

УДК 524.354.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ С ИЗВЕСТНЫМИ КРАСНЫМИ СМЕЩЕНИЯМИ: СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ

© 2009 г. Д. А. Баджин<sup>1\*</sup>, Г. М. Бескин<sup>2</sup>, Дж. Греко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва

<sup>2</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН, пос. Нижний Архыз

<sup>3</sup> Департамент астрономии Болонского университета, Италия

Поступила в редакцию 11.09.2007 г.

После доработки 13.05.2008 г.

Представлены результаты анализа наблюдательных характеристик оптического и гамма-излучения 58 гамма-всплесков с открытыми послесвечениями и известными красными смещениями. Изучены распределения этих параметров и парные корреляции между ними. Примерно у половины объектов обнаружено относительно медленное уменьшение оптического потока на начальных этапах послесвечений (показатель степени в законе затухания  $\alpha < 1$ ). Обнаружены корреляции светимостей, энергий и длительностей оптического и гамма-излучения, которые можно объяснить наличием универсальных особенностей кривых блеска. Впервые обнаружены корреляция максимальной светимости послесвечений с красным смещением и антикорреляция с ним их продолжительностей. На фоне слабой зависимости полной энергии послесвечения от  $z$  этот эффект может объясняться космологической эволюцией окружения гамма-всплесков, определяющего темп оптического энерговыделения.

*Ключевые слова:* гамма-всплески, послесвечения.

INVESTIGATION OF GAMMA-RAY BURSTS WITH KNOWN REDSHIFTS: STATISTICAL ANALYSIS OF PARAMETERS, by D. A. Badjin, G. M. Beskin, and G. Greco. Observational parameters of the optical and gamma-ray emissions from 58 gamma-ray bursts (GRBs) with discovered afterglows and known redshifts are analyzed. The distributions of these parameters and pair correlations between them are studied. A relatively slow decrease in the optical flux at initial afterglow phases (with an exponent in the decay law  $\alpha < 1$ ) has been detected in approximately half of the objects. Correlations between the luminosities, energies, and durations of the optical and gamma-ray emissions have been found; these can be explained by the presence of universal features in the light curves. A correlation of the peak luminosity for afterglows with the redshift and an anticorrelation of their durations with the latter have been found for the first time. Against the background of a weak  $z$  dependence of the total afterglow energy, this effect can be explained by the cosmological evolution of the GRB environment, which determines the rate of optical energy release.

PACS numbers : 98.70.Rz

*Key words:* gamma-ray bursts, afterglows.

### ВВЕДЕНИЕ

За 10 с половиной лет с 28 февраля 1997 г. по 1 сентября 2007 г. было зарегистрировано 726 гамма-всплесков, у 246 из них были обнаружены оптические послесвечения, и у 106 измерены

красные смещения<sup>1</sup>. Такой обширный объем данных уже позволяет анализировать общие свойства гамма-всплесков, например, искать корреляции между теми или иными величинами, характеризующими их. Подобные исследования уже проводились по мере накопления наблюдательных данных.

\* Электронный адрес: badjinda@gmail.com

<sup>1</sup> По данным сайта <http://grad40.as.utexas.edu/grblog.php>

Так, например, статистическому изучению характеристик гамма-излучения посвящены работы Бэнда и др. (1993), Амати и др. (2002), Боргоново, Райда (2001), Гвидорчи и др. (2005а), Гирлянды и др. (2005, 2006), Ли, Пачиньского (2006), Норриса и др. (2000). Корреляции и распределения параметров оптических послесвечений обсуждаются в статьях Цеха и др. (2006), Нардини и др. (2006), Греко и др. (2007). В работах Бескина и др. (2000) и Бартолини и др. (2000) проводился поиск статистических связей между различными характеристиками как оптического, так и гамма-излучения всплесков в их собственной системе отсчета.

В упомянутых работах обнаружены различные статистические закономерности, которые достаточно сложно однозначно интерпретировать. Во-первых, неясно, насколько физически близки изученные объекты, насколько корректно распространять полученные для них результаты на всю совокупность явлений этого типа, поскольку они могут быть представителями разных классов гамма-всплесков. Может оказаться, что часть из них выделяется по какому-либо критерию, как, например, в работе Блума и др. (2003). С другой стороны, использование жесткого отбора объектов для достижения максимальной однородности выборки уменьшает ее объем и снижает статистическую значимость любого результата. Во-вторых, следует внимательно относиться к учету ошибок величин и способу, которым они получены. Так, например, Батлер и др. (2007), используя более полную выборку, корректнее учитывая ошибки и инструментальные эффекты, подвергают серьезному сомнению выводы Амати и др. (2002) и Гирлянды с соавторами (Гирлянда и др., 2005, 2006). Между этими противоборствующими требованиями к совокупности исходных данных приходится искать разумный (и в каждом случае обоснованный) компромисс.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является поиск возможных закономерностей в свойствах гамма-всплесков путем статистического анализа их характерных параметров с использованием как можно более полной выборки объектов. В качестве исследуемых величин выбирались характеристики оптического и гамма-излучения, получаемые из наблюдательных данных при минимуме модельных предположений. Принципиальным моментом было изучение как непосредственно измеряемых параметров, так и приведенных в собственную систему гамма-всплеска, что исключало влияние космологических факторов. Под собственной мы понимаем систему, связанную с близким наблюдателем, находящимся вне самого объекта, но

на достаточно малом от него удалении. Эффекты распространения света, обусловленные релятивистским движением излучающего вещества (см., например, обзор Пирана, 2004), одинаковы как для близкого, так и для наземного наблюдателя, что приводит к эквивалентности описания физических процессов в этих системах. Различие между ними только в учете космологической локализации гамма-всплесков.

В нашу выборку входят 58 гамма-всплесков от GRB 970228 до GRB 070125 с известными красными смещениями и оптическими послесвечениями, наблюдавшимися в полосе  $R$  (диапазон, используемый чаще всего) не менее 3 раз. Совокупность гамма-всплесков характеризуется набором нижеперечисленных параметров.

Красное смещение  $z$  бралось из публикаций, посвященных спектроскопическим наблюдениям.

Максимальный поток в оптике<sup>2</sup>  $F_{\text{opt}}$  получался из минимальной наблюдавшейся звездной величины послесвечения  $R$  с помощью калибровки (см. работу Фукугиты и др., 1995)

$$F_{\text{opt}} = 3.371 \times 10^{-6-0.4R}, \frac{\text{эрг}}{\text{с см}^2}, \quad (1)$$

при учете поглощения в Млечном Пути по картам Шлегеля и др. (1998) и блеска хозяйской галактики (если он был определен). В большинстве случаев  $F_{\text{opt}}$  характеризует излучение в наиболее ранней точке кривой блеска послесвечения. Исключения (согласно опубликованным данным) составляют GRB 060218, более яркий во вторичном максимуме (достигаемом после первичного спада потока), а также GRB 990123, GRB 060206, GRB 060210, GRB 060605, GRB 060614, GRB 060714 и GRB 060926, у которых наблюдался первичный максимум послесвечения.

Интегральный (полный) поток в оптике  $S_{\text{opt}}$  определялся численным интегрированием кривой блеска послесвечения в интервале от самого раннего до самого позднего наблюдения с интерполяцией потока степенным законом на участках между экспериментальными точками. Поскольку на практике удается зарегистрировать лишь часть оптического послесвечения, данный параметр является нижней границей полного потока.

Изотропический эквивалент максимальной светимости в оптике  $L_{\text{opt}}$  связан с максимальным оптическим потоком следующим соотношением:

$$L_{\text{opt}} = 4\pi k_{\text{opt}}(z) D_L^2(z) F_{\text{opt}}, \quad (2)$$

<sup>2</sup>Здесь и далее для характеристик оптического излучения гамма-всплесков используются данные наблюдений в  $R$ -полосе.

где  $z$  — красное смещение,  $D_l(z)$  — фотометрическое расстояние (для космологической модели с  $H_0 = 73.5$  км с<sup>-1</sup> МПк<sup>-1</sup>,  $\Omega_\Lambda = 0.76$ ,  $\Omega_\rho = 0.24$ ),  $k_{\text{opt}}(z)$  — космологическая  $k$ -поправка, учитывающая трансформацию полосы пропускания  $R$  в собственной системе гамма-всплеска для послесвечений со степенным спектром

$$k_{\text{opt}} = \frac{\int_{\nu_{R_0}/(1+z)}^{\nu_{R_1}/(1+z)} \nu^{-\beta} d\nu}{\int_{\nu_{R_0}}^{\nu_{R_1}} \nu^{-\beta} d\nu} = \frac{1}{(1+z)^{1-\beta}}. \quad (3)$$

Здесь  $\nu_{R_0}$  и  $\nu_{R_1}$  частотные границы полосы  $R$ ,  $\beta$  — показатель степени спектра  $F_\nu \propto \nu^{-\beta}$  в оптическом диапазоне. При отсутствии сведений о  $\beta$  для конкретного всплеска использовалось значение  $\beta = 0.7$ , близкое к его среднестатистической оценке.

Изотропический эквивалент полной энергии в оптике  $E_{\text{opt}}$  определялся из интегрального потока согласно соотношению

$$E_{\text{opt}} = \frac{4\pi k_{\text{opt}}(z) D_l^2(z) S_{\text{opt}}}{(1+z)}. \quad (4)$$

Длительность послесвечения  $t_{90\text{opt}}$  определялась как время с момента обнаружения послесвечения, в течение которого было принято 90% интегрального потока в оптике.

Длительность послесвечения в собственной системе  $T_{90\text{opt}}$  рассчитывалась как  $t_{90\text{opt}}/(1+z)$ .

Запаздывание оптического максимума относительно момента обнаружения всплеска в гамма-диапазоне  $t_{\text{peak}}$  и соответствующее ему запаздывание в собственной системе  $T_{\text{peak}} = t_{\text{peak}}/(1+z)$ .

Показатель степени  $\alpha$  уменьшения потока со временем в зависимости  $F \propto t^{-\alpha}$  на начальном (раннем) этапе послесвечения. В качестве последнего использовалась последовательность точек кривой блеска, начинающаяся с первых четырех после максимума потока (включая и сам максимум), для которой реализуется глобальный максимум (среди всех возможных таких последовательностей) коэффициента линейной корреляции между звездной величиной и логарифмом времени. Определенный таким образом участок кривой блеска аппроксимировался линейной зависимостью  $\lg F - \lg t$ , а коэффициент ее наклона и брался за оценку параметра  $\alpha$ . Если же на кривой блеска послесвечения было пять и менее точек, все они использовались в аппроксимации.

Максимальный поток в гамма-диапазоне  $F_\gamma$ , измеренный тем или иным космическим аппаратом,

приводился к диапазону 15–150 кэВ (т.е. рабочему диапазону гамма-телескопа спутника Swift<sup>3</sup>) на основании опубликованных результатов гамма-спектроскопии. Как правило, в качестве спектральных показателей брались величины, полученные из усредненного по времени спектра, за исключением случаев, когда были доступны спектральные данные, относящиеся непосредственно к максимуму. Если для одного всплеска было опубликовано несколько оценок максимального потока, то из них отбиралась величина, измеренная в ближайшем к интервалу 15–150 кэВ диапазоне.

Интегральный поток в гамма-диапазоне  $S_\gamma$  определялся по опубликованным результатам наблюдений приведением их к диапазону 15–150 кэВ. При этом использовался только интегральный (усредненный) по времени гамма-спектр.

Изотропический эквивалент максимальной гамма-светимости в диапазоне 15–150 кэВ для собственной системы всплеска  $L_{\text{iso}}$  вычислялся из максимального потока по следующей формуле:

$$L_{\text{iso}} = 4\pi k_\gamma(z) D_L^2(z) F_\gamma, \quad (5)$$

где  $k_\gamma(z)$  —  $k$ -поправка, определяемая как (см., например, Блум и др., 2001)

$$k_\gamma(z) = \frac{\int_{E_1/(1+z)}^{E_2/(1+z)} F_E(E) dE}{\int_{e_1}^{e_2} F_E(E) dE}. \quad (6)$$

Здесь  $F_E$  — спектральная плотность потока,  $e_1$  и  $e_2$  — нижняя и верхняя границы диапазона энергий, в котором получено  $F_\gamma$ ,  $E_1$  и  $E_2$  — границы интересующего диапазона энергий в собственной системе всплеска. В нашем случае  $e_1 = E_1 = 15$  кэВ,  $e_2 = E_2 = 150$  кэВ.

Изотропический эквивалент полной гамма-энергии (диапазон 15–150 кэВ в собственной системе всплеска)  $E_{\text{iso}}$  получался из интегрального потока по формуле

$$E_{\text{iso}} = \frac{4\pi k_\gamma(z) D_l^2(z) S_\gamma}{1+z}. \quad (7)$$

Максимальный болометрический поток в гамма-диапазоне  $F_{\gamma,\text{bol}}$  оценивался по величине измеренного тем или иным аппаратом максимального потока после приведения к интервалу энергий 1–10 000 кэВ. Такие оценки были получены для 33 всплесков, гамма-спектры которых описываются законом, отличным от одностепенного, поскольку

<sup>3</sup>Аргументы в пользу такого выбора следующие: примерно половина всплесков выборки была обнаружена спутником Swift, и для них доступны лишь “низкоэнергетические” спектральные показатели, что делает невозможным оценку болометрического энерговыделения; точность определения низкоэнергетических спектральных показателей выше, чем высокоэнергетических.

Таблица 1. Параметры “наблюдаемой” выборки

GRB	Число точек	$z$	$\lg F_{\text{opt}},$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$	$\lg S_{\text{opt}},$ эрг $\text{см}^{-2}$	$\lg t_{90\text{opt}},$ сут	$\lg t_{\text{peak}},$ сут	$\lg F_{\gamma},$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$	$\lg S_{\gamma},$ эрг $\text{см}^{-2}$	$\lg t_{\gamma},$ с	$\alpha$
970228	11	0.6950	$-13.44 \pm 0.20$	$-8.18 \pm 0.08$	2.03	-0.161	$-5.60 \pm 0.07$	$-5.84 \pm 0.07$	1.90	$1.46 \pm 0.05$
970508	49	0.8349	$-13.26 \pm 0.04$	$-7.60 \pm 0.02$	2.08	0.289	$-6.25 \pm 0.07$	$-5.99 \pm 0.03$	1.36	$1.31 \pm 0.03$
971214	5	3.4180	$-14.13 \pm 0.04$	$-9.40 \pm 0.03$	0.33	-0.319	$-5.75 \pm 0.07$	$-5.30 \pm 0.03$	1.65	$1.33 \pm 0.09$
980613	5	1.0969	$-14.66 \pm 0.08$	$-9.09 \pm 0.08$	0.79	-0.161	$-7.16 \pm 0.13$	$-6.27 \pm 0.09$	1.30	$0.24 \pm 0.14$
980703	19	0.9662	$-13.92 \pm 0.05$	$-8.78 \pm 0.22$	1.20	-0.026	$-5.85 \pm 0.03$	$-4.68 \pm 0.04$	2.61	$1.32 \pm 0.05$
990123	85	1.6004	$-8.92 \pm 0.04$	$-7.12 \pm 0.02$	-0.72	-3.222	$-5.19 \pm 0.07$	$-4.00 \pm 0.06$	2.02	$1.36 \pm 0.04$
990510	29	1.6187	$-12.27 \pm 0.01$	$-7.62 \pm 0.01$	0.55	-0.833	$-5.74 \pm 0.04$	$-4.83 \pm 0.02$	2.02	$0.91 \pm 0.02$
990712	19	0.4331	$-13.22 \pm 0.01$	$-7.96 \pm 0.02$	1.51	-0.728	$-5.93 \pm 0.03$	$-5.23 \pm 0.02$	1.48	$0.97 \pm 0.02$
991208	19	0.7055	$-12.94 \pm 0.04$	$-7.73 \pm 0.02$	1.32	0.318	$-5.07 \pm 0.04$	$-4.09 \pm 0.04$	1.83	$2.21 \pm 0.08$
991216	48	1.0200	$-12.21 \pm 0.02$	$-7.33 \pm 0.01$	0.90	-0.348	$-4.80 \pm 0.00$	$-4.15 \pm 0.00$	1.18	$1.22 \pm 0.03$
000131	3	4.5000	$-14.73 \pm 0.16$	$-9.55 \pm 0.11$	0.49	0.546	$-5.94 \pm 0.00$	$-4.80 \pm 0.01$	2.04	$2.27 \pm 0.07$
000301C	77	2.0335	$-13.39 \pm 0.02$	$-7.99 \pm 0.01$	0.92	0.245	$-5.98 \pm 0.14$	$-5.46 \pm 0.14$	0.30	$1.40 \pm 0.15$
000418	12	1.1182	$-14.15 \pm 0.02$	$-8.44 \pm 0.06$	1.55	0.394	—	$-5.11 \pm 0.07$	1.48	$1.19 \pm 0.03$
000911	13	1.0585	$-13.64 \pm 0.03$	$-8.23 \pm 0.03$	1.63	0.157	$-4.76 \pm 0.07$	$-4.64 \pm 0.07$	2.70	$1.43 \pm 0.01$
000926	53	2.0369	$-13.18 \pm 0.00$	$-8.27 \pm 0.01$	0.70	-0.060	$-5.84 \pm 0.07$	$-4.99 \pm 0.07$	1.40	$1.73 \pm 0.02$
010222	91	1.4780	$-12.73 \pm 0.04$	$-7.97 \pm 0.01$	1.04	-0.818	$-5.48 \pm 0.05$	$-4.35 \pm 0.01$	2.23	$0.86 \pm 0.02$
011121	29	0.3620	$-12.50 \pm 0.01$	$-7.57 \pm 0.02$	1.57	-0.409	$-5.40 \pm 0.07$	$-4.40 \pm 0.07$	1.45	$1.75 \pm 0.02$
011211	39	2.1400	$-13.51 \pm 0.06$	$-8.58 \pm 0.02$	0.61	-0.375	$-7.62 \pm 0.07$	$-5.62 \pm 0.07$	2.43	$0.85 \pm 0.07$
020124	14	3.1980	$-12.54 \pm 0.04$	$-8.07 \pm 0.02$	-0.07	-1.262	$-6.39 \pm 0.03$	$-5.28 \pm 0.04$	1.69	$0.46 \pm 0.11$
020405	21	0.6950	$-13.33 \pm 0.08$	$-8.13 \pm 0.01$	1.47	-0.042	$-5.69 \pm 0.07$	$-4.22 \pm 0.07$	1.60	$1.45 \pm 0.13$
020813	25	1.2540	$-12.61 \pm 0.15$	$-7.83 \pm 0.11$	1.04	-1.154	$-5.71 \pm 0.07$	$-4.21 \pm 0.07$	1.95	$0.54 \pm 0.03$
020903	8	0.2510	$-13.24 \pm 0.08$	$-7.66 \pm 0.14$	1.81	-0.046	—	—	—	$0.96 \pm 0.05$
021004	465	2.3351	$-11.59 \pm 0.07$	$-7.34 \pm 0.01$	0.96	-2.420	—	$-5.78 \pm 0.07$	1.72	$0.54 \pm 0.03$
021211	70	1.0060	$-11.07 \pm 0.03$	$-8.51 \pm 0.02$	1.48	-3.000	—	$-5.67 \pm 0.03$	0.45	$1.46 \pm 0.02$
030226	39	1.9860	$-12.84 \pm 0.02$	$-8.31 \pm 0.01$	0.27	-0.831	$-7.02 \pm 0.07$	$-5.46 \pm 0.05$	2.00	$0.82 \pm 0.07$
030323	39	3.3720	$-12.89 \pm 0.02$	$-8.14 \pm 0.03$	0.65	-0.477	$-6.89 \pm 0.10$	$-6.11 \pm 0.14$	1.09	$1.52 \pm 0.09$
030328	83	1.5200	$-12.67 \pm 0.04$	$-8.47 \pm 0.01$	0.21	-1.277	$-6.27 \pm 0.07$	$-4.68 \pm 0.00$	1.97	$0.70 \pm 0.06$
030329	1561	0.1685	$-10.39 \pm 0.01$	$-6.05 \pm 0.00$	1.09	-1.329	$-5.20 \pm 0.07$	$-4.02 \pm 0.00$	1.70	$0.86 \pm 0.01$
030429X	13	2.6500	$-13.16 \pm 0.03$	$-8.46 \pm 0.02$	0.42	-0.812	$-5.93 \pm 0.07$	$-6.31 \pm 0.08$	0.96	$0.96 \pm 0.08$
040924	39	0.8590	$-12.59 \pm 0.04$	$-8.91 \pm 0.02$	-0.14	-1.959	$-5.60 \pm 0.07$	$-5.69 \pm 0.02$	0.18	$0.55 \pm 0.2$
041006	81	0.7160	$-12.33 \pm 0.04$	$-8.09 \pm 0.01$	1.65	-2.569	—	$-5.19 \pm 0.07$	1.39	$0.57 \pm 0.09$
050315	3	1.9490	$-13.81 \pm 0.08$	$-9.04 \pm 0.08$	-0.06	-0.316	$-6.92 \pm 0.10$	$-5.47 \pm 0.04$	1.98	$0.63 \pm 0.06$
050319	48	3.2400	$-12.00 \pm 0.02$	$-8.14 \pm 0.03$	0.44	-3.301	$-7.08 \pm 0.07$	$-6.20 \pm 0.07$	1.00	$0.42 \pm 0.01$
050401	34	2.9000	$-12.13 \pm 0.12$	$-9.01 \pm 0.04$	0.87	-3.398	$-5.96 \pm 0.07$	$-5.07 \pm 0.07$	1.52	$0.92 \pm 0.04$
050408	65	1.2360	$-12.24 \pm 0.04$	$-8.84 \pm 0.07$	0.88	-2.137	—	$-5.82 \pm 0.07$	1.16	$1.25 \pm 0.20$
050502	20	3.7930	$-11.27 \pm 0.04$	$-8.63 \pm 0.01$	-0.24	-3.523	$-6.75 \pm 0.07$	$-5.90 \pm 0.07$	1.30	$0.60 \pm 0.14$

Таблица 1. Окончание

GRB	Число точек	$z$	$\lg F_{\text{opt}}$ , эрг с <sup>-1</sup> см <sup>-2</sup>	$\lg S_{\text{opt}}$ , эрг см <sup>-2</sup>	$\lg t_{90\text{opt}}$ , сут	$\lg t_{\text{peak}}$ , сут	$\lg F_{\gamma}$ , эрг с <sup>-1</sup> см <sup>-2</sup>	$\lg S_{\gamma}$ , эрг см <sup>-2</sup>	$\lg t_{\gamma}$ , с	$\alpha$
050525	54	0.6060	-11.10 ± 0.04	-7.77 ± 0.02	0.40	-2.347	-5.51 ± 0.07	-4.94 ± 0.07	0.94	1.19 ± 0.02
050730	35	3.9670	-11.91 ± 0.16	-7.99 ± 0.02	0.05	-3.097	-7.31 ± 0.10	-5.60 ± 0.04	2.19	0.3 ± 0.16
050820	4	2.6120	-11.30 ± 0.04	-7.70 ± 0.03	0.63	-2.310	-7.09 ± 0.07	-5.92 ± 0.05	1.88	0.94 ± 0.02
050904	17	6.2900	-10.07 ± 0.12	-7.59 ± 0.07	-0.62	-2.222	-7.19 ± 0.11	-5.27 ± 0.02	2.35	2.06 ± 0.10
050908	12	3.3440	-13.16 ± 0.12	-9.20 ± 0.06	-0.27	-1.770	-7.35 ± 0.06	-6.29 ± 0.04	1.30	0.63 ± 0.05
050922C	7	2.1980	-11.74 ± 0.04	-7.98 ± 0.02	-0.32	-2.051	-6.21 ± 0.02	-5.77 ± 0.03	0.70	0.33 ± 0.04
051109	7	2.3460	-11.36 ± 0.05	-8.33 ± 0.02	-0.33	-3.301	-6.55 ± 0.08	-5.68 ± 0.06	1.56	0.64 ± 0.04
051111	33	1.5500	-10.58 ± 0.04	-7.92 ± 0.01	-0.42	-3.398	-6.69 ± 0.03	-5.41 ± 0.01	1.67	0.78 ± 0.01
051221	3	0.5465	-13.31 ± 0.16	-10.08 ± 0.10	-1.73	-1.058	-6.02 ± 0.01	-5.94 ± 0.02	0.15	0.78 ± 0.01
060124	23	2.2960	-12.05 ± 0.00	-7.87 ± 0.01	0.16	-1.413	-5.98 ± 0.11	-5.23 ± 0.04	2.85	0.92 ± 0.03
060206	204	4.0480	-11.92 ± 0.01	-7.76 ± 0.01	0.06	-1.366	-6.72 ± 0.03	-6.08 ± 0.02	0.85	0.80 ± 0.03
060210	33	3.9100	-12.56 ± 0.04	-9.13 ± 0.05	-0.48	-2.208	-6.68 ± 0.05	-5.11 ± 0.02	2.41	1.10 ± 0.02
060218	13	0.0331	-12.26 ± 0.04	-6.27 ± 0.03	1.61	-0.001	-7.70 ± 0.24	-5.19 ± 0.03	3.30	0.71 ± 0.02
060526	130	3.2100	-11.41 ± 0.08	-7.92 ± 0.01	0.30	-3.155	-6.92 ± 0.05	-5.97 ± 0.03	1.14	0.61 ± 0.06
060605	11	3.8000	-11.55 ± 0.08	-8.20 ± 0.03	-0.37	-2.301	-7.39 ± 0.09	-6.34 ± 0.04	1.18	1.10 ± 0.08
060614	40	0.1250	-12.78 ± 0.04	-7.95 ± 0.02	0.34	-0.615	-5.70 ± 0.14	-4.66 ± 0.01	2.01	1.88 ± 0.06
060714	13	2.7100	-12.83 ± 0.02	-8.52 ± 0.02	0.27	-1.315	-7.06 ± 0.03	-5.52 ± 0.03	2.06	1.03 ± 0.05
060904B	40	0.7030	-11.43 ± 0.00	-8.03 ± 0.03	0.59	-3.523	-6.76 ± 0.03	-5.77 ± 0.05	2.28	0.89 ± 0.02
060926	14	3.2080	-12.33 ± 0.08	-9.39 ± 0.04	-1.22	-3.000	-7.26 ± 0.04	-6.66 ± 0.06	0.90	0.61 ± 0.06
061007	26	1.2620	-9.59 ± 0.04	-7.31 ± 0.02	-1.28	-2.796	-5.59 ± 0.07	-4.35 ± 0.01	1.88	1.71 ± 0.01
061121	29	1.3140	-12.11 ± 0.12	-8.34 ± 0.06	0.40	-2.509	-5.78 ± 0.01	-4.86 ± 0.01	1.91	0.95 ± 0.05
070125	7	1.5470	-12.86 ± 0.08	-7.85 ± 0.02	0.37	-0.096	-5.35 ± 0.07	-4.47 ± 0.04	1.85	1.50 ± 0.10

интегрирование последнего в широких пределах дает заведомо неправдоподобную величину из-за расходимости. Если для одного всплеска было доступно несколько измерений максимального потока, то из них отбиралось полученное в наиболее широком диапазоне энергий.

Изотропический эквивалент максимальной болометрической гамма-светимости,  $L_{\text{iso,bol}}$ , рассчитывался из  $F_{\gamma,\text{bol}}$  согласно формуле (5), но при этом полагалось  $k_{\gamma}(z) \approx 1$ .

Интегральный болометрический поток в гамма-диапазоне  $S_{\gamma,\text{bol}}$  и соответствующий ему изотропический эквивалент полной болометрической энергии  $E_{\text{iso,bol}}$  (в эрг) для вышеупомянутых 33 всплесков оценивались приведением к диапазону 1–10 000 кэВ с последующим переходом (для  $E_{\text{iso,bol}}$ ) в собственную систему источника согласно формуле (7) (при  $k_{\gamma}(z) \approx 1$ ).

В качестве длительности гамма-всплеска  $t_{\gamma}$  использовался общепринятый параметр  $t_{90}$ , который публикуется в результатах гамма-наблюдений. При этом  $t_{\gamma}$  отбирались значения, измеренные в диапазоне, наиболее близком к 15–150 кэВ.

Длительность гамма-всплеска в собственной системе определялась из соотношения  $T_{\gamma} = t_{\gamma}/(1+z)$ , без учета поправок за изменение энергетического диапазона.

Дальнейшая работа проводилась с двумя выборками: “наблюдаемой” или выборкой наблюдаемых параметров ( $z, F_{\text{opt}}, S_{\text{opt}}, t_{90\text{opt}}, t_{\text{peak}}, F_{\gamma}, S_{\gamma}, t_{\gamma}, \alpha$ ) и “собственной” или выборкой собственных параметров ( $z, L_{\text{opt}}, E_{\text{opt}}, T_{90\text{opt}}, T_{\text{peak}}, L_{\text{iso}}, E_{\text{iso}}, T_{\gamma}, \alpha$ ) (см. табл. 1 и 2). Кроме того, отдельно изучалась подвыборка оценок болометрических светимостей и полных энергий в гамма-диапазоне (табл. 3).

Таблица 2. Параметры “собственной” выборки

GRB	$z$	$\lg L_{\text{opt}}$ , эрг/с	$\lg E_{\text{opt}}$ , эрг	$\lg T_{90\text{opt}}$ , сут	$\lg T_{\text{peak}}$ , сут	$\lg L_{\text{iso}}$ , эрг/с	$\lg E_{\text{iso}}$ , эрг	$\lg T_{\gamma}$ , с	$\alpha$
970228	0.6950	43.82 ± 0.20	48.85 ± 0.08	1.80	-0.390	51.65 ± 0.07	51.19 ± 0.07	1.67	1.46 ± 0.05
970508	0.8349	44.05 ± 0.04	49.45 ± 0.02	1.82	0.026	51.05 ± 0.07	51.06 ± 0.03	1.10	1.31 ± 0.03
971214	3.4180	44.88 ± 0.04	48.96 ± 0.03	-0.31	-0.964	52.52 ± 0.07	52.32 ± 0.03	1.01	1.33 ± 0.09
980613	1.0969	42.97 ± 0.08	48.22 ± 0.08	0.47	-0.483	50.48 ± 0.13	51.05 ± 0.09	0.98	0.24 ± 0.14
980703	0.9662	43.71 ± 0.05	48.56 ± 0.22	0.91	-0.320	51.62 ± 0.03	52.50 ± 0.04	2.32	1.32 ± 0.05
990123	1.6004	48.98 ± 0.04	50.37 ± 0.02	-1.14	-3.637	52.53 ± 0.07	53.30 ± 0.06	1.61	1.36 ± 0.04
990510	1.6187	45.65 ± 0.01	49.88 ± 0.01	0.13	-1.251	52.21 ± 0.04	52.70 ± 0.02	1.60	0.91 ± 0.02
990712	0.4331	43.59 ± 0.01	48.69 ± 0.02	1.35	-0.884	50.92 ± 0.03	51.47 ± 0.02	1.32	0.97 ± 0.02
991208	0.7055	44.21 ± 0.04	49.18 ± 0.02	1.08	0.086	52.18 ± 0.04	52.93 ± 0.04	1.60	2.21 ± 0.08
991216	1.0200	45.28 ± 0.02	49.86 ± 0.01	0.60	-0.654	52.69 ± 0.00	53.03 ± 0.00	0.88	1.22 ± 0.03
000131	4.5000	44.17 ± 0.16	48.61 ± 0.11	-0.25	-0.195	52.53 ± 0.00	52.93 ± 0.01	1.30	2.27 ± 0.07
000301C	2.0335	44.78 ± 0.02	49.70 ± 0.01	0.44	-0.237	52.39 ± 0.14	52.43 ± 0.14	-0.18	1.40 ± 0.15
000418	1.1182	43.57 ± 0.02	48.95 ± 0.06	1.22	0.068	—	52.21 ± 0.07	1.15	1.19 ± 0.03
000911	1.0585	44.00 ± 0.03	49.10 ± 0.03	1.32	-0.157	52.62 ± 0.07	52.42 ± 0.07	2.39	1.43 ± 0.01
000926	2.0369	45.20 ± 0.00	49.62 ± 0.01	0.22	-0.542	52.33 ± 0.07	52.71 ± 0.07	0.92	1.73 ± 0.02
010222	1.4780	45.23 ± 0.04	49.59 ± 0.01	0.65	-1.212	52.42 ± 0.05	53.16 ± 0.01	1.84	0.86 ± 0.02
011121	0.3620	44.13 ± 0.01	48.93 ± 0.02	1.43	-0.543	51.23 ± 0.07	52.10 ± 0.07	1.31	1.75 ± 0.02
011211	2.1400	44.69 ± 0.06	49.12 ± 0.02	0.11	-0.872	50.60 ± 0.07	52.10 ± 0.07	1.93	0.85 ± 0.07
020124	3.1980	46.48 ± 0.04	50.32 ± 0.02	-0.69	-1.885	52.02 ± 0.03	52.51 ± 0.04	1.07	0.46 ± 0.11
020405	0.6950	43.96 ± 0.08	48.93 ± 0.01	1.25	-0.272	51.25 ± 0.07	52.50 ± 0.07	1.37	1.45 ± 0.13
020813	1.2540	45.21 ± 0.15	49.64 ± 0.11	0.69	-1.507	51.93 ± 0.07	53.08 ± 0.07	1.60	0.81 ± 0.02
020903	0.2510	43.07 ± 0.08	48.55 ± 0.14	1.71	-0.143	—	—	—	0.96 ± 0.05
021004	2.3351	46.74 ± 0.07	50.47 ± 0.01	0.44	-2.943	—	52.01 ± 0.07	1.20	0.54 ± 0.03
021211	1.0060	46.51 ± 0.03	48.76 ± 0.02	1.17	-3.302	—	51.63 ± 0.03	0.14	1.46 ± 0.02
030226	1.9860	45.30 ± 0.02	49.36 ± 0.01	-0.21	-1.306	51.03 ± 0.07	52.12 ± 0.05	1.52	0.82 ± 0.07
030323	3.3720	45.90 ± 0.02	50.02 ± 0.03	0.01	-1.118	51.68 ± 0.10	51.82 ± 0.14	0.45	1.52 ± 0.09
030328	1.5200	45.15 ± 0.04	48.95 ± 0.01	-0.19	-1.679	51.59 ± 0.07	52.78 ± 0.00	1.57	0.70 ± 0.04
030329	0.1685	45.57 ± 0.01	49.85 ± 0.00	1.03	-1.396	50.76 ± 0.07	51.87 ± 0.00	1.63	0.86 ± 0.01
030429X	2.6500	45.03 ± 0.03	49.17 ± 0.02	-0.15	-1.375	52.61 ± 0.07	51.67 ± 0.08	0.40	0.96 ± 0.08
040924	0.8590	44.82 ± 0.04	48.24 ± 0.02	-0.41	-2.228	51.84 ± 0.07	51.49 ± 0.02	-0.09	0.55 ± 0.04
041006	0.7160	44.86 ± 0.04	48.87 ± 0.01	1.41	-2.803	—	51.88 ± 0.07	1.16	0.57 ± 0.05
050315	1.9490	44.38 ± 0.08	48.67 ± 0.08	-0.53	-0.786	51.54 ± 0.10	52.53 ± 0.04	1.51	0.63 ± 0.06
050319	3.2400	46.88 ± 0.02	50.11 ± 0.03	-0.19	-3.928	51.87 ± 0.07	52.12 ± 0.07	0.37	0.42 ± 0.01
050401	2.9000	46.29 ± 0.12	48.82 ± 0.04	0.28	-3.989	52.27 ± 0.07	52.57 ± 0.07	0.93	0.92 ± 0.04
050408	1.2360	45.46 ± 0.04	48.52 ± 0.07	0.53	-2.486	—	51.57 ± 0.07	0.81	1.25 ± 0.20
050502	3.7930	47.58 ± 0.04	49.53 ± 0.01	-0.92	-4.204	51.96 ± 0.07	52.13 ± 0.07	0.62	0.60 ± 0.12

Таблица 2. Окончание

GRB	$z$	$\lg L_{\text{opt}}$ , эрг/с	$\lg E_{\text{opt}}$ , эрг	$\lg T_{90\text{opt}}$ , сут	$\lg T_{\text{peak}}$ , сут	$\lg L_{\text{iso}}$ , эрг/с	$\lg E_{\text{iso}}$ , эрг	$\lg T_{\gamma}$ , с	$\alpha$
050525	0.6060	$46.07 \pm 0.04$	$49.20 \pm 0.02$	0.19	-2.552	$51.60 \pm 0.07$	$51.97 \pm 0.07$	0.74	$1.19 \pm 0.02$
050730	3.9670	$47.36 \pm 0.16$	$50.58 \pm 0.02$	-0.65	-3.793	$51.36 \pm 0.10$	$52.38 \pm 0.04$	1.49	$0.30 \pm 0.05$
050820	2.6120	$47.15 \pm 0.04$	$50.19 \pm 0.03$	0.07	-2.868	$51.36 \pm 0.07$	$51.97 \pm 0.05$	1.32	$0.94 \pm 0.02$
050904	6.2900	$49.62 \pm 0.12$	$51.25 \pm 0.07$	-1.48	-3.085	$51.72 \pm 0.11$	$52.78 \pm 0.02$	1.49	$2.06 \pm 0.10$
050908	3.3440	$45.51 \pm 0.12$	$48.83 \pm 0.06$	-0.90	-2.407	$51.46 \pm 0.06$	$51.88 \pm 0.04$	0.66	$0.63 \pm 0.05$
050922C	2.1980	$46.56 \pm 0.04$	$49.80 \pm 0.02$	-0.83	-2.556	$51.89 \pm 0.02$	$51.83 \pm 0.03$	0.19	$0.33 \pm 0.11$
051109	2.3460	$46.99 \pm 0.05$	$49.50 \pm 0.02$	-0.85	-3.826	$51.69 \pm 0.08$	$52.04 \pm 0.06$	1.03	$0.64 \pm 0.04$
051111	1.5500	$47.39 \pm 0.04$	$49.64 \pm 0.01$	-0.83	-3.804	$51.13 \pm 0.03$	$52.01 \pm 0.01$	1.27	$0.78 \pm 0.01$
051221	0.5465	$43.71 \pm 0.16$	$46.76 \pm 0.10$	-1.92	-1.247	$50.95 \pm 0.01$	$50.84 \pm 0.02$	-0.04	$0.78 \pm 0.01$
060124	2.2960	$46.28 \pm 0.00$	$49.94 \pm 0.01$	-0.36	-1.931	$52.20 \pm 0.11$	$52.43 \pm 0.04$	2.33	$0.92 \pm 0.03$
060206	4.0480	$47.08 \pm 0.01$	$50.54 \pm 0.01$	-0.64	-2.070	$51.99 \pm 0.03$	$51.93 \pm 0.02$	0.14	$0.80 \pm 0.03$
060210	3.9100	$47.90 \pm 0.04$	$50.64 \pm 0.05$	-1.17	-2.899	$52.01 \pm 0.05$	$52.88 \pm 0.02$	1.72	$1.10 \pm 0.02$
060218	0.0331	$42.24 \pm 0.04$	$48.22 \pm 0.03$	1.60	-0.015	$46.82 \pm 0.24$	$49.32 \pm 0.03$	3.29	$0.71 \pm 0.02$
060526	3.2100	$47.22 \pm 0.08$	$50.08 \pm 0.01$	-0.33	-3.779	$51.69 \pm 0.05$	$52.17 \pm 0.03$	0.52	$0.61 \pm 0.02$
060605	3.8000	$47.23 \pm 0.08$	$49.89 \pm 0.03$	-1.05	-2.982	$51.14 \pm 0.09$	$51.52 \pm 0.04$	0.49	$1.10 \pm 0.08$
060614	0.1250	$42.92 \pm 0.04$	$47.69 \pm 0.02$	0.28	-0.666	$49.98 \pm 0.03$	$50.99 \pm 0.01$	1.96	$1.88 \pm 0.06$
060714	2.7100	$45.65 \pm 0.02$	$49.39 \pm 0.02$	-0.30	-1.884	$51.58 \pm 0.03$	$52.55 \pm 0.03$	1.49	$1.03 \pm 0.05$
060904B	0.7030	$45.82 \pm 0.00$	$48.99 \pm 0.03$	0.36	-3.754	$50.49 \pm 0.03$	$51.25 \pm 0.05$	2.05	$0.89 \pm 0.02$
060926	3.2080	$46.92 \pm 0.08$	$49.24 \pm 0.04$	-1.84	-3.624	$51.90 \pm 0.04$	$51.87 \pm 0.06$	0.28	$0.61 \pm 0.06$
061007	1.2620	$48.31 \pm 0.04$	$50.24 \pm 0.02$	-1.64	-3.150	$51.85 \pm 0.07$	$52.88 \pm 0.01$	1.52	$1.71 \pm 0.01$
061121	1.3140	$45.71 \pm 0.12$	$49.12 \pm 0.06$	0.04	-2.873	$51.94 \pm 0.01$	$52.49 \pm 0.01$	1.54	$0.95 \pm 0.05$
070125	1.5470	$45.12 \pm 0.08$	$49.17 \pm 0.02$	-0.04	-0.502	$52.43 \pm 0.07$	$52.91 \pm 0.04$	1.44	$1.50 \pm 0.10$

### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ

При анализе свойств в каждой из выборок были исследованы распределения параметров и их парные корреляции. В каждом распределении определялось положение максимума, среднее значение, среднеквадратическое отклонение, диапазон значений параметров. Для распределений, где обнаружилось два примерно равнозначных максимума, которые не устранялись изменением способа разбиения области значений на интервалы, приведены параметры обоих этих максимумов. Все эти данные представлены в табл. 4.

Затем определялись коэффициенты линейной корреляции для параметров в различных парных комбинациях и проводилась линейная аппроксимация методом наименьших квадратов. По возможности с помощью взвешивания учитывались

различия в точности измерения. К сожалению, эта процедура в силу некоторых обстоятельств не всегда приводила к удовлетворительным результатам. В частности, из-за использования большого числа источников данных, полученных разными наблюдательными группами и опубликованных в разное время, было трудно обеспечить совпадение доверительных вероятностей (например, для уровня  $1\sigma$ ) оценок ошибок всех величин. Для части измерений погрешности вовсе не были опубликованы (в этих случаях относительная ошибка принималась равной 10%). Кроме того, поскольку наблюдения проводились на разных инструментах с использованием различных методик, разброс ошибок весьма значителен (вплоть до порядка величины), из-за чего результат иногда смещался к точкам с особенно малыми заявленными ошибками, не соответствующими реальной экспериментальной точ-

Таблица 3. Боллометрические оценки параметров

GRB	$\lg L_{\text{iso,bol}}$ , эрг/с	$\lg E_{\text{iso,bol}}$ , эрг	GRB	$\lg L_{\text{iso,bol}}$ , эрг/с	$\lg E_{\text{iso,bol}}$ , эрг
970228	$52.09 \pm 0.07$	$51.63 \pm 0.07$	970508	$52.07 \pm 0.07$	$52.08 \pm 0.03$
971214	$53.58 \pm 0.07$	$53.39 \pm 0.03$	980613	$51.40 \pm 0.13$	$51.98 \pm 0.09$
980703	$52.29 \pm 0.03$	$53.17 \pm 0.04$	990123	$53.68 \pm 0.07$	$54.46 \pm 0.06$
990510	$52.74 \pm 0.04$	$53.23 \pm 0.02$	990712	$51.38 \pm 0.03$	$51.92 \pm 0.02$
991216	$53.35 \pm 0.004$	$53.68 \pm 0.001$	000131	$53.77 \pm 0.004$	$54.18 \pm 0.008$
000911	$54.04 \pm 0.07$	$53.84 \pm 0.07$	010222	$53.46 \pm 0.05$	$54.19 \pm 0.01$
020124	$52.72 \pm 0.03$	$53.20 \pm 0.04$	020405	$52.32 \pm 0.07$	$53.57 \pm 0.07$
020813	$53.18 \pm 0.07$	$54.33 \pm 0.07$	021211	—	$52.09 \pm 0.03$
030226	$51.70 \pm 0.07$	$52.79 \pm 0.05$	030323	$52.34 \pm 0.1$	$52.47 \pm 0.14$
030328	$52.33 \pm 0.07$	$53.52 \pm 0.002$	030329	$51.15 \pm 0.07$	$52.26 \pm 0.0004$
030429X	$53.05 \pm 0.07$	$52.12 \pm 0.08$	040924	$52.28 \pm 0.07$	$51.93 \pm 0.02$
041006	—	$52.30 \pm 0.07$	050401	$53.11 \pm 0.07$	$53.50 \pm 0.009$
050408	—	$52.15 \pm 0.07$	050525	$51.85 \pm 0.07$	$52.39 \pm 0.004$
051109	$52.26 \pm 0.08$	$52.69 \pm 0.22$	051221	$51.64 \pm 0.014$	$51.42 \pm 0.14$
060124	$53.05 \pm 0.11$	$53.28 \pm 0.04$	060206	$52.49 \pm 0.03$	$52.43 \pm 0.02$
061007	$53.18 \pm 0.07$	$53.94 \pm 0.03$	061121	$52.77 \pm 0.01$	$53.35 \pm 0.03$
070125	$53.47 \pm 0.07$	$53.95 \pm 0.04$			

ности. Например, во многих случаях в качестве погрешностей оптических наблюдений приводятся сотые или даже тысячные доли звездной величины, хотя различия оценок блеска, одновременно полученных разными группами, достигают нескольких десятых долей звездной величины. Последнее значение, по-видимому, и соответствует реальной точности измерений.

Наконец, даже при условии сравнительной достоверности оценок ошибок разброс величин параметров может заметно превышать сами эти ошибки, и взвешивание будет мало менять формальную точность регрессии, приводя, тем не менее, к искажению коэффициента корреляции из-за влияния нескольких оценок с малыми формальными погрешностями.

Мы учли эти эффекты, и в качестве итогового значения из двух коэффициентов корреляции (вычисленных с учетом и без учета весов) выбирали тот, которому соответствовали меньшие остаточные невязки при линейной аппроксимации зависимости между параметрами. Результаты анализа парных корреляций параметров “наблюдаемой” и “собственной” выборок представлены в табл. 5 и 6 соответственно. В сносках к этим таблицам приведены коэффициенты линейной регрессии для

наиболее значимых корреляций и уровни значимости (SL) — вероятности ошибок первого рода при отвержении нулевой гипотезы о полной некоррелированности ( $R = 0$ ) генеральных совокупностей соответствующих параметров. Невзвешенный и взвешенный коэффициенты корреляции, а также уровень значимости находились по формулам (Корн, Корн, 1973)

$$R(x, y) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (8)$$

$$R_w(x, y) = \frac{\sum_i w_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i w_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i w_i (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (9)$$

$$SL(R) = 1 - \frac{2 \Gamma(\frac{n-1}{2})}{\sqrt{\pi} \Gamma(\frac{n-2}{2})} \int_0^R (1-r^2)^{\frac{n-4}{2}} dr, \quad (10)$$

где  $w_i = 1/s_i^2$  — вес  $i$ -й точки ( $s_i$  — инструментальная погрешность  $i$ -й точки),  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  — средние или средневзвешенные (в формуле (8)) значения ве-



**Таблица 4.** Характеристики распределений параметров различных выборок

Параметр	Наивероятное значение <sup>а</sup>	Ширина ячейки <sup>б</sup>	$N_{\max}^в$	Среднее значение <sup>г</sup>	СквО <sup>д</sup>	Min <sup>е</sup>	Max <sup>ж</sup>	$N^з$
$z$	0.5	0.5	10	$1.93 \pm 0.17$	1.32	0.0331	6.29	58
$\lg F_{\text{opt}}$	-12.75	0.5	13	$-12.41 \pm 0.15$	1.16	-14.73	-8.92	58
$\lg S_{\text{opt}}$	-8.0	0.5	22	$-8.18 \pm 0.09$	0.72	-10.08	-6.04	58
$\lg t_{90\text{opt}}$	0.5	0.5	17	$0.51 \pm 0.11$	0.83	-1.73	2.08	58
$\lg t_{\text{peak}}$	-2.25	0.5	8	$-1.4 \pm 0.16$	1.26	-3.52	0.54	58
	-0.25	0.5	14					
$\lg F_{\gamma}$	-7.125	0.25	6	$-6.24 \pm 0.11$	0.77	-7.7	-4.76	52
	-5.875	0.25	10					
$\lg S_{\gamma}$	-5.575	0.25	9	$-5.3 \pm 0.1$	0.69	-6.65	-4.00	57
$\lg t_{\gamma}$	1.375	0.25	9	$1.62 \pm 0.08$	0.65	0.15	3.3	57
	2.0	0.25	13					
$\lg L_{\text{opt}}$	45.25	0.5	9	$45.53 \pm 0.21$	1.57	42.24	49.62	58
$\lg E_{\text{opt}}$	49.0	0.5	18	$49.34 \pm 0.10$	0.79	46.76	51.25	58
$\lg T_{90\text{opt}}$	0.0	0.5	13	$0.08 \pm 0.12$	0.95	-1.92	1.82	58
$\lg T_{\text{peak}}$	-0.5	0.75	15	$-1.82 \pm 0.17$	1.34	-4.02	0.09	58
$\lg L_{\text{iso}}$	51.75	0.5	19	$51.6 \pm 0.13$	0.92	46.82	52.69	52
$\lg L_{\text{iso,bol}}$	52.5	0.3	9	$52.63 \pm 0.14$	0.78	51.15	54.04	30
$\lg E_{\text{iso}}$	52.0	0.5	19	$52.12 \pm 0.09$	0.70	49.32	53.30	57
$\lg E_{\text{iso,bol}}$	52.25	0.5	9	$52.95 \pm 0.15$	0.87	51.42	54.46	33
$\lg T_{\gamma}$	1.5	0.5	22	$1.19 \pm 0.09$	0.68	-0.18	3.29	58
$\alpha$	0.75	0.25	13	$1.05 \pm 0.06$	0.47	0.24	2.27	58

<sup>а</sup> Центр интервала значений параметра, в который попадает наибольшее число объектов.

<sup>б</sup> Ширина этого интервала.

<sup>в</sup> Число объектов в этом интервале.

<sup>г</sup> Среднее значение параметра и стандартная ошибка среднего.

<sup>д</sup> Среднеквадратичное отклонение выборки.

<sup>е</sup> Наименьшее значение.

<sup>ж</sup> Наибольшее значение.

<sup>з</sup> Количество объектов, для которых получены значения соответствующего параметра.

личин  $x$  и  $y$ ,  $\Gamma(\dots)$  — гамма-функция Эйлера,  $n$  — число точек  $(x_i, y_i)$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА, НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ

##### *Свойства распределений*

По данным о гамма-излучении было обнаружено два пекулярных объекта: GRB 020903, от-

носящийся к подклассу рентгеновских вспышек, и GRB 060218, отождествленный со сверхновой SN 2006aj. Первый был полностью исключен из рассмотрения при изучении параметров гамма-излучения из-за чрезвычайно низкого интегрального потока и отсутствия данных о максимальном потоке и длительности. Второй объект из-за очень

**Таблица 5.** Коэффициенты парных корреляций между параметрами “наблюдаемой” выборки

Параметры	$\lg F_{\text{opt}}$	$\lg S_{\text{opt}}$	$\lg t_{90\text{opt}}$	$\lg t_{\text{peak}}$	$\lg F_{\gamma}$	$\lg S_{\gamma}$	$\lg t_{\gamma}$	$\alpha$
$z$	0.12	-0.29	-0.49	-0.30	-0.51 <sup>a</sup>	-0.41	-0.01	-0.26 <sup>ж</sup>
$\lg F_{\text{opt}}$		0.53 <sup>б</sup>	-0.40	-0.73 <sup>в</sup>	-0.02	0.10	-0.01	0.07 <sup>ж</sup>
$\lg S_{\text{opt}}$			0.32	0.00	0.20	0.41	0.29	0.08
$\lg t_{90\text{opt}}$				0.50	0.30	0.24	0.19	0.18
$\lg t_{\text{peak}}$					0.32	0.29	0.17	0.32 <sup>ж</sup>
$\lg F_{\gamma}$						0.73 <sup>г</sup>	-0.06	0.61 <sup>д,ж</sup>
$\lg S_{\gamma}$							0.42	0.55 <sup>е,ж</sup>
$\lg t_{\gamma}$								0.29 <sup>ж</sup>

<sup>a</sup>  $\lg F_{\gamma} = (-5.65 \pm 0.17) - (0.29 \pm 0.07)z$ , уровень значимости  $SL = 2.2 \times 10^{-5}$ .

<sup>б</sup>  $\lg S_{\text{opt}} = (-4.1 \pm 0.9) + (0.33 \pm 0.07) \lg F_{\text{opt}}$ ,  $SL = 9.4 \times 10^{-6}$ .

<sup>в</sup>  $\lg F_{\text{opt}} = (-12.9 \pm 0.11) - (0.48 \pm 0.06) \lg t_{\text{peak}}$ ,  $SL = 4.0 \times 10^{-11}$ .

<sup>г</sup>  $\lg S_{\gamma} = (-1.07 \pm 0.56) + (0.67 \pm 0.09) \lg F_{\gamma}$ ,  $SL = 4.1 \times 10^{-10}$ .

<sup>д</sup>  $\lg \alpha = (2.28 \pm 0.34) + (0.3 \pm 0.06) \lg F_{\gamma}$ ,  $SL = 7.9 \times 10^{-7}$ .

<sup>е</sup>  $\lg \alpha = (2.6 \pm 0.3) + (0.3 \pm 0.06) \lg S_{\gamma}$ ,  $SL = 4.7 \times 10^{-6}$ .

<sup>ж</sup> Результат, вычисленный со взвешиванием.

**Таблица 6.** Коэффициенты парных корреляций между параметрами “собственной” выборки

Параметры	$\lg L_{\text{opt}}$ , эрг/с	$\lg E_{\text{opt}}$ , эрг	$\lg T_{90\text{opt}}$ , сут	$\lg T_{\text{peak}}$ , сут	$\lg L_{\text{iso}}$ , эрг/с	$\lg E_{\text{iso}}$ , эрг	$\lg T_{\gamma}$ , с	$\alpha$
$z$	0.64 <sup>a</sup>	0.58 <sup>б</sup>	-0.63 <sup>в</sup>	-0.43	0.31 <sup>м</sup>	0.26 <sup>м</sup>	-0.28	-0.04
$\lg L_{\text{opt}}$		0.78 <sup>г</sup>	-0.67 <sup>д</sup>	-0.82 <sup>е</sup>	0.25 <sup>м</sup>	0.31 <sup>м</sup>	-0.25	-0.12 <sup>л</sup>
$\lg E_{\text{opt}}$			-0.31	-0.41	0.35 <sup>м</sup>	0.49 <sup>м</sup>	-0.01	-0.03 <sup>л</sup>
$\lg T_{90\text{opt}}$				0.58 <sup>ж</sup>	-0.11 <sup>м</sup>	-0.13 <sup>м</sup>	0.34	0.09 <sup>л</sup>
$\lg T_{\text{peak}}$					0.01 <sup>м</sup>	-0.02 <sup>м</sup>	0.28	0.32 <sup>л</sup>
$\lg L_{\text{iso}}$						0.67 <sup>з,м</sup>	-0.14 <sup>м</sup>	0.19 <sup>л,м</sup>
						0.79 <sup>и,н</sup>		
$\lg E_{\text{iso}}$							0.35 <sup>м</sup>	0.45 <sup>л</sup>
							0.56 <sup>к,н</sup>	
$\lg T_{\gamma}$								0.32 <sup>л</sup>

<sup>a</sup>  $\lg L_{\text{opt}} = (44.08 \pm 0.28) + (0.76 \pm 0.12)z$ ,  $SL = 3.2 \times 10^{-8}$ .

<sup>б</sup>  $\lg E_{\text{opt}} = (48.67 \pm 0.15) + (0.35 \pm 0.07)z$ ,  $SL = 9.1 \times 10^{-7}$ .

<sup>в</sup>  $\lg T_{90\text{opt}} = (0.96 \pm 0.17) - (0.45 \pm 0.07)z$ ,  $SL = 5.8 \times 10^{-8}$ .

<sup>г</sup>  $\lg E_{\text{opt}} = (31.4 \pm 1.9) + (0.39 \pm 0.04) \lg L_{\text{opt}}$ ,  $SL = 2.7 \times 10^{-13}$ .

<sup>д</sup>  $\lg T_{90\text{opt}} = (18.5 \pm 2.7) - (0.41 \pm 0.06) \lg L_{\text{opt}}$ ,  $SL = 4.4 \times 10^{-9}$ .

<sup>е</sup>  $\lg L_{\text{opt}} = (43.8 \pm 0.2) - (0.97 \pm 0.09) \lg T_{\text{peak}}$ ,  $SL = 1.7 \times 10^{-15}$ .

<sup>ж</sup>  $\lg T_{90\text{opt}} = (0.83 \pm 0.17) + (0.41 \pm 0.08) \lg T_{\text{peak}}$ ,  $SL = 9.1 \times 10^{-7}$ .

<sup>з</sup>  $\lg E_{\text{iso}} = (18 \pm 5) + (0.66 \pm 0.10) \lg L_{\text{iso}}$ ,  $SL = 1.8 \times 10^{-8}$ .

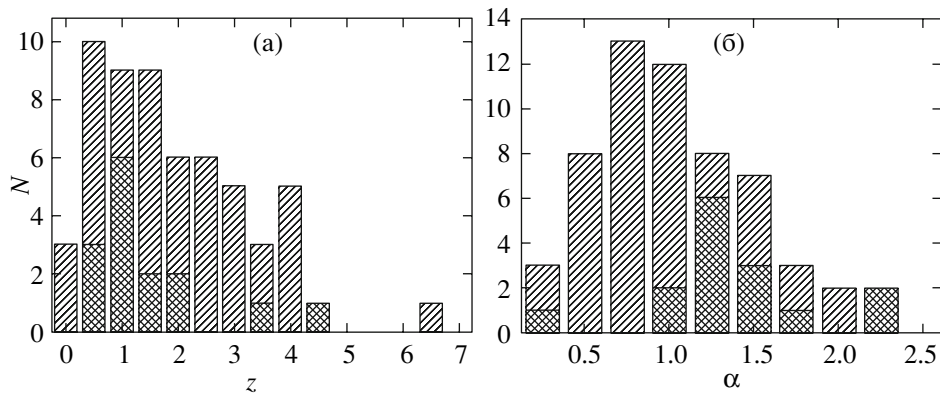
<sup>и</sup>  $\lg E_{\text{iso,bol}} = (6 \pm 6.8) + (0.89 \pm 0.13) \lg L_{\text{iso,bol}}$ ,  $SL = 1.0 \times 10^{-7}$ .

<sup>к</sup>  $\lg E_{\text{iso,bol}} = (52.1 \pm 0.27) + (0.75 \pm 0.2) \lg T_{\gamma}$ ,  $SL = 3.5 \times 10^{-4}$ .

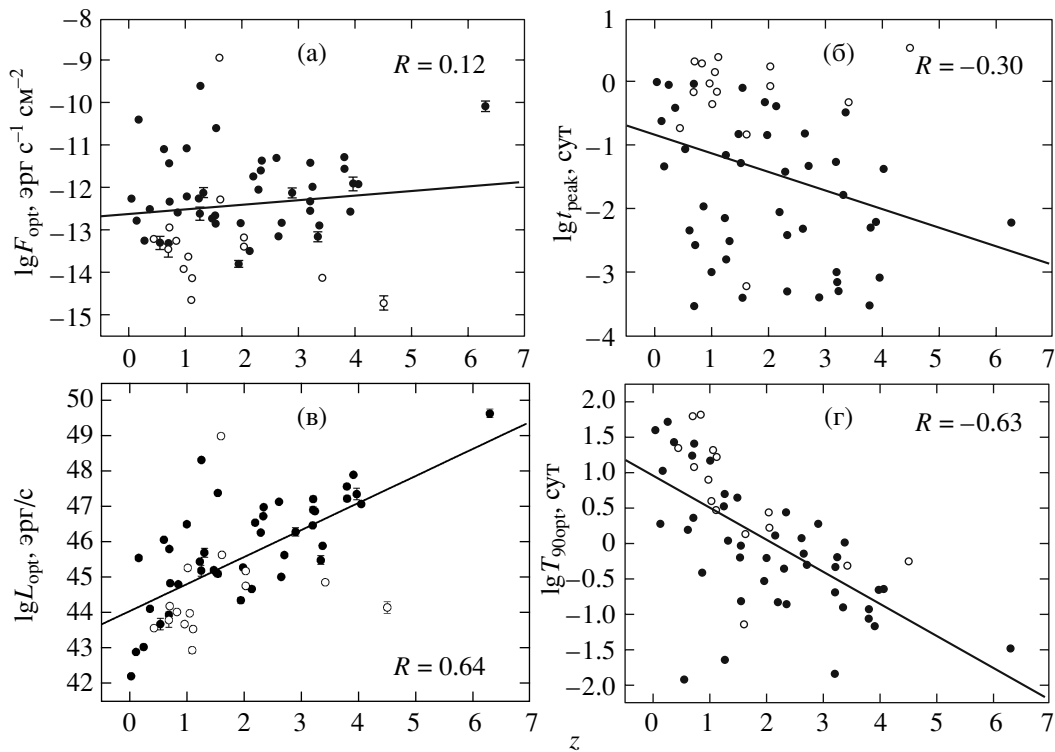
<sup>л</sup> Результат, вычисленный со взвешиванием.

<sup>м</sup> Без учета GRB 060218.

<sup>н</sup> Для болометрических параметров.



**Рис. 1.** Распределения красных смещений (а) и показателей степени спада оптического потока,  $\alpha$ , (б). Обратной штриховкой обозначены распределения параметров подвыборки 15 всплесков эпохи до запуска HETE.

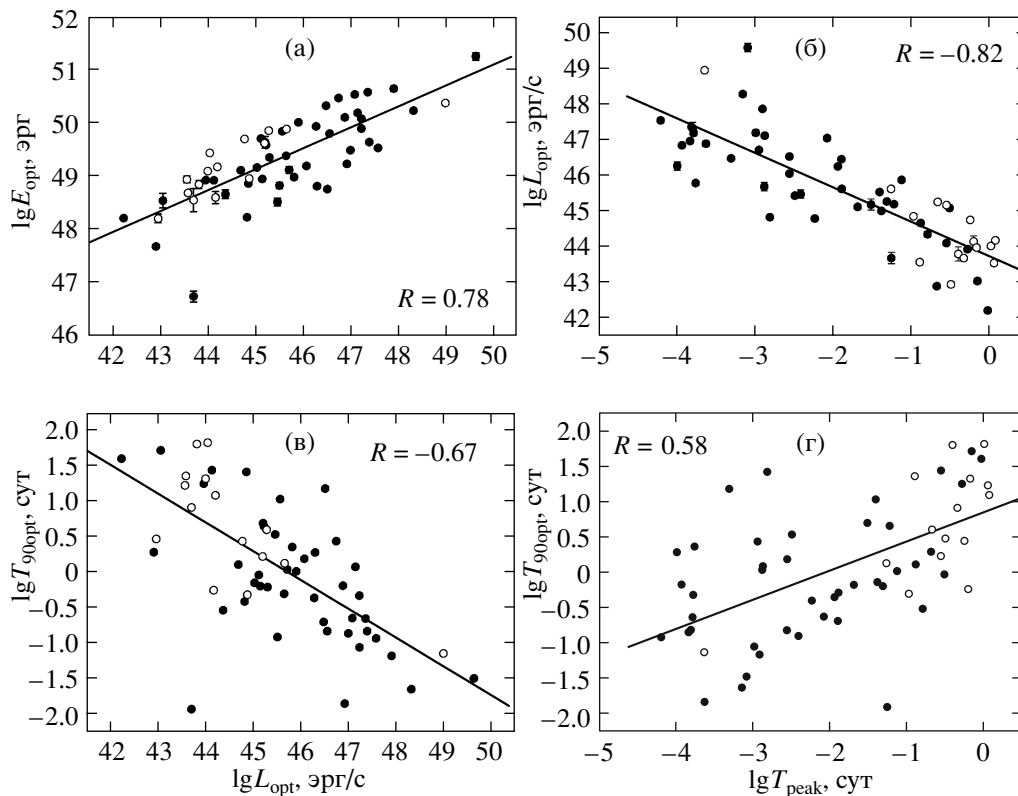


**Рис. 2.** Корреляции оптических параметров с красным смещением. Открытыми кружками обозначены 15 всплесков, открытых до запуска HETE, а темными — 43 объекта эпохи HETE-Swift: (а) — зависимость наблюдаемого максимального оптического потока от красного смещения; (б) — зависимость времени оптического максимума от красного смещения; (в) — корреляция между максимальной оптической светимостью и красным смещением; (г) — корреляция между длительностью послесвечения и красным смещением.

малых гамма-светимости и энергии исключался при анализе корреляций с участием этих величин.

Представляют несомненный интерес особенности распределения степенных показателей ( $\alpha$ ) спада оптического потока на начальных стадиях послесвечений (см. табл. 4 и рис. 1б). Половина из них оказалась меньше единицы. Значения  $\alpha$ , заметно меньшие единицы, невозможно получить в модели послесвечения для внешней ударной волны

с энергетическим спектром электронов  $N(E) \propto E^{-p}$  при общепринятых значениях  $p \approx 2.2-2.4$  и синхротронным механизмом излучения (Бхаттачарья, 2001; Дай, Чен, 2001). Чтобы показатели спада были заметно меньше единицы, требуется либо  $p < 2$ , либо действие еще какого-нибудь (помимо синхротронного) механизма генерации оптического излучения. Следует отметить, что на сложность



**Рис. 3.** Корреляции оптических параметров между собой в собственной системе отсчета. Открытыми кружками обозначены 15 всплесков, открытых до запуска НАТЕ, а темными — 43 объекта эпохи НАТЕ-Swift: (а) — корреляция оптических полной энергии и максимальной светимости; (б) — корреляция между светимостью в максимуме оптической кривой блеска и временем этого максимума; (в) — корреляция между максимальной светимостью и длительностью послесвечения; (г) — корреляция между длительностью послесвечения и временем максимума в оптике.

интерпретации малых скоростей спада блеска послесвечений также указывали Цех и др. (2006).

#### Корреляции $z - L_{\text{opt}}$ и $z - T_{90\text{opt}}$

Мы впервые обнаружили возрастание максимальной оптической светимости послесвечений с увеличением красного смещения (коэффициент корреляции  $R = 0.64$ ) при уменьшении их длительности ( $R = -0.63$ ) (см. табл. 5 и 6, рис. 2в,г).

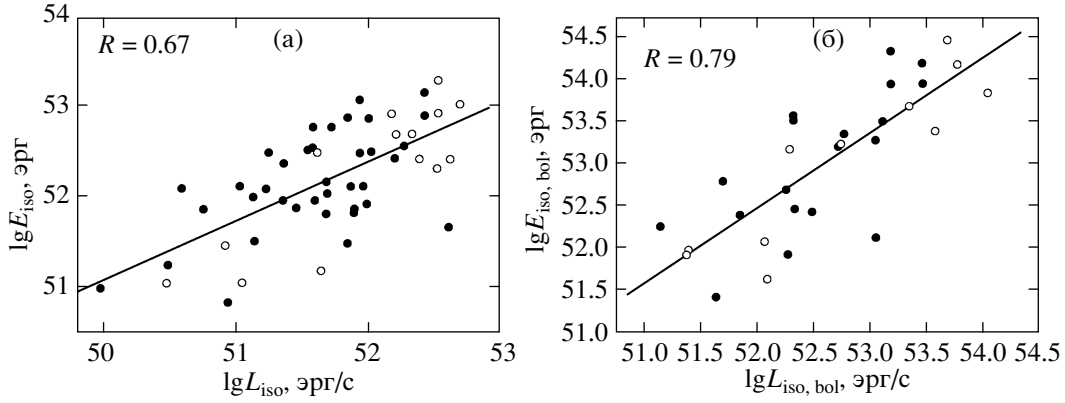
Представляется, что эти зависимости отражают реальную эволюцию свойств послесвечений, а не являются результатом наблюдательной селекции. Действительно, в последнем случае можно было бы ожидать, что наблюдаемый поток ( $F_{\text{opt}}$ ) более далеких объектов меньше, поэтому они могут обнаруживаться лишь на ранних (с большей светимостью) своих стадиях (максимальная светимость показывает сильную корреляцию со временем максимума, см. следующий раздел). Очевидными следствиями такого рода селекции должны быть антикорреляции между красным смещением и моментом регистрации максимума кривой блеска ( $t_{\text{peak}}$ ), а также собственно максимальным потоком ( $F_{\text{opt}}$ ). Еще одним свидетельством указанной селекции

было бы превышение величинами потоков некоего минимального порогового значения при приближении к нему на больших  $z$ . Однако в исследуемой выборке эти эффекты не наблюдаются: корреляции  $t_{\text{peak}}$  и  $F_{\text{opt}}$  с красным смещением практически отсутствуют ( $R = -0.30$  и  $R = 0.12$  соответственно, см. табл. 5 и рис. 2а,б), а разброс потоков не зависит от  $z$ , оставаясь достаточно большим.

Таким образом, есть веские основания полагать, что обнаруженные нами зависимости максимальных светимостей и продолжительностей оптических послесвечений отражают их реальную космологическую эволюцию.

#### Связи между характеристиками оптических послесвечений

Значимые корреляции были обнаружены между полными энергиями ( $E_{\text{opt}}$ ) и максимальными светимостями ( $L_{\text{opt}}$ ) послесвечений ( $R = 0.78$ ), максимальными светимостями и моментами максимумов ( $T_{\text{peak}}$ ,  $R = -0.82$ ), максимальными светимостями и длительностями послесвечений ( $T_{90\text{opt}}$ ,  $R = -0.67$ ), а также между моментами максимумов



**Рис. 4.** Корреляции гамма-параметров. Открытыми кружками обозначены 15 всплесков, открытых до запуска НЕТЕ, а темными — 43 объекта эпохи НЕТЕ-Swift: (а) — корреляция между максимальной светимостью и полной энергией в диапазоне 15–150 кэВ; (б) — корреляция между болометрическими максимальной светимостью и полной энергией гамма-излучения.

и длительностями ( $R = 0.58$ ). Аналоги этих параметров в “наблюдаемой” выборке скоррелированы слабее, что свидетельствует о реальных физических связях между характеристиками послесвечений в их собственной системе отсчета (см. табл. 5 и 6 и рис. 3). Для некоторых параметров (прежде всего для  $L_{\text{opt}}$  и  $E_{\text{opt}}$ ) похожие связи были установлены при анализе выборок гамма-всплесков меньшего объема (Бескин и др., 2000; Бартолини и др., 2001; Греко и др., 2007).

Как отмечалось ранее, подавляющее большинство (исключения составляют семь случаев) максимальных светимостей (или потоков в “наблюдаемой” выборке) на самом деле соответствуют только более или менее ранним измерениям потоков послесвечений. Другими словами, при изменении моментов обнаружения оптического излучения гамма-всплеска мы попадаем на разные фазы его послесвечения. В таком случае разумно предположить, что обнаруженные корреляции являются следствием сравнительной универсальности степенного характера этих кривых  $L(T) \propto T^{-\alpha}$ . В частности, это прямо подтверждается высокой значимостью корреляции  $\lg L_{\text{opt}} - \lg T_{\text{peak}}$ . Покажем, что универсальность затухания блеска послесвечений обуславливает и другие корреляции. Представим зависимость светимости послесвечения от времени в виде

$$L(T) = L_{\text{opt}} \left( \frac{T_{\text{peak}}}{T} \right)^{\alpha}, \quad (11)$$

тогда

$$E_{\text{opt,PL}} \approx \frac{1}{0.9} \int_{T_{\text{peak}}}^{(T_{\text{peak}}+T_{90\text{opt}})} L(T) dT = \quad (12)$$

$$= \frac{L_{\text{opt}} T_{\text{peak}}}{0.9(\alpha - 1)} \left[ 1 - \left( \frac{T_{\text{peak}}}{T_{\text{peak}} + T_{90\text{opt}}} \right)^{\alpha-1} \right]$$

и

$$T_{90\text{opt,PL}} \approx \quad (13)$$

$$\approx T_{\text{peak}} \left[ \left( 1 + \frac{0.9 E_{\text{opt}} (1 - \alpha)}{L_{\text{opt}} T_{\text{peak}}} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} - 1 \right].$$

Индексом PL помечены энергия и длительность послесвечения, определяемые по параметрам каждого события при  $\alpha \neq 1$ .

$E_{\text{opt,PL}}$  и  $T_{90\text{opt,PL}}$  были вычислены для всех объектов выборки и сравнивались с экспериментальными  $E_{\text{opt}}$  и  $T_{90\text{opt}}$ . При этом оказалось, что  $\lg E_{\text{opt}} = (6.5 \pm 1.4) + (0.87 \pm 0.02) \lg E_{\text{opt,PL}}$  и  $\lg T_{90\text{opt,PL}} = (-0.05 \pm 0.07) + (0.79 \pm 0.07) \lg T_{90\text{opt}}$  при коэффициентах корреляции 0.95 и 0.88 соответственно.

При большой значимости корреляции регрессионные коэффициенты, однако, не позволяют говорить о тождестве “модельных” и измеряемых энергий, хотя они и близки друг к другу. Очевидно, это результат проявления индивидуальных особенностей послесвечений на ранних этапах (они дают существенный вклад в энергетику), когда изменение потока может отличаться от степенного закона. Об этом говорит и то, что когда мы работали с менее полной выборкой объектов и наблюдательных данных, в которой было меньше послесвечений, обнаруженных в первые десятки минут после гамма-всплеска, “модельные” и измеренные энергии были практически идентичны ( $\lg E_{\text{opt}} = (3.8 \pm 2) + (0.92 \pm 0.04) \lg E_{\text{opt,PL}}$ ).

Отклонения от простого степенного спада, согласно наблюдениям, могут представлять собой иррегулярные события (вспышки, как у

GRB 060206, “покачивания” кривой блеска, как у GRB 030329 и т.п.) либо плавное увеличение показателя  $\alpha$  со временем в течение первых нескольких десятков минут. Тем не менее, сходство характеристик оптических кривых блеска послесвечений позволяет ставить задачу об изучении их обобщенных характеристик для всей нашей выборки (на эту тему готовится отдельная статья).

#### *Корреляции между параметрами гамма-излучения*

Другим видом надежно выявляемой корреляции является соотношение между светимостями и полными энергиями всплесков в гамма-диапазоне (или их эквивалентами в “наблюдаемой” выборке). Она обнаруживается и в подвыборке болометрических величин, причем  $\lg E_{\text{iso,bol}} \approx \lg L_{\text{iso,bol}}$  (см. табл. 6 и рис. 4а,б).

По аналогии с предыдущим, естественно предположить, что и эти корреляции являются следствием универсального характера кривых блеска в гамма-диапазоне. Положим, что они имеют форму пульсов с быстрым нарастанием и экспоненциальным спадом интенсивности (FRED-пульсы, см., например, обзор Пирана, 2004),  $L(T) \propto L_0 \exp(-T/T_0)$ , где  $L_0$  и  $T_0$  — нормировочные коэффициенты. Тогда  $E_{\text{iso,FRED}} = [L(T_i) - L(T_f)]T_0$ , где индексы  $i$  и  $f$  соответствуют начальному и конечному моментам экспоненциального затухания пульса, а время отсчитывается от некоего нуля-пункта.

Если  $T_f$  достаточно велико ( $L(T_f) \rightarrow 0$ ), то  $\lg E_{\text{iso,FRED}} \approx \lg L(T_i) + \lg T_0$ . Нетрудно убедиться, что это соотношение соответствует обнаруженному соотношению при характерном времени  $T_0 \approx 1$  с. Действительно, согласно некоторым работам (Пиран, 2004, а также ссылки там), эта величина близка к средней длительности пульсов. Таким образом, если высказанное предположение верно, основной вклад в энергию гамма-излучения всплесков с зарегистрированными послесвечениями вносится самым ярким пульсом всплеска.

Необходимо отметить, что корреляция между  $E_{\text{iso}}$  и  $L_{\text{iso}}$  в диапазоне 15–150 кэВ существенно слабее, чем у болометрических параметров ( $R = 0.67$  против  $R = 0.79$ ). Отличаются и коэффициенты регрессии:  $E_{\text{iso}} \propto L_{\text{iso}}^{0.66}$  (см. табл. 6). Это может быть следствием либо отличия кривых блеска от FRED-пульсов, либо различия усредненных спектров от спектров в максимуме, в то время как последние для большинства всплесков выборки не были измерены, и мы пользовались усредненными для коррекций и энергии, и максимальной светимости.

Кроме того, обнаружена корреляция ( $R = 0.56$ , см. табл. 6) корреляция между болометрической

энергией и длительностью  $T_\gamma$ , отсутствующая в “стандартном” диапазоне.

Все эти факты свидетельствуют о сложной зависимости формы, длительности и особенностей генерации излучения гамма-всплесков от энергии фотонов (т.е. спектра). С другой стороны, по-видимому, детальный анализ именно болометрических параметров источников необходим для понимания их общих физических свойств. Будущие наблюдения гамма-обсерватории GLAST, готовящейся к запуску, позволят серьезно продвинуться в этом направлении.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При статистическом анализе результатов наблюдений принципиальными условиями являются однородность выборки данных и отсутствие очевидных эффектов селекции. В настоящей работе эти требования тем более важны, поскольку суммируются итоги трех различных программ, различающихся и условиями регистрации гамма-всплесков, и диапазонами наблюдений, и способами обнаружения оптических послесвечений.

В начале статьи мы подробно описали способы унификации характеристик всплесков, как в гамма-диапазоне (приведение к диапазону 15–150 кэВ и болометрическому), так и в оптике (использование результатов наблюдений только в  $R$ -полосе). Отметим дополнительно, что мы исследовали всплески, чьи интенсивности и энергии в гамма-диапазоне существенно превышали пороги обнаружения гамма-телескопов, многие из них также обнаруживались несколькими аппаратами одновременно. Таким образом, эффекты селекции (и неоднородности), обусловленные различиями чувствительности инструментов и критериев обнаружения, в нашей выборке представляются несущественными.

Основным фактором, который может приводить к неоднородности исследуемой выборки, является изначально большая задержка между обнаружением всплесков гамма-детектором в эпоху до запуска HETE (15 объектов с GRB 970228 по GRB 000926 включительно) и их оптическими отождествлениями — несколько часов (за исключением известного всплеска GRB 990123). События же, зарегистрированные в эпоху HETE и позднее (43 объекта с GRB 010222 по GRB 070125) могли наблюдаться в оптике уже через десятки секунд—минуты.

Как мы показали выше,  $t_{\text{peak}}$  (и  $T_{\text{peak}}$ ) есть интервал между моментом регистрации гамма-всплеска и первым обнаружением оптического излучения, а не реальное запаздывание максимума послесвечения (ясно, что оно должно быть еще меньше). Тогда можно ожидать, что первые 15 событий будут иметь несколько меньший блеск

**Таблица 7.** Сравнение подвыборок наблюдаемых параметров гамма-всплесков, обнаруженных в эпохи до НЕТЕ (15 объектов) и НЕТЕ-Swift (43 объекта)

Параметр <sup>a</sup>	$z$	$\lg F_{\text{opt}}$	$\lg S_{\text{opt}}$	$\lg t_{90\text{opt}}$	$\lg t_{\text{peak}}$
$\Delta/\sigma(\Delta)$	1.45	2.8	0.27	3.1	5.4
$p^b$	0.15	0.6	0.33	0.09	0.16
Среднее по 15	$1.54 \pm 0.29$	$-13.2 \pm 0.36$	$-8.22 \pm 0.19$	$1.02 \pm 0.19$	$-0.26 \pm 0.23$
Среднее по 43	$2.06 \pm 0.21$	$-12.13 \pm 0.14$	$-8.16 \pm 0.11$	$0.33 \pm 0.12$	$-1.78 \pm 0.17$
Среднее по 58	$1.93 \pm 0.17$	$-12.41 \pm 0.15$	$-8.18 \pm 0.09$	$0.51 \pm 0.11$	$-1.4 \pm 0.17$

Параметр <sup>a</sup>	$\lg F_{\gamma}$	$\lg S_{\gamma}$	$\lg t_{\gamma}$	$\alpha$
$\Delta/\sigma(\Delta)$	3.6	1.8	0.44	2.9
$p^b$	0.10	0.02	0.15	0.33
Среднее по 15	$-5.7 \pm 0.17$	$-5.02 \pm 0.18$	$1.69 \pm 0.15$	$1.36 \pm 0.13$
Среднее по 43	$-6.44 \pm 0.12$	$-5.39 \pm 0.1$	$1.6 \pm 0.1$	$0.94 \pm 0.06$
Среднее по 58	$-6.24 \pm 0.11$	$-5.3 \pm 0.09$	$1.62 \pm 0.09$	$1.05 \pm 0.06$

<sup>a</sup> Практически такие же характеристики отличий двух подвыборок были получены для параметров в собственной системе.

<sup>b</sup> Уровень значимости при отвержении гипотезы о принадлежности обеих подвыборок к одной генеральной совокупности.

(и светимость), приходясь на более поздние стадии затухания оптического излучения. Их полный поток (и полная оптическая энергия) и длительность по этой же причине могут отличаться от соответствующих параметров 43 всплесков эпохи НЕТЕ-Swift.

Анализ различий свойств двух упомянутых подвыборок в контексте их возможного влияния на обнаруженные статистические связи между параметрами (прежде всего, наблюдаемыми) был проведен в три стадии. В начале сопоставлялись разницы  $\Delta$  между средними значениями параметров в подвыборках с оценкой стандарта  $\sigma(\Delta)$  этих разниц, при этом  $\sigma(\Delta) = \sqrt{\sigma_{15}^2 + \sigma_{43}^2}$ , где индексами 15 и 43 отмечены стандарты средних для первой и второй подвыборки соответственно. Величины  $\Delta/\sigma(\Delta)$  приведены в табл. 7.

Как и ожидалось, максимально отличаются времена запаздывания между оптическими и гамма-событиями,  $t_{\text{peak}}$ . А вот разница средних в подвыборках для максимальных оптических потоков, гамма-потоков и длительностей послесвечений существенно меньше и практически отсутствует для красных смещений, полных потоков в оптике и гамма-диапазоне, а также продолжительностей гамма-всплесков. Необходимо подчеркнуть, что оценки различий нельзя интерпретировать статистически, сопоставляя им уровни значимости при отвержении гипотез о совпадении средних. Обусловлено это ненормальностью распределений исследуемых параметров, для сравнения которых

на втором этапе мы использовали непараметрический критерий Колмогорова–Смирнова (Большев, Смирнов, 1983). Во второй строке табл. 7 приведены уровни значимости  $p$  для отвержения нулевой гипотезы о принадлежности обеих подвыборок одной генеральной совокупности.

Легко видеть, что вероятность ложного отвержения этой гипотезы для изучаемых наборов параметров, как правило, превышает 10–15%. Другими словами, объединенные совокупности параметров с большой вероятностью являются однородными, а различия между средними связаны с обычными эффектами малых выборок. Исключением является лишь совокупность значений полного потока в гамма-диапазоне: риск ошибиться, отвергнув предположение о совпадении подвыборок, составляет в этом случае лишь 2%. Подчеркнем, что наши выводы не носят абсолютного характера, поскольку основываются на использовании вполне конкретного статистического теста.

Для большей определенности выводов о возможном влиянии неоднородности наблюдательных данных на обнаруженные соотношения между параметрами, на третьем этапе мы сравнивали обнаруженные корреляции с их аналогами в подвыборках 15 объектов эпохи до НЕТЕ и 43 объектов эпохи НЕТЕ-Swift. На рис. 2–4, представляющих зависимости различных пар параметров с коэффициентом корреляции, большим 0.55, объекты “малой” (15) и “большой” (43) подвыборок изображены открытыми и темными кружками соответственно. Нетрудно убедиться, что они довольно

хорошо “перемешаны”. В то же время оценки соответствующих коэффициентов корреляции для пар “большой” подвыборки с точностью в несколько процентов совпадают с таковыми в полной совокупности параметров (58 объектов).

Иными словами, включение в статистический анализ 15 гамма-всплесков эпохи до HETE не изменяет характер обнаруженных связей, оставляя выборку однородной, но, разумеется, повышает значимость этих связей и точность количественных оценок из-за 25%-го увеличения объема выборки. Можно полагать, что установленные между разными параметрами гамма-всплесков статистические зависимости отражают реальные физические свойства этих объектов.

Наибольший интерес, по-видимому, представляет возрастание максимальной светимости оптических послесвечений с увеличением  $z$  (см. табл. 5, 6 и рис. 2в) при  $R = 0.64$ , в то же время у более далеких объектов уменьшается длительность послесвечений ( $R = -0.67$ ) и антикоррелирует с  $L_{\text{opt}}$  ( $R = -0.64$ ), а полное энерговыделение в оптическом диапазоне слабо зависит от  $z$ . Эти эффекты, на наш взгляд, свидетельствуют о космологической эволюции факторов, определяющих в первую очередь темп конверсии энергии первичного взрыва в оптическое излучение, — плотности, структуры окружающего вещества, напряженности и структуры магнитного поля в излучающей области.

Другой сорт корреляций — между энергией и светимостью всплесков как в оптическом, так и в гамма диапазонах — обусловлен, по-видимому, сходством структуры различных гамма-всплесков, а также относительно универсальным характером кривых блеска их оптических послесвечений.

Сильная обратная зависимость максимальной оптической светимости  $L_{\text{opt}}$  и запаздывания максимума послесвечений относительно гамма-всплеска  $T_{\text{peak}}$  ( $R = -0.82$ ), присутствующая и в “наблюдаемой” выборке ( $R = -0.73$ ), давала надежду на получение эмпирической связи между зависимостями “светимость—запаздывание” и “поток—наблюдаемое запаздывание”. Связь такого рода позволила бы определять красное смещение из измеряемых в наблюдениях характеристик. К сожалению, из-за их большого разброса эту задачу пока решить не удалось.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на значительный рост информации о гамма-всплесках, говорить о полном понимании этого феномена еще рано. Взгляды меняются, возникают новые представления. Настоящая работа является одной из попыток сбора, унификации и статистического анализа максимально полного набора наблюдательных данных о гамма-всплесках

с оптическими послесвечениями и измеренными красными смещениями.

Анализ парных корреляций различных параметров позволил обнаружить признаки космологической эволюции скорости высвечивания энергии в оптическом диапазоне, по-видимому, связанные с изменением свойств среды, окружающей гамма-всплеск. Корреляции между максимальной светимостью и полной энергией в гамма- и оптическом диапазонах отражают универсальный для всей совокупности всплесков характер процессов генерации излучения.

Обнаруженные особенности структуры кривых блеска оптических послесвечений, проявившиеся в корреляции “светимость—запаздывание”, будут более детально исследованы в ближайшем будущем. Однако уже сейчас ясно, что неожиданно медленный спад блеска на ранних стадиях (малые  $\alpha$ ) трудно объяснить в рамках современных моделей послесвечений.

## ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ

С сайтов <http://grad40.as.utexas.edu/grblog.php> и <http://www.mpe.mpg.de/~jcg/grbgen.html> брались данные циркуляров IAUC и GCN по координатам объектов, звездным величинам хозяйских галактик, красным смещениям, результатам оптических и гамма-наблюдений для всех всплесков выборки. Кроме того, результаты гамма-наблюдений брались с сайтов космических обсерваторий: <http://space.mit.edu/HETE/>, [http://gcn.gsfc.nasa.gov/integral\\_grbs.html](http://gcn.gsfc.nasa.gov/integral_grbs.html), [http://gcn.gsfc.nasa.gov/sax\\_grbs.html](http://gcn.gsfc.nasa.gov/sax_grbs.html), [http://gcn.gsfc.nasa.gov/batse\\_grbs.html](http://gcn.gsfc.nasa.gov/batse_grbs.html), [http://gcn.gsfc.nasa.gov/swift\\_grbs.html](http://gcn.gsfc.nasa.gov/swift_grbs.html), [http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift/archive/grb\\_table/](http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift/archive/grb_table/).

Данные следующих всплесков полностью заимствованы из интернет-ресурсов: GRB 030323, GRB 050525, GRB 050820, GRB 050904, GRB 050908, GRB 050922C, GRB 051109, GRB 051111, GRB 051221, GRB 060605, GRB 060714, GRB 060904B, GRB 060926, GRB 061121, GRB 070125.

Часть данных для всплесков, перечисленных ниже, бралась из указанных публикаций.

GRB 970228: Уэйнврайт и др. (2007), де Паскуале и др. (2006а), Галама и др. (1997), Гарсиа и др. (1998). GRB 970508: Уэйнврайт и др. (2007), де Паскуале и др. (2006а), Гарсиа и др. (1998), Галама и др. (1998). GRB 971214: Уэйнврайт и др. (2007), де Паскуале и др. (2006а), Диркс и др. (1998). GRB 980613: Уэйнврайт и др. (2007), де Паскуале и др. (2006а), Хйорт и др. (2002), Дйорговски и др. (2003). GRB 980703: Уэйнврайт и др. (2007), де Паскуале и др. (2006а),



Вресвейк и др. (1999), Холланд и др. (2001), Фрейл и др. (2003), Кастро-Тирадо и др. (1999а), Блум и др. (1998). GRB 990123: Уэйнврайт и др. (2007), Канеко и др. (2006), де Паскуале и др. (2006а), Кастро-Тирадо и др. (1999б), Холланд и др. (2000), Кулкарни и др. (1999). GRB 990510: Уэйнврайт и др. (2007), де Паскуале и др. (2006а), Холланд и др. (2000), Бойерман и др. (1999), Харрисон и др. (1999), Израэль и др. (1999), Станек и др. (1999). GRB 990712: Уэйнврайт и др. (2007), де Паскуале и др. (2006а), Хйорт и др. (2000), Саху и др. (2000). GRB 991208: Уэйнврайт и др. (2007), Кастро-Тирадо и др. (2001). GRB 991216: Уэйнврайт и др. (2007), Канеко и др. (2006), Хелперн и др. (2000), Гарнавич и др. (2000). GRB 000131: Уэйнврайт и др. (2007), Андерсен и др. (2000). GRB 000301С: Уэйнврайт и др. (2007), Бхаргави, Ковсик (2000), Йенсен и др. (2001), Мазетти и др. (2000), Сагар и др. (2000). GRB 000418: Уэйнврайт и др. (2007), Клозе и др. (2000). GRB 000911: Лаццати и др. (2001), Прайс и др. (2002). GRB 000926: Уэйнврайт и др. (2007), Финбо и др. (2001), Сагар и др. (2001). GRB 010222: Уэйнврайт и др. (2007), де Паскуале и др. (2006а), Ковсик и др. (2001), Станек и др. (2001). GRB 011121: Уэйнврайт и др. (2007), де Паскуале и др. (2006а), Блум и др. (2002), Гарнавич и др. (2003). GRB 011130: Уэйнврайт и др. (2007), Барро и др. (2003). GRB 011211: Уэйнврайт и др. (2007), де Паскуале и др. (2006а), Якобсон и др. (2003). GRB 020124: Уэйнврайт и др. (2007), Барро и др. (2003), Бергер и др. (2002). GRB 020405: Уэйнврайт и др. (2007), Мазетти и др. (2003). GRB 020813: Уэйнврайт и др. (2007), Барро и др. (2003), Урата и др. (2003). GRB 020903: Уэйнврайт и др. (2007). GRB 021004: Уэйнврайт и др. (2007), Барро и др. (2003), Холланд и др. (2003). GRB 021211: Ли и др. (2003), Пандей и др. (2003). GRB 030226: Клозе и др. (2004), Пандей и др. (2004). GRB 030328: Майорано и др. (2006). GRB 030329: Уэйнврайт и др. (2007). GRB 030429X: Якобсон и др. (2004). GRB 040924: Уэйнврайт и др. (2007), Фань и др. (2005), Хуан и др. (2005). GRB 041006: Уэйнврайт и др. (2007), Станек и др. (2005). GRB 050315: Бартелми и др. (2005). GRB 050319: Возняк и др. (2005). GRB 050401: де Паскуале и др. (2006б). GRB 050408: де Угарте Постиго и др. (2007). GRB 050502: Гвидорчи и др. (2005б). GRB 050730: Пандей и др. (2006). GRB 060124: Мисра и др. (2007). GRB 060206: Возняк и др. (2006). GRB 060210: Курран и др. (2007). GRB 060218: Мирабал и др. (2006), Золлерман и др. (2006). GRB 060526: Дай и др. (2007). GRB 060614: Делла Валле и др. (2006). GRB 061007: Мундел и др. (2007).

Авторы выражают благодарность профессору К.А. Постнову за плодотворные обсуждения и ценные советы при написании статьи, С.В. Карпову за помощь в статистическом анализе и Т.И. Туполовой за помощь в подготовке текста к печати. Особая признательность авторов анонимным рецензентам, замечания которых способствовали значительному улучшению работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амати (L. Amati), MNRAS **372**, 233 (2006).
2. Амати и др. (L. Amati, F. Frontera, M. Tavani, et al.), Astron. Astrophys. **390**, 81 (2002).
3. Андерсен и др. (M.I. Andersen, J. Hjorth, H. Pedersen, et al.), Astron. Astrophys. **364**, L54 (2000).
4. Барро и др. (C. Barraud, J.-F. Olive, J.P. Lestrade, et al.), Astron. Astrophys. **400**, 1021 (2003).
5. Бартелми и др. (S.D. Barthelmy, J.K. Cannizzo, N. Gehrels, et al.), Astrophys. J. **635**, L133 (2005).
6. Бартолини и др. (C. Bartolini, G.M. Beskin, G. Cosentino, et al.), *Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era, International Workshop* (Ed. E. Costa, F. Frontera, J. Hjorth, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2001), p. 151.
7. Батлер и др. (N.R. Butler, D. Kocevski, J.S. Bloom, and J.L. Curtis), принято в печать; Astrophys. J. **635**, arXiv:0706.1275 (2007).
8. Бергер и др. (E. Berger, S.R. Kulkarni, J.S. Bloom, et al.), Astrophys. J. **581**, 981 (2002).
9. Бескин и др. (G.M. Beskin, C. Bartolini, G. Cosentino, et al.), AIP Conf. Ser. **526**, 355 (2000).
10. Блум и др. (J.S. Bloom, D.A. Frail, S.R. Kulkarni, et al.), Astrophys. J. **508**, L21 (1998).
11. Блум и др. (J.S. Bloom, D.A. Frail, and R. Sari), Astron. J. **121**, 2879 (2001).
12. Блум и др. (J.S. Bloom, S.R. Kulkarni, P.A. Price, et al.), Astrophys. J. **572**, L45 (2002).
13. Блум и др. (J.S. Bloom, D.A. Frail, S.R. Kulkarni, et al.), Astrophys. J. **594**, 674 (2003).
14. Бойерман и др. (K. Beuermann, F.V. Hessman, K. Reinsch, et al.), Astron. Astrophys. **352**, L26 (1999).
15. Большев Л.Н., Смирнов Н.В., *Таблицы математической статистики, 3-е изд.* (М.: Наука, 1983).
16. Боргоново, Райд (L. Borgonovo and F. Ryde), Astrophys. J. **548**, 770 (2001).
17. Бхаргави, Ковсик (S.G. Bhargavi and R. Cowsik), Astrophys. J. **545**, L77 (2000).
18. Бхаттачарья (D. Bhattacharya), Bull. Astron. Soc. India **29**, 107 (2001).
19. Возняк и др. (P.R. Woźniak, W.T. Vestrand, J.A. Wren, et al.), Astrophys. J. **627**, L13 (2005).
20. Бэнд и др. (D. Band, J. Matteson, L. Ford, et al.), Astrophys. J. **413**, 281 (1993).
21. Возняк и др. (P.R. Woźniak, W.T. Vestrand, J.A. Wren, et al.), Astrophys. J. **642**, L99 (2006).

22. Вресвейк и др. (P.M. Vreeswijk, T.J. Galama, A. Owens, et al.), *Astrophys. J.* **523**, 171 (1999).
23. Галама и др. (T.J. Galama, P.J. Groot, J. van Paradijs, et al.), *Nature* **387**, 479 (1997).
24. Галама и др. (T.J. Galama, P.J. Groot, J. van Paradijs, et al.), *Astrophys. J.* **497**, L13 (1998).
25. Гарнавич и др. (P.M. Garnavich, S. Jha, M.A. Pahre, et al.), *Astrophys. J.* **543**, 61 (2000).
26. Гарнавич и др. (P.M. Garnavich, K.Z. Stanek, L. Wyrzykowski, et al.), *Astrophys. J.* **582**, 924 (2003).
27. Гарсиа и др. (M.R. Garcia, P.J. Callanan, and D. Moragu), *Astrophys. J.* **500**, L105 (1998).
28. Гвидорчи и др. (C. Guidorzi, F. Frontera, and E. Montanari), *MNRAS* **363**, 315 (2005a).
29. Гвидорчи и др. (C. Guidorzi, A. Monfardini, A. Gom-boc, et al.), *Astrophys. J.* **630**, L121 (2005b).
30. Гирлянда и др. (G. Ghirlanda, G. Ghisellini, C. Firmani, et al.), *MNRAS* **360**, L45 (2005).
31. Гирлянда и др. (G. Ghirlanda, G. Ghisellini, and C. Firmani), *New J. Phys.* **8**, 123 (2006).
32. Греко и др. (G. Greco, D. BadTin, G. Beskin, et al.), *astro-ph/0701306* (2007).
33. Дай, Чен (Z.G. Dai and K.S. Cheng), *Astrophys. J.* **558**, L109 (2001).
34. Дай и др. (X. Dai, J.P. Halpern, N.D. Morgan, et al.), *Astrophys. J.* **658**, 509 (2007).
35. Делла Валле и др. (M. Della Valle, G. Chincarini, N. Panagia, et al.), *Nature* **444**, 1050 (2006).
36. Диркс и др. (A. Diercks, E.W. Deutsch, F.J. Castander, et al.), *Astrophys. J.* **503**, L105 (1998).
37. Дйорговски и др. (S.G. Djorgovski, J.S. Bloom, and S.R. Kulkarni), *Astrophys. J.* **591**, L13 (2003).
38. Жан и др. (B. Zhang, E. Liang, K.L. Page, et al.), *Astrophys. J.* **655**, 989 (2007).
39. Золлерман и др. (J. Sollerman, A.O. Jaunsen, J.P.U. Fynbo, et al.), *Astron. Astrophys.* **454**, 503 (2006).
40. Израэль и др. (G.L. Israel, G. Marconi, S. Covino, et al.), *Astron. Astrophys.* **348**, L5 (1999).
41. Йенсен и др. (B.L. Jensen, J.U. Fynbo, J. Gorosabel, et al.), *Astron. Astrophys.* **370**, 909 (2001).
42. Канеко и др. (Y. Kaneko, R.D. Preece, M.S. Briggs, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **166**, 298 (2006).
43. Кастро-Тирадо и др. (A.J. Castro-Tirado, M.R. Zapatero-Osorio, J. Gorosabel, et al.), *Astrophys. J.* **511**, L85 (1999a).
44. Кастро-Тирадо и др. (A.J. Castro-Tirado, M.R. Zapatero-Osorio, N. Caon, et al.), *Science* **283**, 2069 (1999b).
45. Кастро-Тирадо и др. (A.J. Castro-Tirado, V.V. Sokolov, J. Gorosabel, et al.), *Astron. Astrophys.* **370**, 398 (2001).
46. Клозе и др. (S. Klose, B. Stecklum, N. Masetti, et al.), *Astrophys. J.* **545**, 271 (2000).
47. Клозе и др. (S. Klose, J. Greiner, A. Rau, et al.), *Astron. J.* **128**, 1942 (2004).
48. Ковсик и др. (R. Cowsik, T.P. Prabhu, G.C. Anupama, et al.), *Bull. Astron. Soc. India* **29**, 157 (2001).
49. Корн Т., Корн Г., *Справочник по математике* (М.: Наука, 1973).
50. Кулкарни и др. (S.R. Kulkarni, S.G. Djorgovski, S.C. Odewahn, et al.), *Nature* **398**, 389 (1999).
51. Курран и др. (P.A. Curran, A.J. van der Horst, A.P. Beardmore, et al.), *Astron. Astrophys.* **467**, 1049 (2007).
52. Лаццати и др. (D. Lazzati, S. Covino, G. Ghisellini, et al.), *Astron. Astrophys.* **378**, 996 (2001).
53. Ли и др. (W. Li, A.V. Filippenko, R. Chornock, et al.), *Astrophys. J.* **586**, L9 (2003).
54. Ли, Пачиньский (L. Li and B. Paczynski), *MNRAS* **366**, 219 (2006).
55. Мазетти и др. (N. Masetti, C. Bartolini, S. Bernabei, et al.), *Astron. Astrophys.* **359**, L23 (2000).
56. Мазетти и др. (N. Masetti, E. Palazzi, E. Pian, et al.), *Astron. Astrophys.* **404**, 465 (2003).
57. Майорано и др. (E. Maiorano, N. Masetti, E. Palazzi, et al.), *Astron. Astrophys.* **455**, 423 (2006).
58. Мирабал и др. (N. Mirabal, J.P. Halpern, D. An, et al.), *Astrophys. J.* **643**, L99 (2006).
59. Мисра и др. (K. Misra, D. Bhattacharya, D.K. Sahu, et al.), *Astron. Astrophys.* **464**, 903 (2007).
60. Мундел и др. (C.G. Mundell, A. Melandri, C. Guidorzi, et al.), *Astrophys. J.* **660**, 489 (2007).
61. Нardini и др. (M. Nardini, G. Ghisellini, G. Ghirlanda, et al.), *Astron. Astrophys.* **451**, 851 (2006).
62. Норрис и др. (J.P. Norris, G.F. Marani, J.T. Bonnel, et al.), *Astrophys. J.* **534**, 248 (2000).
63. Пандей и др. (S.B. Pandey, G.C. Anupama, R. Sagar, et al.), *Astron. Astrophys.* **408**, L21 (2003).
64. Пандей и др. (S.B. Pandey, R. Sagar, G.C. Anupama, et al.), *Astron. Astrophys.* **417**, 919 (2004).
65. Пандей и др. (S.B. Pandey, A.J. Castro-Tirado, S. McBreen, et al.), *Astron. Astrophys.* **460**, 415 (2006).
66. де Паскуале и др. (M. De Pasquale, L. Piro, B. Gendre, et al.), *Astron. Astrophys.* **455**, 813 (2006a).
67. де Паскуале и др. (M. De Pasquale, A.P. Beardmore, S.D. Barthelmy, et al.), *MNRAS* **365**, 1031 (2006b).
68. Пираи (T. Piran), *Rev. Mod. Phys.* **76**, 1143 (2004).
69. Прайс и др. (P.A. Price, E. Berger, S.R. Kulkarni, et al.), *Astrophys. J.* **573**, 85 (2002).
70. Сагар и др. (R. Sagar, V. Mohan, S.B. Pandey, et al.), *Bull. Astron. Soc. India* **28**, 499 (2000).
71. Сагар и др. (R. Sagar, S.B. Pandey, V. Mohan, et al.), *Bull. Astron. Soc. India* **29**, 1 (2001).
72. Саху и др. (K.C. Sahu, P. Vreeswijk, G. Bakos, et al.), *Astrophys. J.* **540**, 74 (2000).
73. Станек и др. (K.Z. Stanek, P.M. Garnavich, J. Kaluzny, et al.), *Astrophys. J.* **522**, L39 (1999).
74. Станек и др. (K.Z. Stanek, P.M. Garnavich, and S. Jha), *Astrophys. J.* **563**, 592 (2001).
75. Станек и др. (K.Z. Stanek, P.M. Garnavich, P.A. Nutzman, et al.), *Astrophys. J.* **626**, L5 (2005).
76. де Угарте Постиго и др. (A. de Ugarte Postigo, T.A. Fatkhullin, G. Jóhannesson, et al.), *Astron. Astrophys.* **462**, L57 (2007).
77. Урата и др. (Y. Urata, S. Nishiura, T. Miyata, et al.), *Astrophys. J.* **595**, L21 (2003).

78. Уэйнврайт и др. (C. Wainwright, E. Berger, and B.E. Penprase), *Astrophys. J.* **657**, 357 (2007).
79. Фань и др. (Y.Z. Fan, B. Zhang, S. Kobayashi, et al.), *Astrophys. J.* **628**, 867 (2005).
80. Финбо и др. (J.U. Fynbo, J. Gorosabel, T.H. Dall, et al.), *Astron. Astrophys.* **373**, 794 (2001).
81. Фрейл и др. (D.A. Frail, S.A. Yost, E. Berger, et al.), *Astrophys. J.* **590**, 992 (2003).
82. Фукугита и др. (M. Fukugita, K. Shimasaku, and T. Ichikawa), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 945 (1995).
83. Харрисон и др. (F.A. Harrison, J.S. Bloom, D.A. Frail, et al.), *Astrophys. J.* **523**, L121 (1999).
84. Хелперн и др. (J.P. Halpern, R. Uglesich, N. Mirabal, et al.), *Astrophys. J.* **543**, 697 (2000).
85. Хйорт и др. (J. Hjorth, S. Holland, F. Courbin, et al.), *Astrophys. J.* **534**, 147 (2000).
86. Хйорт и др. (J. Hjorth, B. Thomsen, S.R. Nielsen, et al.), *Astrophys. J.* **576**, 113 (2002).
87. Холланд и др. (S. Holland, G. Bjornsson, J. Hjorth, and B. Thomsen), *Astron. Astrophys.* **364**, 467 (2000).
88. Холланд и др. (S. Holland, J.P.U. Fynbo, J. Hjorth, et al.), *Astron. Astrophys.* **371**, 52 (2001).
89. Холланд и др. (S.T. Holland, M. Weidinger, J.P.U. Fynbo, et al.), *Astrophys. J.* **125**, 2991 (2003).
90. Хуан и др. (K.Y. Huang, Y. Urata, A.V. Filippenko, et al.), *Astrophys. J.* **628**, L93 (2005).
91. Цех и др. (A. Zeh, S. Klose, and D.A. Kann), *Astrophys. J.* **673**, 88 (2006).
92. Шевалье, Ли (R.A. Chevalier and Z.-Y. Li), *Astrophys. J.* **536**, 195 (2000).
93. Шлегель и др. (D.J. Schlegel, D.P. Finkelberger, and M. Davis), *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
94. Якобсон и др. (P. Jakobsson, J. Hjorth, J.P.U. Fynbo, et al.), *Astron. Astrophys.* **408**, 941 (2003).
95. Якобсон и др. (P. Jakobsson, J. Hjorth, J.P.U. Fynbo, et al.), *Astron. Astrophys.* **427**, 785 (2004).