

УДК 524.7

## Космические гамма-всплески: от наблюдений к физике

*А. Позаненко<sup>1</sup>, В. Румянцев<sup>2</sup>, М. Ибрагимов<sup>3</sup>, Е. Павленко<sup>2</sup>, Ю. Ефимов<sup>2</sup>, Д. Шаратов<sup>3</sup>,  
В. Горанский<sup>4</sup>, Е. Барсукова<sup>6</sup>, М. Андреев<sup>8</sup>, К. Антоноук<sup>2</sup>, О. Антоноук<sup>2</sup>, И. Асфандияров<sup>3</sup>,  
Г. Бескин<sup>4</sup>, В. Бирюков<sup>2,5</sup>, С. Бондарь<sup>7</sup>, В. Дорошенко<sup>2,5</sup>, Г. Корниенко<sup>9</sup>, В. Лозников<sup>1</sup>,  
Н. Меркулова<sup>2</sup>, Е. Сергеева<sup>2</sup>, С. Сергеев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт космических исследований РАН, Москва

<sup>2</sup> НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

<sup>3</sup> Астрономический институт им. Улугбека АН РУз, Ташкент

<sup>4</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз

<sup>5</sup> Крымская станция ГАИШ МГУ, Научный

<sup>6</sup> ГАИШ МГУ, Москва

<sup>7</sup> Станция наблюдения Нижний Архыз (НИИ ПП)

<sup>8</sup> Институт астрономии РАН, Москва

<sup>9</sup> Уссурийская астрофизическая обсерватория РАН, Горностаевский

Поступила в редакцию 14 марта 2006 г.

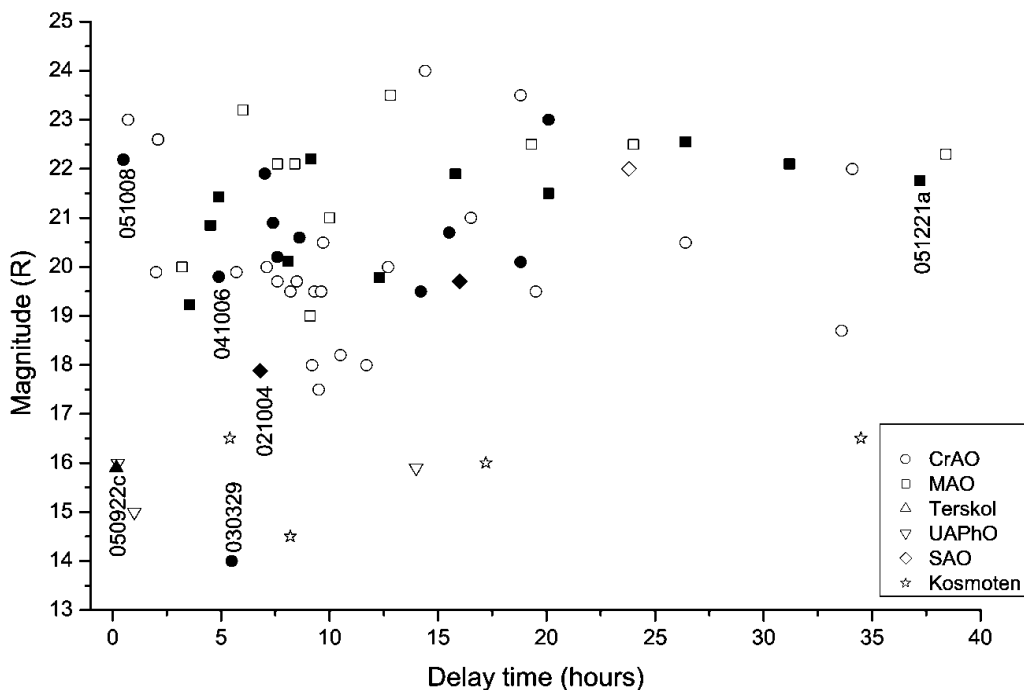
**Аннотация.** Представлены наблюдения проведенные в 2002-2005 гг. обсерваториями стран СНГ по программе поиска послесвечения космических гамма-всплесков. Приведены основные параметры регистрации событий и их статистика. Для всплесков GRB021004, GRB030329 и GRB041006 оценены пределы возможных спектральных вариаций начального периода послесвечения; рассмотрен GRB051008 с аномально малым отношением потоков в оптическом и рентгеновском диапазоне.

**Ключевые слова:** космические гамма-всплески, послесвечение

---

### 1 Наблюдения

Космические гамма-всплески (ГВ) – одна из нерешенных загадок современной астрофизики. Благодаря открытию оптической компоненты гамма-всплесков ученые приблизились к пониманию физики явления, определив, что расстояние до источников всплесков является космологическим – для самого далекого источника ГВ красное смещение  $z = 6.29$ . Однако детальной модели до сих пор не построено. Оптические наблюдения в настоящее время являются приоритетными в исследовании явления ГВ. Ученые СНГ активно участвуют в исследовании оптического компонента практически с момента открытия оптического послесвечения GRB970228 в 1997 г. (Коста и др., 1997; ван Парадайс и др., 1997). В работе Соколова и др. (1998) впервые была проведена многоцветная фотометрия ОТ этого всплеска. Наблюдения оптических транзиентов ведутся в КрАО с июня 2002 г. В феврале 2002 г. в САО были получены трехцветные наблюдения ОТ от GRB021004 (Barsukova et al., 2002). В марте 2003 г. в КрАО и на высокогорной обсерватории Майданак были проведены многоцветные наблюдения ОТ от GRB030329 (Ибрагимов и др., 2003), проведена пятицветная поляриметрия



**Рис. 1.** Наблюдения сети обсерваторий послесвечения космических гамма-всплесков в 2002-2005 гг. По горизонтальной оси отложено запаздывание от начала всплеска до начала наблюдений в часах, по вертикальной оси – блеск оптического транзита (ОТ) при его первоначальной регистрации (закрашенные символы) или верхний предел; большинство значений приведены в полосе R (см. табл.2). Представлены наблюдения *только* для ГВ: часть первоначальных сообщений о регистрации события впоследствии не были подтверждены. Из 56 наблюдавшихся ГВ в ~ 40% случаев был зарегистрирован ОТ. Для каждого всплеска показаны только первоначальные наблюдения: мониторинг ярких событий или повторные наблюдения для подтверждения ОТ могли состоять из серии наблюдений. В случае наблюдения одного и того же всплеска несколькими обсерваториями (табл. 2) приведены результаты наблюдения этих обсерваторий. Значение задержки более 20 часов соответствует наблюдениям областей локализации всплесков определенными триангуляцией с помощью сети космических аппаратов (IPN) со значительным запозданием или же неблагоприятными погодными условиями в первые сутки после всплеска. Отмечены события, упомянутые в тексте

ОТ от GRB030329 (Ефимов и др., 2003). Эти обсерватории составили основу сети СНГ для проведения регулярных наблюдений за послесвечением гамма-всплесков. Исследования оптического компонента гамма-всплесков сложны, так как невозможно предсказать заранее ни время появления источника, ни его координаты. Вероятность обнаружения послесвечения и дальнейшее его успешное исследование напрямую зависит от времени начала наблюдений: чем раньше начаты наблюдения после регистрации космическими обсерваториями гамма-всплеска, тем выше их эффективность, так как кривая блеска описывается, в целом, законом  $\sim t^\alpha$ , где  $t = T - T_0$  – время после начала всплеска в момент  $T_0$ , а  $\alpha = -(0.5 - 2)$ . Кроме того, яркие оптические события, связанные с ГВ, происходят редко, что ограничивает возможность исследования спектральных и поляризационных свойств ОТ. Результаты и телескопы, на которых проводились наблюдения в 2002–2005 гг., представлены в таблицах 1 и 2. Рисунок 1 показывает блеск зарегистрированных событий в зависимости от запаздывания до начала наблюдений после ГВ и позволяет оценить

эффективность применения телескопов с различной апертурой. В двух случаях (GRB050117 (Хилл и др., 2005) и GRB051008 (Румянцев и др., 2005)) найдены кандидаты в ОТ, в других – обнаружения были сделаны зарубежными обсерваториями. В остальных случаях в результате наблюдений был получен верхний предел. Повышение плотности наблюдений в интервале 5–10 часов (рис. 1) соответствует характерному времени готовности сети.

Если кривую блеска не разбивать на фазы, по-видимому соответствующие различным механизмам излучения (синхронное с излучением в гамма-диапазоне (*prompt emission*) – эта фаза равна длительности гамма-всплеска 0.01 – 100 с и фаза послесвечения (*afterglow*)), то наиболее ярким ( $V \sim 8.5$ ) зарегистрированным до сих пор является ОТ всплеска GRB990123 (Акерлоф и др., 1999). Распределение длительностей всплесков описывается бимодальным логарифмически нормальным распределением: одна мода соответствует “коротким” событиям с длительностью  $\lesssim 2$  с (примерно 25% от общего числа), другую составляют всплески с длительностью более 2 с (Мазец и др., 1981, Ковелиоту и др., 1993).

Самая ранняя успешная регистрация ОТ в наших наблюдениях началась через 10.5 минут для GRB050922C (Андреев и др., 2005). Таким образом, все представленные ниже результаты относятся к фазе послесвечения. Для регистрации оптического излучения синхронно с излучением в гамма-диапазоне необходимы роботизированные комплексы, с временем готовности менее характерной длительности всплеска (см. напр. Вестранд и др., 2002), или же синхронные наблюдения одной и той же площадки неба совместно с космическими гамма-телескопами (см. напр. Позаненко и др., 2003). Яркие события позволяют регистрировать послесвечение в течение месяцев после гамма-всплеска, однако в большей части наблюдения послесвечения – это широкополосная фотометрия, позволяющая получить несколько точек для кривой блеска, реконструируемой затем объединением наблюдений большого числа обсерваторий.

Таблица 1. Телескопы, на которых проводились наблюдения

Телескоп	Апертура	Детектор	Расположение
ЗТШ	2.6 м, F/4	CCD FLI IMG-1001E	Научный, КраО
АЗТ-11	1.25 м, F/12.8	UBVRI Photopolarimeter	‘,‘
АЗТ-8	0.7 м, F/4	CCD Apogee AP-7p	‘,‘
АТ-64	0.64 м, F/1.4	CCD SBIG ST-8	‘,‘
К-380	0.35 м, F/13	CCD SBIG ST-7	‘,‘
Цейсс-600	0.6 м, F/7.8	CCD FLI IMG-1001E	Научный, Крымская станция ГАИШ
АЗТ-22	1.5 м, F/7.74	CCD SITE	Майданак, Узбекистан
Цейсс-1 м	1 м, F/13	CCD K-585	САО РАН, Нижний Архыз
Цейсс-600	0.6 м	TV-CCD VS	Станция наблюдения Нижний Архыз (НИИ ПП)
40 см астрограф	0.4 м	CCD FLI IMG-6303	УАФО, Уссурийск
Цейсс-600	0.6 м, F/12.5	CCD S1C	пик Терскол, Институт астрономии РАН

## 2 Спектральная эволюция

В общепринятой модели послесвечения для большей части ГВ, так называемых “длинных” всплесков с длительностью более  $\sim 2$  секунд, релятивистский джет с гамма-фактором  $\Gamma$  и углом раствора  $\theta = 0.01 - 0.1$ , направлен в сторону наблюдателя. Степенная кривая блеска послесвечения испытывает излом, когда наблюдатель начинает видеть все основание конуса джета, в то время как до излома была видна лишь часть конуса, т.е. тогда, когда угол раствора конуса излучения релятивистских электронов  $\sim 1/\Gamma$  становится больше  $\theta$ . Предсказанный излом

Таблица 2. Результаты наблюдений в 2002-2005 гг.

(<sup>1</sup>)Название космической обсерватории зарегистрировавшей ГВ: (S)wift, (H)ETE-2, (I)NTEGRAL, IPN- Interplanetary Network; (<sup>2</sup>)дата наблюдения или *среднее* время (UT), на которое приведен результат, в долях календарного дня; (<sup>3</sup>)оценка блеска (без поправки за галактическое поглощение), ошибка измерения  $1\sigma$  указана в скобках, верхний предел приведен на уровне  $3\sigma$ ; результаты в таблице являются более точными и могут не совпадать с приведенными в GCN; (<sup>4</sup>)время до начала наблюдения ОТ (в часах) от момента регистрации ГВ; (<sup>5</sup>)указано где представлен или использован результат: число обозначает номер циркуляра GCN = GRB Coordinates Network (Бартелми и др.), \* – данная статья

GRB	КА <sup>1</sup>	Дата <sup>2</sup>	Обсерватория/ Телескоп	Результат <sup>3</sup>	$\Delta t^4$ час.	Ref <sup>5</sup>
020625	H	020625	CrAO/AZT-8	R>18.2	10.5	1444
020812	H	020812	CrAO/K-380	V>17.5	9.5	1496
		020812	Kosmoten/Z600	V>14.5	8.2	1479
		020813	SAO/Z1000	R>22	23.8	1527
020813	H	020813	SAO/Z1000	R=19.70(.25)	16	1528
021004	H	04.283	SAO/Z1000	R=17.88(.05) V=18.33(.07) B=18.87(.10)	6.8	1606 *
		08.400		R=20.9(.3)	57.6	1654
021016	H	021017	Kosmoten/Z600	V>16.5	34.5	-
		021017	CrAO/AZT-8	N/A	35.1	-
021113	IPN	021113	CrAO/AZT-8	V>18.0	9.2	1690
021204	H	021204	Kosmoten/Z600	V>16.5	5.4	-
		021204	CrAO/AZT-8	R>20.0	7.1	-
021211	H	021211	CrAO/AT-64	V>19.5	9.3	1752
030226	H	030226	CrAO/AT-64, AZT-8	R=19.5(.2)	14.2	1908
030227	I	030227	CrAO/AT-64, K-380	R>19.5	8.2	1926
030324	H	030324	CrAO/AT-64	R>20.0	7.1	1964
030328	H	28.78	CrAO/AT-64, K-380	R=20.9(.2)	6.7	1991
		29.75	MAO/AZT-22	R=22.1(.3),B=22.8(.4)	30.6	2192
030329	H	030329	CrAO/K-380	VRI photometry	5.71	2005 2028 2050
			AT-64	unfiltered photometry	6.23	2067 2083 2097
			AZT-11	UBVRI photo-/polarimetry	6.90	2144 2146 *
		Kosmoten/Z600	unfiltered 1/25 s time resoled photometry	7.55	2077 2084 2098	
			CrAO/AZT-8	R photometry	11.41	2160 2191 2219
		030330-030629	MAO/AZT-22	BVRI photometry		2288
030413	IPN	030414	CrAO/AT-64	N/A	35	-
		030414	Kosmoten/Z600	R>16	17.2	
030414	IPN	030414	CrAO/AT-64	N/A	9.3	-
030429	H	030429	CrAO/AT-64, K-380	R=20.20(.15)	7.6	2190 2218
030501	I	030501	CrAO/AT-64, K-380	R=20.1	18.8	2202
030823	H	030823	CrAO/AT-64	R>20.5	9.7	-
040319	H	040319	CrAO/AT-64	R>18.0	11.7	-
040403	I	040403	CrAO/AT-64	R>20.0	12.7	2565
040422	I	040422	CrAO/ZTSh	R>21.0	16.5	2580
040624	I	040625	CrAO/AT-64	R>18.7	33.6	2619
040827	I	040829	CrAO/AT-64	R>17.5	55.2	-
040924	H	040924	CrAO/K-380	R>19.7	8.48	2753
041006	H	06.6604	MAO/AZT-22	R=19.22(.03) V=19.76(.03), B=20.01(.02) I=19.05(.07)	3.55	2775 *
		06.8103	CrAO/AT-64	R=19.80(.26)	4.88	2798
		07.850	CrAO/AT-64	R>20.4		
		10.811	MAO/AZT-22	R=23.3(.3)		
		12.849		R>23.3		
		13.799		R>23.0		
041015	I	041016	CrAO/ZTSh	R>22.0	34.08	2828
050117	S	050117	MAO/AZT-22	R=23.6(.7)	3.2	2958, Hill et al.
		050406	CrAO/ZTSh	R>23.4		

050319	S	050319 050320 050321	MAO/AZT-22	R=20.12(.10)	8.1	3124 3140
050401	S	050401 050401	MAO/AZT-22 CrAO/AT-64 SAI/Z600	R=22.2(.2) R>19.7 R>19.5	9.1 27.6	3147, Watson et al
050408	H	050408 050409	CrAO/AT-64 MAO/AZT-22	R>19.9 R=22.55(.35)	2.0 26.4	3206, 3261
050410	S	050410	CrAO/AT-64	R>19.9	5.7	3229
050416	S	050416	MAO/AZT-22	R=20.85(.12)	4.5	3274
050509B	S	050509 050509 050509	MAO/AZT-22 CrAO/ZTSh	R>23.5 R>24.0 I>22.8	12.8 14.4 14.8	3455
050525A	S	050525 050525 30.812 31.780 31.296 050707	UAPhO/Z400 CrAO/AT-64 MAO/AZT-22 CrAO/ZTSh	R>15.9 R>19.5 R>23.1 R>23.6 R>24.1 I>21.8	14.0 19.5 139.2 163.2 151.1	3492 *
050712	S	050712 050712 050712	UAPhO/Z400 MAO/AZT-22 CrAO/AZT-8	R>15.0 R>19.0 R>19.5	1.0 9.1 9.6	3635
050713B	S	050713 050714 050715	MAO/AZT-22	R>23.2	6.0	3701
050802	S	02.659 02.783 03.676 04.963 05.670	MAO/AZT-22 CrAO/ZTSh MAO/AZT-22 CrAO/ZTSh MAO/AZT-22	R=18.92(.13) R=20.73(.03) V=20.92(.03), B=21.54(.04) I=20.34(.06) R=21.37(.18) R>23.0 V=23.5(.5) I=23.5(.3) R>22.0	5.65 8.60	3744 *
050803	S	050803 050804	CrAO/ZTSh	R>22.6	2.1	3760 3783
050813	S	050813	MAO/AZT-22	I>21.0	10.0	3857
050815	S	050816	MAO/AZT-22	R>22.5	24	3862
050824	S	0825.904 0903.814 0904.839 0916.825 1007.849 1107.736	MAO/AZT-22 CrAO/ZTSh MAO/AZT-22 CrAO/ZTSh	R=21.17(.09) R=22.68(.12) R=23.00(.08) R=22.8(.5) R=24.0(.3) R=23.94(.23)	20.1 236 261 524 1051 1794	3897 *
050904	S	050904	CrAO/ZTSh	R>23.5	18.8	3939
050922C	S	050922	Terskol/Z600	R=15.9(.07)	0.175	4016 4048
050922B	S	050922	UAPhO/Z400	R>16.0	0.25	4047
050908	S	050908	MAO/AZT-22	R=21.88(.25)	15.8	4049
051006	S	051007 051008.103	CrAO/ZTSh	R>20.5 R=22.20(.15)	26.4 52.8	4094
051008	S	051008	CrAO/ZTSh	R=22.19(.27)	0.5	4081 4087 *
051016B	S	051016	MAO/AZT-22	R=21.43(.24)	4.9	4185
051021A	H	051021	SAI/Z600	R=21.9(.2)	7.0	4159
051105	S	1105.60 1201.58	MAO/AZT-22	R>22.1 R>21.8	7.6	4349
051109A	S	051109	CrAO/AT-38	R=20.7(.2)	15.5	4273
051111	S	051111	MAO/AZT-22	R=19.78(.14) B>19.0	12.3	4307
051117B	S	051117	MAO/AZT-22	R>22.1	8.4	4308
051211B	I	051212 051217	MAO/AZT-22	R>22.5 R>22.9	19.3	4421
051221A	S	22.631	MAO/AZT-22	R=21.76(.13)	37.2	4613
051221B	S	051222	MAO/AZT-22	R>22.3	38.4	4612

(см. напр. Родс, 1997) был обнаружен по мере увеличения точности фотометрических наблюдений. Время появления излома  $t_b$  позволяет оценить угол раствора конуса джета. (В настоящее время излом регистрируется у большинства ОТ.) Затем ОТ продолжает степенное падение, но кривая блеска формируется не только степенным падением ОТ, но и возникающей сверхновой. В дальнейшем на месте ОТ наблюдается родительская галактика. (Эта схема упрощенно описывает поведение кривой блеска: обнаруживаются значимые отклонения от степенного падения на интервале 1–10 часов в начальный период 1–3 дня (напр. Липкин и др., 2004) и на интервале нескольких дней в заключительной фазе послесвечения (Матесон и др., 2003; Ибрагимов и др., 2003). Наиболее яркие события дают возможность проследить раннюю эволюцию цвета до момента, когда сверхновая начинает оказывать значительный вклад в формирование кривой блеска. Поэтому поиск изменения цвета является важной задачей диагностики механизма излучения.

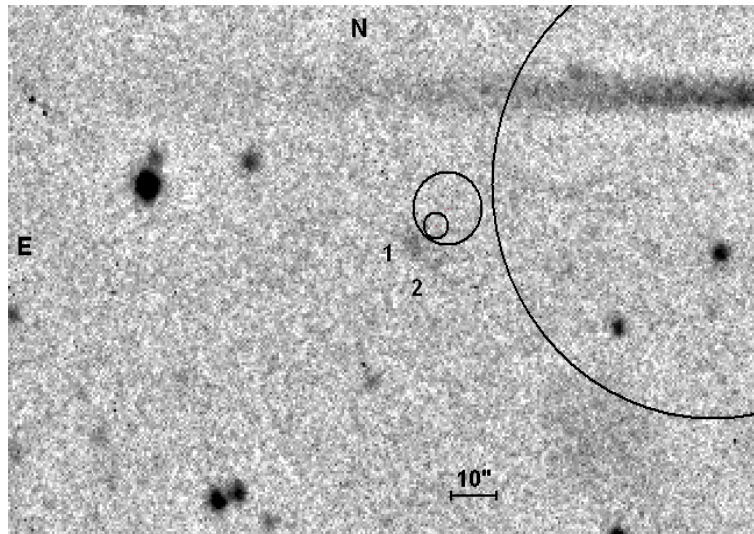
GRB021004 ( $t_b = 8.62 \pm 0.16$  d,  $z = 2.3$ ) наблюдался на телескопе Цейсс-1 м в полосах  $BVR_c$  в период с  $0.292$  d до  $0.500$  d после всплеска (Барсукова и др., 2002). (Здесь и далее использованы оценки  $t_b$  из работы Зех и др., 2005, оценки  $z$  – из таблицы Грайнер, 2006). Результаты показывают, что за 5 часов не обнаруживаются изменений цвета, превышающих ошибки измерения:  $0.09$  m для  $\Delta(V - R_c)$  и  $0.12$  m для  $\Delta(B - V)$  (Горанский и др., 2003). GRB041006 ( $t_b = 0.23 \pm 0.04$  d,  $z = 0.716$ ) наблюдался на АЗТ-22 от  $0.148$  d до  $0.183$  d в полосах  $BVRI$  (Кахаров и др., 2004), т.е. именно во время излома; показатели цвета на среднее время  $T_0 + 0.168$  d составляют  $B - V = 0.25 \pm 0.03$  и  $B - R = 0.79 \pm 0.04$ . Наблюдения, проведенные до излома ( $T_0 + 0.0674$  d)  $B - V = 0.28 \pm 0.03$  (Да Коста и Ноэл, 2004) и после излома ( $T_0 + 1.74$  d)  $B - R = 0.74 \pm 0.08$  (Гарнавич и др., 2004) указывают на неизменность показателей цвета вдоль кривой блеска в пределах ошибок. Показатели цвета исправлены за галактическое поглощение  $E(B - V) = 0.026$  (Шлегель и др., 1998). Изменение цвета  $\Delta(B - R) = 0.14 \pm 0.09$  за время наблюдения 1.88 часа также находится в пределах ошибок измерения. Ахроматизм начальной фазы кривой блеска послесвечения подтверждает общепринятую геометрическую интерпретацию причины излома кривой блеска, а также единый механизм излучения до и после излома. Таким наиболее вероятным механизмом считается синхротронное излучение.

Является ли ахроматизм начальной фазы кривой блеска послесвечения стандартным проявлением гамма-всплесков? GRB030329 ( $t_b = 5.27 \pm 0.02$  d,  $z = 0.168$ ) из-за своей яркости является одним из наиболее изученных всплесков. Оптический транзит этого всплеска в разных фазах наблюдался большинством обсерваторий мира; одно из самых ранних спектрополяриметрических  $UBVRI$  наблюдений (в интервале  $0.28$ – $0.33$  d после всплеска) было проведено на телескопе АЗТ-11 в КраО (Ефимов и др., 2003). Изменение цвета  $\Delta(B - R)$  за этот период составило  $0.1$  m (показатели цвета исправлены за галактическое поглощение  $E(B - V) = 0.025$  (Шлегель и др., 1998)). О монотонном изменении цвета  $\Delta(B - R) = 0.1$  в более широком диапазоне времени  $0.28$ – $0.83$  d сообщено в работе Липкин и др., 2004. В одной из моделей изменение показателя цвета соответствует прохождению уменьшающейся характерной частоты излома синхротронного спектра  $\nu_c$  (*cooling brake*) через оптический диапазон спектра ОТ (Галама и др., 2003). Зарегистрированное направление изменения цвета соответствует этой модели.

Модель синхротронного излучения релятивистского джета предсказывает также ахроматизм кривой блеска до и после прохождения  $\nu_c$  через оптический диапазон. В рамках точности измерений в настоящее время ахроматизм кривой блеска в начальной фазе послесвечения является стандартным свойством ОТ.

### 3 Самый “темный” всплеск

Примерно для 45% всплесков, зарегистрированных рентгеновским телескопом XRT/Swift в 2005 г., оптический компонент не был найден несмотря на интенсивные поиски наземными и космическими телескопами (Моретти и др., 2006). Такой результат уже нельзя списать на позднее начало наблюдений – в настоящее время телескопы-роботы начинают поиски через 1-2 минуты после начала регистрации гамма-всплеска; другие свойства таких событий (длительность, спектр, кривая блеска в гамма-диапазоне и рентгеновское послесвечение) ничем не отличаются от обычных всплесков



**Рис. 2.** GRB051008: время начала всплеска, зарегистрированного обсерваторией Swift,  $T_0 = 08/10/2005$  16:33:21.31 (UT); приведен суммарный снимок поля всплеска, экспозиция 15x60 s, среднее время снимка 17:14 ( $T_0 + 41$  m); Отмечены галактика (1) и переменный объект (2). Координаты (J2000) и блеск объектов: (1) R.A. = 13:31:29.96 Dec = + 42:05:52.26,  $R = 21.50 \pm 0.13$ ; (2) R.A. = 13:31:29.51 Dec = + 42:05:47.96,  $R = 22.19 \pm 0.27$  (ошибка в определении координат составляет  $0.3''$ ). Наблюдения через 23 минуты (среднее время 17:37 ( $T_0 + 64$  m), экспозиция 22x60 s) показывает отсутствие источника (2). Блеск и предельная звездная величина обнаружения для этой эпохи составляют (1)  $R = 21.32 \pm 0.13$ ; (2)  $R > 22.6$ . Оценка блеска галактики (1) на полной сумме всех кадров 37x60 s (среднее время  $T_0 + 55$  m) составляет  $R = 21.4 \pm 0.1$ , предельная звездная величина –  $R > 22.8$ . (Предельная звездная величина приведена на уровне  $3\sigma$ ; оценки блеска даны без учета галактического поглощения  $E(B - V) = 0.01$  (Шлегель и др., 1998)); астрометрия и фотометрия сделаны на основе каталога USNO A2.0 (Моне и др., 1998). Показаны области определения ошибок: гамма-телескопом BAT – большая окружность, радиус  $0.8'$  (Парсонс и др., 2005) и рентгеновским телескопом XRT: начальная  $6.5''$  (Перри и др., 2005a) и скорректированная (малая окружность)  $3.2''$  (Моретти и др., 2006). Области BAT и XRT не пересекаются, что может быть вызвано точностью определения систематических ошибок. Рисунок дает представление о характерной области ошибок, определяемых в режиме реального времени на борту обсерватории Swift, и после наземной обработки

с детектируемым оптическим послесвечением. Это означает, что физика явления, по-видимому, одинакова для этих групп всплесков. Всплески, для которых отношение потока в оптическом диапазоне  $F_O$  к потоку в рентгеновском диапазоне  $F_X$  является аномально малым, называют “темными” гамма-всплесками (Якобсон и др., 2004). Причина появления темных всплесков не ясна – это может быть вызвано огромными космологическими расстояниями, на которых расположен источник, и поглощением оптического излучения на луче зрения в линиях (“лес” линий  $L_\alpha$ ), существенным поглощением в родительской галактике (или самом источнике), малой внутренней светимостью источника в оптическом диапазоне. Последнее может быть объяснено асимметрией джетов, возникающих в противоположных направлениях. Действительно, джет, направленный на наблюдателя, может не сопровождаться оптическим послесвечением (темный всплеск), в то время как джет в противоположном направлении генерирует послесвечение, но остается недоступным для наблюдателя. На возможность геометрической интерпретации, т.е. существования двух противоположно направленных джетов, указывает и приблизительно равная доля всплесков с/без оптического послесвечения. В таком случае ситуация могла бы быть аналогична радиогалактикам с узкими эмиссионными линиями (*narrow-emission line*), где количество галактик с двумя джетами примерно равно количеству галактик с одним джетом (Лехе и др., 2000).

Одним из самых темных событий является GRB051008, имеющий аномально малое отношение  $F_O/F_X$ . Он наблюдался на ЗТШ через 32 минуты после всплеска (Румянцев и др., 2005). Вблизи

области ошибок рентгеновского источника XRT были найдены два объекта (рис. 2), причем объект номер 2 за 23 минуты между двумя эпохами наблюдения исчез. Формально оба объекта не попадают в скорректированную 90% область ошибок XRT для этого всплеска (рис. 2) и лежат на расстоянии 6.1'' и 7.7'' от центра области (окружность радиусом 3.2''). Коррекция включает уменьшение систематической ошибки определения координат телескопом XRT от первоначальной величины 6.5'' до 3.2'' (Моретти и др., 2006). Учитывая малую выборку (31 событие), по которой проводилась коррекция, нельзя исключить, что систематическая ошибка со временем претерпит изменение в большую сторону. Таким образом, мы рассматриваем переменный источник 2 как оптический транзист GRB051008.

Оценка показателя степенного закона падения кривой блеска GRB051008 из наших наблюдений  $\alpha_O < -0.85$  не противоречит показателю степенного закона падения кривой блеска в рентгене  $\alpha_X = -0.86$  за тот же период времени. Кривая блеска рентгеновского послесвечения описывается степенным законом с изломом  $\alpha_{X1} = -0.86 \pm 0.07$  от  $T_0 + 51 m$  до точки излома  $t_b = 275 \pm 35 m$  и далее  $\alpha_{X2} = -2.0 \pm 0.1$  (Перри и др., 2005б). Будучи связанный с джетом, столь ранний излом предполагает, с одной стороны, близкое расположение источника ( $z < 0.36$ ), а с другой – появление сверхновой с максимумом блеска  $R = 21.9$  (в предположении модели сверхновой 1998bw (Ферреро и др., 2005)). Однако поиск, выполненный через 21.5 день после всплеска, не дал положительного результата до  $R_c > 22.5$  (Канн и др., 2005). Если предположить, что ОТ (2) связан с галактикой (1), то угловое расстояние между ними 6.6'' также говорит в пользу близкого расположения источника всплеска. С другой стороны, эмпирическая оценка красного смещения, сделанная на основе соотношения значения  $E_p = 865(-136, +178) keV$  (Голенецкий и др., 2005), где  $E_p$  соответствует максимуму в энергетическом спектре гамма-всплеска, дает величину  $z = 5.2 \pm 1.3$  (Пеланжон и др., 2005). В этом случае излом кривой блеска в рентгене  $t_b = 275 m$  можно было бы объяснить переходом от фазы синхронного излучения к фазе послесвечения (действительно, время в системе наблюдателя  $t_b = 275 m$ , соответствует в системе отсчета источника всплеска времени  $t_b/(1+z) = 44 m$ ). Однако измеренная длительность события составляет  $\sim 280 s$  (Голенецкий и др., 2005). (Интересно отметить, что гамма-всплески, регистрируемые на значительных космологических расстояниях, позволяют эффективно заглянуть в самое начало всплеска в системе отсчета источника.) Кроме того, значительное красное смещение привело бы к чрезвычайно большой полной излученной энергии  $E_{iso} > 10^{54} erg$  (в предположении изотропного излучения). Сравнение в гамма-диапазоне GRB051008 ( $E_p = 865 keV$ , показатель степенного спектра  $\gamma = 1.10 \pm 0.05$ ) с известными ГВ, имеющими близкие значения красного смещения, GRB050904 ( $z = 6.29$ ,  $\gamma = 1.34 \pm 0.06$ ) и GRB060206 ( $z = 4.048$ ,  $E_p = 75.4 \pm 19.5 keV$ ,  $\gamma = 1.06 \pm 0.34$ ) показывает более жесткий спектр и большую переменность кривой блеска GRB051008, что говорит в пользу близкого расположения источника. Столь противоречивые косвенные оценки расстояния не позволяют сделать однозначный вывод в пользу какой-либо из моделей, но внутреннее поглощение и/или малая светимость источника являются предпочтительными. Широкополосная фотометрия могла бы пролить свет на природу GRB051008, однако, в ближайшем к началу всплеска наблюдении (UltraViolet/Optical Telescope (UVOT) на борту обсерватории Swift) получен лишь предел  $v > 18.2$  на время  $T_0 + 50 m$  (Бривельд и др., 2005).

## 4 Заключение

Из всех зарегистрированных всплесков можно отметить еще несколько событий. Яркий всплеск GRB030329 продемонстрировал наличие слабой линейной поляризации в первый день после всплеска (Ефимов и др., 2003) и наблюдался в течение трех месяцев (Ибрагимов и др., 2003). GRB050824 ( $z = 0.83$ ) наблюдался вплоть до полного исчезновения ОТ и проявления на его месте через  $\sim 75$  дней родительской галактики с блеском  $R = 23.94 \pm 0.23$ . При наблюдении “короткого” ( $T \sim 0.2 s$ ) всплеска GRB051221A ( $z = 0.55$ ) была получена оценка блеска ОТ (Шарапов и др., 2006), согласующаяся со степенной кривой блеска без излома (Содерберг и др., 2006). До сих пор (2005 г.) оптическое послесвечение было обнаружено лишь у двух ГВ этого класса, что сразу же позволило определить шкалу расстояний “коротких” всплесков как умеренно космологическую ( $z < 1$ ).



Вопросы о наличии джета, а также феноменология кривой блеска в оптике остаются открытыми. Предполагается, что источником по крайней мере части “коротких” всплесков, является слияние тесной двойной системы компактных источников, например, нейтронных звезд.

Из результатов наших наблюдений следует, что телескопы с апертурой менее 1 м могут быть эффективны для поиска ОТ в течение суток после регистрации ГВ, в то время как телескопы с большей апертурой эффективны и в последующие дни (рис. 1). Однако при наблюдении ярких событий, таких как GRB030329, телескопы с малой апертурой способны давать значимые результаты в течение нескольких дней. Улучшение точности локализации ГВ космическими обсерваториями (до 2000 г. CGRO/BATSE – 3°, до 2004 г. HETE/WXM – 30', HETE/SXC – 4', 2005 г. Swift/BAT – 3', Swift/XRT – 6") позволяет в настоящее время эффективно проводить поиск ОТ на телескопах с умеренным полем зрения. С момента первой публикации о всплесках (Клебесадел и др., 1973) в гамма-диапазоне зарегистрировано ~ 3000 событий, в то время как общее количество обнаруженных с 1997 г. ОТ составляет ~ 110. Для увеличения статистики необходимы наблюдения каждого всплеска, зарегистрированного космическими обсерваториями. Синхронные оптические наблюдения чрезвычайно важны для выяснения природы “центральной машины” всплеска, таких наблюдений насчитывается всего лишь 4. (Данные о количестве приведены на конец 2005 г.)

В целом, создание сети для координированных наблюдений ГВ и включение таких наблюдений в разряд приоритетных задач оправдало себя. Расположение обсерваторий в различных часовых поясах дало возможность продлить наблюдения послесвечения и увеличить эффективность регистрации ОТ.

## 5 Благодарность

Работа поддержана в 2003-2004 гг. грантом CRDF RP1-2394-MO-02, в 2005 г. частичная поддержка была оказана грантом министерства образования и науки РФ.

## Литература

- Акерлоф и др. (Akerlof C., Balsano R., Barthelmy S., et al.) // Nature. 1999. V. 398. P. 400.  
 Андреев М., Позаненко А. (Andreev M., Pozanenko A.) // GCN. 2005. N. 4016.  
 Барсукова Е.А. и др. (Barsukova E.A., Goranskij V.P., Beskin G.M., et al.) // GCN. 2002. N. 1606.  
 Бартелми и др. (Barthelmy, S.D. et al.) // GRB Coordinates Network, <http://gcn.gsfc.nasa.gov>.  
 Бривелд и др. (Breeveld A., Marshall F., Blustin A., et al.) // GCN. 2005. N. 4079.  
 Вестранд и др. (Vestrand W.T., et al.) // SPIE. 2002. V. 4845. P. 126.  
 Ватсон и др. (Watson D., Fynbo J.P.U., Ledoux C., et al.) // submitted to Astrophys. J. 2005.  
 Галама и др. (Galama T., Frail D.A., Sari R., et al.) // Astrophys. J. 2003. V. 585. P. 899.  
 Гарнавич и др. (Garnavich P., Zhao X., Pimenova T.) // GCN. 2004. N. 2792.  
 Голенецкий С. и др. (Golenetskii S., Aptekar R., Mazets E., et al.) // GCN. 2005. N. 4078.  
 Горанский В. и др. // Частное сообщение. 2003.  
 Грайнер и др. (Greiner J., Klose S., Reinsch K., et al.) // Nature. 2003. V. 426. P. 157.  
 Грайнер (Greiner J.) // <http://www.mpe.mpg.de/jcg/grbgen.html>. 2006.  
 Да Коста, Ноел (Da Costa G., Noel N.) // GCN. 2004. N. 2789.  
 Ефимов Ю. и др. (Efimov Y., Antonuk K., Rumyantsev V., et al.) // GCN. 2003. N. 2144.  
 Зех и др. (Zeh A., Klose S., Kann D.A.) // astro-ph/0509299. 2005.  
 Ибрагимов М.А. и др. (Ibrahimov M.A., Asfandiyarov I.M., Kahharov B.B., et al.) // GCN. 2003. N. 2288.  
 Кан и др. (Kann D.A., Ferrero P., Stecklum B., et al.) // GCN. 2005. N. 4246.  
 Кахаров Б. и др. (Kahharov B., Asfandiyarov I., Ibrahimov M., et al.) // GCN. 2002. N. 2775.  
 Клебесадел и др. (Klebesadel R., Strong I., Olson R.) // Astrophys. J. 1973. V. 182. L. 85.  
 Ковелиоту и др. (Kouveliotou C., Meegan C.A., Fishman G.J., et al.) // Astrophys. J. (L). 1993. V. 413. P. 101.

- Коста и др. (Costa E., Frontera F., Heise J., et al.) // *Nature*. V.387. P. 783.
- Лехе и др. (Leahy, J.P., Bridle, A.H., Strom R.G.) // <http://www.jb.man.ac.uk/atlas/>. 2000.
- Липкин и др. (Lipkin Y.M., Ofek E.O., Gal-Yam A., et al.) // *Astrophys. J.* 2004. V. 606. P. 381.
- Мазец Е.П. и др. (Mazets E.P., Golenetskii S.V.; Pinsky V.N., et al.) // *Astrophys. Space Sci.* 1981. V. 80. P. 3.
- Матесон и др. (Matheson T., Garnavich P.M., Foltz C., et al.) // *Astrophys. J. (L)*. 2003. V. 582. P. 5.
- Моне и др. (Monet D.G., et al.) // *USNO-A2.0 Catalog* (Flagstaff: USNO). 1998.
- Моретти и др. (Moretti A., Perri M., Capalbi M., et al.) // *astro-ph/0511604*. 2005.
- ван Парадийс и др. (van Paradijs J., Groot P.J., Galama T., et al.) // *Nature*. V.386. P.686.
- Парсонс и др. (Parsons A., Barbier L., Barthelmy S., et al.) // *GCN*. 2005. N. 4075.
- Пеланжон (Pelangeon A., Atteia J.-L.) // *GCN*. 2005. N. 4086.
- Перри и др. (Perri M., Capalbi M., Burrows D.N.) // *GCN*. 2005. N. 4073.
- Перри и др. (Perri, M., Capalbi M., Burrows D.N., et al.) // *GCN*. 2005. N. 4080.
- Позаненко А. и др. (Pozanenko A., Chernenko, A., Beskin, G. et al.) // *Proceedings of ADASS XII ASP Conference Series*. 2003. V. 295. P. 457. (Ed. H. E. Payne, R. I. Jedrzejewski, and R. N. Hook).
- Родс (Rhoads J.) // *Astrophys. J. (L)* 1997. V. 487. P. 1.
- Румянцев В. и др. (Rumyantsev V., Biryukov V., Pozanenko A., et al.) // *GCN*. 2005. N. 4087.
- Содерберг и др. (Soderberg A., Berger E., Kasliwal M., et al.) // *astro-ph/0601455*. 2006.
- Соколов В.В. и др. (Sokolov V.V., Kopylov A.I., Zharikov S.V., et al.) // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 334. P. 117.
- Ферреро и др. (Ferrero P., Kloze S., Kann A., et al.) // *GCN*. 2005. N. 4085.
- Хилл и др. (Hill J.E., Morris D.C., Sakamoto T., et al.) // *Astrophys. J.* 2006. V. 639. P. 303.
- Шарапов Д. и др. (Sharapov D., Ibrahimov M., Pozanenko A., et al.) // *GCN*. 2006. N. 4613.
- Шлегель и др. (Schlegel D.J., Finkbeiner D.P., Davis M.) // *Astrophys. J.* 1998. V. 500. P. 525.
- Якобсон и др. (Jakobsson P., Hjorth J., Fynbo J.P.U., et al.) // *Astrophys. J. (L)*. 2004. V. 617. P. 21.