заканчивается. Если же ведутся обзорные наблюдения, когда 2 камеры смотрят в одно и то же место, тогда для все звездообразные транзиенты проходят схему совпадений, а для всех кандидатов в метеоры и неизвестные ИСЗ, а так же отождествленных с базой NORAD (общедоступный ежедневно обновляемый каталог) спутников поределаются высоты (см. рис. 11,12). Несмотря на то, что все операции на данном этапе можно было бы проводить в небесных (экваториальных) координатах, для увеличения точности и

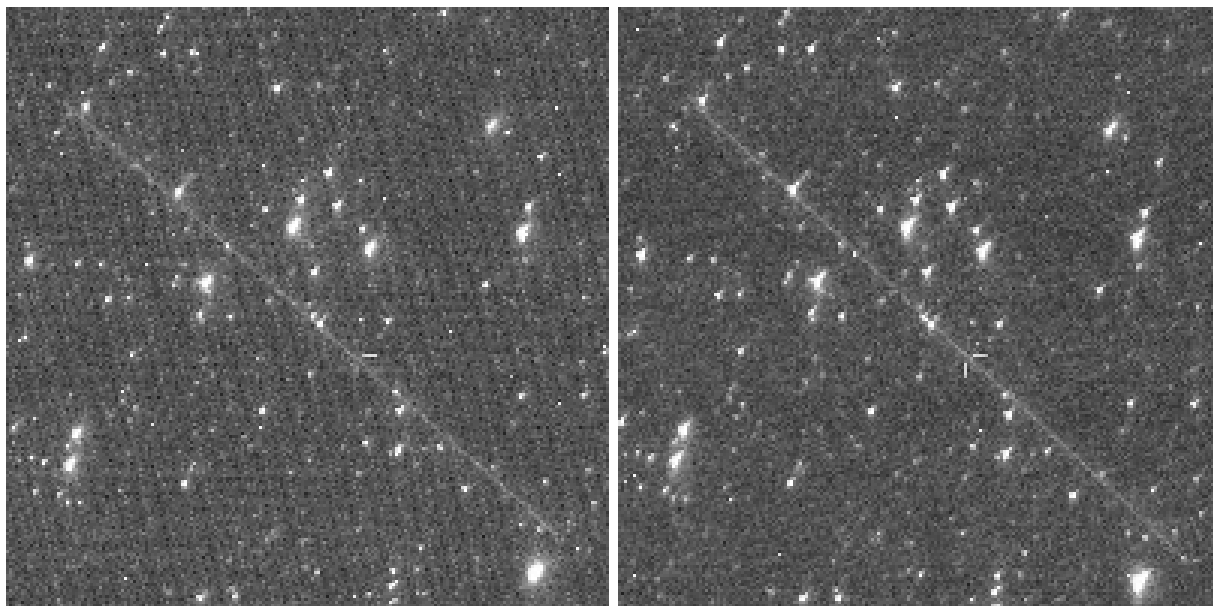


Рис. 12: Параллакс в случае спутников. На снимках представлена область неба размером 4° на 4° с северной и южной камер эксперимента МАСТЕР VWF4.. Высота, определенная методом триангуляции $H_{satell} \sim 4500$ км. Предельно возможная высота для регистрации высоты методом триангуляции с учетом, что точность астрометрии для полосок $\sigma_{astrom}^{line} \sim 20''$, а база $\Delta l = 702$ метра $H_{max} = \Delta l * \arcsin(\sigma_{astrom}^{line}) \sim 7200$ м.

надежности отождествлений строится специальное преобразование кадра с северной камеры к кадру с южной, основанное на тех же принципах (подобные треугольники в качестве зацепки и полином преобразования одних координат в другие), что и астрометрия. Построение такого преобразования занимает скромное время (порядка 0.2-0.3 секунд), зато позволяет увеличить точность преобразования (а значит уменьшить радиус корреляции и количество случайно совпавших шумовых объектов) более чем в 2.5 раза. В случае обнаружения реального звездоподобного транзиента есть возможность мгновенно выдать целеуказание (алерт) на более крупные телескопы МАСТЕР (в Востряково, Кисловодске и вскоре на Урале) для более детального их изучения. Однако этот режим еще пока что в стадии разработки, главным образом из-за обломков высоких ИСЗ довольно часто попадающих в кадр (см рис. 3,19).

3.4 Анализ полосок.

Как было сказано выше, SExtractor дает лишь примерное положение полоски, разбивая ее на несколько ярких продолговатых объектов. Задачу полной фотометрии полосы, определения координат центра и концов и др. параметров решает специально разработанная программы анализа полосок на астрономических кадрах. Для предотвращения перегрузки сервера данная программа работает только днем, и в те моменты ночи, когда погода заведомо не позволяет проводить наблюдения.

Программа анализа использует координаты какого либо места на полосе, определенные на предыдущей стадии обработки, в качестве начальной точки. Вокруг этой начальной точки выбирается рабочая область заданного размера (обычно 512 на 512 пикс., которых достаточно для анализа треков от всех возможных спутников и ме-

теоров). В случае необходимости при анализе очень ярких и длинных болидов этот размер автоматически увеличивается.

Определение фона. Затем начинается процедура определения фона. Для этого рабочая область разбивается на подобласти заданного размера. В каждой из областей 2 раза считается медиана и стандартное отклонение: первый раз примерно по всем пикселям в данной области, а второй раз более точно без учета сильно (на 6-10 σ) выбивающихся пикселей. Пронумеруем каждую область, тогда всего областей будет N_{zone} штук (сейчас $N_{zone} = 256$). А фон и отклонение в каждой точке будут рассчитываться так

$$\begin{aligned} Bg(i, j) &= \sum_{k=1}^{k < N_{zone}} \frac{1}{r_k^2} \cdot Med(k) \\ \Sigma(i, j) &= \sum_{k=1}^{k < N_{zone}} \frac{1}{r_k^2} \cdot \Sigma(k) \end{aligned} \quad (11)$$

где $Bg(i, j)$ фон в точке с координатами (i, j) , $Med(k)$ - медиана в k -й зоне вычисления фона, Σ - стандартное отклонение в соответствующей области, r_k - расстояние от точки (i, j) до центра k -й зоны. На рис. 13:3-4 представлены соответствующие карты фона.

Выделение полосы. Для выделения полосы сперва строится карта ярких пикселей превышающих фон на $n_\sigma \cdot \Sigma(i, j)$. Эмпирическим путем было обнаружено что оптимальным значением является $n_\sigma = 1.5$. На карте (см. рис 13:2) такие точки обозначены черным цветом.

Далее от заданного центра (координаты объекта, найденного SExtractor) запускается рекурсивный алгоритм поиска связанной области. После того как область найдена определяются основные параметры объекта (центр, a, b, θ - наклон к оси X). Если выделенный объект можно классифицировать как полосу ($a/b > 3$), ищется стандартное отклонение σ_{line} точек объекта от прямой, проведенной под углом θ через центр выделенного объекта. После чего снова запускается рекурсивный алгоритм поиска связанной области, на этот раз только в пределах 2-3 σ_{line} от указанной прямой. Кроме того при втором выделении в пределах $2\sigma_{line}$ от указанной прямой разрешается перескакивать через 1-2 слабых пикселя. Таким образом после второго прохода полоска оказывается полностью выделенной, включая слабые края метеоров.

Затем производится попытка найти объекты на продолжении линии на последующих и предыдущих кадрах. Если такой объект найден тогда полоска классифицируется как спутник, иначе - как метеор. При этом и для спутников, и для метеоров получаются профили яркости по полоске (см. рис. 14). Для всех транзиентов сохраняются кусочки изображений.

4 Наблюдения собственного излучения гамма-всплесков.

Теперь, после того как мы поговорили об общих принципах обработки данных в широких и сверхшироких полях, настало время поговорить о наблюдениях гамма-

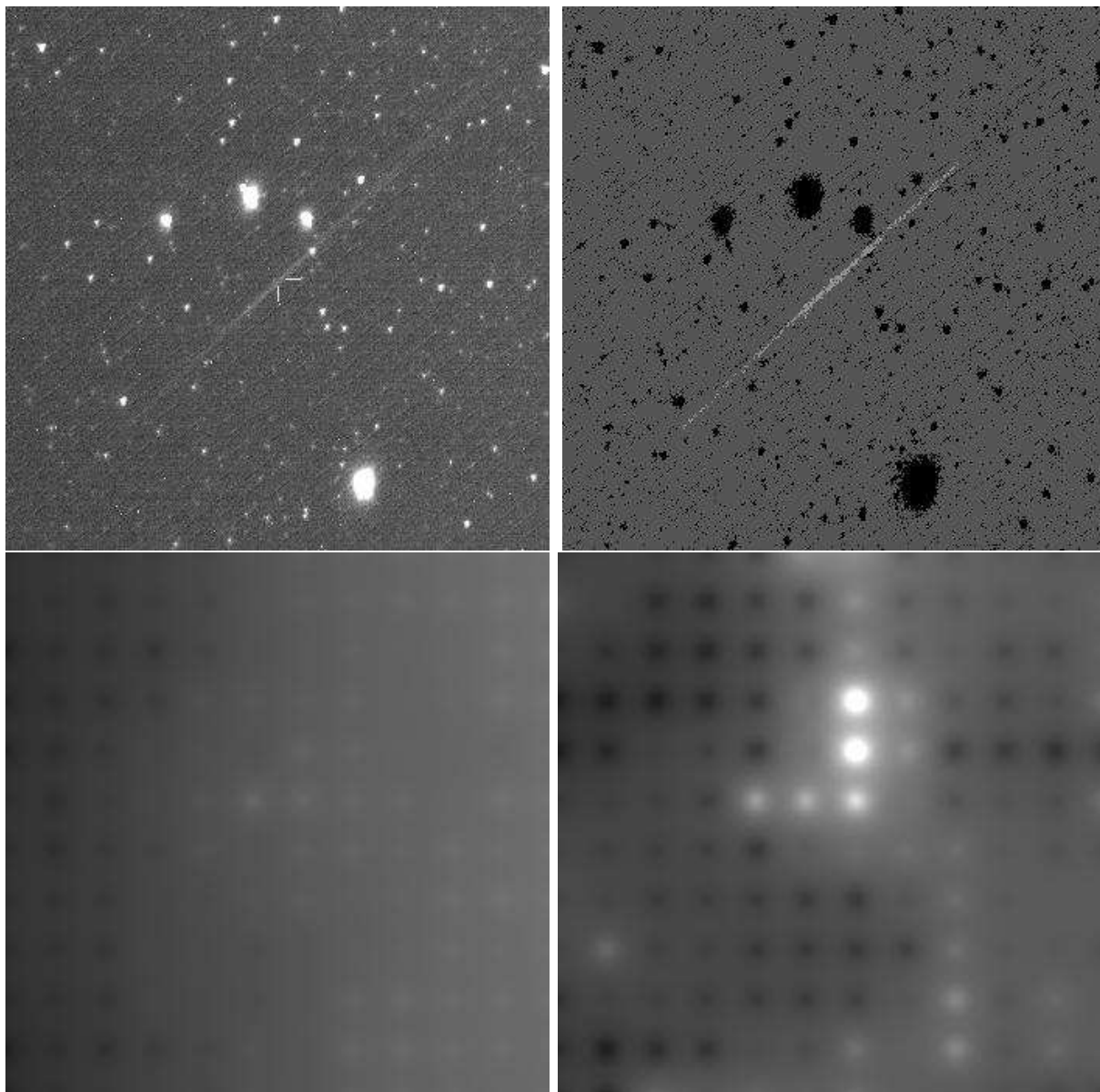


Рис. 13: 1) 5-ти сек. изображение метеора, поле 3° на 3° ($F(i, j)$).
 2) Карта выделения. Черным показаны точки с $F(i, j) > n_\sigma \cdot \Sigma(i, j)$; белым - включенные в исследуемый объект пиксели. Серым - фон.
 3) Карта фона - ($Bg(i, j)$) (слева внизу)
 4) Карта стандартного отклонения ($\Sigma(i, j)$) (справа внизу)

всплесков. В этой главе я подробно остановлюсь на синхронных наблюдениях гамма-всплесков, однако стоит отметить, что за 2 года работы 1 каналной сверхширокопольной камеры в Кисловодске нами произведено более 20 алертных наведений за время меньше минуты, о чем опубликованы соответствующие GCN-телеграммы например GRB 070224 (gcn 6139), GRB 070223 (gcn6131), GRB 070219 (gcn 6113), GRB 061213 (gcn 5915), GRB 061002 (gcn 5677), GRB 060929 (gcn 5657) и многие другие. В конце этой главы я немного остановлюсь на теоретических попытках понять природу центральной машины гамма-всплесков, особо не вдаваясь в детали

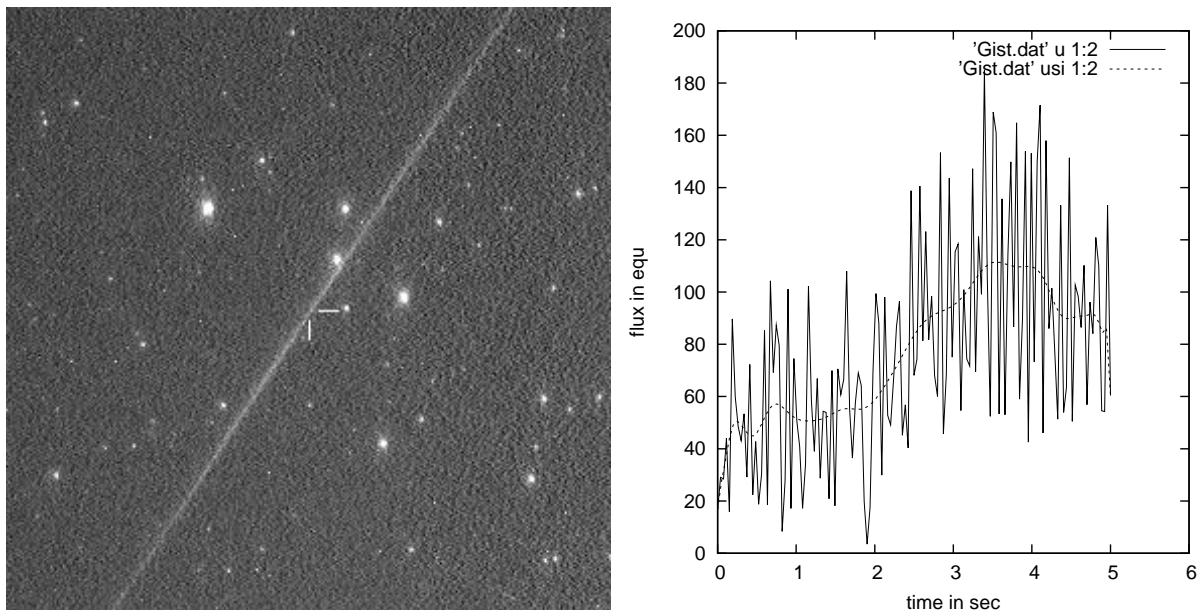


Рис. 14: Метеор и автоматически полученный профиль его яркости.

поскольку эту тему я очень подробно освещал в своей курсовой, а так же в статьях [Lipunov Gorbovskey 2007], [Lipunov Gorbovskey, 2008] и [Lipunov Kornilov Gorbovskey, et al 2008]. Сейчас благодаря Г.Липуновой многократно ускорена скорость расчетов, а совместно с А.Богомазовым ведется работа по расчету на "Машине Сценариев" физически обоснованной сетки начальных условий для расчета последующих гамма-всплесков. Однако пока эта работа еще не завершена до конца и представлять результаты еще рано.

4.1 О значимости синхронных наблюдений

Как известно, грубо оптическое излучение от гамма-всплесков можно разделить на 2 составляющие: "Собственное излучение" (Prompt emission) и послесвечение (afterglow). Здесь мы не будем говорить о послесвечении в силу того, что оно, во-первых, уже достаточно хорошо изучено, а во-вторых не является целью для наблюдения на сверхширокополосных системах. Итак, поговорим о собственном излучении.

Собственным оптическим излучением гамма-всплеска можно назвать излучение синхронное (одновременно) с гамма-излучением, регистрируемым различными космическими гамма обсерваториями (HETE2, Swift, Fermi). Именно оно в отличие от послесвечения несет в себе информацию о самом объекте, рождающем гамма-всплеск, так называемой центральной машине, а не о среде вокруг нее. Существует 2 способа наблюдения собственного оптического излучения гамма-всплесков: синхронные наблюдения и алертные наведения. Сейчас существует уже достаточно много оптических (порядка 20) [Panaitescu, 2008] наблюдений собственного излучения. Однако следует особо подчеркнуть, что большинство из этих наблюдений алертного типа. То есть роботизированный оптический телескоп по быстрому триггеру с борта гамма-обсерватории наводится на объект за время порядка нескольких десятков секунд, при этом если всплеск достаточно длинный к этому времени он еще "горит". Абсолютно другой и пока что менее распространенный класс наблюдений это синхронные

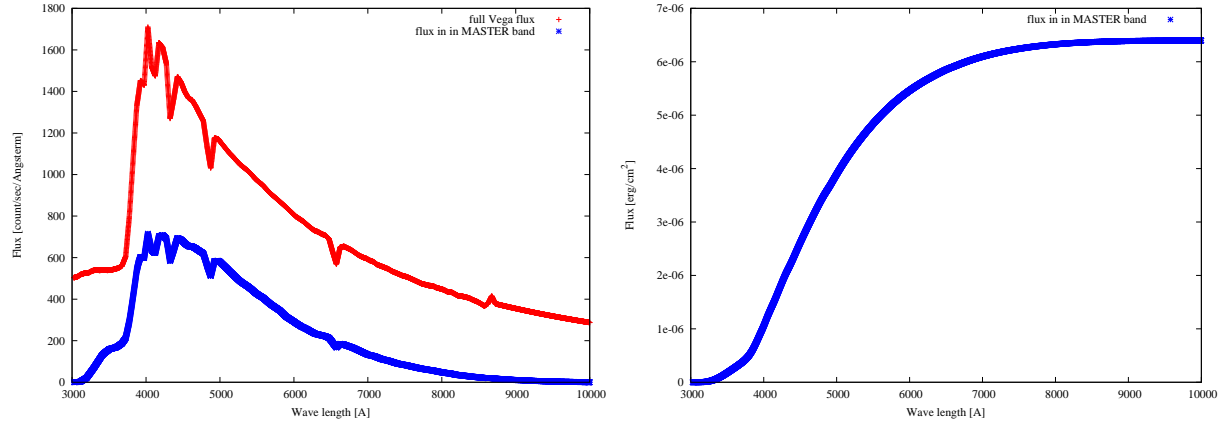


Рис. 15: На левом рисунке представлен спектр Веги и он же через фильтр системы МАСТЕР VWF-4. На правом приведена кумулятивная кривая этого спектра в энергетических единицах

наблюдения со сверхширокопольных камер. Пожалуй самым восхитительным примером наблюдением такого рода являются наблюдения собственного излучения GRB 080319B [Racusin, Kargov et al., 2008]. К этому же классу принадлежат и описываемые здесь наблюдения всплеска GRB081102.

Синхронные наблюдения имеют большое преимущество перед алертными как минимум по двум причинам. Во-первых, в алертных наблюдениях сильно присутствуют эффекты наблюдательной селекции. Действительно, алертным образом можно увидеть собственное излучение только от достаточно длинных всплесков никак не короче 30-40 секунд, ибо задержки (обработка на борту гамма-телескопа, передача сигнала на землю, пересылка информации до конкретной обсерватории, перенаведение телескопа) достаточно велики, и каждая из них порядка 10 сек. А во вторых, что плавно вытекает из первого, алертным образом никогда не удастся зафиксировать оптическое собственное излучение от коротких гамма всплесков. Заметим, что такого излучения вообще никогда еще не только никто никогда еще не видел, но даже не было ни единого верхнего предела.

4.2 Энергетические калибровки фотометрической полосы установки МАСТЕР-VWF4.

Для того, что-бы иметь возможность говорить о блеске объектов не только в терминах звездных величин, но и в энергетических величинах, попробуем откалибровать "нуль-пункт" системы МАСТЕР-VWF4, а именно выясним, какой поток энергии (в $erg/cm^2/s$) приходит от звезды 0-й величины: Веги. Как уже было показано выше полоса системы МАСТЕР-VWF4 соответствует фильтру V каталога Tycho2. Спектр Веги и он же свернутый с кривой пропускания объектива, а так же кривой чувствительности ПЗС матрицы, представлен на рис. 15. Проинтегрировав по всему спектру получим окончательно, что от звезды нулевой величины полосе МАСТЕР-VWF4 приходит

$$F^{Vega} = \int_0^{\infty} f_v(\nu) \cdot \nu \cdot d\nu = 6.4 \pm 0.1 \cdot 10^{-6} erg/cm^2/s \quad (12)$$

Интегрирование производилось численным образом методом трапеций с шагом в 1 ангстрем.

4.3 Синхронные наблюдения гамма-всплесков на сверхширокопальной установке MASTER VWF4 Кисловодск

Камеры MASTER VWF каждую ночь проводят мониторинг ночного неба с целью обнаружения оптических транзиентов. Сейчас существует 2 моды работы. В первой моде, предназначенной для поиска оптических транзиентов, по 2 камеры смотрят в одну и ту же точку неба для реализации схемы совпадений (о которой говорилось выше см. рис 11,12), а во второй все камеры максимально разведены, что обеспечивает размер поля зрения более чем 4000 кв. градусов. Второй режим специально предназначен для синхронного наблюдения гамма-всплесков.

Далее я подробнее остановлюсь на всплесках GRB081102 и обнаруженными аппаратом Fermi GRB081130B, GRB081215.

4.3.1 Гамма всплеск GRB081102

Длинный гамма-всплеск GRB081102 (см. рис 16) был зарегистрированный космической гамма-обсерваторией Swift 2 ноября 2008 года 17:44:39.5 UT [gcn8470]. Несмотря на то, что это был типичный длинный ($T_{90} = 40sec$) гамма-всплеск, немедленной телеграммы с борта аппарата Swift не последовало, а пришла она лишь через 15 минут, что не позволило автоматизированным телескопам провести ранние наблюдения. Однако сверхширокопальная система MASTER VWF-4 с полем зрения ок. 4000^2 краем своего поля зрения видела весь квадрат ошибок всплеска, что и позволило произвести синхронные наблюдения. MASTER VWF-4 в данный момент работал в моде со сведенными камерами поэтому квадрат ошибок этого всплеска попал сразу же в 2 канала. Наблюдения области всплеска в обоих каналах без каких-либо временных разрывов проводились 2 часа до и 7 часов после гамма-всплеска.

К сожалению оптического излучения от данного всплеска зарегистрировать не удалось (см. рис. 16, 17). Возможно это связано с большим поглощением в данном направлении (см. форм. (14)). Тем не менее получен очень солидный (для синхронных(!) наблюдений со сверхширокопальных камер) верхний предел $V_{grb081102} < 13.0^m$ являющийся на сегодня самым высоким синхронным пределом в истории.

Рассмотрим всплеск GRB081102 в сравнении с GRB080319B, от которого было зарегистрировано яркое собственное оптическое излучение $V = 5.3^m$ ([Racusin, Karov et al., 2008]) . Рассмотрим отношение F_{opt}/F_{γ} (где F полный поток в оптике и гамма соответственно) для обоих всплесков.

Оценим $F_{opt}^{grb081102}$. Широкопальной системой мастер был поставлен предел $V > 13^m$. Для учета поглощения в фильтре V можно воспользоваться простой эмпирической формулой [Засов, Постнов,2006]

$$\tau_V = 5.2 \cdot 10^{-22} N_H \quad (13)$$

Соответственно, зная что в области GRB081102 $N_H = 4.9 * 10^{21} cm^{-2}$ [Kalberla et al. 2005], используя определение оптической толщи и формулу Погсона получим, что

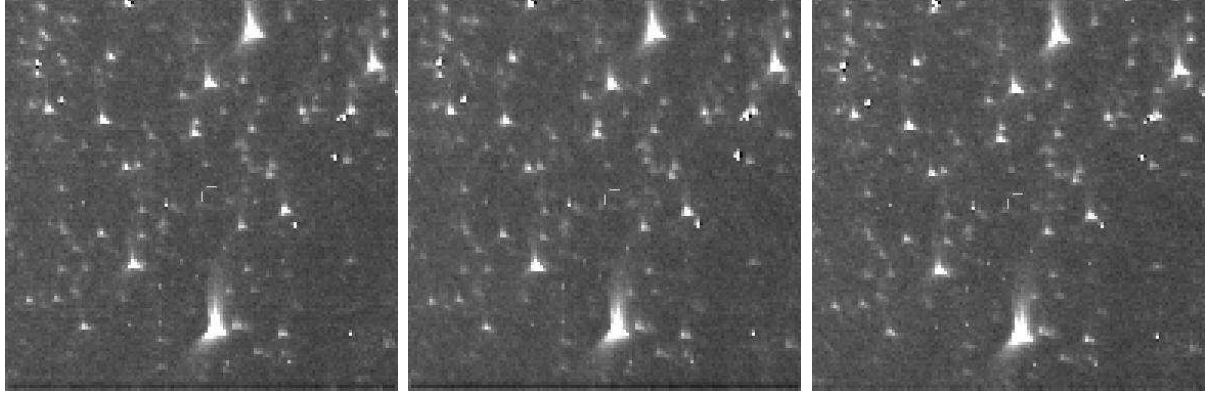


Рис. 16: GRB081102. Суммарные изображения за 30 сек. до (слева), во время (в центре), и через 30 сек. после (справа) гамма-всплеска. Каждый снимок сумма 12 кадров по 6 с южного и по 6 с северного каналов. Таким образом экспозиция на каждом кадре 1 минута. Видеозапись этого всплеска можно посмотреть здесь: [http : // observ . pereplet . ru / images / GRB081102 / grb _ film . html](http://observ.pereplet.ru/images/GRB081102/grb_film.html)

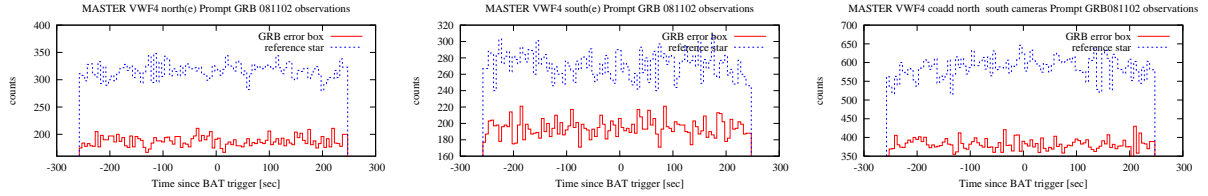


Рис. 17: GRB081102. Красным цветом показана шумовая дорожка с северной, южной камер и с обеих камер сразу в квадрате ошибок GRB081102. Синим показана находящаяся рядом звезда сравнения с $V_{ref} = 11.5^m$

$$\tau_V^{grb081102} = 5.2 \cdot 10^{-22} \cdot 4.9 \cdot 10^{21} = 2.548 \Rightarrow \delta m = 2.8^m \quad (14)$$

Как было показано выше расчетный поток от звезды 0^m (Веги) оптической полосе системы МАСТЕР VWF составляет $6.4 \cdot 10^{-6} \text{ erg/cm}^2$. Опять же применяя формулу Погсона и учитывая что $F_\gamma^{grb081102} = 2.3 \cdot 10^{-6} \text{ erg/cm}^2$ (GCN 8468) получим:

$$\frac{F_{opt}^{grb081102}}{F_\gamma^{grb081102}} < \frac{2.512^{m^{Vega} - (m^{grb081102} - \delta m)} \cdot F^{Vega} \cdot T_{90}^{grb081102}}{F_\gamma^{grb081102}} \quad (15)$$

$$\frac{F_{opt}^{grb081102}}{F_\gamma^{grb081102}} < \frac{2.512^{0-13.0+2.8} \cdot 6.4 \cdot 10^{-6} \text{ erg/s/cm}^2 \cdot 40s}{2.3 \cdot 10^{-6} \text{ erg/cm}^2} = \frac{1}{140}$$

Знак меньше используется потому, что для grb081102 получен только верхний предел Для всплеска GRB080319B $N_H = 9.2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ [Racusin, Kargov et al., 2008], то есть фактически в 5 раз меньше чем для GRB081102 $\tau_V^{grb080319B} = 0.48 \Rightarrow \delta m = 0.5^m$, что в принципе сопоставимо с ошибками измерений. =>

$$\frac{F_{opt}^{grb080319B}}{F_\gamma^{grb080319B}} = \frac{2.512^{m^{Vega} - (m^{grb080319B} - \delta m)} \cdot F^{Vega} \cdot T_{90}^{grb080319B}}{F_\gamma^{grb080319B}} \quad (16)$$



Рис. 18: GRB081130B. Последний error-box из телеграммы GCN8593. Координаты $\alpha = 00^h56^m20^s$ $\delta = +04^\circ12'$, радиус области ошибок $R = 3.5$ градуса [gcn8593]. Центр поля зрения камеры в которую попал всплеск $\alpha = 01^h01^m56^s.49$ $\delta = +19^\circ20'38''.88$. Размер поля зрения на рисунке $10^\circ \times 10^\circ$. Фильм доступен по адресу http://observ.pereplet.ru/images/GRB081130B/grb_film.html

$$\frac{F_{opt}^{grb080319B}}{F_{\gamma}^{grb080319B}} = \frac{2.512^{0-13.0+2.8} \cdot 6.4 \cdot 10^{-6} \text{erg/s/cm}^2 \cdot 50s}{8.1 \cdot 10^{-5} \text{erg/cm}^2} = \frac{1}{23}$$

Таким образом получаем, что в случае GRB081102 доля оптического излучения были как минимум в 6 раз меньше чем в случае grb080319B.

Результаты наблюдений опубликованы в GCN циркулярах: [E. Gorbovskoy et al., gcn8516] и [gcn8471].

4.3.2 Гамма всплеск GRB081130B

В отличие от всплеска GRB081102, настоящий всплеск был зарегистрирован космическим аппаратом FERMI. Обсерватория FERMI, в отличие от Swift, не является специализированной для наблюдения гамма-всплесков, поэтому установленная на борту аппаратура не позволяет определять координаты всплесков и точностью лучшей нескольких десятков квадратных градусов. Кроме того, сейчас она находится

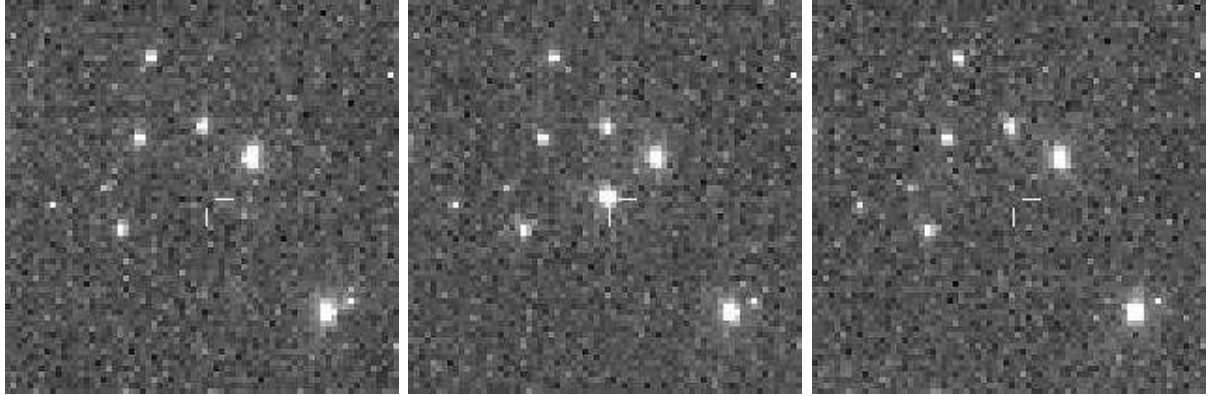


Рис. 19: Транзиентный объект найденный в одно время с GRB081130B по координатам $\alpha = 01^h 10^m 20^s$ $\delta = +18^\circ 44' 35''$ в 14 градусах от центра последней локализации. После детального рассмотрения объект оказался высоким спутником МОЛНИЯ давшим короткую вспышку.

еще на стадии докалибровки и имеются неисправленные систематические ошибки в координатах. Тем не менее FERMI имеет ряд преимуществ по сравнению со Swift. Во-первых, более современные приемники FERMI более чувствительны в целом и сейчас FERMI дает в 2-3 раза больше алертов чем Swift, а во-вторых, FERMI способен регистрировать более жесткое (до 10 МэВ) излучение и в отличии от Swift (до 300 кэВ) хорошо реагирует на короткие жесткие гамма всплески собственного излучения от которых еще никто не видел. Посему из-за большого поля зрения наблюдать синхронное излучение от алертов с обсерватории Ферми можно пока (да и скорее всего в будущем) только с помощью камер свехширокого поля, таких как МАСТЕР-VWF, Pi of the Sky и др.. Послесвечение можно в режиме обзора нескольких площадок пытаться найти на широкопольных инструментах типа МАСТЕР.

Этот гамма-всплеск был первым всплеском с обсерватории FERMI синхронно снятым системой МАСТЕР VWF4. Координаты и область ошибок многократно уточнялись (с характерным разбросом ± 10 градусов), но неизменно попадали в поле зрения наших камер. На рис 18 представлено место окончательной локализации гамма-всплеска. Область grb081130 также наблюдалась без временных промежутков за несколько часов до и несколько часов после гамма-всплеска.

Внутри error-box не было обнаружено хороших кандидатов. Однако учитывая, что координаты определенные обсерваторий FERMI (всплеск был зарегистрирован только ей, Swift, Konus-Wind, и Integral его не заметили) весьма не точны поиск транзиентов был произведен по всем кадрам. В 14 градусах от центра локализации синхронно с гамма-всплеском был найден прелюбопытнейший объект, очень похожий на гамма-всплеск (см рис. 19). Однако после детального анализа, при помощи разработанной с помощью В. Чазова программы расчета положений спутников было выяснено что этот транзиент соответствует высокоорбитальному спутнику МОЛНИЯ который изредка дает такие вспышки. Таким образом после суммирования 4-кадров и получения эффективной экспозиции 20 секунд ($T_{grb081130B} = 15 - 20$ сек. в разных каналах) снова был получен достаточно высокий верхний предел $V_{grb081130B} > 12^m.0$

Гамма-поток от GRB081130B составил $F_{\gamma}^{grb081102} = 1.5 \cdot 10^{-9} \text{ erg/cm}^2$. Прodelывая аналогичные (как в случае GRB081102) операции, без учета возможного поглощения

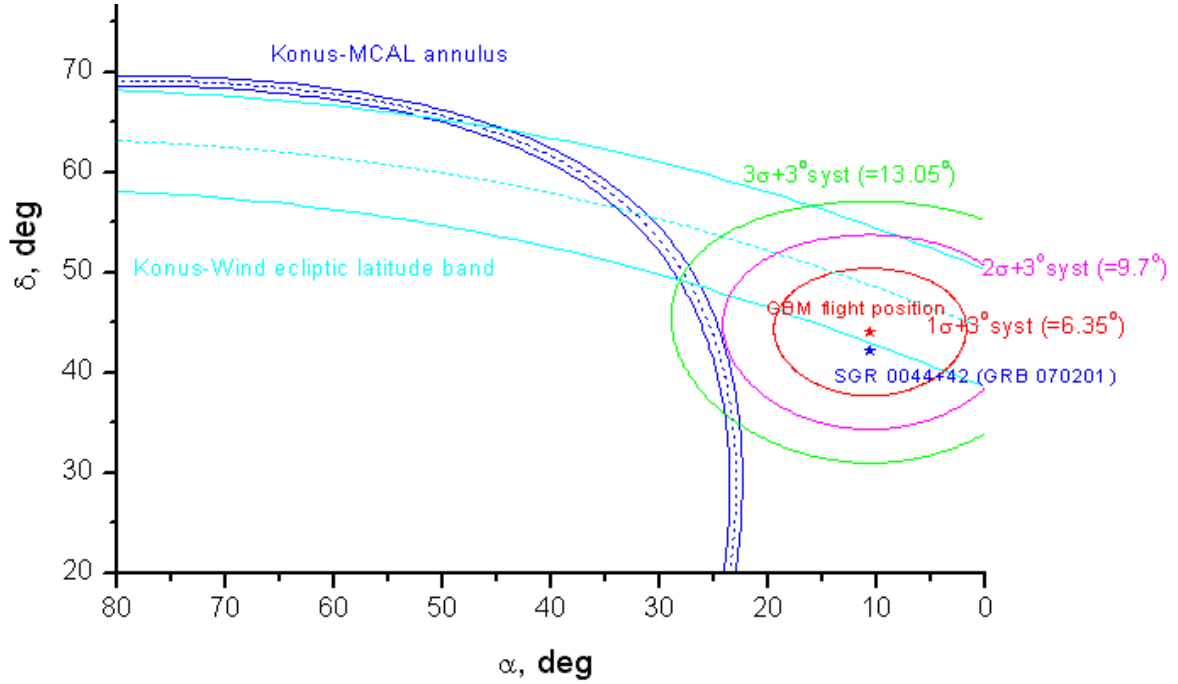


Рис. 20: Первая, в последствии отмененная, локализация GRB 081215. Вся область представленная на рисунке целиком (!) попадает в поле 4-х камер MASTER VWF. Ошибки координат FERMI носят статистический характер, поэтому представлены в виде кругов 1,2 и 3 σ соответственно. В качестве систематической ошибки FERMI выбрана максимальная из заявляемых - 3 градуса. Данные триангуляции в приватной беседе были любезно предоставлены В.Пальшиным.

получим что $F_{opt}^{grb081102} = 1.5 \cdot 10^{-9} \text{ erg/cm}^2$. Таким образом получим весьма солидное ограничение.

$$\frac{F_{opt}^{grb081102}}{F_{\gamma}^{grb081102}} < \frac{1}{1000} \quad (17)$$

Стоит однако же отметить, что из-за плохо оцениваемых систематических ошибок в определении координат обсерваторией ФЕРМИ существует не нулевая (порядка 5 – 10%) вероятность что этот всплеск вообще не попал в поле зрения наших камер. Результаты опубликованы в циркулярах [E. Gorbovskey et al., gcn8597, gcn8585]

4.3.3 История наблюдений гамма всплеск GRB081215

Очень мощный всплеск GRB081215 был обнаружен обсерваторией FERMI 15 декабря 2008 г в 18:48:36.85 UT. Также этот всплеск видели практически все находящиеся на орбите аппараты кроме Swift и Mars Odissey (с которого до настоящего времени просто не получены данные). После первых уточнений обсерватория FERMI давала координаты $\alpha = 004231 \quad \delta = +440401$ [FERMI trigger №251059717] с ошибкой в круге радиусом по $3\sigma R_{FERMI} = 13.05$ градуса и учетом систематической ошибки в 3 градуса, а позже, триангуляция с аппаратов Konus-Wind и SuperAgile кольцо с центром в точке $\alpha = 05^h 12^m 48^s$, $\delta = +17^{\circ} 34' 32''$ и радиусом $R = 51.547 \pm 0.508$ градусов (см.

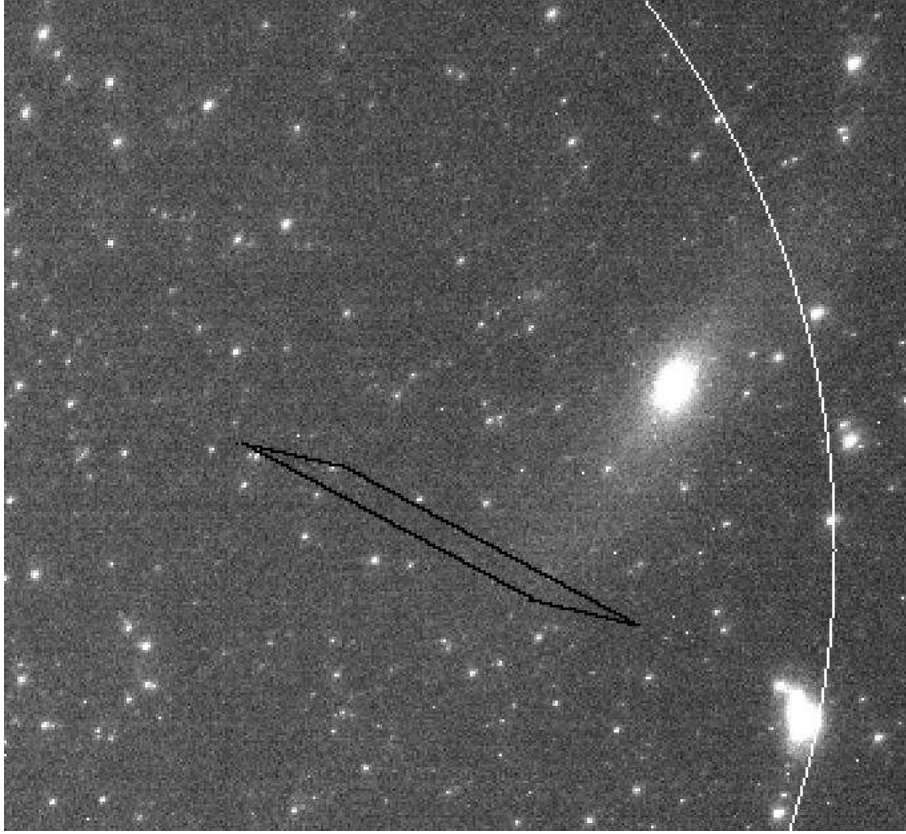


Рис. 21: Снимок синхронный с гамма всплеском grb081215. Черными линиями представлена локализация SGR 0044+42 [Gorbovskey et al., 2008], белой первый, не окончательный 1σ FERMI error-box. Фильм можно посмотреть здесь [http : //observ.pereplet.ru/images/GRB081215/grb_film.html](http://observ.pereplet.ru/images/GRB081215/grb_film.html)

рис 20). Вся эта огромная область синхронно и без временных разрывов была снята установками МАСТЕР VWF и был получен верхний предел $V > 11^m$

До появления триангуляции было видно (см. рис. 21) что даже в 1σ FERMI error-box попадает туманность Андромеды и обнаруженный в сентябре этого года SGR в ней [Mazets et al., 2008]. Мы сразу заподозрили связь SGR 0044+42 и GRB081215 [Gorbovskey et al., 2008]. Однако после триангуляции и определения спектра стало ясно, что это не SGR а обычный длинный всплеск, хотя он (при $T_{grb081215} = 5$ сек) и был похоже на короткий. Область триангуляции находилась достаточно далеко от центра определенного FERMI, но пересекалась с областью ошибок по 3σ . Самое удивительное, что при потоке $F_{grb081215} \sim 7 \cdot 10^{-5} \text{ erg/cm}^2$ [В.Пальшин] получалось фантастическое $\frac{F_{opt}^{grb081215}}{F_{\gamma}^{grb081215}} < \frac{1}{10^5}$, что просто невероятно!

Однако грустный ответ на этот вопрос пришел через пару дней уже после написания большей части этой главы. Оказалось, что автоматика FERMI приняла за гамма-всплеск отраженный от Земли сигнал, а реальные координаты всплеска разве что ни на полнеба (более 150 градусов) отстоят от сообщенных в первых телеграммах и уже не попадают в наше поле зрения. Не смотря на неудачу, эта история имеет важное поучительное значение: до тех пор, пока систематические ошибки на обсерватории Ферми не будут исправлены, во-первых, на кадрах синхронных с алертами



Рис. 22: Снимок с камеры МАСТЕР VWF синхронный с гамма всплеском grb081215. Белый круг первый, не окончательный 3σ FERMI error-box + 3 градуса систематической ошибки. Черные дуги результаты триагнуляции. Черный прямоугольник - локализация SGR 0044+42. Фильм можно посмотреть здесь [http : //observ.pereplet.ru/images/GRB081215/grb_film.html](http://observ.pereplet.ru/images/GRB081215/grb_film.html)

Ферми кадрах любой области неба имеет смысл внимательнее искать транзиенты ибо реальные и определенные координаты не всегда, но иногда, могут отличаться на десятки градусов; и во-вторых, на более узкопольных телескопах типа МАСТЕР для поиска послесвечения стоит организовывать обход квадрата ошибок с радиусом хотя бы на 3-5 градусов больше заявленной.

5 Универсальная модель "центральной машины" космологических гамма-всплесков всех типов

Гамма-всплески – самые мощные источники электромагнитного излучения во Вселенной - связываются с процессом коллапса, протекающим в экстремальных условиях быстрого вращения и мощного магнитного поля ([Woosley,1993]). Последующее за основным импульсом свечение в рентгеновском и других диапазонах излучение – афтерглюо(послесвечение) – получило прекрасное объяснение как результат торможения релятивистского джета сформировавшегося в результате мгновенного точечного взрыва, с системой головной и обратной ударной волны ([Meszaros & Rees, 1997]).

Однако после 3 лет работы космической обсерватории Swift ([Gerhles, 2006]) становится очевидным, что временное поведение многих гамма-всплесков демонстрирует такие детали (прекурсоры, ранние оптические вспышки), которые никак не согласуются с моделью точечного мгновенного взрыва и свидетельствуют о долгом (по сравнению с продолжительностью гамма-всплеска) времени работы центральной машины ([Gerhles, 2006],[Wang, Xiang-Yu & Meszaros, P., 2007]). Недавно открытый гамма-всплеск GRB 070110 продемонстрировал экстраординарное поведение в рентгеновском диапазоне, когда в течение 20 000 секунд наблюдалось неизменное рентгеновское свечение – рентгеновское плато ([Troja, 2007]). Аналогичное поведение показывает гамма-всплеск GRB 050904. Для всплеска GRB060926 роботом телескопом МАСТЕР была обнаружена ранняя (прим. через 70 сек. после гамма-всплеска) оптическая вспышка. Синхронно наблюдалась вспышка и в рентгеновском диапазоне. Стоит отметить что в целом вспышки у гамма-всплесков наблюдаются часто, однако значительно позже (через часы и дни после всплеска), ранние вспышки явление уникальное [Lipunov Kornilov Gorbovskoy, et al 2008].

Такое поведение демонстрирует долговременную активность центральной машины и служит ключом к выяснению механизма ее работы. Нами показано, что наблюдаемые свойства плато получают естественное объяснение в модели спинара – квазиравновесного коллапсирующего объекта равновесие, которого поддерживается равенством центробежных и гравитационных сил, а эволюция определяется его магнитным полем. Более того, оказывается, что в течение часа рентгеновские телескопы фиксировали излучение объекта размеры которого меньше Шварцшильдовского радиуса! Спинар- парадигма имеет прозрачное физическое содержание, которое открывает путь к успешному пониманию гамма-всплесков и сопутствующих событий, и позволяет свести их многообразие к двум физическим параметрам - начальному моменту вращения и начальному магнитному полю.

Длительная активность центральной машины гамма-всплесков предсказывалась ранее ([Липунова, 1997], [Липунова,Липунов 1998]) как результат возникновения в процессе коллапса быстровращающегося квазистатического объекта равновесие которого поддерживается центробежными силами - спинар парадигма. Время жизни спинара определяются, скоростью диссипации вращательного момента вследствие взаимодействия магнитного поля спинара с окружающей плазмой. В этом суть спинар парадигмы. Возникновение спинарной парадигмы восходит к 60 годам прошлого века, когда стали ясны важность учета магнитовращательных эффектов в процессе коллапса. Спинары впервые рассматривались в связи с проблемой энерговыделения и эволюции квазаров ([Хойл и Фаулер]; [Ozernoy,66]; [Озерной Усов,73]) и проблемой

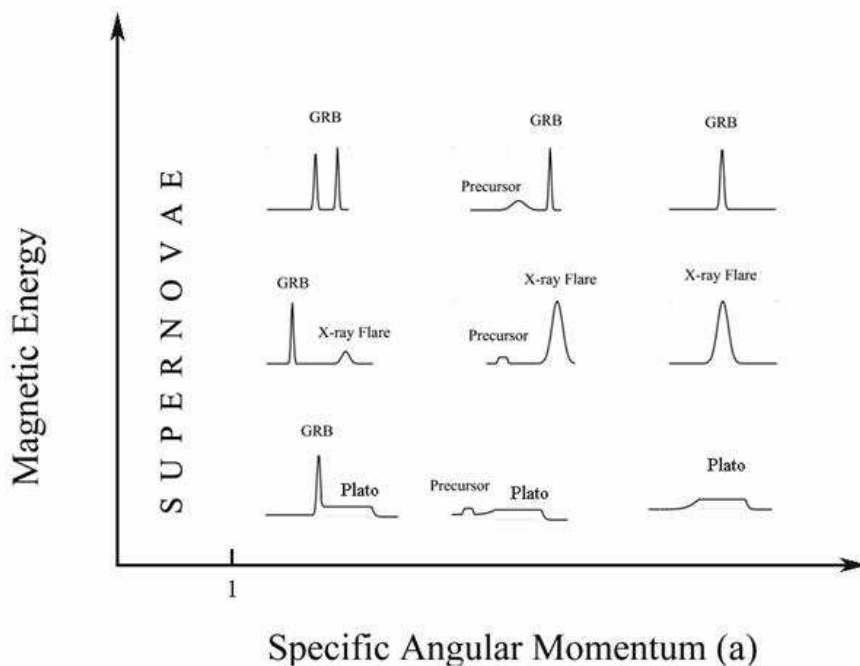


Рис. 23: Классификация гамма-всплесков в рамках спинар-парадигмы. При слабом магнитном поле и большом вращательном моменте (правый нижний угол) первая вспышка будет слабой (велик центробежный барьер) и мягкой. Затем следует медленный коллапс (магнитное поле слабо) приводящий к слабой рентгеновской вспышке. При малом вращательном (левый нижний угол) моменте энергия выделяемая центробежном барьере велика и первая вспышка будет выглядеть как гамма-всплеск, а вторая вспышка соответствующая коллапсу спинара будет по-прежнему слабой и мягкой и проявит себя как далекая рентгеновская вспышка. Далее, при еще большем магнитном поле, вторая вспышка приближается к гамма-всплеску, растет ее энергия и она становится сама частью гамма-всплеска (левый верхний угол). При движении вправо возрастает момент и первый всплеск теряет энергию становится прекурсором близким ко второму, который при сильном поле становится мощным гамма-всплеском. Коллапс ядра с эффективным параметром Керра меньше 1 приводит к вспышке сверхновой.

сброса оболочки сверхновых звезд ([Бисноваты-Коган,71], [LeBlanc Wilson,70]).

Мы, как и другие авторы считаем, что явление гамма-всплеска связано с коллапсом быстровращающегося ядра массивной звезды или слиянием релятивистских звезд (нейтронных звезд и черных дыр). В первом случае обширная оболочка и предшествующий звездный ветер обеспечивают похожее на сверхновую поведение самого всплеска и его послесвечения (как правило это длинные, с характерным временем более 2 секунд всплески). Во втором все происходит практически в вакууме и всплески оказываются как правило короткими, а послесвечения слабыми.

Ниже мы предлагаем физически прозрачную качественную модель спинара, учитывающую все релятивистские эффекты и прекрасно, без привлечения дополнительных гипотез, объясняющую явление плато, близких рентгеновских вспышек и прекурсоров.

Спинар может образоваться двумя путями: в результате столкновения двух ней-

тронных звезд ([Липунова, 1997]) или вследствие коллапса ядра массивной звезды. Образование неустойчивого железного ядра связано с исчерпанием топлива для термоядерных реакций в результате эволюции массивной звезды массой более 10 масс Солнца. Его коллапс обычно приводит к явлению сверхновой звезды, частота появления которых ($1/20$ в год на 10^{11} Солнечных масс) прекрасно согласуются с частотой рождения массивных звезд в галактиках (функцией Солпитера). Энерговыведение и мощность таких взрывов невелика, что связано с быстротечностью самого коллапса и наличием обширной массивной оболочки. Основная энергия выделяется в нейтрино (при коллапсе в нейтронную звезду), а в случае особенно большой массы энергия затягивается вместе с веществом под горизонт событий образующейся черной дыры. Поэтому как правило мощность энерговыведения в максимуме едва достигает 10^{44} эрг/с.

Однако, если ядро обладает быстрым вращением и магнитным полем, прямой коллапс становится невозможным. Такая ситуация может возникнуть на поздних стадиях эволюции двойных системах, когда образуется двойная гелиевая звезда с периодом обращения менее 1 суток (Тутуков). Частота таких событий на два порядка ниже ($1/10^4$ в год и 10^{11} солнечных масс. (см. Bogomazov, Lipunov, Tutukov, 2007), так что быстровращательный коллапс является скорее исключением. Эта частота неплохо согласуется с частотой регистрации гамма-всплесков если учесть, что излучение гамма-всплеска узконаправлено с углом раскрытия $\Omega^j \sim 0.1$. Расчеты слияния нейтронных звезд приводит к темпам $\sim 10^{-4}$ в год на 10^{11} масс Солнца (Lipunov et al., 1987).

Рассмотрим магнитовращательный коллапс ядра звезды, имеющего массу M_{core} и эффективный параметр Керра ([Thorne,86])

$$a_0 \equiv \frac{I\omega_0 c}{GM_{core}^2} \quad (18)$$

где $I = kM_{core}R_0^2$ – момент инерции ядра, ω – угловая скорость вращения, c и G – скорость света и постоянная тяготения, k – безразмерная константа, которую для простоты мы примем равной единице.

При сохранении вращательного момента ядра (что, конечно, будет нарушено в нашем сценарии) величина a остается постоянной. Но в любом случае, поскольку черная дыра не может иметь параметр Керра больше единицы, прямой коллапс в такой ситуации невозможен.

Пусть α_m – отношение магнитной энергии ядра U_m к его гравитационной энергии $\alpha_m \equiv \frac{U_m}{GM_{core}^2/R_A}$. Полную магнитную энергию можно записать через среднее магнитное поле B пронизывающего спинар $U_m = \frac{B^2}{8\pi} \frac{4}{3}\pi R^3 = \left(\frac{1}{6}\right) B^2 R^3$. Отметим, что в приближении сохранения магнитного потока $BR^2 = const$ отношение магнитной и гравитационной энергии остается постоянным в течение коллапса: $\alpha_m = const$ и $U_m \propto R^{-1}$.

Поскольку начальный параметр Керра $a_0 > 1$, прямое образование черной дыры невозможно и процесс коллапса разбивается на несколько важных этапов (см. рис. 24:1). После потери устойчивости начинается практически свободное падение с характерным временем $T_A = \sqrt{\frac{R_A^3}{GM_{core}}} \sim 100s$ где R_A начальный радиус ядра звезды. В процессе коллапса гравитационная энергия практически не излучается, а переходит в кинетическую, вращательную и магнитную энергию ядра. Легко видеть, что вра-

щательная энергия растет быстрее гравитационной $U_{spin} \approx I\omega^2/2 \propto R^{-2}$ и коллапс останавливается (см рис. 24:1:В) вблизи радиуса, определяемого равенством центробежной и гравитационной сил: $\omega^2 R_B = \frac{GM_{core}}{R_B^2}$. Откуда следует, что начальный радиус спинара примерно равен $R_B = a^2 GM_{core}/c^2 = a^2 R_g/2$. При этом выделяется половина гравитационной энергии:

$$E_B = \frac{GM^2}{R_B} - \frac{GM^2}{2R_B} \approx -\frac{GM^2}{2R_B} = -\frac{1}{2a^2} M_{core} c^2 \quad (19)$$

Вспышка в силу осевой симметрии должна быть направлена по оси вращения и иметь угол раскрытия Ω_B . Если $a_0^2 \leq 100$ энергия первого взрыва значительно превышает энергию связи оболочки звезды и релятивистский джет легко выходит наружу.

Длительность этой стадии определяется временем выхода джета на поверхность и характером высвечивания, определяемый структурой первичного джета и оболочки и лежит в диапазоне от нескольких до сотен секнд. Характер спектра будет определяться гамма-фактором джета ([Wang, Xiang-Yu & Meszaros, P., 2007]). После окончания гамма-всплеска, «рана» на теле звезды не затягивается. Образовавшейся в ее недрах спинар начинает терять момент вращения вследствие магнитной вязкости и излучать свою вращательную энергию. Подобно тому как спутник увеличивает свою скорость при торможении в верхних слоях атмосферы, спинар увеличивает свою угловую скорость вращения. По мере уноса вращательного момента спинар сжимается $d(I\omega)/dt = -U_m$. Характерное время диссипации вращательного момента $t_C \sim \frac{I\omega}{U_m} \sim \frac{GM_{core} a_0^3}{c^3 \alpha_m \kappa t}$. При этом увеличивается скорость вращения и светимость спинара не только не уменьшается, а даже нарастает $L = -\omega d(I\omega) = U_m \omega \propto R^{5/2}$. Без учета релятивистских эффектов кривая блеска спинара имеет вид:

$$L_D = \frac{M R g^2 \omega}{\alpha M c^2} \sim \frac{\alpha_m c^5}{G} \quad (20)$$

Пока $t \ll t_c$, светимость практически постоянна и равна $L_{plato}(\max) \sim \frac{\alpha_m c^5}{a_0^3 G}$! Таким образом, модель спинара даже в ньютоновском приближении предсказывает плато, параметры которого оцениваются двумя последними формулами. При приближении радиуса спинара к гравитационному радиусу начинают сказываться эффекты общей теории относительности. В частности, начинает исчезать магнитное поле коллапсара в полном соответствии с теоремой об отсутствии волос у черной дыры (??). Изменение магнитного поля в приближении дипольного момента было впервые просчитано Гинзбургом и Озерным, (1965) для невращающейся черной дыры. Расчет эволюции дипольного магнитного поля для вращающегося тела (в керровской метрике) был проделан Kramer(1984), Manko and Sibgatullin (1992). Результаты этих расчетов приближенно аппроксимируются законом

$$U_m \sim U_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \frac{\xi(x_0)}{\xi(x)} \quad (21)$$

где $\xi(x) = \frac{x_{\min}}{x} + \frac{x_{\min}^2}{2x^2} + \ln \left(1 - \frac{x_{\min}}{x} \right)$ а x_{\min} радиус горизонта для текущего параметра Керра. Вторым важным эффектом является увлечение систем отсчета в метрике вращающегося тяготеющего тела и релятивистские эффекты, связанные с близостью

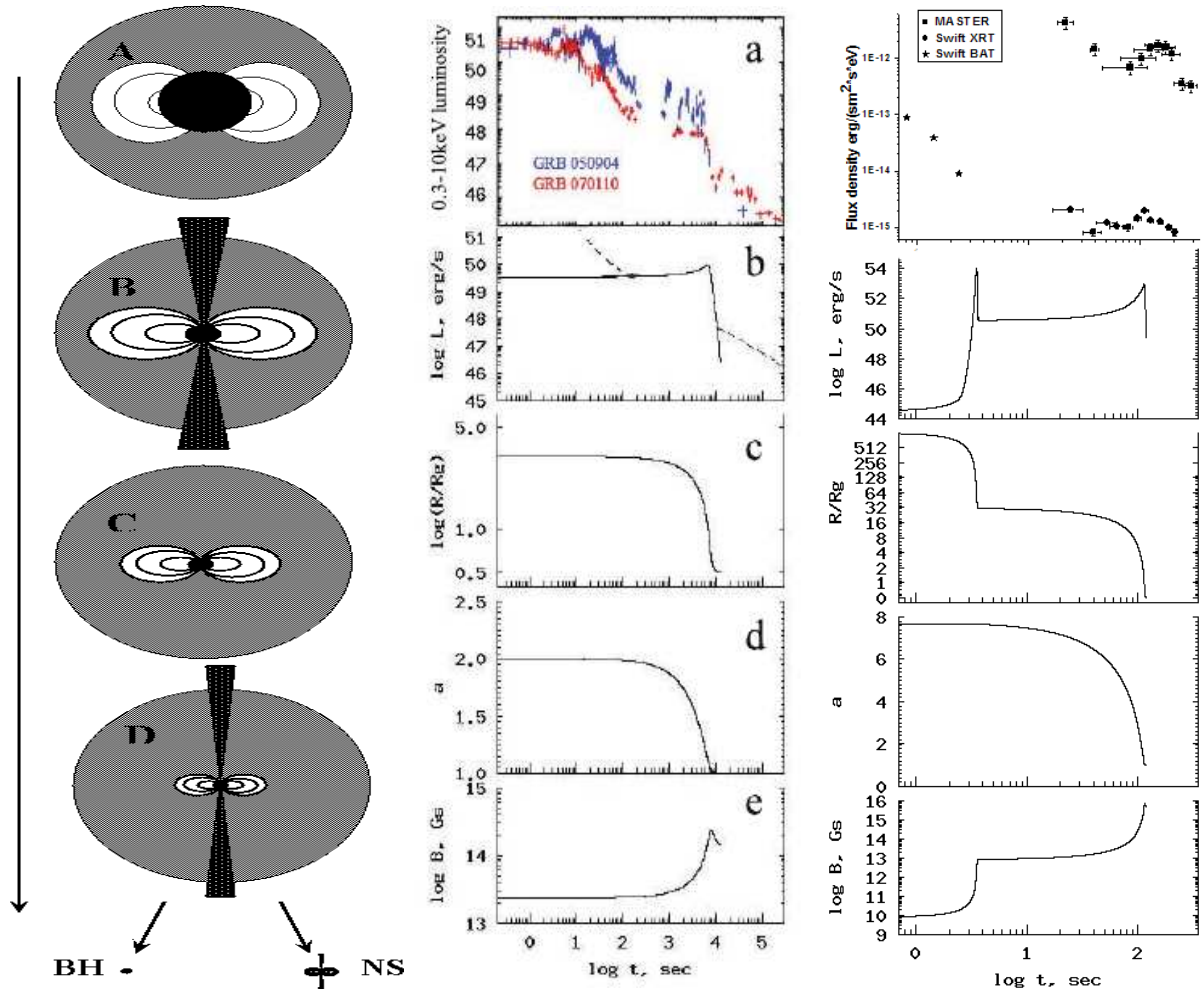


Рис. 24: На правом рисунке схема коллапса быстро вращающегося намагниченного ядра массивной звезды. Серым показана оболочка звезды, а черным ее ядро. Перед коллапсом звезда имеет размер порядка нескольких радиусов Солнца, а ее железное ядро в сто раз меньше (стадия А). В процессе коллапса быстрее всего нарастают центробежные силы и в результате образуется спинар (стадия В). Его образование сопровождается анизотропным выбросом энергии. Из-за диссипации вращательного момента спинар тормозится и сжимается (стадия С). Светимость его нарастет и образуется новый джет, достигающий своего максимума энерговыделения вблизи гравитационного радиуса. В зависимости от массы ядра образуется либо нейтронная звезда либо предельно вращающаяся черная дыра. В центре и слева расчеты для всплесков с длинным рентгеновским плато (в центре) и ранней вспышки на примере обнаруженной нами у GRB090826.

горизонта событий. Для учета последних двух эффектов воспользуемся постньютоновским приближением для центробежной силы в метрике Керра (Mukhopadhyay, B., 2002):

$$g = \frac{GM}{x^3} \frac{(x^2 - 2ax + a^2)^2}{(\sqrt{x}(x-2) + a)^2} \quad (22)$$

Кривая энерговыделения приобретает характер вспышки, которая описывается

приближенной системой элементарных уравнений:

$$\begin{aligned}
\omega^2 R &= g \\
d(I\omega)/dt &= -U_m \\
dt_\infty &= dt/\alpha \\
L_\infty &= \alpha^2 L_C = \alpha^2 U_m \omega
\end{aligned}
\tag{23}$$

Где L_∞ и dt_∞ светимость и время в системе бесконечно удаленного неподвижного наблюдателя, α функция длительности – отношение хода часов опорных наблюдателей к темпу течения мирового времени на экваторе метрики Керра (Thorne et al., 1986):

$$\alpha = \sqrt{\frac{x^2 + a^2 - 2x}{x^2 + a^2}}
\tag{24}$$

которая на горизонте предельно вращающейся черной дыры $R- > R_g/2$ превращается в ноль $\alpha- > 0$.

По мере нарастания светимости, в какой-то момент начинают выполняться условия пробоя оболочки. Появляется второй джет мощность которого достигает своего максимума вблизи гравитационного радиуса. При этом эффективный керровский параметр стремится к предельному для предельновращающейся керровской дыры. Характерная светимость спинара вблизи горизонта событий описывается диссипацией вращательной энергии вблизи гравитационного радиуса: $L_D = MR_g^2 \omega / \alpha M c^2 \sim \alpha_m c^5 / G$. Напомним, что $c^5 / G = 4 \cdot 10^{59}$ erg/s – так называемая естественная светимость. Характерное время вблизи максимума: $T_D \sim \frac{M_{core} R_g^2 \omega}{U_m} = GMa^3 / c^3 \alpha_m$

Дальнейшая судьба звезды зависит от ее массы. Если масса превышает предел Оппенгеймера-Волкова для нейтронной звезды, звезда коллапсирует в черную дыру. В противном случае образуется нейтронная звезда, которая продолжает светить по магнитодипольной формуле характерной для радиопульсаров $L \approx \mu^2 \omega / R_l^3 \propto t^{-2}$ где μ – дипольный магнитный момент, $R_l = c/\omega$ – радиус светового цилиндра (Lipunov, 1992). Спинар парадигма позволяет свести наблюдаемое разнообразие гамма-всплесков, прекурсоров и вспышек к двум параметрам: магнитное поле – начальный вращательный момент (23).

На 24:2 приведено точное решение системы уравнений, которое прекрасно согласуется с наблюдаемыми явлениями плато для GRB 070110 и GRB 050904 а на 24:3 для наблюдаемой с робот-телескопа МАСТЕР синхронно с XRT ранней вспышки у GRB 060926. Для примера рассмотрим случай с плато. Наилучшим образом оба плато описываются в модели коллапса ядра $7M_\odot$, начальной доле вращательной энергии и начальном Керровском параметре $a = 4.3$. Для этих параметров изложенный выше сценарий выглядит следующим образом. Потеря устойчивости ядра быстровращающейся звезды привело к образованию спинара и выделению энергии $(1/2a^2)M_{core}c^2 \cdot 10^{53}$ erg. Вследствии сложного процесса выхода на поверхность релятивистского джета с большим гамма-фактором возник гамма-всплеск длившийся около 100 сек. После выхода на поверхность джета возникло послесвечение (t^{-2}) (Kumar, P. & Panaitescu, A. 2000). Затем, после 300 секунды основная энергия излучается передней ударной волной (bow shock) которая тормозится в звездном ветре звезды-прародителя (t^{-1}) (Troja et al.(2007)). При этом спинар продолжает излучать практически с постоянной светимостью которая проявилась на 1000 секунде,

когда существенно погасло послесвечение. Далее светимость остается практически постоянной. После небольшого повышения светимости вследствие сжатия спинара плато обрывается, радиус спинара становится меньше гравитационного радиуса и спинар оказывается внутри эргосферы будущей черной дыры! Из-за резкого возрастания релятивистского гравитационного красного смещения и эффектов исчезновения магнитного поля резко падает светимость. Около 900 секунд светимость спинара продолжает падать пока интенсивность не станет меньше светимости передней ударной волны. Все это время спинар находится в эргосфере $R_g/2 < R < R_g$. Похоже, человечество пока никогда не забиралось так глубоко к горизонту событий! Поскольку реальные гамма-всплески находятся от нас на больших красных смещениях, то время по земным часам удлиняется как $(1+z)$ и мы получаем возможность исследовать коллапс внутри эргосферы в течении до 2500-3600 сек, то есть практически в течении одного часа! На рис 24:2 Показана синтетическая кривая блеска с учетом послесвечения $L = C_1 t^{-2} + C_2 t_{-1} + L_\infty$, которая хорошо согласуется с наблюдаемой кривой блеска.

6 Заключение

В работе рассмотрены очень перспективные широкопольные и сверхширокопольные системы. В первой главе приведен подробный обзор таких систем, описаны основные возможности и результаты. Подробно описана система MASTER VWF, созданная в Кисловодске и Иркутске, при непосредственном участии автора. Описана аппаратура, задачи, методика наблюдений и взаимосвязи. Во второй главе рассмотрены общие принципы первичной обработки изображений в широких и сверхшироких полях. В ней рассмотрены методы астрометрии и фотометрии в широких полях, а так же выделения звезд с изображений. Поскольку основные идеи в данной главе схожи как для широких так и для сверхшироких полей в ней затронуты не только сверхширокопольные камеры (1000 кв. градусов), но и телескопы типа МАСТЕР (6 кв. градусов). Третья глава целиком посвящена поиску и анализу транзиентов со сверхширокопольных камер. Описаны критерии классификации транзиентов и алгоритмы программы выделения и анализа полосок от спутников и метеоров. В четвертой главе изложены результаты наблюдения собственного излучения гамма-всплесках на сверхширокопольных камерах. Подробно рассмотрены синхронные наблюдения гамма-всплесков GRB081102, GRB081130B и GRB081215.

Также вкратце изложена предложенная автором (совместно с научным руководителем) теоретическая модель центральной машины гамма-всплесков в основу которой положена спинар-парадигма. На примере сверхдлинного рентгеновского плато показано как в рамках спинар-парадигмы можно объяснить сопутствующие явления на кривых гамма-всплесков.

Кроме того в процессе работы созданы программы автоматизации наблюдений и автоматического выбора объектов, драйвера и обвязки для используемых устройств под OS Linux. Ведутся работы по созданию единой сети широкопольных и сверхширокопольных телескопов МАСТЕР. Об исключительной важности такого рода сетей писал в последней своей работе выдающийся астрофизик современности Б.Пачинский.

По суммарным результатам работы опубликовано 13 статей в ведущих астрономических журналах (ApJL, MNRAS, Astronomical Nachristen, Астрономический

журнал, ПАЖ и др.), а так же порядка 100 GCN циркуляров.

В заключении хотелось бы искренне поблагодарить А.А. Белинского, В.Г. Корнилова и Н.И. Шацкого за ценные советы и постоянную помощь на протяжении всех 5-ти лет выполнения работы. А так же рецензента данной работы, К.А. Постнова за помощь в исправлении ошибок и оформлении.

Список литературы

- [Lipunov Gorbovskey 2007] Lipunov, V.; Gorbovskey, E. The Astrophysical Journal, Volume 665, Issue 2, pp. L97-L100. An Extra Long X-Ray Plateau in a Gamma-Ray Burst and the Spinar Paradigm
- [Lipunov Gorbovskey, 2008] Lipunov, V. M Gorbovskey, E. S. Spinar paradigm and the central engine of gamma-ray bursts Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 383, Issue 4, pp. 1397-1412.
- [Lipunov Kornilov Gorbovskey, et al 2008] Lipunov, VM; Kornilov VG.; Gorbovskey ES et al Astronomy Letters, Volume 34, Issue 3, pp.145-151 Discovery of an optical flare from GRB 060926 by the MASTER robotic telescope: Possible formation of a marginally rotating black hole
- [Липунов и др, 2007] В.М.Липунов, В.Г.Корнилов, Е.С.Горбовской Астрономический журнал, 2007, т.84, N12, с. 1110-1134 "Оптические наблюдения гамма-всплесков, открытие сверхновых звезд 2005bv, 2005ee, 2006ak и поиск транзиентов на телескопе-роботе МАСТЕР"
- [E. Gorbovskey et al., gcn8516] E. Gorbovskey, V. Lipunov, V.Kornilov, et al., gcn8516
- [gcn8471] V. Lipunov, V.Kornilov, E. Gorbovskey, et al., gcn8471
- [Cwiok et al. 2007] M. Cwiok, W. Dominik, K. Malek et al., Astrophysics and Space Science Vol. 309, 531
- [Onda et al. 2006] Onda, K.; Tamagawa, T.; Tashiro, M. et al. Il Nuovo Cimento B, vol. 121, Issue 12, p.1549-1550
- [Racusin et al, 2008] Racusin, J. L.; Karpov, S. V. et al. .2008 Nature.455..183R
- [gcn8470] Mangano et al., GCN Circ 8470
- [gcn8593] A.J. van der Horst, GCN Circ 8593
- [E. Gorbovskey et al., gcn8597] E. Gorbovskey, V. Lipunov, V.Kornilov, et al., GCN Circ 8597
- [gcn8585] E. Gorbovskey, V. Lipunov, V.Kornilov, et al., gcn 8585
- [Racusin, Karpov et al., 2008] Racusin, J. L.; Karpov, S. V. et al. .2008 Nature.455..183R
- [Panaitescu, 2008] A. Panaitescu, astro-ph 2008

- [Засов, Постнов,2006] Засов, Постнов учебник Общая астрофизика,2006
- [Kalberla et al. 2005] Kalberla et al. 2005
- [Mazets et al., 2008] E. P. Mazets arXiv:0712.1502v1 10 Dec 2007
- [Gorbovskey et al., 2008] E. Gorbovskey, V. Lipunov, V.Kornilov, et al. GCN CIRCULAR 8674
- [Бисноваты-Коган,71] Bisnovaty-Kogan, G.S. The Explosion of a Rotating Star As a Supernova Mechanism. *Sov. Astron.* 14, 652-655 (1971).
- [Gerhles, 2006] Gehrels, N., et al. A new γ -ray burst classification scheme from GRB060614. *Nature* 444, 1044-1046 (2006).
- [Ginzburg Ozernoy,64] Ginzburg, V.L. & Ozernoy, L.M. On gravitational collapse of magnetic stars. *ЖЭТФ* 47, 1030-1040 (1964).
- [Хойл и Фаулер] Hoyle, F. & Fowler, W.A. On the nature of strong radio sources. *MNRAS* 125, 169-176 (1963).
- [Kramer,84] Kramer, D. Kerr solution endowed with magnetic dipole moment. *Class.Quantum Grav.* 1, L45-L50 (1984).
- [LeBlanc Wilson,70] LeBlanc, J.H. Wilson, J.R. A Numerical Example of the Collapse of a Rotating Magnetized Star. *Astrophys. J.* 161, 541-551 (1970).
- [Lipunov,92] Lipunov, V.M. *Astrophysics of Neutron Stars*, Springer-Verlag, Berlin, 322 p. (1992).
- [Липунова, 1997] Lipunova, G.V. A burst of electromagnetic radiation from a collapsing magnetized star. *Astronomy Letters* 23, 84-92 (1997).
- [Липунова,Липунов 1998] Lipunova, G.V. & Lipunov, V.M. Formation of a gravitationally bound object after binary neutron star merging and GRB phenomena. *Astron. Astrophys.* 329, L29-L32 (1998).
- [Manko & Sibgatullin] Manko, V.S. & Sibgatullin, N.R. Kerr metric endowed with magnetic dipole moment. *Class.Quantum Grav.* 9, L87-L92 (1992).
- [Meszaros & Rees, 1997] Meszaros, P. & Rees, M.J. Optical and Long-Wavelength Afterglow from Gamma-Ray Bursts. *Astrophys. J.* 476, 232-237 (1997).
- [Ozernoy,66] Ozernoy, L.M. A Theory for the Formation and Structure of Quasistellar Radio Sources. *Soviet Astronomy* 10, 241-250 (1966).
- [Озерной Усов,73] Ozernoy, L.M. & Usov, V.V. Supermassive Oblique Rotator: Electrodynamics, Evolution, Observational Tests. *Astrophys. and Space Sci.* 25, 149-194 (1973).
- [Thorne,86] Thorne, K.S., Price, R.H. & Macdonald, D.A. *Black Holes: The Membrane Paradigm*, ew Haven, CT, Yale University Press, 380 p. (1986).

- [Troja, 2007] Troja, E., et al. Swift observations of GRB 070110: an extraordinary X-ray afterglow powered by the central engine. (astro-ph 0702220), *Astrophys. J.*, in press (2007).
- [Woosley,1993] Woosley, S. Gamma-ray bursts from stellar mass accretion disks around black holes. *Astrophys. J.* 405, 273-277 (1993).
- [Wang, Xiang-Yu & Meszaros, P., 2007] Wang, Xiang-Yu & Meszaros, P. GRB Precursors in the Fallback Collapsar Scenario (astro-ph 0702441) (2007).