

УДК 524.7-732/17

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ С ИЗВЕСТНЫМИ КРАСНЫМИ СМЕЩЕНИЯМИ, ИМЕЮЩИХ МАКСИМУМЫ В КРИВЫХ ОПТИЧЕСКОГО БЛЕСКА

© 2015 Г. М. Бескин<sup>1,2\*</sup>, Г. Оганесян<sup>3</sup>, Дж. Греко<sup>4</sup>, С. Карпов<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия<sup>3</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344000 Россия<sup>4</sup>Урбинский университет, Урбино, 61029 Италия

Поступила в редакцию 28 октября 2014 года; принята в печать 17 сентября 2015 года

В работе приведены результаты статистического анализа характеристик гамма-всплесков с измеренными красными смещениями их родительских галактик и имеющих максимум в кривой оптического блеска в собственных системах отсчета. Оптические источники классифицированы на основании сравнения запаздывания оптических максимумов относительно момента триггера с длительностью собственно гамма-излучения. Приведены результаты корреляционного анализа всевозможных пар энергетических, спектральных и временных характеристик как гамма-, так и оптического излучения. Выделены пары параметров с коэффициентами корреляции, превышающими 50% при уровнях значимости меньше 1%. Специально обсуждаются впервые полученные эмпирические закономерности — связь максимальной оптической светимости послесвечений (в  $R$ -полосе) с красным смещением  $L_R \propto (z+1)^{5.39 \pm 0.74}$  и связь максимальной оптической светимости ранних оптических источников с моментом достижения этого максимума  $L_R \propto T_{\text{peak}}^{-3.85 \pm 1.22}$ . Анализируется также сходство зависимостей между максимальной оптической светимостью и изотропическим эквивалентом полной энергии гамма-всплесков у послесвечений ( $L_R \propto E_{\text{iso}}^{1.06 \pm 0.22}$ ) и у ранних оптических источников ( $L_R \propto E_{\text{iso}}^{1.59 \pm 0.21}$ ).

Ключевые слова: *гамма-всплески — методы: статистические*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Гамма-всплески — ярчайшие нестационарные явления во Вселенной (изотропический эквивалент их полной энергии достигает  $10^{54}$  эрг). Наряду с собственно всплесками наблюдаются также связанные с ними переменные источники излучения в разных диапазонах — радио, инфракрасном, оптическом, рентгеновском — менее интенсивные, однако достаточно мощные (их светимости достигают  $10^{51}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ ). Общепринято деление всех этих проявлений на два типа транзиентов: синхронные с гамма-излучением (prompt), продолжающиеся по крайней мере до  $T_{90}$  (момент времени, к которому выделяется 90% энергии гамма-всплеска) и послесвечения (afterglow), как правило, начинающиеся после его выключения. Наиболее популярным описанием их совокупности является модель, в которой сочетаются внутренняя и внешняя ударные

волны, возникающие при торможении фрагментов релятивистского потока из-за столкновений внутри него (prompt) и при его торможении во внешней межзвездной среде (afterglow) [1, 2].

Большинство работ посвящено изучению свойств отдельных гамма-всплесков и попыткам верификации на этой основе моделей феномена в целом. Как показало время, при таком подходе его самосогласованная физическая картина далека от построения, в особенности для оптических компонентов всплесков. До сих пор непонятно, существуют ли обратные ударные волны (reverse shock), какую энергетическую структуру имеет релятивистская струя, каково распределение плотности в окружающей всплеск межзвездной среде и т.д. В силу этих обстоятельств поиск статистических связей между различными параметрами всплесков в их подвыборках, сформированных по различным критериям, при минимальном использовании модельных представлений остается

\*E-mail: beskin@sao.ru

Таблица 1. Параметры гамма-всплесков в системе отсчета наблюдателя

No.	Name	$z$	Sample	$t_{\text{peak}}$ , s	$\log F_{\text{opt}}$ , $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log S_{\text{opt}}$ , $\text{erg cm}^{-2}$	$\alpha_r$	$\alpha_d$	$\log F_{\text{iso}}$ , $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log S_{\text{iso}}$ , $\text{erg cm}^{-2}$
1	130427A	0.340	P	14.31	$-8.21 \pm 0.01$	$-6.80 \pm 0.04$	1.43	$-1.69 \pm 0.27$	$-4.20 \pm 0.01$	$-3.14 \pm 0.01$
2	130831A	0.479	A	804.04	$-10.83 \pm 0.01$	$-7.96 \pm 0.01$	0.58	-0.19	$-5.93^{+0.04}_{-0.04}$	$-5.05 \pm 0.01$
3	081007	0.530	A	139.80	$-11.59 \pm 0.01$	$-8.68 \pm 0.03$	$1.04 \pm 0.11$	$-1.14 \pm 0.05$	$-6.74^{+0.21}_{-0.20}$	$-6.23 \pm 0.04$
4	060729	0.543	P	95.60	$-11.63 \pm 0.06$	$-10.17 \pm 0.08$	6.72	$-3.51 \pm 0.80$	$-6.95 \pm 0.13$	$-5.39^{+0.04}_{-0.03}$
5	060729	0.543	A	458.80	$-11.97 \pm 0.04$	$-8.64 \pm 0.05$	$0.80 \pm 0.12$	$-0.21 \pm 0.04$	$-6.95^{+0.13}_{-0.13}$	$-5.39^{+0.04}_{-0.03}$
6	111209A	0.677	A	676.08	$-11.82 \pm 0.04$				$-6.35 \pm 1.77$	$-5.88^{+0.12}_{-0.13}$
7	060904B	0.703	A	526.00	$-11.97 \pm 0.01$	$-7.93 \pm 0.02$	$0.79 \pm 0.5$	$-1.07 \pm 0.06$	$-6.74^{+0.13}_{-0.11}$	$-5.73^{+0.09}_{-0.07}$
8	080710	0.845	A	2441.00	-11.91	-8.12	$1.08 \pm 0.5$	$-0.54 \pm 0.01$	$-6.97 \pm 0.14$	$-5.49 \pm 0.07$
9	080319B	0.937	P	27.65	$-7.55 \pm 0.07$	$-6.08 \pm 0.04$	$2.85 \pm 0.54$	$-4.28 \pm 0.34$	$-4.95 \pm 0.01$	$-3.39 \pm 0.01$
10	071010B	0.950	A	136.99	$-11.88 \pm 0.04$	$-9.76 \pm 0.05$	$0.62 \pm 0.11$	$-0.38 \pm 0.18$	$-6.26^{+0.04}_{-0.03}$	$-5.29 \pm 0.02$
11	070419A	0.971	A	485.82	$-12.56 \pm 0.05$	$-9.10 \pm 0.07$	$1.93 \pm 0.28$	$-0.53 \pm 0.06$	$-8.20 \pm 0.29$	$-6.27 \pm 0.05$
12	071010A	0.980	A	514.15	$-11.50 \pm 0.04$	$-7.53 \pm 0.03$	$0.87 \pm 0.09$	$-0.76 \pm 0.01$	$-7.29 \pm 0.42$	$-6.33 \pm 0.09$
13	091024	1.092	A	442.00	$-10.78 \pm 0.01$	$-6.98 \pm 0.04$	$1.83 \pm 0.05$	$-1.13 \pm 0.06$	$-6.46 \pm 0.06$	$-4.88 \pm 0.02$
14	061007	1.262	P	57.90	$-8.92 \pm 0.01$	$-7.22 \pm 0.01$	$5.84 \pm 1.89$	$-1.52 \pm 0.08$	$-5.40 \pm 0.02$	$-3.94 \pm 0.01$
15	130420A	1.297	A	1778.28	$-11.53 \pm 0.04$				$-6.69 \pm 0.04$	-5.11
16	090530	1.300	A	60.48	$-11.44 \pm 0.04$	$-7.90 \pm 0.05$	0.90	$-0.68 \pm 0.05$	$-6.35 \pm 0.11$	$-5.73 \pm 0.04$
17	061121	1.315	P	71.26	$-10.61 \pm 0.04$	$-8.98 \pm 0.04$	$1.83 \pm 0.04$	$-3.24 \pm 0.15$	$-5.44 \pm 0.01$	$-4.55 \pm 0.01$
18	061121	1.315	A	151.20	$-10.84 \pm 0.04$	$-6.96 \pm 0.04$	1.44	$-1.05 \pm 0.01$	$-5.44 \pm 0.01$	$-4.55 \pm 0.01$
19	100901A	1.410	A	4579.20	$-11.50 \pm 0.04$	$-6.69 \pm 0.03$			$-7.26 \pm 0.27$	$-5.47 \pm 0.06$
20	110213A	1.460	A	248.00	-10.43	$-6.14 \pm 0.01$	0.80	$-0.59 \pm 0.05$	$-6.00 \pm 0.08$	$-5.06 \pm 0.03$
21	060418	1.489	A(U)	127.00	$-10.33 \pm 0.06$	$-7.51 \pm 0.05$	$2.28 \pm 0.33$	$-1.13 \pm 0.12$	$-6.11 \pm 0.04$	$-4.88 \pm 0.01$
22	080330	1.512	A	432.90	$-12.29 \pm 0.04$	$-8.37 \pm 0.02$			$-7.36 \pm 0.22$	$-6.36 \pm 0.08$
23	990123	1.600	P	49.88	$-8.43 \pm 0.07$	$-6.75 \pm 0.07$	3.72	$-2.37 \pm 0.05$		-3.21
24	080603A	1.687	P?	136.00	$-13.07 \pm 0.10$	$-11.38 \pm 0.12$	1.17	-4.26		-5.73
25	080603A	1.687	A(U)	2112.00	$-12.20 \pm 0.01$	$-8.05 \pm 0.03$	$0.04 \pm 0.01$	$-0.54 \pm 0.11$		-5.73
26	080928	1.692	A	2117.84	$-11.80 \pm 0.02$	$-7.88 \pm 0.03$	$2.20 \pm 0.68$	$-0.11 \pm 0.02$	$-6.66 \pm 0.07$	$-5.40 \pm 0.03$
27	120119A	1.728	A	766.80	$-11.02 \pm 0.08$	$-7.56 \pm 0.06$	$0.44 \pm 0.06$	$-0.65 \pm 0.06$	$-5.93 \pm 0.02$	$-4.63 \pm 0.02$

Таблица 1. (Продолжение)

No.	Name	$z$	Sample	$t_{\text{peak}}$ , s	$\log F_{\text{opt}}$ , $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log S_{\text{opt}}$ , $\text{erg cm}^{-2}$	$\alpha_r$	$\alpha_d$	$\log F_{\text{iso}}$ , $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$\log S_{\text{iso}}$ , $\text{erg cm}^{-2}$
28	100906A	1.730	A(U)	125.35	$-9.95 \pm 0.01$	$-7.38 \pm 0.01$	0.46	$-0.47 \pm 0.06$	$-6.12 \pm 0.02$	$-4.86 \pm 0.01$
29	081008	1.968	P?	107.63	$-10.66 \pm 0.01$	$-7.80 \pm 0.03$	$1.26 \pm 0.13$	$-0.72 \pm 0.03$	$-6.94^{+0.08}_{-0.07}$	$-5.25^{+0.05}_{-0.04}$
30	081203	2.050	A	345.00	$-9.99 \pm 0.04$	$-6.58 \pm 0.04$	1.18	$-1.62 \pm 0.05$	$-6.43 \pm 0.06$	$-4.87 \pm 0.02$
31	110205A	2.220	P	226.00	$-11.82 \pm 0.03$	$-9.73 \pm 0.07$	$3.43 \pm 0.20$	$-2.92 \pm 0.26$	$-6.60 \pm 0.03$	$-4.70 \pm 0.02$
32	110205A	2.220	A	1040.00	$-10.67 \pm 0.03$	$-7.30 \pm 0.06$	$1.36 \pm 0.26$	$-1.58 \pm 0.02$	$-6.60 \pm 0.03$	$-4.70 \pm 0.02$
33	120815A	2.359	A	499.50	$-12.27 \pm 0.01$	$-8.69 \pm 0.01$	$0.15 \pm 0.03$	$-0.50 \pm 0.02$	$-6.77 \pm 0.22$	$-6.27 \pm 0.05$
34	080310	2.427	A(U)	228.50	$-11.86 \pm 0.02$	$-8.35 \pm 0.02$	$1.53 \pm 0.13$	$-0.65 \pm 0.09$	$-7.17^{+0.13}_{-0.12}$	$-5.57 \pm 0.03$
35	090812	2.452	P	73.55	$-11.10 \pm 0.03$	$-9.37 \pm 0.04$	$1.03 \pm 0.03$	$-1.10 \pm 0.03$	$-6.20 \pm 0.04$	$-4.93 \pm 0.02$
36	050820A	2.615	P	267.44	$-11.47 \pm 0.01$	$-9.63 \pm 0.03$	$0.59 \pm 0.48$	$-3.59 \pm 0.68$	$-6.43 \pm 0.12$	$-5.06 \pm 0.03$
37	050820A	2.615	A(U)	426.83	$-11.20 \pm 0.01$	$-7.48 \pm 0.03$	$3.21 \pm 0.69$	$-0.89 \pm 0.02$	$-6.43 \pm 0.12$	$-5.06 \pm 0.03$
38	080210	2.641	A	345.60	$-10.90 \pm 0.04$	$-7.48 \pm 0.04$	3.66	$-1.36 \pm 0.02$	$-6.83 \pm 0.11$	$-5.56 \pm 0.03$
39	071031	2.692	A	1023.80	-12.71	$-8.85 \pm 0.01$	$1.27 \pm 0.07$	$-0.19 \pm 0.03$	$-7.64^{+0.13}_{-0.12}$	$-5.96 \pm 0.06$
40	090726	2.710	A	514.80	$-12.13 \pm 0.03$	$-8.90 \pm 0.02$	$1.03 \pm 0.05$	$-1.48 \pm 0.16$	$-7.42^{+0.14}_{-0.13}$	$-6.19^{+0.05}_{-0.04}$
41	091029	2.750	A	410.30	$-12.13 \pm 0.01$	$-7.91 \pm 0.01$	0.47	$-0.55 \pm 0.01$	$-6.90 \pm 0.05$	$-5.55 \pm 0.03$
42	070411	2.950	A	432.00	$-12.04 \pm 0.02$	$-7.68 \pm 0.04$	$0.31 \pm 0.12$	$-0.42 \pm 0.30$	$-7.03 \pm 0.07$	$-5.37 \pm 0.02$
43	060607A	3.075	P?	212.04	$-11.09 \pm 0.01$	$-8.17 \pm 0.02$	$1.87 \pm 0.54$	$-1.31 \pm 0.08$	$-6.82^{+0.08}_{-0.07}$	$-5.43^{+0.06}_{-0.05}$
44	060526	3.221	A(U)	192.79	$-11.80 \pm 0.09$	$-8.13 \pm 0.08$	0.43	$-0.84 \pm 0.12$	$-6.87 \pm 0.10$	$-5.73 \pm 0.06$
45	080810	3.355	P?	126.14	$-9.98 \pm 0.05$	$-7.11 \pm 0.03$		$-1.94 \pm 0.12$	$-6.63 \pm 0.05$	$-5.01 \pm 0.03$
46	090313	3.380	A	1312.80	$-11.11 \pm 0.04$	$-6.98 \pm 0.06$	$1.19 \pm 0.15$	$-1.31 \pm 0.13$	$-7.46 \pm 0.37$	$-5.67^{+0.07}_{-0.08}$
47	060605	3.773	A	463.00	$-10.38 \pm 0.09$	$-6.83 \pm 0.12$	$0.31 \pm 0.08$	$-0.84 \pm 0.04$	$-7.44^{+0.24}_{-0.23}$	$-6.25^{+0.07}_{-0.09}$
48	081029	3.848	A	5936.80	$-12.29 \pm 0.01$	$-7.89 \pm 0.01$	$1.83 \pm 0.15$	$-0.67 \pm 0.03$	$-7.66 \pm 0.24$	$-5.48 \pm 0.05$
49	060210	3.913	A	393.00	$-11.55 \pm 0.06$	$-7.92 \pm 0.05$	$1.15 \pm 0.64$	$-1.11 \pm 0.04$	$-6.46 \pm 0.08$	$-4.85 \pm 0.02$
50	050730	3.968	A	726.89	$-11.63 \pm 0.09$	$-7.62 \pm 0.06$	$0.88 \pm 0.25$	$-0.86 \pm 0.06$	$-7.20 \pm 0.11$	$-5.59 \pm 0.04$
51	060206	4.048	A	3534.00	$-12.04 \pm 0.01$	$-7.75 \pm 0.01$	$4.65 \pm 0.30$	$-1.12 \pm 0.07$	$-6.57^{+0.07}_{-0.06}$	$-5.98^{+0.04}_{-0.03}$
52	080129	4.350	A	514.59	$-9.05 \pm 0.04$	$-4.80 \pm 0.04$			$-7.26^{+0.32}_{-0.31}$	$-5.72^{+0.06}_{-0.07}$
53	071025	5.200	A	499.40	$-11.54 \pm 0.03$	$-8.14 \pm 0.05$	$0.25 \pm 0.02$	$-0.81 \pm 0.13$	$-6.81 \pm 0.05$	$-4.96 \pm 0.01$
54	050904	6.295	A(U)	518.40	$-10.04 \pm 0.12$	$-6.91 \pm 0.02$	3.46	-4.09	$-7.06 \pm 0.08$	$-4.91 \pm 0.02$

Таблица 2. Параметры гамма-всплесков в собственной системе отсчета

No.	Name	$z$	Sample	$T_{\text{peak}}$ , s	$\log L_R$ , erg s <sup>-1</sup>	$\log E_R$ , erg	$T_{90}$ , s	$\log L_{\text{iso}}$ , erg s <sup>-1</sup>	$\log E_{\text{iso}}$ , erg	$\alpha$
1	130427A	0.340	P	10.68	48.42±0.01	49.71±0.04	242.33±1.87	52.38±0.01	53.66 <sup>+0.13</sup> <sub>-0.09</sub>	0.99±0.08
2	130831A	0.479	A	543.60	46.20±0.01	48.89±0.01	23.43±0.36	51.00±0.04		0.06±0.05
3	081007	0.530	A	91.40	45.57±0.01	48.29±0.03	3.63±0.17	50.30 <sup>+0.21</sup> <sub>-0.21</sub>	50.89 <sup>+0.18</sup> <sub>-0.20</sub>	0.65 <sup>+1.02</sup> <sub>-0.64</sub>
4	060729	0.543	P	61.97	45.55±0.06	47.05±0.10	77.22±0.91	50.11±0.13	52.00 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.48</sub>	0.23±0.14
5	060729	0.543	A	297.38	45.20±0.04	77.22±0.91	50.11±0.13	52.00 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.48</sub>	0.23 ± 0.14	
6	111209A	0.677	A	403.15	45.63±0.04		2.77±0.20	50.95±1.77	51.97 <sup>+0.41</sup> <sub>-1.14</sub>	0.57 <sup>+0.48</sup> <sub>-0.49</sub>
7	060904B	0.703	A	308.88	45.59±0.01	49.41±0.02	100.44±1.34	50.59 <sup>+0.13</sup> <sub>-0.11</sub>	51.45 <sup>+0.34</sup> <sub>-0.08</sub>	1.00 <sup>+0.69</sup> <sub>-0.59</sub>
8	080710	0.845	A	1322.75	45.832	49.35	75.35±5.43	50.57±0.14	52.69 <sup>+0.22</sup> <sub>-0.85</sub>	0.74±0.24
9	080319B	0.937	P	14.27	50.28±0.07	51.47±0.04	76.06±1.29	52.70±0.01	55.05 <sup>+0.02</sup> <sub>-0.10</sub>	0.91±0.02
10	071010B	0.950	A	70.25	45.96±0.04	47.80±0.05	17.78±0.52	51.40 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.03</sub>	52.25 <sup>+0.16</sup> <sub>-0.04</sub>	0.53 <sup>+0.23</sup> <sub>-0.22</sub>
11	070419A	0.971	A	246.55	45.24±0.05	48.41±0.07	81.83±4.5	49.49±0.29	51.26 <sup>+0.18</sup> <sub>-0.10</sub>	
12	071010A	0.980	A	259.67	46.35±0.04	50.03±0.03	11.31±0.86	50.40±0.42	51.56 <sup>+0.12</sup> <sub>-0.66</sub>	
13	091024	1.092	A	211.24	47.24±0.01	50.73±0.04	54.83±2.37	51.36±0.06	53.46 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.50</sub>	0.72±0.07
14	061007	1.262	P	25.59	49.40±0.01	51.07±0.01	33.118±0.23	52.57±0.02	54.83 <sup>+0.02</sup> <sub>-0.28</sub>	1.04±0.03
15	130420A	1.297	A	774.17	46.71±0.04		50.00±2.11	51.31±0.04	52.72	0.88 <sup>+0.68</sup> <sub>-0.41</sub>
16	090530	1.300	A	26.30	46.81±0.04	49.99±0.05	17.72±0.50	51.65±0.11		0.43±0.16
17	061121	1.315	P	30.79	47.64±0.04	48.90±0.04	35.86±5.40	52.57±0.01	53.83 <sup>+0.02</sup> <sub>-0.54</sub>	0.63±0.03
18	061121	1.315	A	65.33	47.41±0.04	50.92±0.04	35.86±5.40	52.57±0.01	53.83 <sup>+0.02</sup> <sub>-0.54</sub>	0.63±0.03
19	100901A	1.410	A	1900.08	46.85±0.04	51.27±0.03	190.54±4.42	50.83±0.27	52.82 <sup>+0.16</sup> <sub>-0.14</sub>	0.45 <sup>+0.22</sup> <sub>-0.23</sub>
20	110213A	1.460	A	100.81	47.98	51.87±0.01	17.53±1.41	52.12±0.08	53.13 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.22</sub>	0.18±11
21	060418	1.489	A(U)	51.02	48.07±0.06	50.49±0.05	41.48±4.15	52.03±0.04	53.41 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.51</sub>	0.39±0.05
22	080330	1.512	A	172.34	46.01±0.04	49.53±0.02	26.31±0.39	50.81±0.22	52.14 <sup>+0.29</sup> <sub>-0.34</sub>	
23	990123	1.600	P	19.18	50.08±0.07	51.15±0.07			54.60	
24	080603A	1.687	P?	50.61	45.62±0.10	48.16±0.05			52.12	
25	080603A	1.687	A(U)	785.89	46.49±0.01	50.20±0.03			52.12	
26	080928	1.692	A	786.72	46.84±0.02	50.33±0.03	105.83±4.52	51.62±0.07	52.92 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.37</sub>	0.27 <sup>+0.12</sup> <sub>-0.13</sub>
27	120119A	1.728	A	281.09	47.59±0.08	50.61±0.06	25.81±1.59	52.38±0.02	53.32 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.03</sub>	0.95 <sup>+0.14</sup> <sub>-0.13</sub>

Таблица 2. (Продолжение)

No.	Name	$z$	Sample	$T_{\text{peak}}$ , s	$\log L_R$ , $\text{erg s}^{-1}$	$\log E_R$ , erg	$T_{90}$ , s	$\log L_{\text{iso}}$ , $\text{erg s}^{-1}$	$\log E_{\text{iso}}$ , erg	$\alpha$
28	100906A	1.730	A(U)	45.92	48.71±0.01	50.82±0.01	42.80±0.25	52.18±0.02	53.50 <sup>+0.02</sup> <sub>-0.40</sub>	0.34±0.04
29	081008	1.968	P?	36.26	48.18±0.01	49.70±0.01	67.15±3.88	51.50 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.07</sub>	52.83 <sup>+0.11</sup> <sub>-0.07</sub>	0.70 <sup>+0.34</sup> <sub>-0.31</sub>
30	081203	2.050	A	113.11	48.76±0.04	51.69±0.04	83.37±8.83	52.06±0.06	53.76 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.61</sub>	0.56±0.06
31	110205A	2.220	P	70.19	47.01±0.03	48.59±0.07	86.03±1.45	51.97±0.03	53.49 <sup>+0.22</sup> <sub>-0.04</sub>	0.61 <sup>+0.18</sup> <sub>-0.17</sub>
32	110205A	2.220	A	322.98	48.16±0.03	51.02±0.04	86.03±1.45	51.97±0.03	53.49 <sup>+0.22</sup> <sub>-0.04</sub>	0.61 <sup>+0.18</sup> <sub>-0.17</sub>
33	120815A	2.359	A	148.72	46.77±0.01	49.83±0.01	2.88±0.36	51.88±0.22	52.74 <sup>+0.21</sup> <sub>-0.96</sub>	
34	080310	2.427	A(U)	66.67	47.01±0.02	49.98±0.02	105.60±1.10	51.49 <sup>+0.13</sup> <sub>-0.12</sub>	53.31 <sup>+0.11</sup> <sub>-0.68</sub>	
35	090812	2.452	P	21.31	48.15±0.03	49.50±0.04	28.90±4.43	52.48±0.04	53.89 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.61</sub>	0.71±0.06
36	050820A	2.615	P	73.99	47.58±0.01	49.15±0.02	66.31±0.10	52.31±0.12	53.89 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.11</sub>	0.83±0.11
37	050820A	2.615	A(U)	118.08	47.85±0.02	51.06±0.02	66.31±0.10	52.31±0.12	53.89 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.11</sub>	0.83±0.11
38	080210	2.641	A	94.92	48.08±0.04	50.73±0.04	12.05±1.20	51.93±0.11	53.06 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.24</sub>	0.25±0.12
39	071031	2.692	A	277.30	46.57	49.87±0.01	50.70±1.93	51.13 <sup>+0.13</sup> <sub>-0.12</sub>		
40	090726	2.710	A	138.76	47.06±0.03	49.72±0.02	13.75±0.26	51.36 <sup>+0.14</sup> <sub>-0.13</sub>	52.26 <sup>+0.24</sup> <sub>-0.13</sub>	
41	091029	2.750	A	109.41	46.98±0.01	50.63±0.01	10.66±0.34	51.89±0.05	52.84 <sup>+0.19</sup> <sub>-0.06</sub>	0.60 <sup>+0.32</sup> <sub>-0.30</sub>
42	070411	2.950	A	109.37	47.26±0.02	51.02±0.02	27.48±0.92	51.84	53.33 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.25</sub>	0.30±0.10
43	060607A	3.075	P?	52.04	48.21±0.01	50.52±0.02	25.17±0.82	52.10 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.07</sub>	52.95 <sup>+0.12</sup> <sub>-0.07</sub>	0.99 <sup>+0.32</sup> <sub>-0.34</sub>
44	060526	3.221	A(U)	45.67	47.47±0.09	50.51±0.08	70.01±0.95	52.09±0.10	53.02 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.18</sub>	
45	080810	3.355	P?	28.97	49.53±0.05	51.76±0.03	104.05±1.17	52.37±0.05	53.95 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.07</sub>	0.69±0.12
46	090313	3.380	A	299.73	48.36±0.04	51.85±0.06	20.60±1.54	51.56±0.37	53.12 <sup>+0.07</sup> <sub>-0.39</sub>	
47	060605	3.773	A	97.00	49.46±0.09	52.33±0.12	3.88±0.24	51.69 <sup>+0.24</sup> <sub>-0.23</sub>	52.22 <sup>+0.36</sup> <sub>-0.07</sub>	
48	081029	3.848	A	1224.61	47.55±0.01	51.26±0.01	34.88±1.76	51.51±0.24	53.49 <sup>+0.12</sup> <sub>-0.10</sub>	0.57±0.20
49	060210	3.913	A	79.99	48.11±0.06	51.05±0.05	75.30±4.20	52.72±0.08	54.10 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.56</sub>	0.53±0.10
50	050730	3.968	A	146.31	47.94±0.09	50.85±0.06	12.17±0.45	51.98±0.11	53.41 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.60</sub>	0.61±0.13
51	060206	4.048	A	700.08	47.68±0.01	51.27±0.01	1.20±0.03	52.64 <sup>+0.07</sup> <sub>-0.06</sub>	52.61 <sup>+0.07</sup> <sub>-0.05</sub>	0.82 <sup>+0.33</sup> <sub>-0.31</sub>
52	080129	4.350	A	96.18	50.62±0.04	54.14±0.04	8.52±0.56	52.01 <sup>+0.32</sup> <sub>-0.31</sub>	53.42 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.57</sub>	0.78 <sup>+0.253</sup> <sub>-0.24</sub>
53	071025	5.200	A	80.55	48.76±0.03	51.36±0.05	26.00±0.87	52.64±0.05		0.33±0.06
54	050904	6.295	A(U)	71.06	50.46±0.12	52.73±0.12	27.03±0.31	52.59±0.08	54.38 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.24</sub>	0.83±0.07

**Таблица 3.** Парные корреляции между параметрами гамма-всплесков с коэффициентами корреляции  $R > 0.5$  и уровнями значимости  $SL < 1\%$ . В таблице указаны параметры линейной регрессии ( $a + bx$ ) (переменные в логарифмическом масштабе)

Correlation	Sample	$N$	$R$	SL	$a$	$b$
$E_{\text{iso}} : L_{\text{iso}}$	P + P?	11	0.86	$0.72 \times 10^{-3}$	$-19.44 \pm 16.25$	$1.40 \pm 0.31$
	A	30	0.80	$0.91 \times 10^{-7}$	$11.00 \pm 5.85$	$0.81 \pm 0.11$
	A + A(U) + P + P?	47	0.84	$0.11 \times 10^{-12}$	$4.37 \pm 4.64$	$0.94 \pm 0.09$
	P	8	0.89	$0.32 \times 10^{-2}$	$3.29 \pm 10.67$	$0.97 \pm 0.20$
	A + A(U)	36	0.82	$0.86 \times 10^{-9}$	$8.32 \pm 5.31$	$0.86 \pm 0.10$
	A + A(U) + P?	39	0.82	$0.13 \times 10^{-10}$	$8.10 \pm 5.09$	$0.87 \pm 0.10$
$E_R : L_R$	P + P?	13	0.95	$0.51 \times 10^{-6}$	$6.81 \pm 4.14$	$0.89 \pm 0.09$
	A	32	0.92	$0.42 \times 10^{-13}$	$3.82 \pm 3.51$	$0.99 \pm 0.07$
	A(U)	7	0.92	$0.29 \times 10^{-2}$	$19.67 \pm 5.76$	$0.65 \pm 0.12$
	A + A(U) + P + P?	52	0.80	$0.92 \times 10^{-12}$	$13.13 \pm 3.92$	$0.78 \pm 0.08$
	A + A(U)	39	0.91	$0.89 \times 10^{-15}$	$7.80 \pm 3.10$	$0.90 \pm 0.07$
	P	9	0.99	$0.11 \times 10^{-6}$	$4.74 \pm 2.06$	$0.93 \pm 0.04$
$E_R : E_{\text{iso}}$	A + A(U) + P?	43	0.89	$0.13 \times 10^{-14}$	$9.02 \pm 3.31$	$0.87 \pm 0.04$
	P + P?	13	0.76	$0.25 \times 10^{-2}$	$-10.75 \pm 15.56$	$1.13 \pm 0.29$
	A	32	0.65	$0.16 \times 10^{-3}$	$-7.39 \pm 13.13$	$1.10 \pm 0.50$
	A + A(U) + P + P?	48	0.52	$0.14 \times 10^{-3}$	$-9.10 \pm 9.95$	$0.78 \pm 0.19$
	A + A(U)	35	0.66	$0.15 \times 10^{-4}$	$-4.02 \pm 10.79$	$1.03 \pm 0.20$
	P	9	0.96	$0.42 \times 10^{-4}$	$-32.27 \pm 9.07$	$1.52 \pm 0.17$
$L_R : (z + 1)$	A + A(U) + P?	39	0.68	$0.22 \times 10^{-5}$	$-7.07 \pm 10.29$	$1.09 \pm 0.19$
	A	34	0.79	$0.30 \times 10^{-7}$	$44.68 \pm 0.37$	$5.39 \pm 0.74$
	A + A(U) + P + P?	54	0.56	$0.13 \times 10^{-4}$	$45.48 \pm 0.45$	$4.36 \pm 0.90$
	A + A(U)	41	0.78	$0.19 \times 10^{-8}$	$44.67 \pm 0.36$	$5.54 \pm 0.71$
$E_R : L_{\text{iso}}$	A + A(U) + P?	45	0.77	$0.54 \times 10^{-9}$	$44.58 \pm 0.37$	$5.57 \pm 0.72$
	A	32	0.65	$0.65 \times 10^{-4}$	$-4.92 \pm 11.95$	$1.07 \pm 0.23$
	A + A(U) + P + P?	49	0.56	$0.30 \times 10^{-4}$	$1.76 \pm 10.51$	$0.94 \pm 0.20$
	A + A(U)	38	0.66	$0.66 \times 10^{-5}$	$-5.49 \pm 10.63$	$1.09 \pm 0.21$
$L_R : E_{\text{iso}}$	A + A(U) + P?	41	0.66	$0.23 \times 10^{-5}$	$-5.79 \pm 10.17$	$1.09 \pm 0.20$
	P + P?	13	0.87	$0.12 \times 10^{-3}$	$-25.60 \pm 12.69$	$1.37 \pm 0.24$
	A	30	0.68	$0.40 \times 10^{-4}$	$-9.22 \pm 11.60$	$1.06 \pm 0.22$
	A + A(U) + P + P?	50	0.79	$0.15 \times 10^{-10}$	$-16.12 \pm 7.24$	$1.20 \pm 0.14$
	A + A(U)	37	0.72	$0.40 \times 10^{-6}$	$-13.66 \pm 9.81$	$1.15 \pm 0.19$
	P	9	0.94	$0.15 \times 10^{-3}$	$-37.50 \pm 11.53$	$1.59 \pm 0.21$
A + A(U) + P?	41	0.74	$0.34 \times 10^{-7}$	$-17.09 \pm 9.41$	$1.22 \pm 0.18$	

Таблица 3. (Продолжение)

Correlation	Sample	$N$	$R$	SL	$a$	$b$
$L_R : L_{\text{iso}}$	A	34	0.74	$0.51 \times 10^{-6}$	$-13.49 \pm 9.60$	$1.18 \pm 0.19$
	A + A(U) + P + P?	51	0.78	$0.21 \times 10^{-10}$	$-20.33 \pm 7.80$	$1.31 \pm 0.15$
	A + A(U)	40	0.76	$0.14 \times 10^{-7}$	$-18.38 \pm 9.10$	$1.27 \pm 0.18$
	A + A(U) + P?	43	0.76	$0.30 \times 10^{-8}$	$-20.36 \pm 8.90$	$1.31 \pm 0.18$
$E_{\text{iso}} : (z + 1)$	A	30	0.59	$0.59 \times 10^{-3}$	$51.49 \pm 0.35$	$2.75 \pm 0.71$
	A + A(U)	37	0.62	$0.79 \times 10^{-2}$	$51.47 \pm 0.32$	$2.93 \pm 0.63$
	A + A(U) + P?	41	0.63	$0.12 \times 10^{-4}$	$51.43 \pm 0.30$	$3.01 \pm 0.60$
$L_R : T_{\text{peak}}$	P + P?	13	-0.69	0.01	$53.94 \pm 1.87$	$-3.85 \pm 1.22$
$E_{\text{opt}} : (z + 1)$	A	32	0.72	$0.34 \times 10^{-5}$	$47.97 \pm 0.47$	$5.29 \pm 0.93$
	A + A(U) + P + P?	52	0.63	$0.50 \times 10^{-6}$	$48.06 \pm 0.42$	$4.84 \pm 0.84$
	A + A(U)	39	0.73	$0.12 \times 10^{-6}$	$48.01 \pm 0.41$	$5.18 \pm 0.79$
	A + A(U) + P?	43	0.71	$0.76 \times 10^{-7}$	$47.89 \pm 0.42$	$5.28 \pm 0.84$
$L_{\text{iso}} : (z + 1)$	A	34	0.69	$0.56 \times 10^{-5}$	$50.11 \pm 0.27$	$2.98 \pm 0.55$
	A + A(U) + P + P?	51	0.55	$0.29 \times 10^{-4}$	$50.57 \pm 0.26$	$2.41 \pm 0.52$
	A + A(U)	40	0.69	$0.70 \times 10^{-6}$	$50.18 \pm 0.25$	$2.92 \pm 0.49$
	A + A(U) + P?	43	0.70	$0.14 \times 10^{-6}$	$50.17 \pm 0.24$	$2.98 \pm 0.47$

актуальной задачей. В ее контексте особенно важную роль играет анализ свойств выборки гамма-всплесков с измеренными красными смещениями, насчитывающей около 250 объектов [3]. Такой объем данных позволяет проводить статистический анализ параметров гамма-всплесков в собственной системе отчета, выявляя эмпирические связи между физическими характеристиками в «чистом» виде [4–10]. В то же время анализируются подобные связи и для оптических компонентов всплесков [11–16], родительских галактик [17, 18], а также характеристик локальной межзвездной среды у прародителей гамма-всплесков [19].

Основной проблемой всех таких исследований является поиск оптимального соотношения между критериями отбора объектов и объемом выборки: при более жестком отборе последний уменьшается, и соответственно падает значимость устанавливаемых статистических зависимостей, возрастает роль эффектов селекции. Мы изучаем соотношения параметров гамма-всплесков с измеренными красными смещениями, чьи оптические кривые блеска имеют максимумы. Последнее условие выделяет особое физическое состояние в рамках любых моделей — торможение либо сталкивающихся внутри джета оболочек для ранних оптических источников, либо выброшенного вещества во внешней межзвездной среде. Подчеркнем, что при этом зара-

нее неизвестно, какой именно физический процесс определяет возникновение такого максимума. Разделение объектов по подвыборкам проводилось на основании сравнения длительности временного интервала между началом возрастания оптического блеска и моментом триггера с продолжительностью собственно гамма-излучения (ранние источники оптического излучения, послесвечения и послесвечения в сопровождении остаточного гамма-излучения), а определение физического типа оптических источников (ранний или послесвечение) является результатом статистического анализа всей подвыборки. Так, некоторые объекты, формально отнесенные к ранним оптическим компонентам, впоследствии оказались по своим статистическим свойствам близки к послесвечениям. Отметим, что использование для статистического анализа выборки гамма-всплесков с известными красными смещениями позволяет ставить задачу о космологической эволюции как свойств самих всплесков, так и межзвездной среды в области их локализации. В разделе 2 настоящей работы мы приводим определения и способы получения различных характеристик объектов, а также описываем методы статистического анализа исходных данных и полученные результаты. В разделах 3–5 обсуждаются некоторые обнаруженные нами наиболее важные корреляции между параметрами всплесков: связи

между оптической светимостью в максимумах кривых блеска с красным смещением, между оптической светимостью и энергией всплесков в гамма-диапазоне, а также между светимостью и моментом достижения максимума. В разделе 6 мы кратко обобщаем полученные результаты.

## 2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа были выбраны 54 гамма-всплеска с известными красными смещениями и максимумами в оптических кривых блеска. Источником данных для определения их параметров служили зависимости от времени зарегистрированного потока излучения как в гамма-, так и в оптическом (в звездных величинах) диапазонах. В последнем случае это кривые блеска, как правило, в  $R$ -полосе,  $R(t)$ , иногда с модифицированными фильтрами  $r'(t)$ ,  $R_C(t)$  и  $r(t)$ , в одном случае — в  $V$ -полосе (GRB 050730), в двух — в белом свете (GRB 100906A и GRB 080810). С использованием калибровок из работы [20] находились спектральные плотности потоков в соответствующих полосах  $F_\nu$  в системе наблюдателя. Величины  $F_\nu$  преобразовывались в спектральные плотности потока  $F_R$  на эффективной длине волны  $R$ -полосы в собственной системе отчета. Если отсутствовали данные о показателе оптического спектра  $\beta$ ,  $F_\nu \propto \nu^{-\beta}$ , использовалось среднее значение для выборки оптических компонентов всплесков  $\beta = 0.75$  [21] и определялись следующие величины: поток в системе наблюдателя

$$F_{\text{opt}} = \int_{\nu_1}^{\nu_2} F_0 \nu^{-\beta} d\nu,$$

где  $\nu_1$  и  $\nu_2$  — частотные границы фотометрической полосы в системе наблюдателя; интегральный оптический поток  $S_{\text{opt}}$  (результат численного интегрирования по времени  $F_{\text{opt}}(t)$ ); момент достижения максимума оптической кривой блеска относительно момента обнаружения гамма-всплеска  $t_{\text{peak}}$ ; показатели возрастания и спада интенсивности оптического излучения,  $F_{\text{opt}} \propto t^{\alpha_r}$ ,  $F_{\text{opt}} \propto t^{\alpha_d}$ . Параметры гамма-излучения — максимальный  $F_{\text{iso}}$  и интегральный  $S_{\text{iso}}$  потоки в диапазоне 15–350 кэВ, время высвечивания 90% энергии гамма-всплеска  $t_{90}$  и показатель энергетического спектра  $\alpha$  — были взяты из [22]. В таблице 1 приведена информация о гамма-всплесках и их параметрах в системе отчета наблюдателя.

С учетом поглощения в Галактике [23], блеска родительской галактики (при наличии) и поглощения в ней, для стандартной космологической модели с  $\Omega_M = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$ ,  $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мpc}^{-1}$  были определены параметры гамма-всплесков в

собственной системе отчета: максимальная оптическая светимость в  $R$ -полосе

$$L_R = 4\pi D^2 \int_{\nu_{R_0}}^{\nu_{R_1}} F_0 \nu^{-\beta} d\nu,$$

где  $\nu_{R_0}$  и  $\nu_{R_1}$  — частотные границы стандартной  $R$ -полосы,  $D$  — фотометрическое расстояние; полная оптическая энергия  $E_R$  в этом же диапазоне (интеграл по времени  $L_R(t)$ ); временные параметры  $T_{\text{peak}}$ ,  $T_{90}$  с учетом космологического сокращения. Изотропический эквивалент энергии гамма-всплеска в расширенном диапазоне 1–10 000 кэВ  $E_{\text{iso}}$  был взят из [22], максимальная светимость  $L_{\text{iso}}$  получена из  $F_{\text{iso}}$  как

$$L_{\text{iso}} = 4\pi D^2 F_{\text{iso}}.$$

В случае, когда поглощение в родительской галактике  $A_R$  не было измерено, на основе данных об  $A_V$  из [13] для 76 всплесков определялись средние из этих величин на соответствующем красном смещении и трансформировались в  $A_R$  с использованием модели поглощения в Магеллановых Облаках [24]. Данные о параметрах гамма-всплесков в собственной системе отчета представлены в таблице 2.

Все оптические источники были отнесены к одному из четырех следующих типов на основании соотношения между длительностью собственно гамма-излучения и запаздыванием начала возрастания оптического блеска относительно момента триггера.

- P (от англ. «prompt») — к нему отнесены тринадцать оптических транзиентов, у которых блеск начинает возрастать до затухания гамма-излучения. В их число входят четыре события, обозначаемые как P?, чья принадлежность к P не является однозначной; возможно, они относятся к типу A(U) (см. ниже).
- A (от англ. «afterglow») — 34 источника, блеск которых начинает возрастать после прекращения гамма-активности.
- A(U) — семь источников, возрастание блеска которых происходит на фоне остаточного гамма-излучения после выделения 90% всей энергии всплеска.

Для статистического анализа были сформированы семь выборок, в которые вошли объекты следующих типов:

- (1) источники типа P и P?;
- (2) только послесвечения A;
- (3) только источники с продолжающейся гамма-активностью A(U);



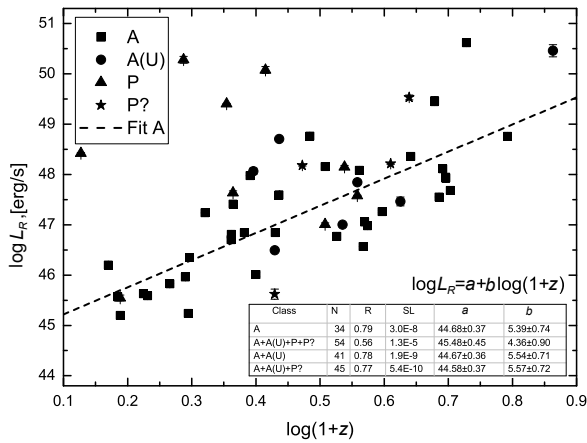


Рис. 1. Зависимость максимальной оптической светимости в R-полосе  $L_R$  от красного смещения  $z$ .

- (4) все 54 оптических источника;
- (5) послесвечения A и источники с продолжающейся гамма-активностью A(U);
- (6) только ранние оптические источники P;
- (7) источники A вместе с A(U) и P?.

Были определены невзвешенные коэффициенты корреляции Пирсона  $R$  между всеми возможными парами параметров  $x$  и  $y$  гамма-всплесков из этих выборок, а также их уровни значимости SL по формулам:

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

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

где  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  — средние значения  $x$  и  $y$ ,  $\Gamma$  — гамма-функция Эйлера,  $n$  — число точек  $(x_i, y_i)$ . Корреляции между параметрами с коэффициентами  $R > 0.50$  при их уровнях значимости  $SL < 1\%$  полагались установленными, и для параметров определялись коэффициенты линейной регрессии (таблица 3).

### 3. КОРРЕЛЯЦИЯ $L_{opt} : (z + 1)$

Среди всех корреляционных связей, установленных в работе, наибольший интерес, на наш взгляд, представляет впервые обнаруженная зависимость  $L_R : (z + 1)$  (рис. 1). В частности, ее наличие приводит к представлению о вероятной космологической эволюции локальной межзвездной среды в зонах рождения гамма-всплесков.

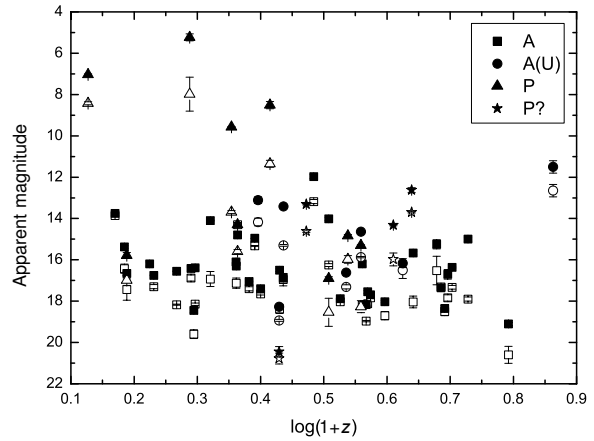


Рис. 2. Наблюдаемые величины оптических источников (в произвольных фильтрах) в моменты обнаружения (пустые символы) и максимума (заполненные символы) в кривой блеска в зависимости от красного смещения  $z$ .

Подчеркнем, что эта корреляция высокослабима для объектов всех типов, за исключением таких из выборки объектов типа P, что является свидетельством в пользу принадлежности источников типа P? к послесвечениям (объекты типа A и A(U), характеристики которых в обсуждаемой корреляции практически совпадают). Для полной уверенности в реальности установленной корреляции необходимо проанализировать возможную роль селекционных эффектов в ее возникновении. Отметим, что для выяснения влияния селекции на параметры всплесков в выборках разного типа в первую очередь необходимо изучить совокупность оценок блеска оптических компаньонов всплесков в момент их обнаружения. С этой целью мы построили зависимости наблюдаемых звездных величин от  $(z + 1)$  оптических компаньонов в моменты их обнаружения и достижения максимума кривой блеска (рис. 2). На основании данных из рис. 1 и 2 можно сформулировать следующие заключения. При относительной неизменности светимости на разных красных смещениях в сопутствующих системах отчета наблюдаемый поток должен падать квадратично с  $(z + 1)$  и при этом на максимальных красных смещениях достигать типичного предела обнаружения на уровне  $23^m$ , оцененного в нашей выборке по полным кривым блеска. Этот эффект приводил бы к отсутствию объектов с низкой светимостью в собственной системе отсчета, наблюдаемый блеск которых слабее  $23^m$ , и, как следствие, к росту светимости с ростом красного смещения. Тем не менее ни в совокупности оценок блеска оптических источников в момент их обнаружения, ни в максимуме блеска регулярное уменьшение потока излучения не наблюдается. С другой стороны, и при  $z > 4$ , и при  $z < 2$  блеск объектов

**Таблица 4.** Характеристики зависимости максимальной оптической светимости от красного смещения выборки  $A + A(U) + P?$  в различных диапазонах  $z$ : количество источников выборки  $N$ , коэффициент корреляции Пирсона  $R$ , значения величин  $a, b$  линейной регрессии  $\log L_R = a + b \log(z + 1)$

$z$	$N$	$R$	SL	$a$	$b$
все	45	0.77	$0.54 \times 10^{-9}$	$44.58 \pm 0.37$	$5.57 \pm 0.72$
$z < 4.5$	43	0.72	$0.65 \times 10^{-7}$	$44.67 \pm 0.40$	$5.55 \pm 0.81$
$z > 1$	36	0.61	$0.84 \times 10^{-4}$	$45.08 \pm 0.62$	$4.96 \pm 1.11$
$1 < z < 4.5$	34	0.50	$0.23 \times 10^{-2}$	$45.39 \pm 0.70$	$4.31 \pm 1.30$

изменяется в близких пределах от  $19^m - 20^m$  до  $13^m - 14^m$ , намного превышая предел обнаружения в  $23^m$ . Другими словами, селекция по яркости в наших данных отсутствует.

Мы сравнили коэффициенты корреляции и параметры линейной регрессии для групп источников из выборки  $A + A(U) + P?$ , локализованных в различных диапазонах красных смещений (таблица 4). Легко видеть, что даже если исключить источники с  $z > 4.5$  и  $z < 1$ , рост светимости с возрастанием красного смещения остается обнаружимым и значимым. Разумеется, при сужении диапазона красных смещений коэффициенты корреляции уменьшаются, тем не менее параметры линейных регрессий для разных групп источников остаются схожими по величине в пределах их погрешностей, в частности, показатели степени близки к значениям 4–5.

Таким образом, этот краткий анализ показывает, что обнаруженная корреляция не может быть обусловлена эффектами наблюдательной селекции оптических источников по яркости.

Для определения статистической значимости установленной корреляции была сгенерирована выборка из 100 000 оптических источников, распределенных нормально по  $L_R$  со средним  $\log L_R = 46$ ,  $\sigma = 2$  в логарифмической шкале [25] (т.е. со светимостями, не зависящими от красного смещения). Поглощения (Галактическое и от родительской галактики) принимались  $0 < A_R < 3$ , показатели оптического спектра  $0.2 < \beta < 1.2$ . Пределы  $A_R$  и  $\beta$  брались из наблюдений [13], распределение принималось равномерным — изменение функций распределений мало повлияло на результат. Источникам случайным образом присваивались  $z$  в интервале  $0 < z < 6$ . Из этой генеральной совокупности случайным образом отбирались подвыборки по 50 источников (2000 подвыборок) с наблюдаемым блеском, определенным с использованием значений светимости и других вышесприведенных параметров, превышающим  $23^m$ .

Для каждой из выборок вычислялся коэффициент корреляции между светимостью и красным смещением. Его значение превысило уровень 0.7 лишь в двух случаях; другими словами, ошибка первого рода (вероятность найти корреляцию в случайной выборке источников, когда ее нет в генеральной совокупности) составила  $10^{-3}$ . Для оценки ошибки второго рода генерировалась генеральная совокупность, отличающаяся от предыдущей заданным законом  $L_R \propto (1 + z)^4$ . Коэффициент корреляции лишь в одной подвыборке оказался меньше 0.8, что дает  $5 \times 10^{-4}$  для ошибки второго рода (вероятность не обнаружить корреляцию, когда она существует в генеральной совокупности). В конечном итоге возрастание светимости в максимумах кривых блеска послесвечений с ростом красного смещения всплесков представляется реальным эффектом. Он, по-видимому, отражает факт космологической эволюции плотности межзвездной среды в областях рождения гамма-всплесков [26]. Действительно, результаты корреляционного и регрессионного анализа (см. рис. 1) показывают, что связь  $L_R : (z + 1)$  справедлива для всех типов оптических источников (выборки  $A$ ,  $A + A(U)$ ,  $A + A(U) + P?$ ), за исключением ранних ( $P$ ) (корреляция существенно уменьшается при их добавлении к послесвечениям). С другой стороны, объекты типа  $P?$  могут быть отнесены с большей уверенностью к послесвечениям, а не к ранним источникам, поскольку характеристики выборки объектов  $A + A(U) + P?$ , в которую они входят, практически совпадают с таковыми для выборок послесвечений  $A$  и  $A + A(U)$ , где они отсутствуют. Более того, есть основания полагать, что лишь четыре (из девяти) наиболее ярких ранних оптических объекта, не имеющие никакого отношения к корреляции  $L_R : (z + 1)$ , являются настоящими ранними источниками, чье оптическое излучение генерируется на стадии столкновения внутренних ударных волн вблизи центральной машины гамма-всплеска и не подвержено влиянию межзвездной среды. Этим они отличаются от оставшихся пяти источников выборки  $P$ , зависимость светимости которых от красных смещений практически совпадает с таковой для послесвечений. Таким образом, можно предположить, что существует группа гамма-всплесков, чьи ранние оптические компаньоны, синхронные с гамма-излучением, по своей природе являются послесвечениями, т.е. результатом взаимодействия джета с локальной межзвездной средой. Другими словами, сама по себе эта синхронность не является достаточным условием для интерпретации раннего оптического излучения в рамках модели внутренних ударных волн, генерирующихся при столкновениях отдельных оболочек в самом джете. В пользу такого предположения свидетельствует и обнаруженная

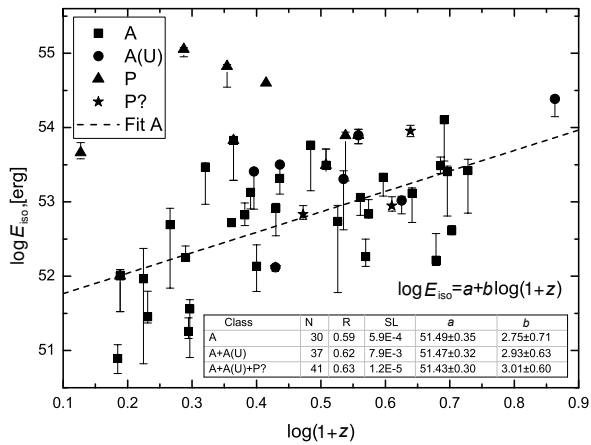


Рис. 3. Зависимость  $E_{iso}$  от красного смещения  $z$ .

нами достаточно сильная корреляция энергии и максимальной светимости собственно гамма-всплесков с красным смещением  $E_{iso} : (z + 1)$  и  $L_{iso} : (z + 1)$  (рис. 3 и 4) у объектов из тех же самых выборок. Естественно, что эти связи усиливаются, если в выборку включить пять источников раннего оптического излучения, чьи корреляционные и регрессионные свойства практически совпадают с таковыми для послесвечений A + A(U) + P?. Отметим, что эта корреляция существенно значимее слабой связи, установленной для полной выборки гамма-всплесков с измеренными красными смещениями ( $R = 0.44$ ) [27], обычно объясняемой селективными свойствами основного детектора Swift (урезание по наблюдаемому потоку). Наконец, укажем еще на одну особенность «настоящих» всплесков, самых ярких событий, чьи характеристики не зависят от красного смещения — у этих объектов нет максимумов в оптических послесвечениях, т. е. их оптический блеск достаточно монотонно уменьшается после максимума, совпадающего по времени с гамма-всплеском. Это поведение может интерпретироваться в контексте вышеприведенных соображений как затухание излучения выброшенного в джете вещества, распространяющегося в пространстве, откуда мощным взрывом центральной машины выметен межзвездный газ.

С большой вероятностью корреляция  $L_R : (z + 1)$  для послесвечений связана с эволюцией плотности локальной межзвездной среды, областей активного звездообразования в родительских галактиках гамма-всплесков, на масштабах  $0 < z < 6$ . Плотность межзвездной среды задает характер торможения головной ударной волны, ответственной за позднее оптическое излучение, а именно — в более плотных средах светимость выше [28].

Отсутствие у некоторых мощных гамма-всплесков, сопровождаемых ранним оптическим излучением, послесвечений с максимумами является, по-

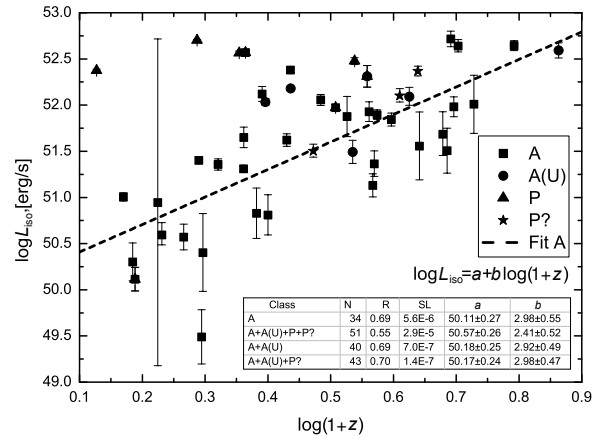


Рис. 4. Зависимость  $L_{iso}$  от красного смещения  $z$ .

видимому, свидетельством определенных отличий в их физической природе по сравнению с другими событиями. Тем более что их светимости не коррелируют с красными смещениями (выпадают из обнаруженных зависимостей). В сочетании с тем фактом, что остальные ранние оптические источники (по изотропическому эквиваленту оптической энергии  $E_R$  ниже на два порядка) не изменяют полученных корреляций, это приводит к идее о выделенных высокоэнергетических источниках гамма-всплесков, не «чувствующих» межзвездную среду. С другой стороны, можно предположить, что существуют ранние оптические источники (prompt sources) и даже гамма-источники (!), подверженные влиянию межзвездной среды во время и вскоре после взрыва центральной машины.

#### 4. КОРРЕЛЯЦИЯ $L_R : E_{iso}$

Корреляционная связь между светимостью в максимуме оптического блеска и энергией гамма-излучения установлена нами практически для всех выборок источников (рис. 5). В частности, для послесвечений (A) она имеет вид  $L_R \propto E_{iso}^{1.06 \pm 0.22}$ , практически совпадая с зависимостью  $L_R^{peak} \propto E_{iso}^{1.00 \pm 0.14}$ , ранее полученной в работе [29]. Подобное соотношение является типичным в моделях торможения головной ударной волны в межзвездной среде. Проанализируем, какой именно версии этого процесса соответствует наш результат.

Рассмотрим две области синхротронного спектра, в которых может быть локализован максимум кривой оптического блеска [30]. Если характерная частота излучения меньше характерной частоты охлаждения электронов  $\nu_i < \nu_c$ , то показатель оптического спектра  $\beta = \frac{p-1}{2}$ , где  $p$  — показатель спектра высвечивающихся электронов  $N \propto \epsilon^{-p}$ ,

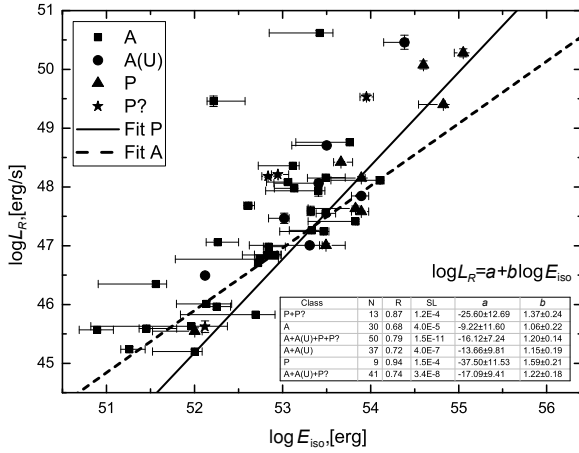


Рис. 5. Зависимость максимальной оптической светимости в  $R$ -полосе  $L_R$  от  $E_{iso}$ .

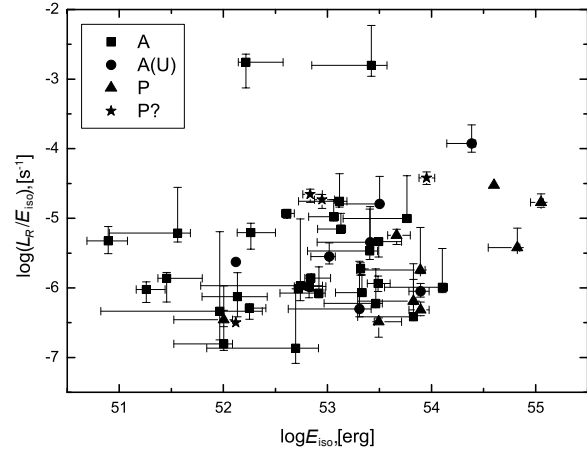


Рис. 6. Зависимость отношения  $L_R/E_{iso}$  от  $E_{iso}$ .

$2 < p < 3$  [31], и  $0.5 < \beta < 1$ ; когда же  $\nu_i > \nu_c$ , то  $\beta = \frac{p}{2}$  и  $1 < \beta < 1.5$ . В то же время наблюдения дают  $\beta < 1$  [18] со средним  $\beta = 0.75$ , откуда следует, что частота излучения ниже частоты охлаждения. Проанализируем теперь связь  $L_{peak} \propto E_{iso}^\delta$  для этого случая, т. е. при  $\nu_i < \nu_c$  [32].

(1) При высвечивании энергии и передних, и обратных ударных волн в оптически тонкой плазме  $L_{peak} \propto E_{iso}^{\frac{12-7k-pk}{4(3-k)}}$ , а профиль плотности межзвездной среды имеет вид  $n \propto r^{-k}$ .

(2) Для оптически толстой плазмы имеем:

(а) при доминировании передней ударной волны  $L_{peak} \propto E_{iso}^{\frac{12-5k+4p-pk}{4(4-k)}}$ ;

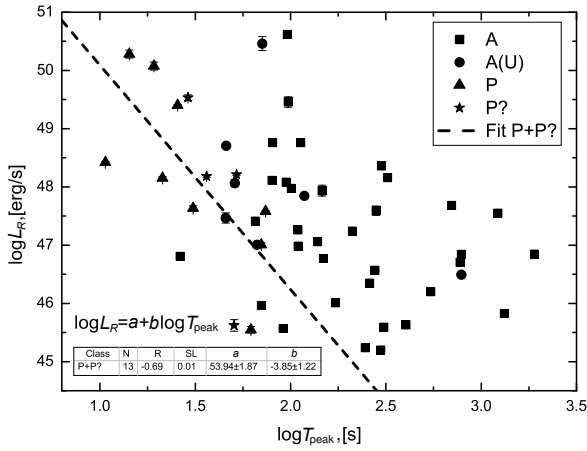
(б) при доминировании обратной ударной волны  $L_{peak} \propto E_{iso}^{\frac{20-5k-pk}{4(4-k)}}$ .

Для определения  $\delta$  воспользуемся полученными в работе [29] оценками  $0 < k < 1.5$  и  $2 < p < 3.5$ . При оптически тонкой плазме линейная зависимость светимости от энергии ( $\delta = 1$ ), близкая к полученной нами, может реализоваться только при распространении ударных волн в однородной среде, возможность существования которой вокруг гамма-всплеска представляется маловероятной. При оптически толстой плазме ограничения на величину  $\delta$  как для передней  $0.95 < \delta < 1.625$ , так и для обратной  $0.725 < \delta < 2.5$  ударных волн согласуются с полученной нами оценкой. Таким образом, этот анализ показывает, что излучение послесвечений в выборке объектов с максимумами в оптических кривых блеска может быть связано как с передней, так и с обратной ударными

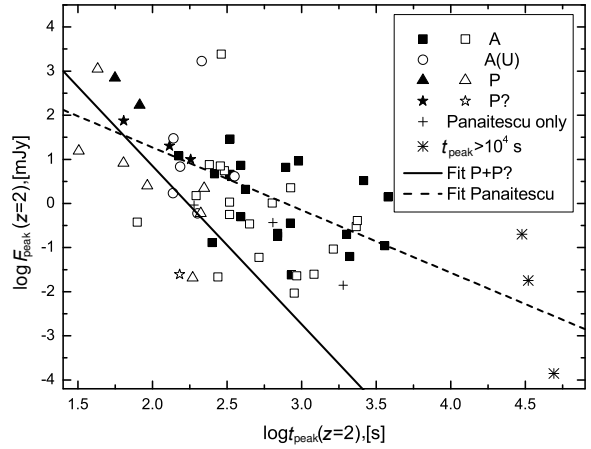
волнами. Отметим, что параметры линейной регрессии  $L_R : E_{iso}$  для источников из всех выборок в пределах погрешностей весьма близки (см. рис. 4). Для уточнения этого результата мы приводим на рис. 6 зависимость условного коэффициента трансформации механической энергии в оптическую  $\kappa = L_R/E_{iso}$  от гамма-энергии. Ясно, что это отношение зависит как от реального КПД преобразования механической энергии взрыва в излучение, так и от раствора джета. Легко видеть, что поведение такой характеристики для разных источников очень похоже. Это может свидетельствовать о связи реального коэффициента преобразования и угла раствора джета, которая обеспечивает неизменность  $\kappa$  в зонах генерации излучения ранних источников и послесвечений, т. е. на разных расстояниях от центральной машины.

## 5. КОРРЕЛЯЦИЯ $L_R : T_{peak}$

Изучение характера зависимости между нормированным оптическим потоком и временем наступления максимума относительно момента обнаружения гамма-всплеска  $F_{z=z_0} \propto t_{peak}^{-\gamma}$  может прояснить различные стороны физической природы этих объектов. Анализ этой связи посвящены, например, работы [21, 33]. Представляется, что существенным недостатком этих исследований является отсутствие разделения изучаемых источников по их возможному происхождению: не выделялись ранние источники, послесвечения и совсем поздние. В частности, в последнем случае, когда максимум достигается при  $T_{peak} > 10^4$  сек, повышение яркости на таких временных масштабах обусловлено неоднородностями межзвездной среды при распространении головной ударной волны [34], в отличие от природы максимумов ранних источников и послесвечений. В нашей выборке обнаружена



**Рис. 7.** Зависимость максимальной оптической светимости в  $R$ -полосе  $L_R$  от времени наступления максимума  $T_{\text{peak}}$ .



**Рис. 8.** Зависимость максимального потока на  $z = 2$  от времени наступления максимума. Заполненные символы — данные, совпадающие в нашей работе и в [21]; пустые символы — данные, имеющиеся в нашей работе и отсутствующие в [21]; крестиками обозначены данные, отсутствующие у нас и имеющиеся в [21] (звездочки — объекты с  $t_{\text{peak}} > 10^4$  сек).

антикорреляция между оптической светимостью в максимуме и временем его достижения, однако только для ранних источников —  $P + P?$  — эта связь характеризуется величиной  $\gamma = 3.85 \pm 1.22$  (рис. 7). В работах же [33] и [21] получено, что  $\gamma = 2$  для всех кривых блеска с максимумом и  $\gamma = 1$  для кривых блеска с плоским участком. Представляется, что этот результат носит случайный характер и обусловлен наличием в выборке ранних источников, для которых действительно справедлива связь «светимость—момент максимума» и нескольких слабых поздних источников, создающих эффект длинной базы. Докажем это. На рис. 8 показаны разделенные согласно нашей классификации точки на графике  $F_{z=2} : t_{\text{peak}}$  из работы [21]. Коэффициент корреляции Пирсона для всех источников [21]  $R = -0.77$ , но при удалении из этой выборки источников типа  $P$  и  $P?$ , а также источников с  $t_{\text{peak}} > 10^4$  с корреляция исчезает ( $R = -0.44$ ). Для сравнения нашей выборки с выборкой [21] также приведены данные, отсутствующие в последней, что дополнительно усиливает утверждение об отсутствии данной корреляции у послесвечений. Найденную нами эмпирическую связь между светимостью в максимуме и моментом его достижения для ранних источников можно интерпретировать в рамках модели множественных столкновений плазменных оболочек [2]: каждый акт такого столкновения порождает единственный максимум, один или несколько из которых мы наблюдаем. Этот процесс, возможно, носит релаксирующий характер: последующие акты разогрева при столкновениях высвечивающейся плазмы менее энергичны, что качественно объясняет установленную нами связь  $L_R \propto T_{\text{peak}}^{-3.85 \pm 1.22}$ .

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Количество наблюдаемых гамма-всплесков на сегодняшний день велико, но до полного понимания природы этого явления еще очень далеко. В нашей работе сделана попытка выявить новые свойства гамма-всплесков с оптическими компонентами. Результаты работы можно кратко резюмировать следующим образом:

- приведены парные корреляции между параметрами гамма-всплесков в наблюдаемой и собственной системах отчета, выделены статистически значимые случаи;
- выявлена свободная от эффектов селекции корреляция между максимальной светимостью в стандартной  $R$ -полосе и красным смещением;
- сделан шаг к переосмыслению ранее найденной корреляции между максимальной светимостью и временем наступления максимума в оптической кривой блеска — показано, что такая связь характерна только для ранних оптических источников;
- выдвинута гипотеза о наличии связи между эффективностью преобразования механической энергии релятивистской струи в оптическое излучение и ее раствором, обеспечивающей сходство корреляций оптической светимости и гамма-энергии для источников разной локализации в струе.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена частично за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной

поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Изучение статистических свойств гамма-всплесков в качестве явлений, способствующих формированию звездно-планетных комплексов поддержано Российским научным фондом (проект 14-50-00043, направление “Экзопланеты”).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Mészáros and M. J. Rees, *Astrophys. J.* **476**, 232 (1997).
2. M. J. Rees and P. Meszaros, *Astrophys. J.* **430**, L93 (1994).
3. N. Gehrels and S. Razzaque, *Frontiers of Physics* **8**, 661 (2013).
4. J. P. Norris, G. F. Marani, and J. T. Bonnell, *Astrophys. J.* **534**, 248 (2000).
5. L. Borgonovo and F. Ryde, *Astrophys. J.* **548**, 770 (2001).
6. L. Amati, F. Frontera, M. Tavani, et al., *Astron. and Astrophys.* **390**, 81 (2002).
7. C. Guidorzi, F. Frontera, E. Montanari, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **363**, 315 (2005).
8. G. Ghirlanda, G. Ghisellini, C. Firmani, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **360**, L45 (2005).
9. G. Ghirlanda, G. Ghisellini, and C. Firmani, *New J. Physics* **8**, 123 (2006).
10. L.-X. Li and B. Paczyński, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **366**, 219 (2006).
11. A. Zeh, S. Klose, and D. A. Kann, *Astrophys. J.* **637**, 889 (2006).
12. M. Nardini, G. Ghisellini, G. Ghirlanda, et al., *Astron. and Astrophys.* **451**, 821 (2006).
13. D. A. Kann, S. Klose, B. Zhang, et al., *Astrophys. J.* **720**, 1513 (2010).
14. L. Li, E.-W. Liang, Q.-W. Tang, et al., *Astrophys. J.* **758**, 27 (2012).
15. E. Zaninoni, M. G. Bernardini, R. Margutti, et al., *Astron. and Astrophys.* **557**, A12 (2013).
16. A. Melandri, S. Covino, D. Rogantini, et al., *Astron. and Astrophys.* **565**, A72 (2014).
17. P. Schady, T. Dwelly, M. J. Page, et al., *Astron. and Astrophys.* **537**, A15 (2012).
18. T. Zafar, D. Watson, J. P. U. Fynbo, et al., *Astron. and Astrophys.* **532**, A143 (2011).
19. S. Schulze, S. Klose, G. Björnsson, et al., *Astron. and Astrophys.* **526**, A23 (2011).
20. M. Fukugita, K. Shimasaku, and T. Ichikawa, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 945 (1995).
21. A. Panaitescu, W. T. Vestrand, and P. Woźniak, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **433**, 759 (2013).
22. N. R. Butler, D. Kocevski, J. S. Bloom, and J. L. Curtis, *Astrophys. J.* **671**, 656 (2007).
23. D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis, *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
24. Y. C. Pei, *Astrophys. J.* **395**, 130 (1992).
25. D. M. Coward, E. J. Howell, M. Branchesi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **432**, 2141 (2013).
26. G. Beskin, G. Oganessian, G. Greco, and S. Karpov, *EAS Publ. Ser.* **61**, 241 (2013).
27. L.-X. Li, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **379**, L55 (2007).
28. L. J. Gou, P. Mészáros, T. Abel, and B. Zhang, *Astrophys. J.* **604**, 508 (2004).
29. E.-W. Liang, L. Li, H. Gao, et al., *Astrophys. J.* **774**, 13 (2013).
30. A. Panaitescu, *AIP Conf. Ser.* **1133**, 127 (2009).
31. T. Piran, *Rev. Modern Physics* **76**, 1143 (2004).
32. H. J. van Eerten, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **445**, 2414 (2014).
33. A. Panaitescu and W. T. Vestrand, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **414**, 3537 (2011).
34. D. Lazzati, E. Rossi, S. Covino, et al., *Astron. and Astrophys.* **396**, L5 (2002).

## Statistical Analysis of the Parameters of Gamma-Ray Bursts with Known Redshifts and Peaked Optical Light Curves

G. M. Beskin, G. Oganessian, G. Greco, and S. Karpov

We present the statistical analysis of the properties of gamma-ray bursts with measured host galaxy redshifts and peaked optical light curves in proper frames of reference. The optical transients are classified by comparing the time lag of the optical peak relative to the GRB trigger with the duration of the gamma-ray emission itself. The results of the correlation analysis of all possible pairs of energy, spectral, and temporal characteristics of both gamma-ray and optical emissions are given. We specify the pairs of the parameters with correlation coefficients greater than 50% at significance levels better than 1%. The following empirical relations, obtained for the first time, are specifically discussed: a correlation between the peak optical afterglow *R* band luminosity and redshift  $L_R \propto (z + 1)^{5.39 \pm 0.74}$  and a correlation between the peak luminosity of the prompt optical emissions and the time of the peak  $L_R \propto T_{\text{peak}}^{-3.85 \pm 1.22}$ . We also analyze the similarity of the relationships between the peak optical luminosity and the isotropic equivalent of the total energy of gamma-ray bursts for afterglows ( $L_R \propto E_{\text{iso}}^{1.06 \pm 0.22}$ ) and for prompt optical emissions ( $L_R \propto E_{\text{iso}}^{1.59 \pm 0.21}$ ).

Keywords: *gamma-ray burst: general—methods: statistical*