

## ИССЛЕДОВАНИЕ 130 ОБЛАСТЕЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ НА СЕТИ МАСТЕР В ТЕЧЕНИЕ ЧЕТЫРЕХ ЛЕТ НАБЛЮДЕНИЙ

<sup>1,2</sup>О.А. Ершова, <sup>2</sup>Е.М. Минкина, <sup>2</sup>П.В. Балануца

<sup>1</sup>Астрономическая обсерватория ИГУ, Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия  
oliteya@gmail.com

<sup>2</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва, Россия

## FOUR-YEAR OBSERVATIONS OF 130 LOCALIZATION AREAS OF GAMMA-RAY BURSTS BY MASTER ROBOTIC NET

<sup>1,2</sup>O.A. Ershova, <sup>2</sup>E.M. Minkina. <sup>2</sup>P.V. Balanutsa

<sup>1</sup>Astronomical Observatory of ISU, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia  
oliteya@gmail.com

<sup>2</sup>Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию гамма-всплесков: наблюдению их полей ошибок на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ [Lipunov et al., 2010], анализу раннего оптического излучения источников и сравнению их характеристик в оптическом, рентгеновском и гамма диапазонах. Представлены результаты анализа ранних наблюдений 130 областей локализации гамма-всплесков, проведенных на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ за 2011–2017 гг. в полностью автоматическом режиме. Из 130 гамма-всплесков в первые 60 с после срабатывания триггера на орбитальных обсерваториях Swift, Fermi, INTEGRAL, MAXI, Lomonosov, Konus-Wind, МАСТЕР навелся на 51, являясь мировым лидером по первым наведениям. Полная автоматизация наблюдений и собственное программное обеспечение обработки изображений в режиме реального времени позволили нам получить уникальные данные о раннем оптическом излучении, сопровождавшем гамма-всплески.

**Abstract.** This paper studies gamma-ray bursts: observation of error boxes on the MASTER SAI MSU Global Robotic Net in 2011–2017, analysis of early optical emission of sources in multiwavelength band on 130 GRB's localization areas. MASTER-Net is the world's first by pointings on 60s interval of trigger work. Fully automated observations in real time and software created by us allowed us to obtain unique data on early optical emission followed by gamma-ray bursts.

### ВВЕДЕНИЕ

Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ является лидером ранних наведений в исследовании областей локализации гамма-всплесков. Автоматический режим наблюдений позволяет получать в обработку до нескольких десятков и даже сотен тысяч источников и программно проводить их отождествление в соответствии с каталогами новых объектов, определяя движущиеся и стационарные объекты. Ключевыми особенностями сети являются идентичное приемное оборудование каждой обсерватории МАСТЕР, распределение по долготам и широтам земного шара (10 обсерваторий на настоящий момент), обеспечение быстрого наведения (десятки градусов в секунду) по целеуказанию, собственное программное обеспечение для обработки широкополных изображений в режиме реального времени (1–2 мин после считывания с матрицы) с выделением новых или вспыхивающих объектов [Gorbovskey et al., 2010]. Каждая обсерватория МАСТЕР — это быстрый (скорость позиционирования 30°/с) двойной широкополный (2×4 кв. град.) и сверхширокополный (2×384 кв. град.) цветной (BVRI+PP) поляризационный роботизированный телескоп. Ориентация поляризационных фильтров предполагает отсчет угла от направления на север против часовой стрелки: МАСТЕР-Амур — 45° камера 210, 135° камера 211; МАСТЕР-Тунка — 0° камера 206, 90° камера 208; МАСТЕР-Кисловодск — 0°, 45° камера 200, 90°, 135° камера 202, MASTER-SAAO — 135° камера 212, 45° камера 213.

Получены уникальные данные о раннем оптическом излучении, сопровождавшем гамма-всплески

GRB 110801A, GRB120106A, GRB 120404A, GRB 120811C, GRB 120907A, GRB 121011A, GRB 130122A, GRB 130907A, GRB 131030A, GRB 131125A, GRB 140103A, GRB 140108A, GRB 140129B, GRB 140206A, GRB 140304A, GRB 140311B, GRB 140512A, GRB 140629A, GRB 140801A, GRB140907A, GRB 140930B, GRB141028A, GRB 141225A, GRB 150210A, GRB 150211A, GRB 150301B, GRB 150323C, GRB 150404A, Fermi trigger 449861706, GRB 150403A, GRB 150413A, GRB 150518A, GRB 150627A, GRB 151021A, GRB 151215A, GRB 160104A, GRB 160117B, GRB 160131A, GRB 160227A, GRB 160425A, GRB 160611A, GRB 160625B, GRB 160804A, GRB 160910A, GRB 161017A, GRB 161117A, GRB 161119A.

В работе рассмотрены результаты наблюдений в оптическом (МАСТЕР) и рентгеновском (Swift-BAT, XRT) диапазонах для следующих гамма-всплесков: GRB 130907A, GRB 120811C, GRB 110801A, GRB 120404A, GRB 140129B, GRB140311B, GRB 160227A, а также области локализации для нескольких десятков гамма-всплесков с обнаруженными в них оптическими транзиентами [Ershova et al., 2020]. Далее для примера приведен блок наблюдений для трех активных гамма-всплесков.

### GRB 130907A

Детектор Swift-BAT (15–150 кэВ) орбитальной обсерватории Swift зарегистрировал гамма-всплеск GRB 130907A 07.09.2013 в 21:14:13 UT. Рентгеновский детектор Swift-XRT (0.3–10 кэВ, рентгеновский телескоп) начал наблюдения через 66 с после

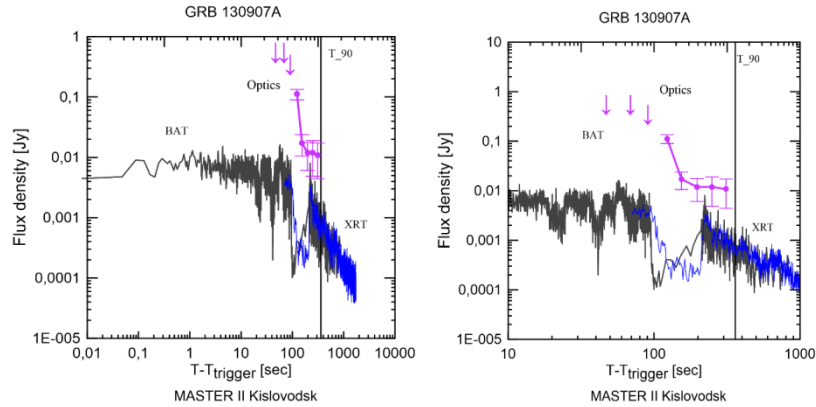


Рис. 1. Поведение яркости GRB 130907A в зависимости от времени по данным разных обсерваторий

триггера в 21:42:19.3 UT, оптический телескоп Swift-UVOT — через 77 с после триггера (длительностью 150 с). Первые детальные изображения вспышки были получены телескопом UVOT в окрестности точки с координатами, определенными Swift-XRT:  $\alpha=14^{\text{h}}23^{\text{m}}34.03^{\text{s}}$ ;  $\delta=+45^{\text{d}}36^{\text{m}}27.1^{\text{s}}$ ; здесь и далее эпоха J2000. Блеск объекта при наблюдениях в белом свете составил 15.55 зв. вел. Телескоп-робот МАСТЕР-Кисловодск навелся за 18 с в автоматическом режиме на координаты Swift-BAT в 21:42:00 UT и начал наблюдения (через 43 с от момента срабатывания триггера). Наблюдения были выполнены в двух перпендикулярных поляризациях, оптический транзиент присутствует на четырех первых изображениях с экспозициями 20, 30, 40, 50 с, что дало возможность программному обеспечению МАСТЕР автоматически обнаружить и подтвердить новый объект 15 зв. вел. в максимуме (оптический источник гамма-всплеска), сформировать и отправить телеграмму GCN. Вследствие большого зенитного расстояния ( $86^{\circ}$ ), на котором наблюдалась область локализации гамма-всплеска, объект виден на одиночных кадрах на протяжении первых пяти минут, в дальнейшем — только на суммарных кадрах. Отношение сигнал/шум во время съемки менялось в пределах от 3 до 6 (в зависимости от текущих метеоусловий). Наблюдения МАСТЕР в оптическом диапазоне выполнены до момента 360 с от начала события — в этот период Swift-BAT зарегистрировал 90 % энергоделения вспышки.

Телескоп NOT (Nordic Optical Telescope) провел наблюдения транзиента с координатами RA, DEC (2000)=14 23 34.08+45 36 26,7, обнаруженного МАСТЕР и Swift-UVOT, измерив красное смещение  $z=1.238$ , что соответствует расстоянию 0.05 Гпк (при постоянной Хаббла 66.93).

Несмотря на значительное зенитное расстояние, на котором велись наблюдения, мы получили детализированную кривую блеска (рис. 1), которая позволяет корректно сравнивать результаты МАСТЕР и SWIFT. Провал, заметный на трех кривых в рентгеновском, гамма- и оптическом диапазонах, позволяет утверждать, что излучения всех трех видов возникли одновременно и имеют общую природу. Можно предположить, что оптическое и рентгеновское, а также ультрафиолетовое и инфракрасное

излучения в данном случае являются частью послесвечения или переизлучения нагретого вещества, окружающего коллапсирующий объект.

### GRB 160227A

В 19:32:08 UT 27.02.16 гамма-рентгеновская обсерватория SWIFT обнаружила GRB 160227A [Siegel et al., 2016]. Swift-XRT начал наблюдения через 151.8 с после триггера. Уточненные координаты Swift-XRT для этого всплеска:  $\alpha=12^{\text{h}}59^{\text{m}}11.38^{\text{s}}$ ;  $\delta=78^{\text{d}}40^{\text{m}}36.5^{\text{s}}$ ; радиус квадрата ошибок 5 угл. сек. Телескоп Swift-UVOT продолжил наблюдения в оптическом диапазоне через 150 с после триггера, обнаружив послесвечение яркостью  $19.32 \pm 0.15$  mag.

GRB 160227A наблюдался практически всей сетью МАСТЕР, что позволило построить кривую блеска на основании данных нескольких телескопов.

Телескоп МАСТЕР-Урал автоматически навелся и начал наблюдения GRB 160227A через 115 с после триггера SWIFT в 19:34:93 UT. На первом кадре с экспозицией 20 с в квадрате ошибок SWIFT-BAT был найден оптический источник с координатами  $\alpha=12^{\text{h}}59^{\text{m}}14.13^{\text{s}}$ ;  $\delta=+78^{\text{d}}40^{\text{m}}44.2^{\text{s}}$  и яркостью  $17.3^{\text{m}}$ . В течение часа было получено несколько одиночных и суммарных кадров, на которых видно уменьшение яркости гамма-всплеска от  $17.0^{\text{m}}$  до  $19.1^{\text{m}}$  ( $m_{\text{lim}}=19.5$  mag). Наблюдения проведены в двух поляризациях.

Телескоп NOT начал наблюдения GRB 160227A 27.02.16 в 20:19:12 UT. Исследование спектра оптического послесвечения гамма-всплеска позволило оценить красное смещение  $z=2.38$  [Xu et al., 2016].

Из 130 гамма-всплесков, оптическое исследование которых проведено на телескопах-роботах МАСТЕР, 85 событий зарегистрированы на орбитальной обсерватории Swift (первыми опубликованы), 33 — на Fermi, 5 — на INTEGRAL; координаты для трех получены по IPN-триангуляции, 4 получены на MAXI.

Телескоп NOT начал наблюдения GRB 160227A 27.02.16 в 20:19:12 UT. Исследование спектра оптического послесвечения гамма-всплеска позволило оценить красное смещение  $z=2.38$ . При рассмотрении кривой блеска (см. рис. 2) отчетливо заметна корреляция двух провалов на 174с, 383с, 607с и 2647с и пиков на 231с, 485с, 935с, 1765с и 2789с. в трех диапазонах излучения, далее оптическая кривая неравно-

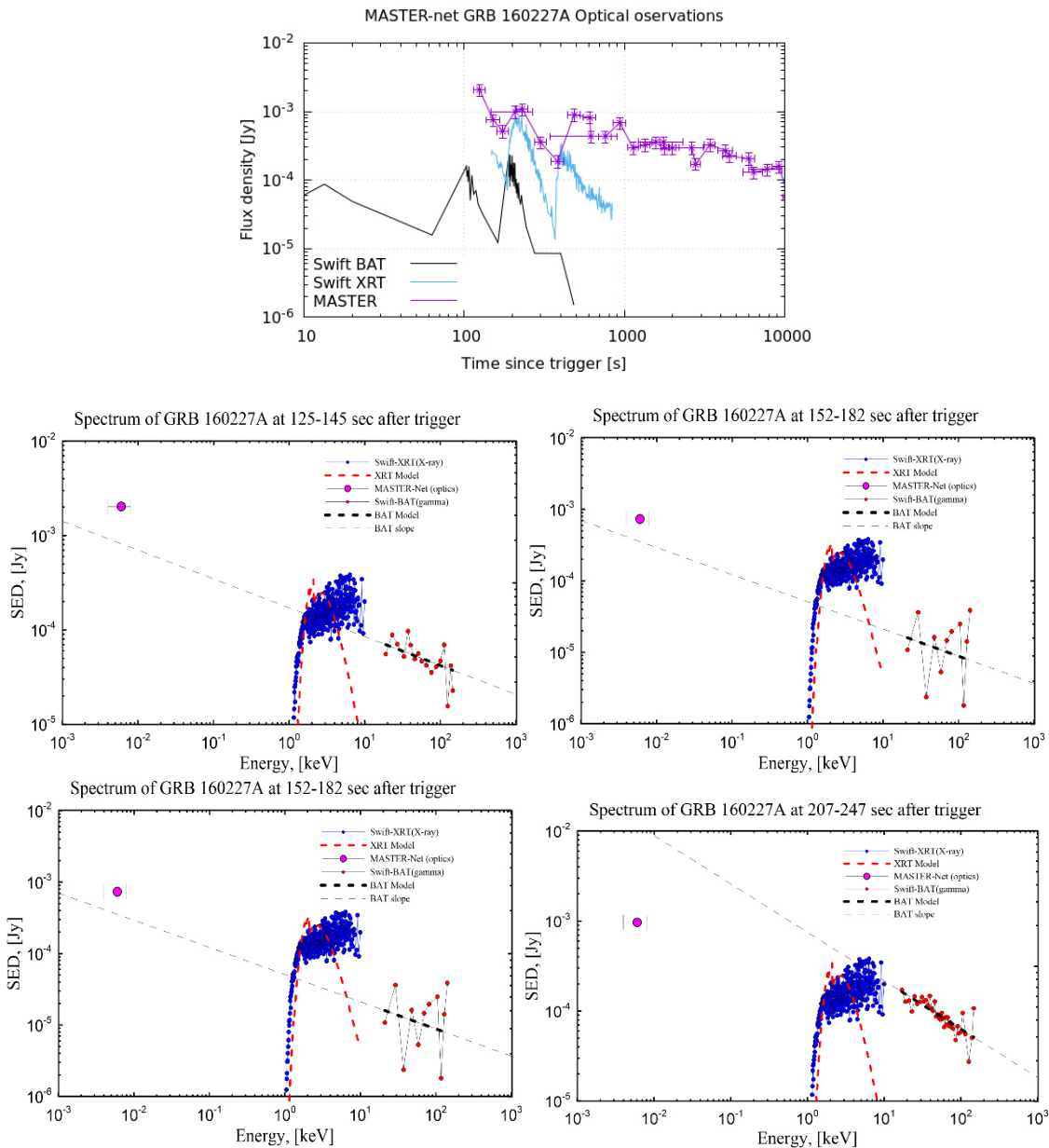


Рис. 2. GRB 160227A: кривая блеска с заметной корреляцией излучения трех типов от 100 до 1000 с, спектры GRB 160227A в интервале от 125 до 711 секунды после триггера

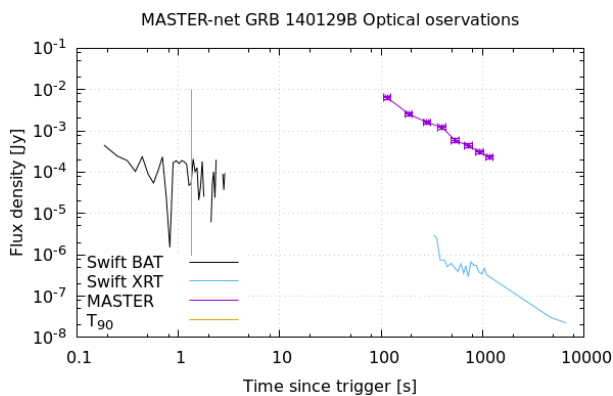


Рис. 3. Рентгеновская и оптическая кривые блеска для 140129B. Черная линия – гамма-излучение, фиолетовая – оптические точки, голубая – рентген, желтая – линия  $T_{90}$  мерно спадает, в то время как данные в рентгеновском после 900с и гамма после 500 с обрываются.

### GRB 140129B

На рис. 3 показаны рентгеновская и оптическая кривые блеска для 140129B.

Обсерватория SWIFT зарегистрировала (Swift-BAT) гамма-всплеск GRB 140129B в 12:51:09 UT [Bernardini et al., 2014]. Детектор XRT начал наблюдения в 12:52:16.5 UT через 67.1 с после триггера, обнаружив рентгеновский источник в квадрате ошибок BAT. Телескоп UVOT начал наблюдения через 356 с после триггера в белом свете с экспозицией 150 с, обнаружив оптический источник по координатам  $\alpha=21^{\text{h}}47^{\text{m}}01.67^{\text{s}}$ ;  $\delta=+26^{\text{d}}12^{\text{m}}22.9^{\text{s}}$  с  $m=16.9^{\text{m}}+0.1^{\text{m}}$  ( $1\sigma$ ) [Poleshchuk et al., 2014].

Телескоп МАСТЕР, расположенный в Тунке, навелся на гамма-всплеск GRB 140129B через 105 с после времени триггера 29.01.2014 в 12:52:54 UT. Яркость объекта составила около  $14^{\text{m}}$  в соответствии с координатами SWIFT-UVOT и Swift-XRT.

Оптическая кривая блеска затухает линейно с небольшим пиком на 366-й секунде (15.9 mag), индекс затухания в интервале от 108 с до 1330 с равен 1.467. Начиная с 1000 с, рентгеновская кривая спадает с тем же значением. Доверительный интервал для оси Y составляет  $0.75^m$ .

Анализ 130 гамма-всплесков показал, что среди оптических телескопов другие инструменты, исследующие GRB, не наводились быстрее, чем MASTER и Swift-UVOT.

Благодаря преимуществам телескопов-роботов Глобальной сети MASTER (полная роботизация наблюдений, автоматическое быстрое наведение телескопов, проведение исследований в поляризационных и WBVRI-фильтрах одновременно, обработка результатов в режиме реального времени, созданные нами интерактивные инструменты анализа астрономических данных для исследования быстропеременных и движущихся объектов) можно получать и исследовать детальные кривые блеска источников гамма-всплесков в оптическом диапазоне. Из 130 исследованных областей локализации оптический компаньон обнаружен в 44 случаях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bernardini M.G., et al. GRB 140129B: Swift detection of a burst with an optical afterglow. *GCN Circular Archive*. 2014. № 15765. 1.

Gorbovskoy E.S., et al. Transient detections and other real-time data processing from MASTER-VWF wide-field cameras. *Adv. Astronomy*. 2010. Vol. 2010. P. 62G.

Ershova O., et al. Early optical observations of gamma-ray bursts compared with their gamma- and X-ray characteristics using a MASTER global network of robotic telescopes from Lomonosov Moscow State University. *Astronomy Rep.* 2020. Vol. 64. P. 126.

Kornilov V.G., et al. Robotic optical telescopes global network MASTER II. Equipment, structure, algorithms. *Experimental Astronomy*. 2012. Vol. 33. P. 173K.

Lipunov V.M., et al. Master Robotic Net. *Adv. Astronomy*. 2010. Vol. 2010. Article id 349171. 6 p. DOI: [10.1155/2010/349171](https://doi.org/10.1155/2010/349171).

Poleshchuk V.A., et al., MASTER OT early light curve. *GCN Circular Archive*. 2014. № 15776. 1.

Siegel M.H., et al. Swift detection of a burst with an optical counterpart. *GCN Circular Archive*. 2016. № 19098. 1.

Xu D., et al. NOT Redshift. *GCN Circular Archive*. 2016. № 19109. 1.