РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

УДК 524.7-732

С О К О Л О В
Владимир Владимирович

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ: ОПТИЧЕСКИЕ ТРАНЗИЕНТЫ И РОДИТЕЛЬСКИЕ ГАЛАКТИКИ

(01. 03. 02 – астрофизика, радиоастрономия)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Архыз – 2002

Работа выполнена в Специальной астрофизической обсерватории РАН

Официальные оппоненты:- доктор физ.-мат. наук
профессор Ю. Н. Гнедин
- доктор физ.-мат. наук
В. Е. Панчук
- доктор физ.-мат. наук
член-корр. РАН А. М. Черепащук

Ведущая организация - Институт Космических Исследований РАН

Защита состоится "___" ______________ 2002 г. в "___" часов на открытом заседании диссертационного Совета (шифр Д 002.203.01) по присуждению ученой степени доктора физико-математических наук при Специальной астрофизической обсерватории РАН (369167, Карачаево-Черкесия, пос. Нижний Архыз, САО РАН).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан "___" ______________ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук Майорова Е.К.

Актуальность отождествления γ-всплесков

Космические γ-всплески (Gamma-Ray Bursts, GRB) — яркие короткие, от долей секунды до сотен секунд, *вспышки* мягкого гамма-излучения с полными потоками ("fluences") от $\sim 10^{-7}$ эрг см$^{-2}$ до 10^{-3} эрг см$^{-2}$. С такими потоками эти события регистрируются со средним темпом ≈ 0.8 всплесков в сутки (Fishman et al. 1994), кривые блеска часто показывают сложную/многопиковую структуру с переменностью на временах до десятков миллисекунд, энергетические спектры с максимумом до ~ 1 МэВ (Schaefer et al. 1994, Лучков, Митрофанов, Розенталь 1996), но излучение вспышки наблюдается и в рентгеновском диапазоне $2 - 30$ кэВ (Amati et al. 2002). До 1997 г. вся информация об этих событиях получалась только из наблюдений на всенаправленных γ-детекторах, установленных на космических платформах. Задача *отождествления источников всплесков* во всех других диапазонах электромагнитного спектра и установления шкалы расстояний до них стала *актуальной* сразу же, как только стало понятно их космическое происхождение.

Точная и быстрая локализация этих событий на небе, а тем более оптические и другие отождествления наземными и космическими обсерваториями были трудной проблемой в течение 30 лет со времени открытия всплесков в 1965-1967 гг. (Прилуцкий, Розенталь, Усов 1975). Тем не менее, за это время около 200 γ-всплесков были все-таки локализованы на небе с низкой точностью ($\sim 10^o$). Многое было известно об этом явлении и до запуска в 1991 г. знаменитой специализированной космической γ-обсерватории им. А. Комптона (CGRO) с прибором BATSE (Burst And Transient Search Experiment; Meegan et al. 1992, Fishman et al. 1994). Но до 1997 г. γ-всплески наблюдались только в гамма-диапазоне с помощью нескольких детекторов на околоземных орбитах, на космических станциях серии "Венера" и на других (Прилуцкий, Розенталь, Усов 1975, Розенталь, Усов, Эстулин 1983, Мазец и Голенецкий 1987). Никакой надежной информации о расстояниях до источников не было, поскольку лучшие локализации источников этих транзиентных событий на небесной сфере с помощью международной сети космических аппаратов IPN (InterPlanetary Network) достигали нескольких квадратных минут дуги и определение размеров такой области (бокса) ошибок локализации происходило достаточно медленно, чтобы успеть организовать оптические наблюдения с Земли с целью найти соответствующий источнику всплеска тоже транзиентный (быстро слабеющий) оптический объект или какой-либо соответствующий γ-всплеску оптический компаньон ("counterpart"). Из-за полного незнания расстояния до источника всплеска, выделяемая за время всплеска полная энергия в различных теоретических сценариях явления γ-всплеска различалась на 20 порядков, что делало природу источников совершенно неопределенной (Лучков, Митрофанов, Розенталь 1996) и еще более затрудняло их поиск в других диапазонах длин волн. Оставалось делать глубокие снимки наименьших по площади на небе областей (боксов) ошибок и искать какие-то пекулярные объекты в них, исходя из той или иной (галактической или внегалактической) более-менее разумной физической гипотезы/модели, объясняющей возможную популяцию этих странных объектов в оптическом диапазоне.

Еще в начале 90-х многие исследователи исходили из того, что это единая популяция источников (см. ссылки в цитированных обзорах), хотя уже тогда было известно, что все γ-всплески явно делятся на длинные и короткие события. Особенно запутывало ситуацию с расстояниями то, что до 1993 г. вместе с "классическими" (т. е. неповторяющимися) γ-всплесками с помощью одних и тех же моделей анализировались и рекуррентные источники всплесков, например GBS0526-66 (Мазец и Голенецкий 1987), которые позже, примерно с 1995 г., выделились в особый класс мягких повторяющихся всплесков (так называемые Soft Gamma-Ray Repeaters, SGRs). Эти рекуррентные всплески показывают характерные признаки нейтронных звезд (пульсирующая компонента потока, локализация в остатках вспышек сверхновых) в нашей Галактике и в Большом Магеллановом Облаке. Не удивительно, что до начала осознания того факта, что по крайней мере эти источники представляют собой какой-то отдельный класс галактических источников, огромной популярностью пользовалась именно галактическая гипотеза происхождения всех или большинства γ-всплесков.

Наземные оптические наблюдения с целью отождествления источников всплесков в других диапазонах почти не проводились до запуска на орбиту в 1991 г. γ-обсерватории CGRO. В предлагаемой диссертационной работе показано как была поставлена и как решалась задача по *оптическому отождествлению γ-всплесков* на 6-метровом телескопе БТА (Большой Телескоп Азимутальный), начиная с 1993 г., когда источники всплесков исследовались только в одном (гамма) диапазоне, и после 1997 г., когда γ-всплески были отождествлены сначала в рентгеновском, а затем в оптическом и в радиодиапазоне. Постановка задачи по отождествлению γ-всплесков уточнялась в процессе накопления новой информации, начиная с 1993 г. и особенно с весны 1997 г., когда отождествление в рентгеновском и в оптическом диапазонах произошло. Конкретные задачи, выполнявшиеся на различных этапах работы в процессе наблюдений и затем при интерпретации данных в рамках международных программ 1997-2001 гг., перечислены в разделе "Содержание работы" для каждой из глав диссертации.

Цель работы — выяснение природы источников космических гамма-всплесков путем исследования *кандидатов* для оптического отождествления источников всплесков в транзиентном (оптические транзиентые источники) и в спокойном (родительские галактики) состоянии, *определение места источников γ-всплесков среди других астрофизических объектов.* Более конкретно, с 1997 г. главной целью стало выяснение того, *какие объекты являются прародителями источников γ-всплесков.* (см. также Табл. 1.)

Научная новизна и практическая ценность:

В диссертационной работе впервые последовательно изложена методика оптического отождествления γ-всплесков, начиная с первых попыток (1994-1996 гг.) поисков слабых объектов в больших (IPN) боксах ошибок локализации и заканчивая успешными наблюдениями оптических транзиентных источников, связанных с γ-всплесками и исследованиями их родительских галактик (в 1997–2000 гг.).

1. Впервые проведено исследование в трех (B, V, R) фотометрических полосах области локализации короткого γ-всплеска GRB 790613 до $B = 26.2$, $V = 25.7$, $R = 25.6$, и в рамках галактической модели получены ограничения по расстояниям до предполагаемого объекта — источника этого всплеска [2, 3, 8, 9, 10].

2. Впервые для пульсара PSR B0656+14 были определены потоки в фотометрических полосах B, R и I [6, 7, 11]. Впервые исследованы слабые объекты в окрестностях PSR B0656+14 [11, 35].

3. В результате наблюдений "энергичного преследования" (англ. follow-up) слабеющего Оптического Транзиента (OT) GRB 970508 впервые для таких объектов получен самый большой набор данных в четырех стандартных фотометрических полосах и впервые исследована *эволюция непрерывного спектра* оптического источника, связанного с γ-всплеском.

Проведены наиболее точные измерения блеска в фотометрических полосах BVR_cI_c в фазе максимальной яркости и в максимуме блеска этого ОТ GRB. С использованием оригинальных данных определен наклон непрерывного спектра этого объекта в яркой фазе и определен усредненный степенной закон падения блеска в фотометрической полосе R_c после максимума блеска в течение 86 дней [23, 24].

4. Новыми являются результаты исследования родительской галактики γ-всплеска GRB 970508: исследование широкополосного $BVRI$-спектра (или цветов) галактики, сравнение спектра со средним распределением энергии в континууме для галактик различных хаббловских типов, определение абсолютной величины, сравнение распределения энергии в спектре галактики GRB 970508 с ультрафиолетовыми спектрами близких по светимостям галактик со вспышкой звездообразования в локальной Вселенной, оценка линейных размеров этой галактики, оценка величины ее центральной поверхностной яркости, исследование $BVRI$-спектров трех близких объектов в поле, оценка светимости и размеров (гало) ближайшей галактики в поле галактики GRB 970508 и объяснение дополнительного красного смещения $z = 0.767$ [25, 26].

5. По фотометрическим наблюдениям шести родительских галактик γ-всплесков на одном телескопе и в одной и той же стандартной (Cousins) фотометрической системе впервые был получен самый большой набор данных по их четырехполосной фотометрии BVR_cI_c. По этим данным изучены цвета галактик, подтверждена связь γ-всплесков с массивным звездообразованием. Для пяти родительских галактик впервые учтено внутреннее поглощение и определены их абсолютные величины ($M_{B_{rest}}$). Все результаты и выводы по родительским галактикам являются новыми [28, 29, 34, 38].

6. Новыми являются результаты исследования эффекта покраснения ОТ GRB 970508 или "плеча" ("red bump") на его кривой блеска в I_c на 36-й день после всплеска. Наблюдения ОТ в полосе I_c по отношению к поведению блеска объекта в B, V, R_c проводились только на 6-метровом телескопе САО РАН [24]. Это был один из первых случаев наблюдений "GRB/SN-эффекта". Такой эффект, указывающий на связь γ-всплеска со вспышкой сверхновой (СН), был обнаружен впервые в восьми сетах B, V, R_c, I_c наблюдений ОТ GRB, вплоть до наблюдения основного вклада в потоки и показатели цвета от родительской галактики [26, 30, 33, 41].

7. На 6-метровом телескопе были впервые исследованы области лока-

лизаций GRB до глубины $> 26^m$, с ошибкой в оценке блеска не хуже, чем $0.2^m - 0.3^m$ [2, 9]. Опыт фотометрии слабых объектов [2, 9, 11, 23, 24, 26, 32, 35] использовался на 10-метровом телескопе Keck II в наблюдениях родительских галактик γ-всплесков и при исследовании изолированных нейтронных звезд-пульсаров на больших телескопах (Subaru, VLT). Результаты исследований в трех полосах бокса ошибок "классического" короткого γ-всплеска GRB 790613 могут быть использованы в новых наблюдательных программах по отождествлению коротких всплесков.

8. Практически ценным может быть опыт участия в международных программах отождествления γ-всплесков в результате (follow-up) наблюдений быстро слабеющих транзиентных источников [12-16, 18, 20-22]. Полученная на БТА фотометрическая информация помогала корректировать постановку спектральных и фотометрических задач на других телескопах (Keck II, HST, VLT и других).

9. В работе предложена полезная для практических применений *методика* определения внутреннего поглощения в далеких галактиках с использованием данных их $BVRI$-фотометрии [34, 38, 40,42].

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследования бокса ошибок короткого γ-всплеска GRB 790613:
По результатам фотометрического исследования области ошибок локализации короткого γ-всплеска GRB 790613 получены наблюдательные ограничения для галактической модели происхождения коротких всплесков. С использованием оригинальных данных BVR фотометрии и с учетом архивных рентгеновских данных показано, что в направлении этого γ-всплеска нет объекта ярче $B \approx 26$ (или до расстояний 70-90 пк) с показателями цвета и рентгеновским потоком, характерными для старой изолированной нейтронной звезды с чисто тепловым (чернотельным) спектром.

2. Результаты $BVRI$ фотометрии пульсара PSR B0656+14:
Отождествление изолированной нейтронной звезды — пульсара ($B \approx 25$) на основании его астрометрического положения и фотометрии в четырех фотометрических полосах. Для PSR B0656+14 были определены потоки в B, V, R и I, что подтвердило нетепловую природу излучения в оптической области спектра этой изолированной нейтронной звезды вплоть до ~ 8000Å. Наблюдаемый спектр от UV до IR диапазона — сумма нетеплового и теплового спектров нейтронной звезды. Исследованы слабые

($B \approx 25$) протяженные объекты в окрестностях пульсара.

3. Результаты исследования оптического транзиента длинного γ-всплеска GRB 970508 в яркой фазе:
Исследованы изменения блеска ОТ GRB 970508 в первые и в последующие сутки (с мая по август 1997 г.) в стандартных фотометрических полосах B, V, R_c, I_c. По этим данным было обнаружено неожиданное и до сих пор окончательно не понятое увеличение блеска ("вторая вспышка") от $R_c = 21.19 \pm 0.25$ (Май 9.75 UT) до $R_c = 19.70 \pm 0.03$ (Май 10.77 UT). Проведены точные четырехполосные измерения блеска как в самом максимуме, так и после него. Исследована спектральная эволюция оптического источника, связанного с γ-всплеском. Обнаружено экспоненциальное падение блеска после максимума (май 10.77 UT) во всех $BVRI$-полосах в течение примерно 3 суток. Определен показатель (-1.10 ± 0.08) степенного спектра излучения объекта. Такой спектр сохранялся в течение по крайней мере трех суток после максимума. Определен усредненный степенной закон падения блеска в R-полосе $F \propto t^{-1.171(\pm 0.012)}$ в течение 86 дней после этого же максимума. Проведено сравнение оптических и рентгеновских данных, подтверждающих активность источника (тоже 2-ю вспышку) в рентгене и в оптике с общей энергетикой более 16% от энергии γ-всплеска, наблюдавшуюся в первую неделю после самого всплеска.

4. Результаты исследования родительской галактики γ-всплеска GRB 970508:
Вывод об отсутствии вклада какого-либо переменного источника в наблюдаемые потоки этой галактики через 200 дней после всплеска. Получен широкополосный ($BVRI$) спектр/цвета родительской галактики GRB 970508 (с $z = 0.835$) и сравнен со средним распределением энергии в континууме для галактик различных хаббловских типов — исключены распределения энергии нормальных галактик более ранних типов, чем Sbc. Определена абсолютная B величина ≈ -18.5 и отмечено, что светимость родительской галактики γ-всплеска GRB 970508 приближенно соответствует колену локальной функции светимости $L_B \approx L^*_{\rm late}$ (или средней светимости) галактик поздних типов Sd-Sm-Irr. Проведено сравнение BVR_cI_c распределения энергии в спектре галактики GRB 970508 с ультрафиолетовыми спектрами близких по светимостям галактик локальной Вселенной со вспышкой звездообразования: наилучшее согласие распределений энергии соответствует спектру Scd HII галактики со звездообразованием NGC7793 ($M_B \approx -18$) и спектру голубой компактной

галактики Mrk 1267. Сделаны оценки линейных размеров родительской галактики GRB 970508 (4-5 кпк) и величины ее центральной поверхностной яркости $\mu_0 \approx (19.1 - 20.4)$ mag/arcsec^2 у этого объекта. Исследование $BVRI$-спектров 3 галактик в поле ОТ GRB 970508, оценка светимости и размеров (гало) для ближайшей галактики, объяснение дополнительного абсорбционного красного смещения $z = 0.767$.

5. Результаты фотометрии и спектроскопии других родительских галактик:
Приведены наблюдательные свидетельства в пользу ассоциации массивных звезд и γ-всплесков, основанные на *цветах* и других свойствах родительских галактик, предполагающих активное звездообразование. Для пяти родительских галактик γ-всплесков было учтено внутреннее поглощение. Предложена оригинальная методика определения внутреннего поглощения по $BVRI$- фотометрии. Определены K-поправки и абсолютные величины $M_{B_{rest}}$ шести галактик. С помощью методов популяционного синтеза показано, что UV часть спектра этих галактик описывается теоретическими моделями спектров галактик с недавней вспышкой звездообразования. Для двух галактик оценены массы, возрасты, металличность, типы законов поглощения. Наблюдаемый в $BVRI$-спектре родительской галактики GRB 980703 дефицит потока в B фильтре, объяснен поглощением (в полосе графита) на 2200Å, что соответствует солнечной металличности и возрасту галактики $\sim 10^9$ лет, определяемым по моделям. Определены темпы звездообразования по распределению энергии и по спектрам трех родительских галактик. Сделан вывод о том, что индивидуальные оценки темпа звездообразования в родительских галактиках γ-всплесков соответствуют росту среднего темпа звездообразования галактик на тех же расстояниях (т.е. для z около 1 и больше), а светимости родительских галактик соответствуют средней светимости галактик для этих же красных смещений. Сделан вывод о том, что родительские галактики γ-всплесков ничем не отличаются от всех других таких же далеких непекулярных галактик при $z \sim 1$. На основании оценок плотности этих далеких галактик на небесной сфере определена средняя годовая частота (верхняя оценка): $\sim 10^{-8}$ γ-всплесков в "средней" галактике в год.

6. Результаты исследования эффекта покраснения ОТ GRB 970508:
Вывод о том, что разные фазы (законы) падения блеска на протяжении всей кривой блеска соответствуют вкладам в полный измеряемый поток от *оптического компаньона* γ-всплеска до трех разных по механизму вы-

свечивания источников: сначала вкладу послесвечения γ-всплеска, затем (возможно) излучения связанной с ним Сверхновой, вплоть до проявления *постоянного блеска* родительской галактики. Обнаружение эффекта покраснения источника ("red bump") или "плеча" на кривой блеска в I_c полосе, наблюдавшегося примерно через 36 дней после γ-всплеска GRB 970508 и указывающего на связь γ-всплеска со сверхновой (СН), как это наблюдается теперь уже во многих других случаях ОТ GRB. Интерпретация оптических наблюдений ОТ GRB 970508 в рамках связи γ-всплеск/СН ("GRB/SN"). Сделан вывод о том, что отношение числа наблюдаемых в далеких галактиках γ-всплесков, которые могли бы быть связаны с коллапсом массивных звезд ("core-collapse SN"), к числу СН типа Ib/c равно $\approx 5 \cdot (10^{-5} - 10^{-6})$. При условии, что *все длинные γ-всплески действительно связаны с (core-collapse) СН*, соответствующие фотометрические эффекты в *многополосных* кривых блеска ОТ будут наблюдаемыми с Земли, если родительская галактика γ-всплеска (с $z \lesssim 1$) по абсолютной величине по крайней мере не меньше, чем пиковая абсолютная звездная величина СН.

Апробация: Результаты работы по теме диссертации неоднократно докладывались на астрофизических семинарах в САО, АКЦ ФИАН, ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, Кафедры Астрофизики СПбГУ, ежегодных конференциях в Пущино (1997, 1999, 2000, 2001), посвященных актуальным проблемам астрофизики. Доклады были сделаны также на: IAU Colloquium No.151 "Flares and Flashes" (Декабрь 1994, Зоненберг, Германия), 29th ESLAB Symposium "Towards the Source of Gamma-Ray Bursts" (Апрель 1995, Нордвайк, Нидерланды), 3rd Huntsville Symposium "Gamma-Ray Bursts" (Октябрь 1995, Хантсвилл, США), Общемосковском семинаре астрофизиков (ОСА) — Коллоквиум по проблеме гамма-всплесков (23 Мая 1997, ГАИШ, Москва), Fourth Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium (Сентябрь 1997,Хантсвилл, США), 1st Workshop "Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era" (Ноябрь 1998, Рим), Коллоквиуме "Гамма-всплески и связанные с ними явления" (13 Ноября 1998, ГАИШ, Москва), 19th Texas Symposium "Relativistic Astrophysics and Cosmology" (Декабрь 1998, Париж), Colloquium on Physics of Neutron Stars (Май 1999, ФТИ им. А.Ф.Иоффе, С-т Петербург), Конференции по 2-D спектроскопии в САО (Декабрь 1999, Н.Архыз, САО), Joint European and National Astronomical Meeting "JENAM-2000" (Июнь 2000, Москва), 2nd Workshop on "Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era" (Октябрь 2000, Рим), Коллоквиуме "Космичекие взрывы 2000: от Большого Взрыва до гамма-всплесков" (24 ноября 2000, ГАИШ, Москва), Conference on Physics of Neutron Stars (Июнь 2001, ФТИ, С-т Петербург). Результаты работы по теме диссертации вошли в список важнейших достижений САО РАН в 1994, 1996-1998, 2000, 2001 гг. [17, 19, 36]. По теме диссертации опубликовано 35 научных работ.

Личный вклад автора: Автору принадлежит постановка задачи по поиску на БТА оптических объектов, возможно связанных с γ-всплесками, и последующее формулирование всех целей наблюдательных программ на различных этапах работы по теме, начиная с 1993 г. Автор принимал участие в наблюдениях по своей программе отождествления γ-всплесков ("архивные" GRB-боксы, пульсары, follow-up наблюдения ОТ GRB и галактик). Автору принадлежит постановка всех задач по обработке и интерпретации полученных данных, начиная от стадии оформления наблюдательной заявки и до написания статей по результатам работы. Автору принадлежит идея накопления информации по фотометрии родительских галактик γ-всплесков для как можно большего числа таких объектов (переход к астрономии GRB), а также идея сравнения $BVRI$-спектров родительских галактик с ультрафиолетовыми спектрами локальных галактик и затем (второе приближение) с рассчитанными спектрами галактик в методе оценки внутреннего поглощения. Автору принадлежит постановка задачи по моделированию и учету внутреннего поглощения в родительских галактиках γ-всплесков.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из вводной главы, пяти основных глав, заключения, списка цитируемой литературы из 318 наименований; содержит 260 страниц текста, в том числе 58 рисунков и 27 таблиц.

Содержание работы

В Главе 1 (Введение и обзор текущих исследований) сказано об актуальности отождествления γ-всплесков и о главных целях диссертационной работы. Во второй части этой вводной главы на конкретных примерах показано, что такое отождествление γ-всплесков, приведен обзор исследований по теме, начиная с самых первых попыток отождествления, в том числе включая и обзор результатов наблюдений на БТА по программе "Отождествление гамма-всплесков" до весны 2000 г.

Этой проблеме посвящено довольно много обзоров (Прилуцкий, Розенталь, Усов 1975; Розенталь, Усов, Эстулин 1983; Мазец и Голенецкиий 1987; Лучков, Митрофанов и Розенталь 1996; Постнов 1999; Djorgovski et al. 2001, 2001a; Castro-Tirado 2001a) и, кажется, нет необходимости описывать здесь еще раз во многом драматическую и противоречивую историю открытия и исследования этого интереснейшего явления. Поэтому в 1-й главе (в разделе 1.2) сделан обзор в основном только по теме диссертации, касающейся одной из существенных составляющих всей проблемы γ-всплесков — их *оптическому отождествлению*, теме, которая стала особенно "горячей" в астрофизике с 1997 г., когда начал свою работу на орбите Земли знаменитый спутник BeppoSAX (Boella et al. 1997). Текущие исследования в настоящее время, когда возникла *астрономия* γ*-всплесков*, можно проиллюстрировать Таблицей (схемой) 1 на стр. 15. Фактически согласно такой логике эти исследования проводятся с 1997 г., начиная с первых отождествлений γ-всплесков в оптике. Однако попытки отождествить γ-всплеск предпринимались и раньше, когда это явление наблюдалось в основном только как спонтанное повышение фона мягкого гамма-излучения регистрируемого *гамма-детектором*, а не каким-либо астрономическим инструментом, например телескопом в любом другом диапазоне электромагнитного спектра, или рентгеновской камерой широкого поля, например, как WFC/BeppoSAX. К такой логической схеме (как блок-схема в Табл. 1) надо было еще прийти, поэтому в разделе 1.2.1 кратко изложена история проблемы *отождествления* γ-всплесков, начиная с исследований в огромных ($\gtrsim 10\ arcmin^2$) боксах ошибок их локализации на небе.

Об оптическом отождествлении до весны 1997 г.:

Поиски оптических объектов, связанных с γ-всплесками, с самого начала предпринимались в трех направлениях: 1) поиск каких-либо пекулярных объектов в области (в боксе ошибок) локализации через несколько месяцев и лет после вспышки–γ-всплеска (*"quiet counterparts"*); 2) поиск оптических вспышек в боксах ошибок локализации по архивным оптическим данным (*"flaring counterparts"*); 3) поиск оптики от источников либо в момент вспышки, либо сразу (follow-up) после детектирования всплеска (*"fading counterparts"*).

Первой попыткой оптического исследования области локализации γ-всплеска была работа Chevalier et al. (1981), в которой еще фотографическим путем изучался бокс ошибок одного из всплесков до $23.5^m - 24^m$. Поиску оптических кандидатов для отождествления в нескольких областях локализации γ-всплесков были посвящены работы Ricker et al. (1986) и Harrison et al. (1994). Следующим шагом по поиску оптических кандидатов был обзор Vrba et al. (1995) еще семи боксов ошибок, в которых была сделана многополосная CCD фотометрия со средним пределом обнаружения около 24^m. Наблюдения на БТА областей локализации [1, 2, 3, 8, 9, 10] были продолжением поисков первого направления — поиск пекулярных по цветам объктов типа *"quiet counterparts"*. Работа по программе поиска оптических кандидатов, соответствующих источникам γ-всплесков, началась в САО в 1993 г. Главной целью программы было найти оптические объекты, связанные со "старыми/архивными" γ-всплесками, выбирая для исследования наименьшие ($\sim 1\ arcmin^2$) боксы ошибок их локализации на небе. Тогда довольно популярным представлением об источниках было представление об изолированных нейтронных звездах, на поверхности которых происходят мощные взрывы (Woosley, Wallace 1982, Розенталь, Усов, Эстулин 1983). Теперь, после рентгеновских, оптических, инфракрасных и радио отождествлений старые представления обо всей популяции источников γ-всплесков существенно пересмотрены. Считается, что может быть только короткие γ-всплески действительно связаны с компактными объектами в Галактике (Bisnovatyi-Kogan 2001, Cline et al. 2001). Но наблюдательные усилия по программам отождествления до 1997 г. оказались все-таки не бесполезными, поскольку основной их смысл свелся к тому же, что делали тогда и все другие группы — в тот период времени отрабатывались *методики поиска и исследования* слабых источников в самых разных диапазонах электромагнитного спектра. Именно так и надо понимать первые попытки поисков *голубых звездообразных объектов* в больших областях ошибок локализации GRB, которые были предприняты и на БТА до 1997 г.

Поиск оптических вспышек (*"flaring counterparts"*) в областях локализации всплесков с помощью архивных данных исходит из того, что γ-всплески могут быть рекуррентными событиями, по крайней мере, на шкале ~ 10 лет, и в момент всплеска часть энергии излучается в оптическом диапазоне. Результатом такого поиска по архивным пластинкам различных обсерваторий стало обнаружение более чем 50 переменных объектов внутри и вблизи областей локализаций γ-всплесков. Например, оптические вспышки в областях локализации трех γ-всплесков были обнаружены с помощью архивных фотопластинок (Schaefer 1984). Большинство из этих объектов действительно представляют собой какие-то реальные вспышки. Некоторые из них были включены и в программу наблюдений на БТА, в частности, объект "ОТ 1959 Москаленко" в области локализации γ-всплеска GBS 791101, которая была исследована в июне 1994 г. в BVR-полосах [4]. В этом случае вблизи положения возможного переменного источника ОТ 1959, указанного Moskalenko et al. (1989), был найден объект $V = 23.43$ с пекулярными цветами ($B - V = 0.9, V - R = 1.10$). Возможно, что этот объект и является кандидатом для отождествления оптической вспышки 1959 года, но связь его с γ-всплеском GBS 791101 остается проблематичной.

Приоритетами наблюдательных программ того времени на БТА по отождествлению γ-всплесков и пульсаров были: *отработка методики* глубоких многоцветных фотометрических CCD-наблюдений, отбор и анализ слабых (слабее $23^m - 24^m$) объектов по показателям цвета ($B - V$, $V - R$, $R - I$) и профилям (фотометрическим разрезам), оценка собственных движений звездообразных объектов, подсчеты числа объектов вплоть до фотометрического предела, поиск переменных и изучение пекулярных объектов, найденных в боксах ошибок локализации γ-всплесков. В итоге (до весны 1997 г.) были исследованы области локализации γ-всплесков: GRB 790613, GRB 791101 (ОТ Москаленко), GRB 930131 (ОТ McNamara & Harrison), GRB 910601 (ROSAT # 30), GRB 790418, GRB 790326b. Надежных кандидатов для отождествления обнаружено не было [3-5, 10]. В параллельной наблюдательной программе по отождествлению в оптике ближайших нейтронных звезд были проведены ($BVRI$) наблюдения PSR B0656+14 [6, 7, 11]. Многополосная фотометрия другой изолированной нейтронной звезды Geminga (J0633+1746) была также сделана на БТА в рамках программы исследования спектров и отождествления слабых объектов ([32], Kurt et al. 2001).

Третье направление или стратегия (*"fading counterparts"*) поисков оптических компаньонов (англ. counterparts) γ-всплесков, впоследствии оказалась самой выигрышной. Но отработка *методики* такого поиска ярких оптических вспышек сразу после всплеска началась задолго до ее успешной реализации в 1997 г. В настоящее время такой поиск осуществляется в ходе глобального эксперимента с участием большого количества обсерваторий Земли. Для этого до 1997 г. были созданы несколько международных сетей, по которым быстро передаются полученные с космических детекторов координаты γ-всплеска после его локализации. В число таких международных сетей входили BATSE/COMPTEL/NMSU Rapid Response Network (McNamara et al. 1995), BACODINE (Barthelmy et al. 1995).

В частности, одна из первых попыток оптических наблюдений (follow-up) до "Эры BeppoSAX" была предпринята McNamara & Harrison (1994) после всплеска GRB 930131, детектированного γ-обсерваторией CGRO. В том месте, где B. McNamara & T. Harrison наблюдали предполагаемый ОТ GRB, на БТА не было найдено ничего ярче $V \approx 25.5$ [5].

Эра BeppoSAX ("Afterglow Era") и астрономия γ-всплесков:

Если в γ-диапазоне с помощью классического метода космической триангуляции (с помощью InterPlanetary Network) быстрая, т.е. *одновременно* со всплеском, локализация направления на источник всплеска на небе с точностью хотя бы до нескольких угловых минут невозможна, то можно пытаться отождествить события, которые могут обеспечить в своем спектре достаточно много мягких рентгеновских квантов. Как выяснилось впоследствии, как раз длинные (они же и мягкие — много рентгена) γ-всплески лучше всего для этого подходят. В результате успешные рентгеновские, оптические да и все другие отождествления длинных γ-всплесков были проведены в 1997-99 гг. в основном с помощью итало-голландского спутника BeppoSAX, на котором кроме γ-монитора (GRBM) были установлены две широкоугольные рентгеновские камеры WFC. BeppoSAX/ GRBM/WFC обеспечивал не только локализацию γ-всплесков с точностью до угловых минут, но на нем также были сделаны уникальные измерения спектров γ-всплесков в широком диапазоне энергий от 2 до 700 кэВ (Piro et al. 1999, Frontera et al. 2000, Amati et al. 2002). В разд. 1.2.1 описана основная идея–схема метода отождествления с помощью этого спутника. Начиная с первого удачного случая отождествления γ-всплеска GRB 970228 (Groot et al. 1997a, van Paradijs et al. 1997), примерно та же схема отождествления по *одновременной с GRB* рентгеновской вспышке реализуется до сих пор.

В частности, γ-всплесками сейчас фактически называют вспышки *рентгеновского и гамма-излучения* с энергией фотонов $2-30$ кэВ ("полужесткий BeppoSAX/WFC-рентген") и до 700 кэВ (мягкий гамма-диапазон) и более. В том числе и с учетом данных наблюдений на БТА можно сказать, что галактики, в которых наблюдается послесвечение всплесков в оптическом, IR и радиодиапазоне, — это в общем-то обычные для $z \gtrsim 1$ далекие галактики, хотя и с энергичным звездообразованием (один из основных выводов диссертации). Результаты исследований кривых блеска ОТ γ-всплесков в совместных наблюдательных программах и результаты рентгеновских наблюдений на BeppoSAX и на рентгеновской обсерватории Chandra [31] показали, что объектами, связанными с источниками γ-всплесков, вероятнее всего могут быть массивные звезды (еще один вывод диссертации). Таким образом, основной вопрос, который в конце концов обсуждается в диссертации и который вытекает из осознания результатов исследований периода 1997-2000 гг. первых отождествлений γ-всплесков в других диапазонах, таков: какие объекты могли бы быть прародителями γ-всплесков [39]?

Наблюдения оптических транзиентов (ОТ) и родительских галактик в САО РАН с 1997 г. по 2000 г.

В разделе 1.2.2 сделан *обзор* всех результатов совместных работ по follow-up-программе отождествления длинных γ-всплесков. Таблица 1 основных задач "наблюдений энергичного преследования" ("follow-up observations") — блок-схема, отражающая логику отождествления GRB — была сформулирована в процессе выполнения наблюдательной программы на 6-метровом телескопе в 1999 г. Схема отражает современное направление и основные цели текущих исследований по проблеме оптических транзиентов (ОТ), родительских галактик и вообще по проблеме источников космических γ-всплесков, по крайней мере по состоянию дел к лету 2002 г. Эта же схема представляет основные задачи, которые решались в процессе работы по теме диссертации. Здесь видно *что такое оптическое отождествление* γ-всплесков, и видно *как* (метод) и для чего проводился на БТА мониторинг транзиентов, связанных с ними.

Как уже было сказано выше, новая фаза в решении проблемы отождествления началась с исследования γ-всплеска GRB 970228. Детектирование слабеющего оптического кандидата внутри бокса ошибок нового рентгеновского источника 1SAX J0501.7+1146 обеспечило по существу первую точную (до угл. секундны) локализацию γ-всплеска. А затем совпадение ОТ со слабым протяженным объектом (Groot et al. 1997b, Metzger et al. 1997a, Sahu et al. 1997) — родительской галактикой — предполагало космологическое расстояние до источника γ-всплеска.

γ-всплеск GRB 970508: Второй оптический транзиент (ОТ GRB) был найден для GRB 970508. Измерение его красного смещения $z \geq 0.835$ (Metzger et al. 1997b) уже с неизбежностью устанавливало космологическую шкалу расстояний для источников длинных γ-всплесков. Первые успешные наблюдения в САО по follow-up-программе начались в мае 1997 г. с участия в отождествлении GRB 970508, когда были проведены пер-

Таблица 1. **Астрономия γ-всплесков на БТА:** цель программы — *пролить свет на проблему прародителей, изучая ОТ и родительские галактики γ-всплесков.*

Наблюдения оптических транзиентов (ОТ) гамма-всплесков и их родительских галактик

(BVR_cI_c) фотометрия и спектроскопия оптического послесвечения на различных стадиях — многополосные кривые блеска

(BVR_cI_c) фотометрия и спектроскопия галактик, статистика — набор наблюдательных данных по свойствам этих галактик

Исследование особенностей в поведении кривых блеска оптичекого послесвечения, определение расстояний (красных смещений z), изучение спектральных особенностей и их эволюции

Определение параметров родительских галактик: (BVR_cI_c)-спектры, светимости, морфология, внутреннее поглощение, скорость звездообразования — моделирование спектров

Связь "GRB/SN" — признаки СН в кривых блеска и в спектрах ОТ

Установление связи "гамма-всплески — массивное звездообразование"

Отличаются ли родительские галактики от галактик "поля"? Какие объекты могли бы быть прародителями гамма-всплесков? Какой механизм обеспечивает оптическое послесвечение?

Теоретические модели гамма-всплесков, рентгеновского, оптического и радио послесвечения вые многополосные ($BVRI$) наблюдения оптического послесвечения. Результаты доложены в IAU циркулярах [12]. О первичной интерпретации наблюдений мая-августа 97-го было доложено осенью 1997 г. от имени всех групп, принимавших участие в наблюдениях [23]. Уже при отождествлении GRB 970508 стали выделяться два главных и *разных по методике наблюдений* направления: мониторинг OT GRB и исследование родительской галактики [13] (Таблица 1). Иногда больше информации по оптическому *отождествлению* γ-всплесков (например, по измерению z) удавалось получить, исследуя постоянный по блеску источник — родительскую галактику, поскольку follow-up наблюдения самого OT GRB по разным причинам оказывались иногда не очень удачными. Один из примеров такого отождествления GRB рассмотрен ниже.

γ-всплеск GRB 980613: До этого всплеска уже в шести случаях (из 11) были обнаружены соответствующие OT GRB. Для отождествления GRB 980519 и GRB 971214 на БТА была проведена фотометрия родительских галактик [16, 29, 38]. GRB 980613 — второе (после GRB 970508) событие, когда мы (SAO RAS GRB follow-up team) снова смогли принять участие в "преследовании" OT GRB. Кооперативные наблюдения послесвечения GRB 980613 состоялись через 7.3 суток после γ-всплеска, во время которых для оптического объекта найденного Hjorth et al. (1998, GCN #109) было сделано 6 экспозиций в полосе R_c и был обнаружен этот же источник на БТА 20/21 июня 1998 г [14]. Предварительная фотометрия нового объекта в полосе, близкой к фильтру R_c (в стандартной Cousins-системе), привела к оценке блеска $R_c = 23.17 \pm 0.08$ для суммы OT плюс родительская галактика. Значительно больший, чем мониторинг OT GRB, вклад в астрономию γ-всплесков дали исследования родительской галактики GRB 980613 [38]. Но первые наблюдения 20/21 июня поля GRB 980613 помогли провести на БТА в следующем месяце 23/24 июля 1998 г. специальные наблюдения галактики в стандартных BVR_c полосах при лучших фотометрических условиях и при качестве изображения $1''.3 - 1''.5$. Они дали такие результаты [29]: $B = 24.77 \pm 0.25$, $V = 23.94 \pm 0.21$, $R_c = 23.58 \pm 0.10$ Все более поздние наблюдения в оптике для γ-всплеска GRB 980613 относятся только к его родительской галактике (Djorgovski et al. GCN #189, `http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3_archive.html`).

γ-всплеск GRB 980703: В июле 1998 г. на БТА была проведена многоцветная (BVR_cI_c) фотометрия родительской галактики γ-всплеска GRB 980703 [15]. С учетом результатов наблюдений на 10-метровом телескопе

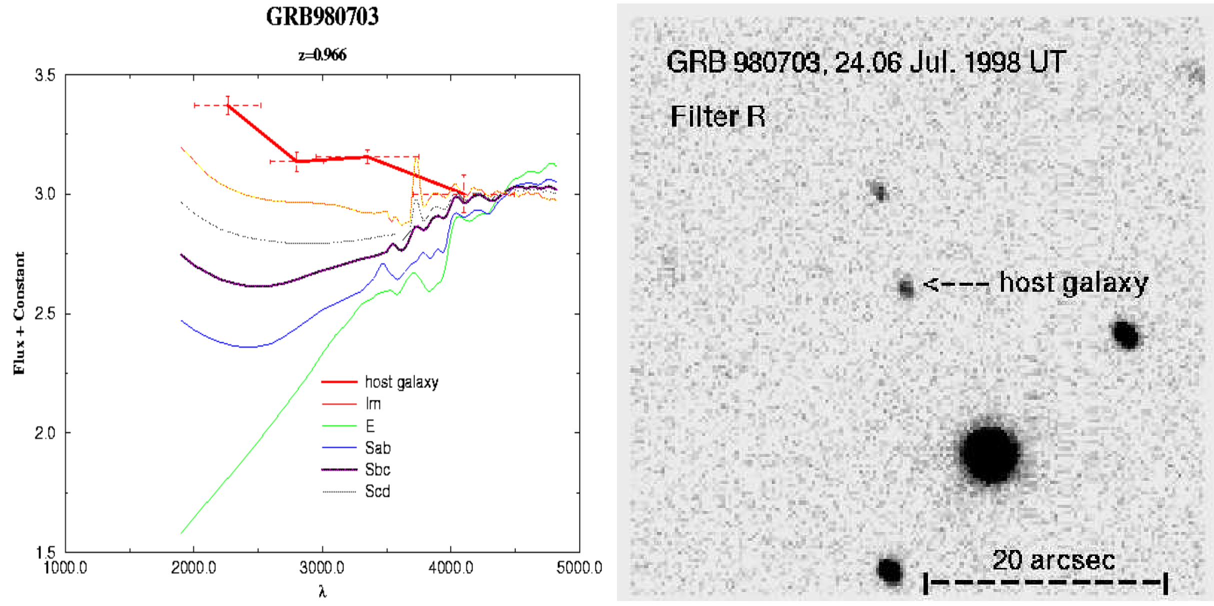

Рис. 1. Многоцветная фотометрия и изображение в R_c-фильтре поля родительской галактики γ-всплеска GRB 980703 по наблюдениям на БТА в июле 1998 г. Показано сравнение полученного по BVR_cI_c-потокам распределения энергии (с учетом сдвига в ультрафиолетовую область спектра для $z = 0.966$) этой галактики с распределениями энергий в спектрах галактик различных хаббловских типов. Все спектры показаны в шкале "Flux + Constant" с произвольной (по оси потоков) постоянной: $\log(F_\lambda) = \log F_\lambda(obs) + C$, где потоки измерены в эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$ Å^{-1} и λ в Å. Полуширины каждого фильтра для его λ_{eff} с учетом сдвига влево для $z = 0.966$ обозначены пунктирными горизонтальными отрезками с барами.

Keck-II (Djorgovski et al. 1998; GCN #137, #139) для предполагаемой тогда, через 20 суток после всплеска, родительской галактики GRB 980703 на БТА было получено 4 экспозиции: B (480 sec), V (420 sec), R_c (300 sec) и I_c (360 sec). И в этом случае OT GRB ослабел очень быстро и уже можно было считать, что наблюдается родительская галактика с минимальным вкладом OT. На CCD-изображениях уверенно детектирован протяженный объект (Рис. 1) во всех четырех BVR_cI_c полосах — родительская галактика γ-всплеска, совпадающая с положениями рентгеновского, оптического и радио транзиентов. Результаты [28, 29]: $B = 23.04 \pm 0.09$, $V = 23.02 \pm 0.10$, $R_c = 22.43 \pm 0.08$, $I_c = 22.10 \pm 0.18$. Это соответствует и результатам спектральных наблюдений на Keck-II — галактика оказалась очень голубой по показателям цвета (Рис. 1, левая панель), что соответствует галактике со звездообразованием. В [38] и в Главе 5 диссертации фотометрия родительской галактики GRB 980703 сравнивается с результатами спектроскопии на LRIS/Kesk II и с результатами моделирования распределения энергии, учитывающего эффекты звездообразования и внутреннего поглощения в самой галактике. Как правило, все родительские галактики γ-всплесков, отождествленные тогда и позже (с $R > 21$), почти всегда, когда удавалось провести такие наблюдения, детектируются либо во всем оптическом диапазоне от B до I полосы, либо хотя бы в одной из полос для очень слабых объектов $27^m - 28^m$. Этот *наблюдательный признак* явно указывает на молодые галактики со звездообразованием, поскольку при $z \gtrsim 1$ наблюдения в оптическом диапазоне соответствуют наблюдению далекой UV части спектра этих галактик (см. Рис. 1), определяемой областями звездообразования.

γ-всплеск GRB 980519: Этот γ-всплеск GRB 980519 был отождествлен во всех диапазонах — рентгеновском, оптическом и радиодиапазоне. Очень крутое падение блеска в оптике (степенное с показателем ≈ -2) не позволило нам принять участие в "преследовании" и отождествлении ОТ GRB этого всплеска. Но на БТА мы тогда (в 1998 г.) наблюдали самую слабую из родительских галактик [16]. Фотометрия этого объекта была сделана в апертуре с диаметром $2.5''$ по сумме наблюдений за две ночи и его величина $R_c = 26.05 \pm 0.22$. В следующем, после [16], электронном циркуляре были доложены (Bloom et al. 1998, GCN #149) результаты наблюдений на Keck-II/LRIS, проведенных 18 июля 1998 г. и подтверждающих существование слабого объекта с $R_c = 26.1 \pm 0.3$, найденного на БТА в том же месте, где обнаруживался ранее ОТ GRB 980519 (Jaunsen et al. 1998, #78). Морфология этой галактики была позже исследована на HST (Jaunsen et al. 2002).

γ-всплеск GRB 990123: В циркуляре GCN #209 [18] было доложено о follow-up наблюдениях ОТ γ-всплеска GRB 990123 на БТА. Это также были кооперативные наблюдения до сих пор самого мощного из γ-всплесков. Энерговыделение $\sim 10^{54}$ эрг заставило всех думать, что γ-всплеск должен быть связан с неизотропным излучением источника. К тому же это был тот редкий случай, когда оптическая вспышка наблюдалась почти одновременно с γ-всплеском (Akerlof et al. 1999). На БТА CCD-снимок был получен в R-фильтре для области локализации всплеска GRB 990123 (BeppoSAX/WFC) 24 января 1999 г., через 16.04 часов после γ-всплеска. С учетом возможного вклада от родительской галактики, для ОТ GRB было измерено $R = 19.9 \pm 0.2$, что согласовалось со степенным законом падения блеска с показателем степени -1.5, который был предложен Bloom et al. (GCN #208). Эти данные затем были использованы в сводке всех результатов по ОТ GRB 990123 при исследовании временно́го поведения

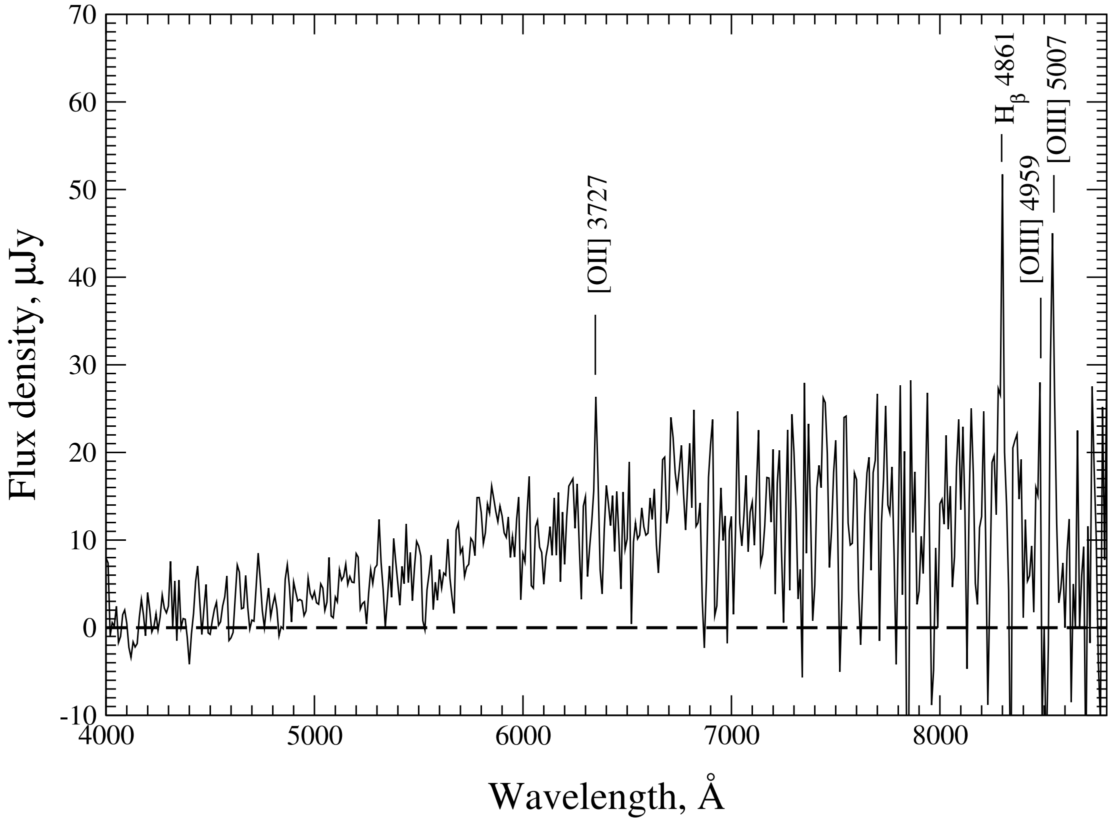

Рис. 2. Спектр оптического транзиента γ-всплеска GRB 991208, полученный в follow-up наблюдениях 14 декабря 1999 г на мультизрачковом спектрографе 6-метрового телескопа САО РАН [20, 21].

этого оптического транзиента (Sari & Piran 1999).

γ-всплеск GRB 991208: Мы приняли участие в кооперативных исследованиях OT GRB и затем родительской галактики яркого ($S \sim 10^{-4}$ эрг см$^{-2}$; Hurley et al, GCN #450) γ-всплеска GRB 991208. В этих наблюдениях впервые на БТА удалось получить *спектр* транзиента (Рис. 2) и одновременно измерить блеск OT на 1-метровом телескопе САО [20, 21]. В спектре OT GRB были найдены эмиссионные линии на $\lambda = 6350$Å, 8550Å и 8470Åс наиболее вероятным отождествлением: [OII] 3727Å, [OIII] 4959, 5007Å , принадлежащие родительской галактике OT GRB при космологическом красном смещении $z = 0.707 \pm 0.002$. Более детальный анализ выявил присутствие и линии H_β в спектре, полученном на БТА. Группа follow-up наблюдений оптических транзиентов γ-всплесков на телескопе Keck II подтвердила этот результат (Djorgovski et al. 1999, GCN #481). Авторы перекалибровали и сложили свои спектры, полученные на Keck-II/LRIS для OT GRB 991208 в ночи 14 и 15 декабря 1999 г. Сумма спектров с улучшенным S/N действительно показала существование (при их

дисперсии 2.47Å/пиксел) эмиссионных линий на 6356Å, 8454Å, и 8545Å, уже доложенных нами [21]. Интерпретация этих (характерных для галактик со звездообразованием) эмиссий как [O II] 3727Å и [O III] 4959Å, 5007Åпривела к величине $z = 0.7055 \pm 0.0005$. Специальные BVR_cI_c фотометрические наблюдения родительской галактики γ-всплеска GRB 991208 были проведены на БТА 31 марта 2000 г. На CCD-кадре в месте, совпадающем с положением ОТ в декабре, была обнаружена слабая галактика с величинами [29]: $B = 25.18 \pm 0.16$, $V = 24.63 \pm 0.16$, $R_c = 24.36 \pm 0.15$ и $I_c = 23.70 \pm 0.28$. Эти результаты были опубликованы и в работе, посвященной интерпретации кривой блеска ОТ GRB 991208 в четырех фотометрических полосах [37], целью которой был поиск проявлений СН в кривой блеска ОТ. Затем фотометрические наблюдения галактики GRB 991208 с использованием фотометрических данных с БТА (в том числе и для подготовки заявки-задания) были продолжены позже на космическом телескопе Хаббла (HST) в совместной программе исследований морфологии этого объекта [22]. В положении, где раньше наблюдался ОТ, была найдена галактика с величиной $V = 24.6 \pm 0.15$. Сравнение HST-изображения (Рис. 3) с изображениями ОТ, полученными на Земле ([22], Castro-Tirado et al. 1999, GCN #452), показывает, что положение ОТ сдвинуто относительно центра родительской галактики менее чем на 0."1. Здесь прямо видно, что ОТ находится в *самой яркой* части этой компактной галактики. В Гл. 5 диссертации, с использованием всех полученных данных для этой галактики, оценены ее светимость, внутреннее поглощение и темп звездообразования [38]. По многим параметрам (спектр, светимость, размеры, морфология, положение ОТ) эта галактика совпадает с родительской галактикой GRB 970508.

С учетом результатов совместных follow-up наблюдений с другими группами в 1997-2000 гг. *отождествление гамма-всплесков в оптическом диапазоне* таким образом значит, что в большом ($> 1'$) боксе ошибок слабеющего с характерным темпом рентгеновского источника, обнаруживаемого в области локализации гамма-всплеска, надо найти оптический источник — ОТ гамма-всплеска, тоже слабеющий после максимума ($20^m - 22^m$) с характерным темпом уменьшения блеска на временах дни/недели ($\sim t^{-1}$ и быстрее). Как правило, такое отождествление завершается, когда в месте, которое соответствует астрометрическому положению ОТ, транзиентного IR источника или положению радиотранзиента, находится слабый ($> 21^m$) протяженный голубой объект — родительская

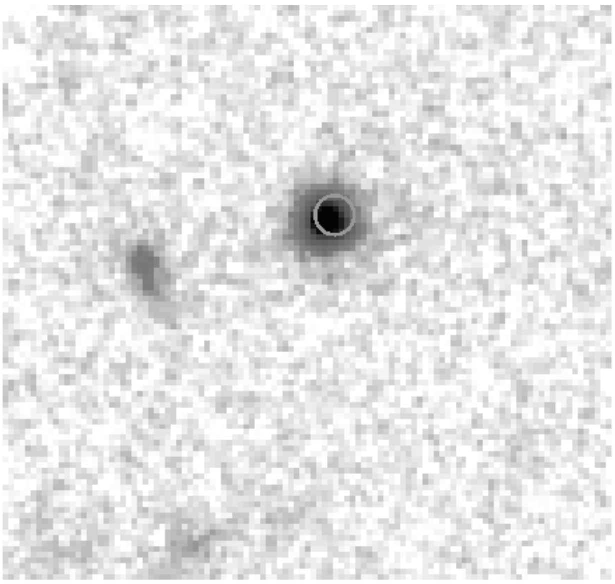

Рис. 3. Родительская галактика γ-всплеска GRB 991208. Фрагмент размером $3'' \times 3''$ HST/STIS/50CCD-поля GRB 991208, полученного на телескопе им. Хаббла [22]. Положение, которое занимал оптический транзиент в декабре 1999 г., указано кружком. (N – вверх, E – влево)

галактика гамма-всплеска. И всегда такая галактика оказывается галактикой с признаками (цвета, спектры и морфология) вспышки звездообразования.

Таким образом, во вводной Главе 1 диссертации (разделы 1.1.1 и 1.2.2) сделан обзор по отождествлению GRB в оптическом диапазоне, с учетом результатов, полученных как в САО (до весны 2000 г.), так и по результатам других групп. Кроме того, в каждой из глав более подробно упомянуты новые (вплоть до 2002 г.) исследования по каждой из задач главы.

В Главе 2 (Фотометрия слабых объектов в области локализации γ-всплеска и изолированные нейтронные звезды) речь идет об исследованиях IPN бокса ошибок ("архивного") γ-всплеска GRB 790613, целью которых была наблюдательная проверка галактической гипотезы происхождения коротких γ-всплесков. Описана методика поиска голубого звездообразного объекта типа аккрецирующей изолированной нейтронной звезды в окрестностях Солнца. Проведена "регистрация" всех оптических источников до предела около $25^m - 26^m$ на CCD-изображениях, полученных на БТА, и отбор всех "подозрительных" по цвету объектов в области локализации GRB 790613. Описана *методика фотометрии* слабых объектов.

Во вводном разделе 2.1 отмечено, что, начиная с работ Mazets & Golenetskii (1981) и Mazets et al. (1981), уже более 20 лет известно, что по своим длительностям космические γ-всплески явно разделяются на две категории: *короткие* γ-всплески (≈ 0.2 с) составляют примерно 25% от полного числа и длинные γ-всплески (в среднем ≈ 20 с) — остальные 75%. Из работ Мазеца и Голенецкого (1987), Hurley (1992) и Kouveliotou et al. (1993) следовало, что короткие γ-всплески характеризуются и более жесткими (чем длинные) спектрами. Короткие всплески имеют явно отличное от длинных распределение "число всплесков/их интенсивность" — аналог зависимости logN-logS (Tavani 1998), они не показывают дефицита числа всплесков при малых интенсивностях — эффект, который явно присутствует в таких же распределениях для длинных γ-всплесков. Таким образом, короткие γ-всплески могут представлять собой отдельный класс явлений, так как их характерные особенности настолько отличают их от длинных всплесков, что заставляют предполагать и их разное происхождение (Mazets and Golenetskii 1981). Если учитывать транзиенты во всех диапазонах (рентгеновском, радио и оптическом), то отождествленных длинных γ-всплесков наберется уже более 30-ти. Но что касается *коротких* всплесков, то еще ни в одном случае какого-то надежного отождествления проведено не было. До сих пор все еще можно думать, как и до эры BeppoSAX, что источники коротких и жестких всплесков могут находиться в Галактике (см., например, у Tavani 1998) и исследователи продолжают приводить аргументы в пользу галактического происхождения коротких γ-всплесков (Bisnovatyi-Kogan 2001, Cline et al. 1999, 2001).

При постановке наблюдательной задачи (разд. 2.2) в 1993 г. на 6-метровом телескопе имелись в виду одиночные компактные объекты типа изолированных нейтронных звезд, которые остыли до температур $\approx 10^5 K$ и ниже. Аналогичные соображения уже использовались в литертуре при интерпретации результатов глубоких фотометрических исследований некоторых γ-боксов (Motch et al. 1990). В конце концов в любой из галактических моделей для источников γ-всплесков (Kouveliotou et al. 1993), в которых сделаны попытки учета новых данных, можно ставить вопрос о поиске *ближайших* объектов в других диапазонах. В частности, это могут быть объекты низкой светимости с близким к чернотельному распределением потоков в B, V, R полосах. Используя в основном только предположение о компактности потенциального источника γ-всплеска и то, что количество таких объектов в окрестностях Солнца во всяком случае должно быть не меньше, чем это допускают оценки числа ("старых") изолированных нейтронных звезд, используя также данные наблюдений в мягком рентгеновском диапазоне, в разделе 2.2 диссертации показано, какие ограничения по расстояниям до таких объектов могут дать прямые оптические наблюдения. Одиночные (или изолированные) нейтронные звезды (пульсары Геминга, PSR 0656+14) с относительно низкими температурами поверхности, а иногда и с релей-джинсовским, как у RX J1856.5-3754 (Walters & Matthews 1997), поведением потоков в оптике и расположенные довольно близко от Солнца уже наблюдались (Caraveo et al. 1994) как объекты $25^m - 25^m.5$ (см. также в обзоре van Kerkwijk & Kulkarni, 2001).

Относительно *метода поиска* таких объектов (разделы 2.3.1 – 2.3.3) можно сказать, что до начала эры BeppoSAX диаграммы "цвет-цвет" применялись при исследованиях глубоких снимков с целью обнаружения объектов с пекулярными цветами в "старых" боксах ошибок локализации γ-всплесков (GRB-боксах). Если вероятность случайно найти такой объект в малом боксе или в малой площадке на небе оказывалась малой, то объект считался потенциально связанным с γ-всплеском. Кроме наших поисков одиночных нейтронных звезд [3, 8, 9, 10], к примерам поиска пекулярных объектов в GRB-боксах можно отнести также поиски квазаров и активных ядер галактик (Luginbuhl et al. 1995), поиски вспыхивающих звезд (Gorosabel & Castro-Tirado 1998), белых карликов (Motch et al. 1990) и новых [4]. В настоящее время двуцветные диаграммы применяются для обнаружения пекулярного по цвету оптического транзиента длинных GRB (Gorosabel et al. 2001), т. е. используется опыт исследований как GRB-боксов, так и оптических компаньонов изолированных нейтронных звезд-пульсаров [6, 7].

GRB 790613 — пример одного из наиболее мощных γ-всплесков — короткого события, локализованного с помощью сразу нескольких космических детекторов с наилучшей на северном небе точностью $\approx 0.7\ arcmin^2$ (Barat et al. 1984). Бокс ошибок локализации GRB 790613 уже был довольно хорошо изучен в рентгеновском (Greiner et al. 1995) и в оптическом диапазонах (Harrison et al. 1994). В разделе 2.3 с помощью данных еще более глубоких оптических наблюдений на БТА показано, что объект типа голубого оптического кандидата для RX J1856.5-3754 можно пытаться обнаружить, исследуя бокс ошибок γ-всплеска и его окрестности в трех стандартных фильтрах — B, V, R. В разделах 2.3.1, 2.3.2 и 2.3.3 изложена методика фотометрического поиска таких "чернотельных" (по распределению потоков в BVR) объектов в γ-боксе, а в разделе 2.3.4 приведены ограничения на величину собственных движений в поле GRB 790613 и дан общий обзор всех наблюдаемых объектов этой площадки. В разделе 2.4 сказано, что результаты глубоких оптических наблюдений в этом боксе с учетом рентгеновских данных все еще позволяют "спрятать" довольно много холодных (с $T < 10^5 K$) одиночных компактных объектов вблизи Солнца.

Та же цель — отработка методики отождествления и фотометрическое исследование слабых звездообразных объектов, преследовалась и в параллельной наблюдательной программе (АКЦ ФИАН совместно с САО) отождествления и наблюдений изолированных нейтронных звезд-пульсаров. Для этого на БТА была сделана $BVRI$ ПЗС фотометрия пульсаров: PSR B0656 +14, PSR 0809+74, PSR B0950+08, J0633+1746 (Geminga) [32]. В частности, на БТА, по положению VLA- радиоисточника для PSR B0656 +14, был отождествлен (разд. 2.5.1) звездообразный объект 25^m [6, 7], для него были определены потоки в B, V, R и I полосах. Это позволило с учетом UV-наблюдений на HST говорить о более сложной, преимущественно нетепловой природе излучения в UV и в оптической областях спектра компактных объектов. То есть спектр искомых пекулярных звездообразных объектов в оптическом диапазоне, как и для PSR B0656 +14, может представлять собой сумму тепловой и нетепловой компоненты — степенной спектр с наклоном ≈ -1. В разделе 2.5.2 исследован сам оптический компаньон PSR B0656 +14 и протяженные и звездообразные объекты его ближайшей окрестности [11, 35].

В разделах 2.4 и 2.6 (см. здесь разд. *Основные положения, выносимые на защиту* в двух первых пунктах) сформулированы результаты 2-й главы. Рис. 4 иллюстрирует ограничения по расстояниям до изолированного компактного объекта с температурой $\sim 10^5$ K при наблюдениях в некотором направлении и при заданных пределах по потокам в рентгеновском и в оптическом диапазонах.

Глава 3 (Оптический транзиент длинного γ-всплеска GRB 970508 в яркой фазе): С весны 1997 г. актуальными стали совместные наземно-космические наблюдения оптических транзиентов. Цель — успеть отнаблюдать только что обнаруженный и быстро слабеющий в рентгеновском, в оптическом или в радио диапазонах транзиентный источник — послесвечение γ-всплеска. Детально, в нескольких фотометрических полосах исследовать изменения его блеска со временем — устано-

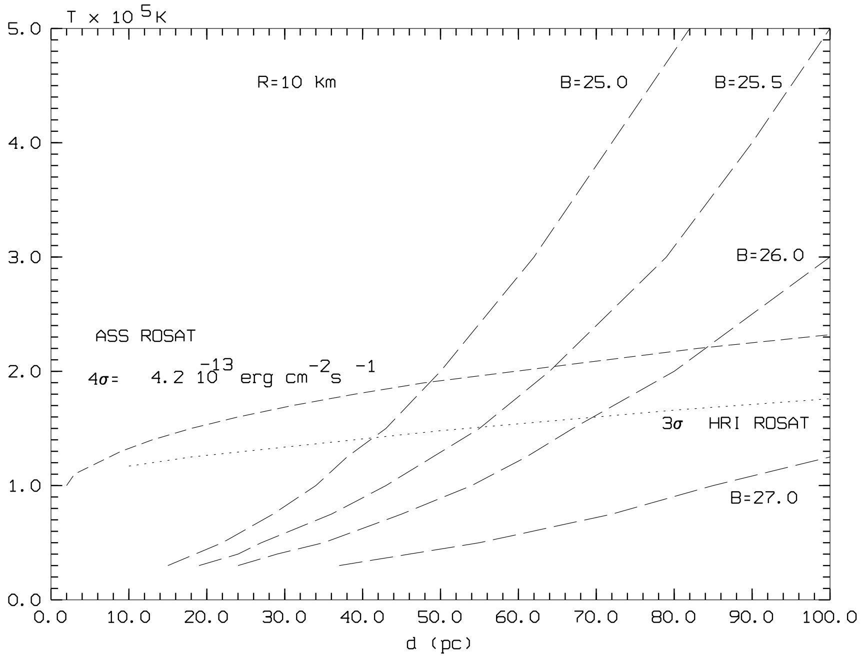

Рис. 4. Пределы на величину температуры (черного тела) T_{bb} излучения с поверхности объекта с R=10 км, в зависимости от расстояния. Прерывистая линия — поток 4.2×10^{-13} эрг$\cdot$см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$ при заданной T_{bb} и расстоянии в полосе 0.1-2.4 кэВ. Пунктирная линия — 3σ - предел обнаружения при времени накопления сигнала 13168 с от точечного источника с чернотельным спектром (в том же диапазоне энергий) для HRI (High Resolution Imager) спутника ROSAT в *направлении бокса ошибок* GRB 790613 (Boer et al. 1993). Прерывистыми линиями (длинный штрих) указаны пределы для оптических наблюдений чернотельного излучения в полосе B.

вить законы падения блеска, получить спектральные (цветовые) характеристики оптического транзиента (OT GRB) и исследовать эволюцию спектра со временем. Установить спектральные и временные корреляции с переменностью этого объекта (afterglow) в других диапазонах: в радио, в NIR, в рентгеновском (BeppoSAX). В Главе 3 детально описана вся процедура фотометрических наблюдений и первичной интерпретации данных применительно к OT GRB 970508 в яркой фазе (май-август 1997 г.) [17].

Во вводном разделе 3.1. описан контекст, в котором проводились наблюдения OT GRB 970508, сделан обзор самых ранних наблюдений в одной полосе R, подчеркнуто наличие второй вспышки у этого OT GRB. К концу 1997 г. оптическое послесвечение γ-всплесков наблюдалось в трех случаях: GRB 970228, GRB 970508 и GRB 971214. Оптические данные по первому в истории проблемы оптическому послесвечению γ-всплеска GRB 970228 были получены на различных инструментах и относились к различным фотометрическим системам и полосам. Кроме очень популярной у наблюдателей в первое время исследований ОТ γ-всплесков R-полосы, блеск оптического источника в других фильтрах определялся в самые разные времена наблюдений и лишь несколько надежных оценок блеска удалось успеть сделать, когда объект был еще достаточно ярким. В конце концов это привело к неопределенностям и в интерпретации оптических наблюдений первого ОТ GRB 970228 (Galama et al. 1998). Но, по крайней мере, одно стало ясно после события GRB 970228: переменный оптический источник, связанный с γ-всплеском, можно наблюдать в течение довольно длительного периода времени от одного до нескольких дней в достаточно яркой фазе с величинами $V < 22$ или около этого значения.

В Главе 3 проведен детальный анализ результатов BVR_cI_c фотометрии ОТ GRB 970508 на БТА с мая по август 1997 г., то есть в основном идет речь о CCD-фотометрии в фазе максимального блеска источника, когда наблюдалось, как потом стало понятно после наблюдений других afterglow, довольно редкое для всех оптических транзиентов γ-всплесков явление — явная немонотонность в поведении кривой блеска ОТ. Или, по сути дела, это была *еще одна вспышка* в оптике (19.7^m) на вторые сутки после самого γ-всплеска, если первой вспышкой считать объект 21^m, наблюдавшийся в первые часы после всплеска (Рис. 5). Для этого уникального afterglow γ-всплеска совместными усилиями многих групп наблюдателей и благодаря быстрому обмену наблюдательной информацией удалось получить почти полный набор данных во всех диапазонах: гамма и рентгеновском (BeppoSAX), оптическом, NIR, радиодиапазоне. Поэтому особое внимание посвящено в этой главе обсуждению результатов сравнения BVR_cI_c кривых блеска вблизи максимума с данными в рентгеновском диапазоне и того, что наблюдалось затем, после максимума блеска ОТ, в NIR и в радио диапазонах вплоть до 87 дня после γ-всплеска. Редуцированная, т.е. приведенная к одной фотометрической полосе, кривая блеска в R-фильтре, включающая все данные, полученные по этому объекту нами и другими наблюдателями, за примерно этот же период времени, начиная почти с момента детектирования GRB 970508, приведена в статье Galama et al. (1998). В работе используются данные и из доклада [23]: как результаты фотометрии ОТ, так и наши вторичные стандарты для редукции всех данных в одну систему. Этот обзор фотометрии ОТ GRB 970508 в одной полосе R, по наблюдениям разных авторов с мая по август 1997 г., показан здесь на Рис. 5.

В разделе 3.1 обращено особое внимание и на самую первую фазу на-

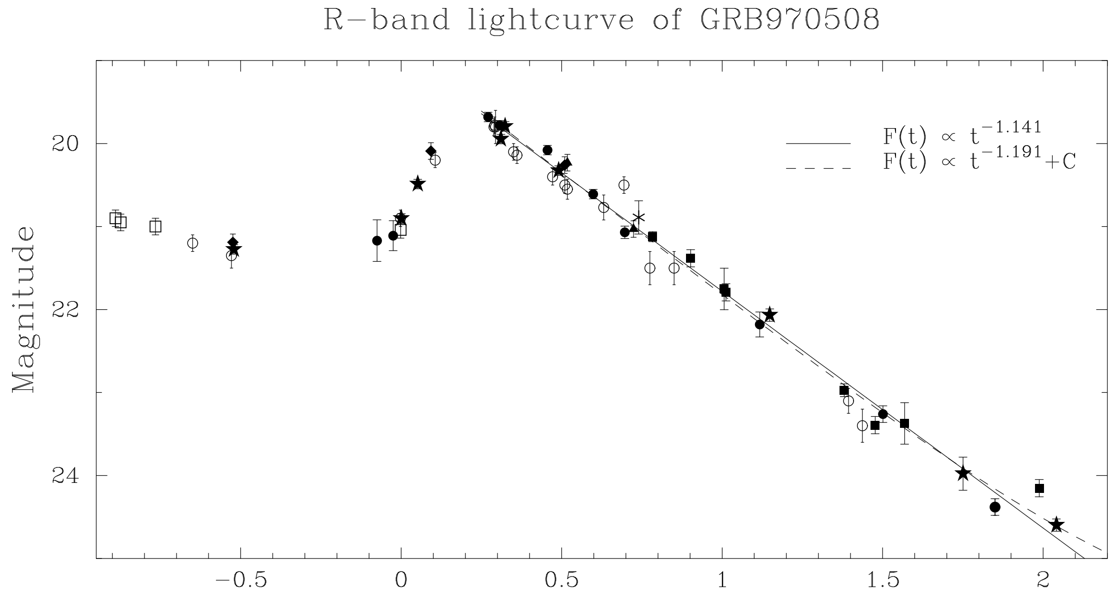

Рис. 5. Сводная кривая блеска ОТ GRB 970508 ["R-величина *vs* log(дня)"] в одной фотометрической полосе R, построенная по данным разных авторов, включая и данные из [23] — *закрашенные кружки*. Наблюдения в разных фотометрических системах приведены к стандартной фотометрической R-полосе с использованием вторичных звезд-стандартов из [23] — все закрашенные символы (см. Galama et al. 1998 и ссылки там). Значения звездных величин *в самом максимуме блеска* (•) и вблизи него, полученные на БТА, соответствуют наименьшим ошибкам измерений.

блюдений этого уникального транзиента в оптике — такое не наблюдалось с тех пор еще ни в одном из более чем 25-ти случаев ОТ γ-всплесков. Имеется в виду медленное падение блеска (до 2-го максимума), которое успели зафиксировать другие наблюдатели. Это медленное падение блеска очень напоминает падение блеска у некоторых ОТ GRB сразу же после всплеска, но в этих случаях такое падение сменяется через дни еще более быстрым уменьшением блеска (Panaitescu & Kumar, 2002), а не *вторым максимумом.* На Рис. 5 хорошо видно сначала небольшое падение ($\approx 0.5^m$) блеска источника в первые несколько часов (от 3 до 7 часов) после γ-всплеска или от первого максимума в оптике. Затем наблюдался резкий подъем на кривой блеска, еще один максимум на вторые сутки после γ-всплеска. Минимум блеска ОТ лежит где-то между 7-м и 21-м часами после γ-всплеска GRB 970508 (Рис. 5), когда объект наблюдался только в рентгене (Piro et al. 1998). Обычно (*пока*) для всех остальных отождествленных в оптике γ-всплесков найденные послесвечения **всегда** оказываются в максимуме и потом монотонно слабеют. Лишь этот ОТ, хорошо изученный в четырех диапазонах, показал явно странное, отличающее его от других, пекулярное поведение. Поэтому здесь иногда транзиентный источник, обнаруженный в первые 3 часа 5 мин, т. е. сразу же после самой 1-й рентгеновской BeppoSAX/WFC-вспышки (длительностью ≈ 30 с), называется *первой вспышкой*, а максимум через 2 суток (Май 10.77 UT) — *второй вспышкой*, чем подчеркивается пекулярность этого случая послесвечения γ-всплеска.

В разделе 3.2 описан поиск и отождествление оптического компаньона GRB 970508, а также его многополосная BVR_cI_c фотометрия. Четыре ярких звезды в поле OT GRB 970508 были использованы как вторичные фотометрические стандарты (стандарты в поле). Приведены координаты и величины вторичных фотометрических стандартов, которые были использованы и другими наблюдателями, в частности, при калибровке своих наблюдений и при редукции наблюдений других авторов в других системах к стандартной R_c-полосе (см. Рис. 5).

В разделе 3.3 описана BVR_cI_c-кривая блеска в фазе максимального блеска и последующее его падение. Здесь *фаза максимального блеска источника* определяется как период времени, когда блеск оптического объекта увеличился до этого максимума и затем начал падать до $V \approx 21.5$ и $R_c \approx 21.1$. С учетом наиболее точных данных, полученных в САО сразу в четырех стандартных фотометрических полосах (всего 20 отдельных оценок блеска) в течение первых трех дней после второй вспышки или после максимума блеска при $t - t_0 = 1.866$, это падение блеска лучше всего соответствует не степенному, а экспоненциальному закону. Какой-либо степенной закон хуже согласуется с уменьшением блеска объекта, если судить по наиболее точным данным, полученным на других телескопах и на БТА после максимума. Синхронное падение блеска во всех четырех полосах позволило утверждать, что несколько дней после максимума спектр объекта или, точнее, распределение энергии в спектре оставалось близким к степенному $F_\nu \propto \nu^{-1.10\pm0.08}$. Этот же наклон непрерывного спектра OT GRB 970508 был найден и по спектральным наблюдениям около максимума блеска транзиента (Metzger et al. 1997a). Таким образом, наши данные подтверждают это [24] и позволяют утверждать, что, по крайней мере, в течение трех ночей после максимума распределение энергии в спектре оставалось таким же, какое получили M. Metzger с сотрудниками, т. е. таким же, как и в максимуме блеска OT.

Примерно на четвертые сутки после максимума или после этой новой оптической вспышки, если *первой* вспышкой считать послесвечение через несколько часов после самого γ-всплеска, падение блеска по экспоненте замедлилось и только через 10 дней после максимума (а не *сразу* после всплеска как у других ОТ GRB), по крайней мере в трех BVR_c полосах вплоть до 84-го дня после регистрации γ-всплеска (а для I_c полосы только до $\approx$ 36-го дня) кривые блеска могут быть описаны некоторыми степенными зависимостями, строго говоря, разными для каждого из фильтров. Для R_c полосы такой усредненный ход уменьшения звездной величины объекта со временем по нашим данным [24] соответствует $F \propto t^{-1.171\pm0.012}$, начиная с момента максимума и вплоть до 84 дня после всплеска. Что касается I_c-фильтра, то, начиная с 36-го дня после всплеска, объект не показал дальнейшего "гладкого" падения блеска, как, например, в полосе R_c. В этот период (и вплоть до $t-t_0 = 87.085$) его звездная величина явно стабилизировалась на уровне $I_c = 23.07$ — новый эффект, интерпретации которого посвящена Глава 6.

В разделе 3.4 проведено сравнение BVR_cI_c кривых блеска в оптическом и в рентгеновском диапазонах вблизи фазы максимума блеска ОТ GRB 970508. И начало второй вспышки в оптике и отмеченные выше особенности BVR_cI_c кривых блеска немедленно после максимума (May 10.77 UT) также явно коррелируют с особенностями изменений рентгеновского потока (вторая длинная рентгеновская вспышка), которые наблюдали Л.Пиро с сотрудниками (Piro et al. 1998). Таким образом, Piro et al. (1998) отмечают, что в рентгеновском диапазоне поведение наблюдаемого потока с момента самого γ-всплеска тоже не следует степенному закону. В рентгеновском диапазоне это *отклонение* от степенного закона, длящееся около четырех суток, может содержать примерно 10% всей энергии самого всплеска GRB 970508. Почти одновременно с этим отклонением (или вспышкой в рентгене) наблюдается увеличение блеска транзиента и в оптике, что и отличает кривую блеска послесвечения GRB 970508 от кривых блеска почти всех других ОТ γ-всплесков. Он стал даже ярче, чем был в первые 3 часа после γ-всплеска (Рис. 5). Это может быть аргументом в пользу общего происхождения и рентгеновских и оптических событий (или особенностей на кривых блеска) примерно через сутки после всплеска. Таким образом, наблюдения прямо указывают на некоторую собственную вспышечную активность источника послесвечения в первые сутки с энергией, *сравнимой с энергетикой самого γ-всплеска*, но выделяющейся на временной шкале в 10000 раз большей, чем длительность основного события — γ-вспышки.

В разделе 3.5 проведено сравнение кривых блеска в оптическом, радио и в NIR диапазонах после фазы максимума. Возможность объяснения наблюдательных данных внутренними свойствами самого источника в моделях асимметричных релятивистских джетов [24] уже тогда начала обсуждаться некоторыми исследователями (Paczyn'ski 1997), а сейчас это, пожалуй, самая популярная модель для "длинных" γ-всплесков.

В заключительном разделе 3.6 сформулированы основные выводы этой главы (см. п. 3 в *Основных положениях, выносимых на защиту*).

В Главе 4 (Исследование родительской галактики γ-всплеска GRB 970508) главной целью является анализ полученных данных об оптическом объекте –"остатке" γ-всплеска в спокойном состоянии [25, 26, 27]. То есть здесь исследована родительская галактика всплеска (Рис. 6) и проведено сравнение показателей цвета для этой галактики с цветами других галактик. (Аналогичное Рис. 6 изображение, но еще с ОТ GRB, приведено в [17].) В результате для родительской галактики GRB 970508 получены данные о ее хаббловском типе и светимости. Проведено сравнение ее $BVRI$-спектра с ультрафиолетовыми спектрами галактик локальной Вселенной. Сделана оценка центральной поверхностной яркости и размеров этой галактики. Проведен анализ полученных фотометрических данных по ближайшим соседям этой GRB-галактики.

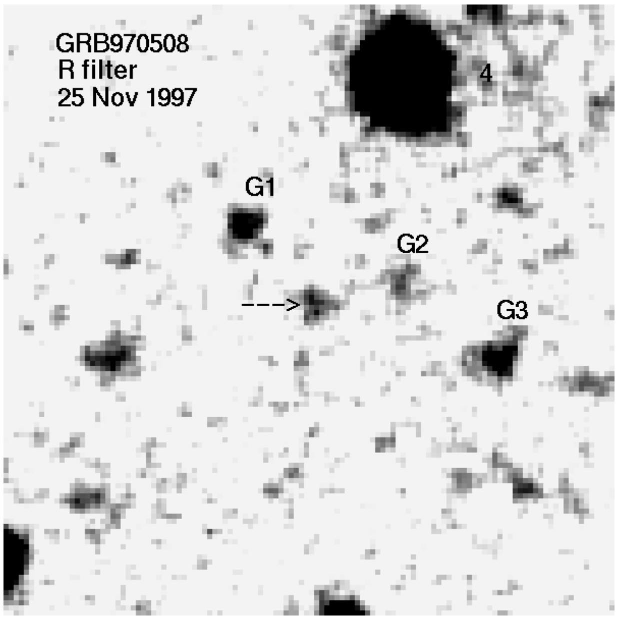

Рис. 6. CCD/R_c-изображение с размерами $33'' \times 33''$. Получено на БТА 25 ноября 1997 г. Север – вверх, Восток – справа. Стрелкой указана родительская галактика GRB 970508 с $B = 25.77 \pm 0.19$, $V = 25.25 \pm 0.22$ $R_c = 24.99 \pm 0.17$, $I_c = 24.07 \pm 0.25$. G1, G2, G3 — ближайшие к ней галактики. Галактика G2 находится в $\approx 5''$ от галактики GRB 970508.

Во вводном разделе 4.1 сказано об отождествлении γ-всплесков в 1997-98 гг., когда было отождествлено уже 8 GRB, сказано о первых попытках "увидеть" вклад родительской галактики GRB 970508 в фотометрию транзиентного оптического объекта, связанного с γ-всплеском. В разделе 4.2 описаны самые поздние BVR_cI_c наблюдения оптического компаньона GRB 970508 на 6-метровом телескопе САО в октябре, ноябре и в декабре 1997 г., в январе, июле и в августе 1998 г. В 1998 г. мы первыми доложили, что видим уже только родительскую галактику, без вклада в BVR_cI_c потоки от переменного объекта OT GRB 970508 [14]. Но чтобы сказать об этом уверенно, были предварительно проверены все возможности вклада OT даже на временах вплоть до 470-го дня после всплеска. Соответственно были проанализированы 3 случая [26]: **(1)** — в последних наблюдениях были измерены BVR_cI_c-потоки от "чистой" галактики, **(2)** — какой-то вклад от OT GRB все еще может быть, и этот вклад в последние BVR_cI_c-потоки учитывается некоторыми независимыми степенными законами, следующим из наиболее популярных (тогда) сценариев послесвечения γ-всплесков, **(3)** — вклад от OT учитывается с помощью некоторого одного среднего ("стандартного") степенного закона. Показано, что все рассмотренные варианты в пределах ошибок наблюдений (и χ^2-аппроксимаций по ним) дают одинаковые распределения энергии/цветов объекта, соответствующие галактике с хаббловским типом во всяком случае не раннее, чем Sbc.

В разделе 4.3 исследованы объекты поля родительской галактики GRB 970508: получены величины и цвета трех близких ($< 10''$) галактик (G1, G2, G3, см. Рис. 6). Ближайшая галактика G2 ($B > 26.7$, $V = 26.1 \pm 0.25$, $R_c = 25.31 \pm 0.12$, $I_c = 23.73 \pm 0.08$), находящаяся на расстоянии $> 4.5''$ от родительской галактики GRB 970508 (Рис.6), может быть причиной второй системы абсорбционных линий с красным смещением 0.767, которые наблюдались (Metzger et al. 1997a) в мощном континууме OT в момент его максимального блеска. В разделе 4.4 сделаны оценки абсолютных величин родительской галактики γ-всплеска GRB 970508 и галактики G2 при $H_0 = 60$ км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$ и для трех плоских фридмановских моделей с параметрами плотности вещества и космологической постоянной $(\Omega_m, \Omega_\Lambda) =$ (1,0); (0,0); (0,1). Абсолютные величины родительской галактики $M_{B_{rest}}$ равны: -18.0 ± 0.3, -18.5 ± 0.3 и -19.0 ± 0.3 соответственно.

Близость наблюдаемого распределения энергии в спектре галактики GRB 970508 к непрерывному спектру типичной Scd галактики побудили автора к тому, чтобы в общем исследовать вопрос о связи родительской галактики γ-всплеска со всем классом позднего типа спиральных и иррегулярных галактик. Первый шаг в таком исследовании состоит в том, чтобы сравнить свойства родительской галактики со свойствами галактик в локальной Вселенной, которые хорошо изучены и могут служить некими "стандартами" при исследовании галактик на $z \sim 1$. Это и было сделано в разделе 4.5, где проведено сравнение BVR_cI_c-спектра родительской галактики GRB 970508 с ультрафиолетовыми спектрами локальных галактик со звездообразованием. Второй шаг состоит в том, чтобы выяснить возможные отклонения в свойствах родительской галактики γ-всплеска от свойств популяции локальных галактик (нормальных, со вспышкой звездообразования, иррегулярных) вследствие эффектов ли эволюции, а может быть, просто эффекта селекции — ведь это γ-всплеск "выбирает" галактику для исследования. То есть надо было понять, насколько родительскую галактику γ-всплеска можно было считать пекулярной? Используя соотношения/диаграммы "M_B vs. $\log D_{25}$" для четырех подвыборок галактик из каталога LEDA (Sbc-Sc, Scd-Sd, Sm и Irr типов), в разделе 4.6 оценены линейные размеры родительской галактики GRB 970508 (см. Рис. 7) и ее центральная поверхностная яркость.

В разделе 4.7 обсуждены результаты и приводятся основные выводы 4-й главы. Абсолютная B-величина ≈ -18.5 галактики GRB 970508 соответствует светимости $L_B \approx 0.1L^*_{\rm gen}$, где $L^*_{\rm gen}$ — колено общей локальной (Шехтера) функции светимости. Однако отмечено, что светимость родительской галактики γ-всплеска соответствует колену локальной функции светимости с $L^*_{\rm late} \approx L_B$ для галактик поздних типов Sd-Sm-Irr (Binggeli et al. 1988). Сравнение (BVR_cI_c) распределения энергии в спектре галактики GRB 970508 с ультрафиолетовыми спектрами близких по светимостям локальных галактик со вспышкой звездообразования соответствует наилучшим аппроксимациям спектрами Scd HII галактики со звездообразованием NGC 7793 ($M_B \approx -18$) и голубой компактной галактики Mrk 1267. Положение родительской галактики на диаграмме "M_B vs. $\log D_{25}$" (Рис. 7) для локальных галактик позднего типа из каталога LEDA позволяет отнести родительскую галактику GRB 970508 и к классу голубых компактных галактик в локальной Вселенной.

Глава 5 (Фотометрия и спектроскопия родительских галактик других γ-всплесков): Начиная с 1997 г., еще до возникновения в 1998-99 гг. астрономии γ-всплесков, нашей специальной целью стало по-

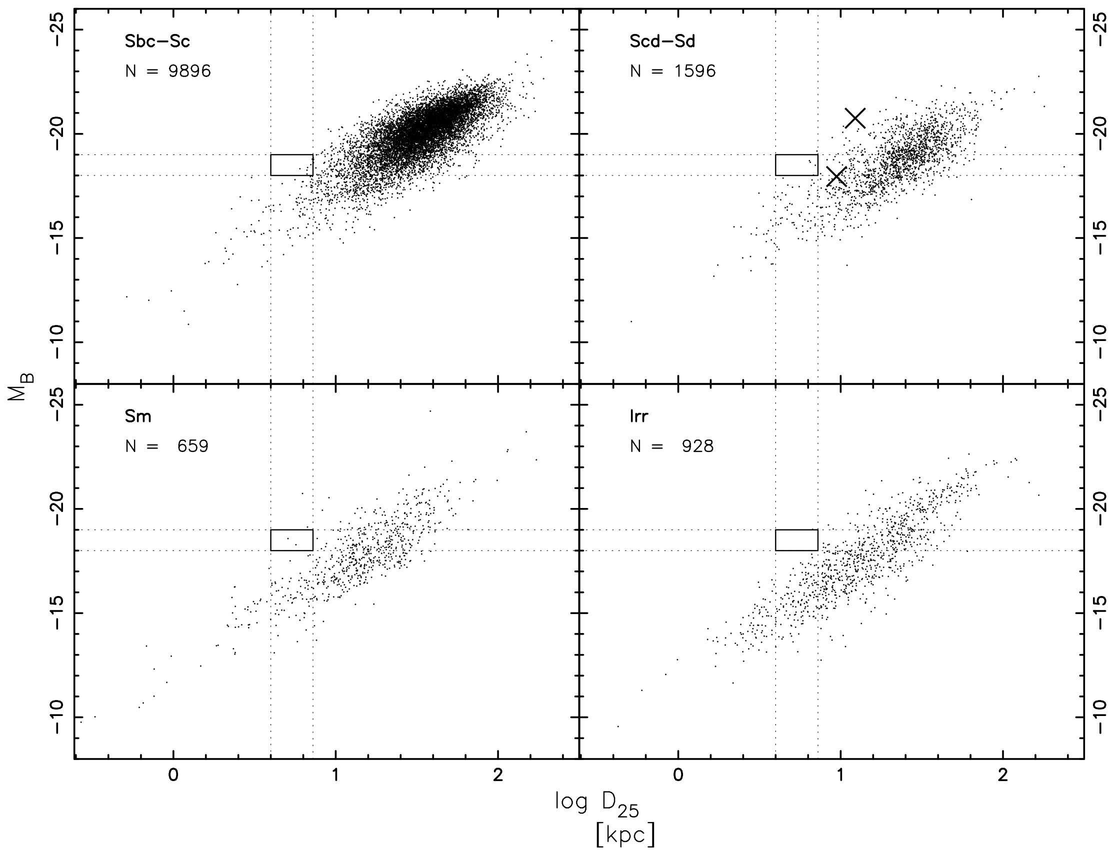

Рис. 7. Диаграммы "абсолютная величина M_B vs. линейный диаметр $\log D_{25}$" для галактик типов Sbc-Sc, Scd-Sd, Sm и Irr, выбранных из каталога LEDA. Пунктирными линиями и прямоугольниками ограничена область абсолютных величин и диаметров ($-19.0 < M_B < -18.0$ и 4 кпк $< D_{25} <$ 7 кпк), которую может занимать родительская галактика GRB 970508 на этих диаграммах. Крестами обозначено положение двух галактик — пекулярной галактики Mrk 1267 и Scd галактики NGC 7793 — наиболее близких к родительской галактике γ-всплеска GRB 970508 по своим светимостям и по распределениям энергии в их спектрах.

лучение однородной выборки фотометрических данных с тем, чтобы начать накопление статистики по родительским галактикам [19, 28, 29, 34, 36] и ответить на вопросы, особенно актуальные до 99-го г.: 1) В каких галактиках это явление (γ-всплеск) наблюдается чаще всего? 2) Действительно ли существует какой-то особый класс "GRB-галактик"? 3) Установить надежно, привлекая данные спектроскопии, где — в старых ли эллиптических или в спиральных галактиках со звездообразованием — γ-всплески наблюдаются чаще? 4) Слияние нейтронных звезд или массивное звездообразование и его следствие — коллапс массивного ядра звезды — ответственны за *механизм* всплеска? 5) Если γ-всплески все-таки связаны со звездообразованием и с эволюцией массивных звезд, то насколько темп звездообразования в родительских галактиках отличен от темпа звездообразования у всех остальных галактик с тем же z? 6) Сколько "GRB-галактик" приходится на квадратный градус небесной сферы и чем же эти галактики отличаются от других таких же далеких галактик или от (слабых) галактик "поля"?

Таблица 2. Наблюдаемые и абсолютные звездные величины родительских галактик.

Host	набл. вел. R	абс. вел. $M_{\mathrm{B_{rest}}}$	ссылки
GRB 970228	24.6±0.2	-18.6	R: Galama et al. (2000)
			$M_{\mathrm{B_{rest}}}$: Bloom et al. (2001b)
GRB 970508	24.99±0.17	-18.6	[38]
GRB 971214	25.69±0.3	-21.1	R: [38]
			$M_{\mathrm{B_{rest}}}$: Kulkarni et al. (1998)
GRB 980613	23.58±0.1	-20.8	[38]
GRB 980703	22.30±0.08	-21.3	[38]
GRB 990123	24.47±0.14	-20.9	[38]
GRB 990712	21.80±0.06	-19.9	Hjorth et al. (2000)
GRB 991208	24.36±0.15	-18.8	[38]

В 5-й главе в той или иной мере затронуты и обсуждены все эти вопросы. В разделе 5.1 (введение к главе) сделан обзор по отождествлению γ-всплесков и по исследованиям родительских галактик. В разделе 5.2 сравнены широкополосные $BVR_{\mathrm{c}}I_{\mathrm{c}}$ спектры (или распределения BVR_cI_c потоков) с непрерывными спектрами родительских галактик GRB 970508 (Bloom et al. 1998b) и GRB 980703 (Djorgovski et al. 1998b). Сравнение широкополосной фотометрии со спектроскопией для двух галактик *с наибольшей и с наименьшей* светимостями из Табл. 2 показало, насколько информативным является такой метод сбора информации для этих далеких галактик с относительно гладкими спектрами при $z \sim 1$. Используя сравнение наших $BVR_{\mathrm{c}}I_{\mathrm{c}}$ данных с шаблонными SED-ами (Spectral Energy Distributions) локальных галактик со звездообразованием с различными значениями внутреннего поглощения (см. Рис. 8), можно грубо оценить среднее внутреннее поглощение в родительских галактиках в некотором *первом приближении* (разд. 5.3). В отличие от того, что было в главе 4, здесь детально сравнивается распределение цветов родительских галактик с распределениями энергии (SED-ами) в спектрах локальных галактик уже только одного, определенного типа — галактик со вспышкой звездообразования (Connoly et al. 1995). Результаты приведены в разделе 5.4. Такое сравнение позволяет корректнее (чем в главе 4) определить K-поправки для выборки родительских галактик. В частности, для вычисления K-поправки были использованы шаблонные распределения энергии

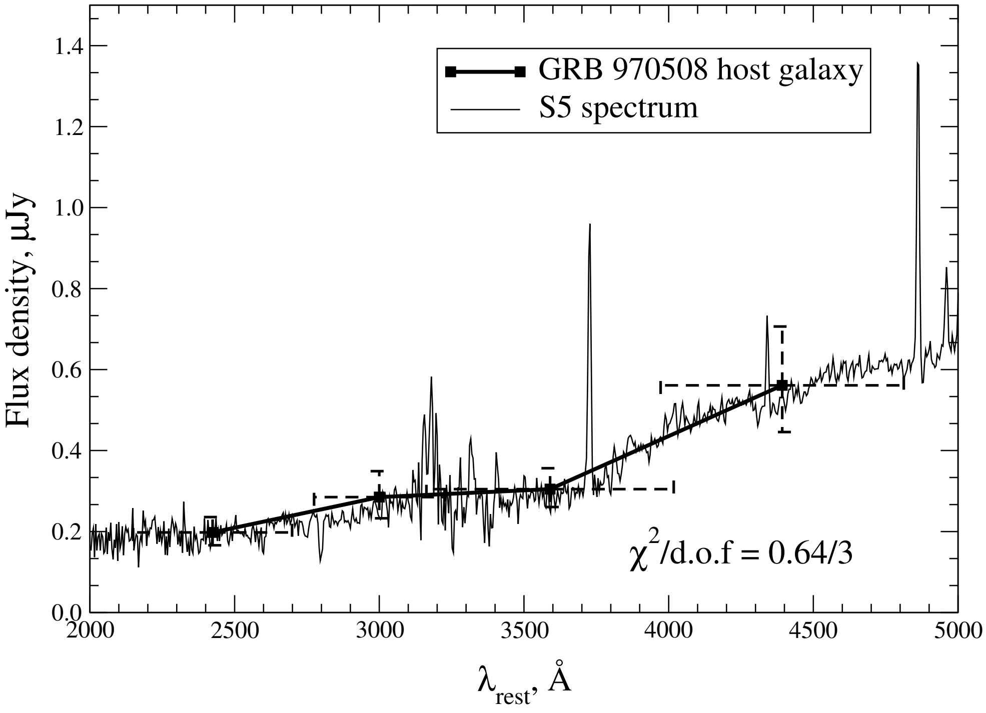

Рис. 8. Наилучшая аппроксимация ультрафиолетовым спектром starburst шаблона S5 (Connoly et al. 1995) широкополосного BVR_cI_c-спектра родительской галактики GRB 970508 (сдвинуто в систему покоя для $z = 0.835$). Поток от галактики-шаблона S5 был приведен к шкале потоков родительской галактики, т.е. к одному и тому же расстоянию. С учетом $z = 0.835$ уменьшены ширины каждого из фильтров (BVR_cI_c), они изображены для каждого $\lambda_{\rm eff}$ (в системе покоя GRB 970508) прерывистыми горизонтальными линиями с барами. На основании сравнения только с непрерывными спектрами starburst шаблонов, среднее межвездное поглощение света A_V внутри галактики GRB 970508 может быть в пределах 1.5–1.86.

в спектрах (SED-ы локальных галактик со звездообразованием), чтобы определить затем абсолютные величины родительских галактик разными методами. В Табл. 2 приведены результаты этих расчетов [38] и данные других авторов для первых восьми родительских галактик.

В разделе 5.5 описаны основные моменты теоретического моделирования (популяционный синтез) спектров галактик со вспышкой звездообразования [38, 40, 42]. Моделирование позволяет (во *втором приближении*) сделать более точными оценки среднего внутреннего поглощения, используя определение поглощения в первом приближении из раздела 5.3. Результаты сравнения теоретических распределений энергии (SED-ов) с наблюдаемыми распределениями BVR_cI_c потоков и инфракрасных (NIR) потоков от родительских галактик GRB 970508 и GRB 980703 (с существенно различными светимостями) были использованы для оценок некоторых эффектов внутреннего поглощения в родительских галактиках γ-всплесков. Таким образом, для родительской галактики GRB 970508 было проведено всестороннее исследование, учитывающее все известные данные наблюдений: цвета, спектры, морфология. В разделе 5.6 сделаны оценки средних SFR (Star Formation Rates) для родительской галактики GRB 991208 с использованием разных методов, в том числе и по эмиссионному спектру, полученному на БТА (Рис. 2).

Таким образом, наблюдательные свидетельства в пользу ассоциации массивных звезд и γ-всплесков основаны на цветах и на других свойствах родительских галактик, то есть на свойствах, предполагающих активное звездообразование: положение источника в галактике (Bloom et al. 2001b), возможные свидетельства сверхновых в кривых блеска (об этом в 6-й главе) и прямые наблюдения линий железа в ренгене от нескольких всплесков ([31], Antonelli et al. 2000). Здесь *цвета* галактик [38] как индикатор этой идеи (*ассоциации массивных звезд и γ-всплесков*) указаны в первую очередь (Lloyd-Ronning, Fryer, Ramirez-Ruiz 2001). Окончательное обсуждение всех результатов по родительским галактикам дано в разделе 5.7, а их краткая формулировка – в 5.8, где обсуждены все предыдущие выводы о связи γ-всплесков с массивным звездообразованием в родительских галактиках и сформулирован вывод о неизбежности сценариев с массивным звездообразованием для решения проблемы прародителей γ-всплесков.

Глава 6 (Прародители источников γ-всплесков): Во вводном разделе 6.1 сказано о возможной связи явления γ-всплеска со сверхновыми (СН) и подчеркнуто, что существенным для интерпретации является учет данных рентгеновских наблюдений послесвечения γ-всплесков на спутниках BeppoSAX, ASCA и Chandra (Piro et al. 1999, Yoshida et al. 2001, Antonelli et al. 2000, Amati et al. 2000, [31]). В разделах 6.2 и 6.3 сделан обзор всех особенностей временно́го поведения в четырех фотометрических полосах переменного оптического источника, связанного с γ-всплеском GRB 970508, проведена интерпретация фотометрического эффекта покраснения ("плечо" на I_c-кривой блеска) ОТ GRB 970508 как эффекта [17, 24, 30, 33], прямо связанного с вкладом СН в наблюдаемые потоки от транзиента через несколько недель после всплеска (Рис. 9). Этот эффект уже (до 2000 г.) был замечен для ОТ других γ-всплесков и сразу же была предложена наиболее вероятная его интерпретация (Galama et al. 2000, Bloom et al. 1999): проявление оболочки СН, каким-то образом (тут еще спорят о деталях) связанной с источником γ-всплеска. Действительно, исследования последних трех лет показывают, что уже в нескольких случаях послесвечение γ-всплесков имеет необычные (новые) временные и VRI спектральные свойства: GRB 970228 (Galama et al. 2000), GRB 980326 (Bloom et al. 1999) , GRB 990712 (Bjornsson et al. 2001), GRB 991208 [37], GRB 000911 (Lazzati et al. 2001a). Последний случай наблюдался для OT GRB 011121 на HST (Bloom et al. 2002) сразу в четырех фотометрических полосах красной стороны спектра OT GRB с $z = 0.36$.

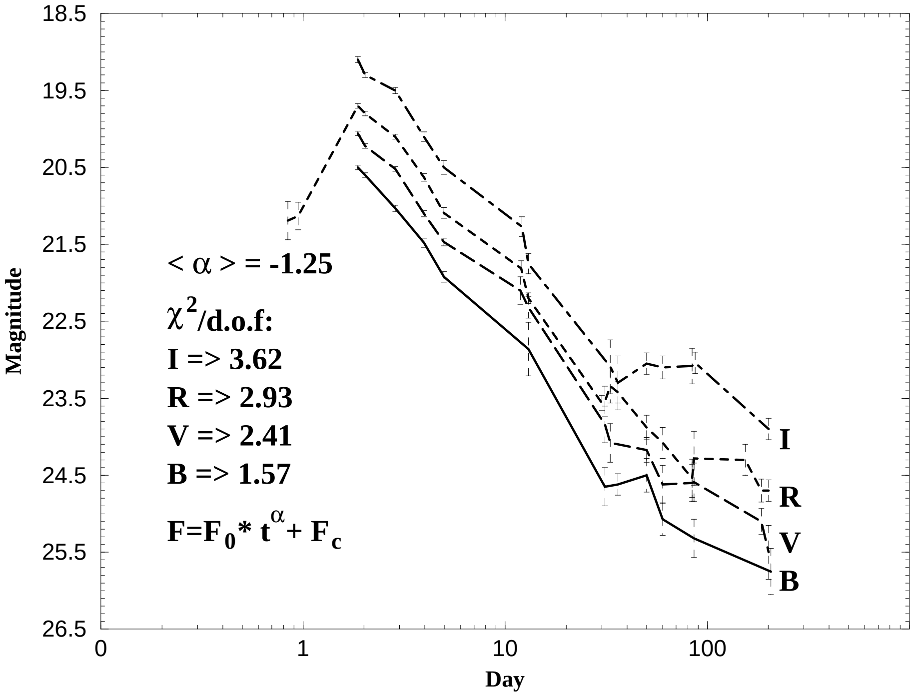

Рис. 9. Показаны отклонения (в единицах χ^2/d.o.f.) от некоторого "среднего" модельного закона с двумя источниками — "GRB-afterglow" + галактика: $F(t) = F_o \times t^{\alpha} + F_c$ для $< \alpha >= -1.25$. Эта модельная аппроксимация $F(t)$ определена, начиная только с момента *максимума* блеска OT. Наибольший вклад в поток от некоторого третьего источника наблюдается в I_c-полосе примерно через 40-100 дней после всплеска. Эффект уменьшается в сторону голубой части спектра OT, как и должно быть в случае, если он действительно объясняется СН типа Ib/c, сопровождавшей GRB 970508.

В разделе 6.4 в рамках предположения о связи γ-всплесков со СН согласованы такие числа, как: число галактик, в которых могут наблюдаться γ-всплески, число обнаруживаемых γ-всплесков и число вспышек СН в далеких галактиках [33, 41]. Главный вывод, который следует и из нашего (главы 4, 5) исследования галактик, состоит в том, что *родительские галактики γ-всплесков ничем не отличаются от других галактик с близкими значениями z*: ни по цветам, ни по спектрам, ни по скоростям звездообразования, ни по светимостям, ни по поверхностной яркости. Другими словами, на Рис. 10, или в таких же глубоких обзорах, при больших z *в оптике* видны как раз те галактики, в которых чаще всего и наблюдаются γ-всплески. А это позволяет теперь (с 97-99 гг.) уже с учетом результатов прямых оптических отождествлений, т. е. *прямо из наблюдений*, оценивать среднюю годовую частоту γ-всплесков, приходящихся на каждую такую галактику: $\sim 10^{-8}$ всплесков в "средней" галактике в год. Отсюда следует, что отношение числа наблюдаемых в далеких галактиках γ-всплесков, которые могли бы быть связаны с коллапсом массивных звезд ("core-collapse SN"), к числу СН типа Ib/c равно $\approx 5 \cdot (10^{-5} - 10^{-6})$.

Линии железа, найденные в спектрах рентгеновского послесвечения γ-всплесков на BeppoSAX, ASCA и Chandra, должны тоже довольно определенно указывать на массивный звездный прародитель всплеска, так как эти спектральные особенности могут быть прямым свидетельством существования плотных оболочек в окрестностях массивных звезд – прародителей γ-всплесков — "пред-GRB" (пред-СН). В разделе 6.5 на основании данных наблюдений в рентгеновском диапазоне сделана попытка интерпретировать самый трудный для теории послесвечения случай ОТ GRB 970508 с *уникальной* кривой блеска, наиболее полный набор многополосной фотометрии которого (ОТ) был получен на БТА [17]. В разделе 6.5.1 сказано о возможных наблюдательных эффектах типа второй вспышки ОТ на Рис. 5, *связанных с тем*, что вокруг WR (Вольфа-Райе) звезды-прародительницы источника γ-всплеска, начиная с расстояний r меньше или $\sim 10^9$ см (характерные размеры ядра массивной звезды) и до r больше или $\sim 10^{15}$ см (расстояния, на которых начинается взаимодействие WR-звездного ветра с околозвездной средой), существует *плотная оболочка*, возникшая в результате эволюции массивной звезды (Бисноватый-Коган, Зельдович 1968, Bisnovatyi-Kogan, Nadyozhin 1972, Cherepashchuk and Postnov 2001, Ramirez-Ruiz et al. 2001). Ниже собраны основные предположения возможного сценария *"массивная звезда —> WR —> пред-СН = пред-GRB"* [41], обсуждаемого в разделах 6.5.2 и 6.6 и следующего из интерпретации отношения числа наблюдаемых в далеких галактиках γ-всплесков к числу СН типа Ib/c [$\approx 5 \cdot (10^{-5} - 10^{-6})$].

В таком сценарии с энергетикой источника γ-всплеска порядка $10^{47} - 10^{49}$ эрг и непустым пространством около массивной звезды-прародительницы:

1) возможно только наиболее коллимированная часть излучения источника всплесков, распространяющаяся в виде луча (beam) внутри телесного угла $\Omega_{beam} \sim (10^{-5} - 10^{-6}) \cdot 4\pi$ sr, уходит на бесконечность, при этом **пол-**

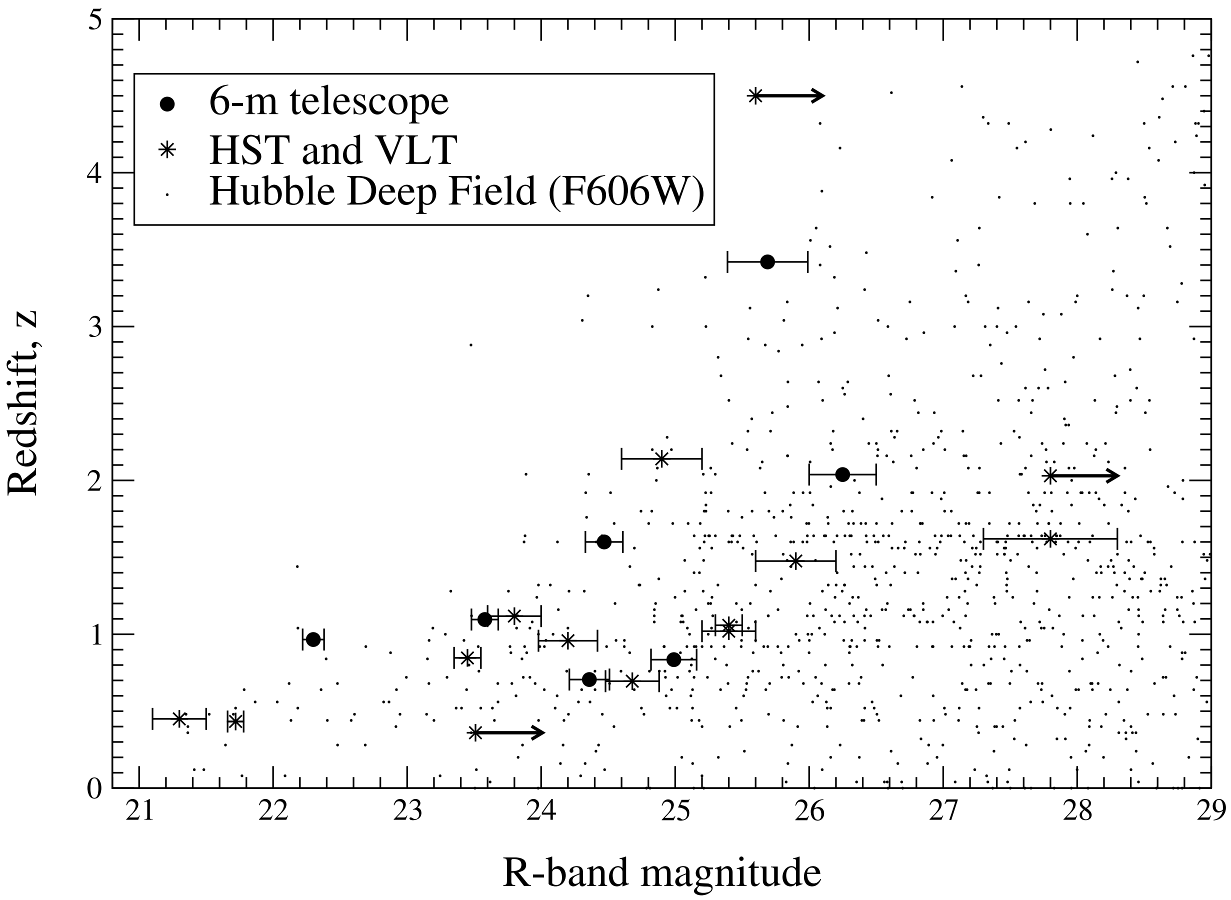

Рис. 10. Хаббловская диаграмма для родительских галактик γ-всплесков с известными (до июня 2002 г.) наблюдаемыми звездными величинами (или с верхними пределами по R) и спектроскопическими красными смещениями на фоне результатов процедуры фотометрического измерения z, примененной к галактикам из Hubble Deep Field (HDF) группой Fernández-Soto et al. (1999). Кружками отмечены родительские галактики γ-всплесков, фотометрия которых была сделана на БТА, звездочки — результаты других авторов (HST, VLT). Для галактики GRB 991208 измерения $z = 0.706$ и $R = 24.36$ сделаны на БТА. Точками показаны положения галактик из обзора HDF по результатам глубоких наблюдений на космическом телескопе имени Хаббла (HST) — т. е., на диаграмме отложены звездные величины в фильтре HDF F606W и соответствующие фотометрические красные смещения галактик из каталога F606W. Наблюдаемые звездные величины родительских галактик в полосе R исправлены за поглощение в Галактике. Эффекты наблюдательной селекции: уменьшение числа измеренных *спектроскопических* z после $z \approx 1.2$, значения z родительских галактик в основном получены по спектрам более ярких галактик, виден рост ошибки измерения блеска галактик с величиной. С учетом этих эффектов распределение z от R для родительских галактик γ-всплесков хорошо следует хаббловскому ходу для всех остальных "нормальных" (непекулярных) галактик глубокого обзора. (При одном и том же z на этом рисунке видны галактики больших и малых светимостей, вплоть до карликовых.)

ная энергетика источника (в электромагнитном диапазоне) либо такого же порядка, как и $E_{beam} = E_\gamma \Omega_{beam}/4\pi \sim 10^{45} - 10^{47}$ эрг, либо около 10^{49} эрг (где E_γ — так называемый "изотропный эквивалент"),
2) вокруг WR звезды-прародительницы источника γ-всплеска, начиная с расстояний $< 10^9$ см и до $r > 10^{15}$ см, существует плотная (ветровая) среда/оболочка,
3) огромное давление излучением может быть источником зарождения джета в малой области с размерами $\sim 10^9$ см и до $\sim 2 \cdot 10^{11}$ см, то есть там, где плотноть оболочки самая большая ($\sim 10^{15} - 10^{10}$ см$^{-3}$), но оптическая толща по томпсоновскому рассеянию уже становится меньше единицы ($\tau \sim \sigma_T \cdot n \cdot r < 1$),
4) при этом сама вспышка (возможно почти сферически-симметричный "γ-взрыв") с полной энергией до $\sim 10^{49}$ эрг возникает где-то ниже, в объеме с размерами до $3 \cdot 10^9$ см, поскольку нетепловые спектры γ-всплесков требуют прозрачности плазмы для выхода γ-излучения на еще меньших глубинах $\sim 10^8$ см (т.е. там, где WR-закон $n = A \cdot r^{-2}$ для звездного ветра уже перестает выполняться),
5) конкретные механизмы возникновения γ-излучения при энергетике $10^{47} - 10^{49}$ эрг не обсуждаются, но главное наблюдательное следствие такого сценария — это изотропная оптика и рентген [41], то есть возможны транзиентные вспышки "без γ-всплесков" (Rhoads 2001a, 2001b) и возможны яркие вспышки через день-три после всплеска, как это уже наблюдалось для второго отождествленного в оптике GRB 970508 (Рис. 5) и для его рентгеновского транзиента (Piro et al. 1998), что может быть следствием взаимодействия ультрарелятивистского джета с окружающей WR звезду-прародительницу плотной оболочкой с размерами $r \gtrsim 10^{15}$ см.

В Главе 7 (Заключение) сформулированы (в разд. 7.1) основные выводы диссертационной работы, одновременно являющиеся положениями, выносимыми на защиту. Цели, поставленные автором в Гл. 1 (см. также Табл. 1), достигнуты, и в разделе 7.2 сделана попытка подвести некоторый общий итог исследований по γ-всплескам к 2002 г. Сказано о возможных перспективах продолжения работы по спектральным и фотометрическим исследованиям объектов (ОТ, СН, галактик с $z \gtrsim 1$), связанных с γ-всплесками. По-видимому, для решения трудной проблемы механизма всплеска существенно было сначала выяснить, какие же звездные объекты могли бы быть прародителями источников GRB [39]. Далее, если наблюдаемый на Земле γ-всплеск — это действительно результат эволюции массивной звезды в далекой галактике, то тогда как связаны источники γ-всплесков со взрывами СН? — вопрос дальнейших исследований оптики GRB. Также *из данных наблюдений* должен быть получен и ответ на главный для теории вопрос: какова истинная энергетика γ-всплеска (Rhoads 2001a, 2001b) и какой все-таки угол коллимации гамма-лучей ("beaming") во время γ-вспышки/всплеска при коллапсе (релятивистском, скорее всего) компактного ядра массивной звезды?

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность Копылову Ивану Михеевичу, научному руководителю моей кандидатской (по поздним стадиям эволюции массивных тесных двойных звезд), который поддерживал и эту программу в КТШТ с самого начала; сотрудникам follow-up team SAO RAS: А. И. Копылову, С. Н. Жарикову, Т. А. Фатхуллину, В. Н. Комаровой, Т. Н. Соколовой; всем моим соавторам, администрации САО и всем сотрудникам обсерватории, помогавшим в этой работе с 1992 г.; Российскому Фонду Фундаментальных Исследований, при поддержке которого работа выполнялась в 1998-2002 гг. (гранты 98-02-16542 и 01-02-17106).

Публикации по теме диссертации

[1] V. V. Sokolov, A. I. Kopylov, S. V. Zharikov, "Optical studies of gamma-ray burst field GRB 790418 at the 6-m telescope", Bull. Spec. Astrophys. Obs., 1994, 38: 46-57

[2] V. V. Sokolov, A. I. Kopylov, V. G. Kurt, S. V.Zharikov, "The Deep Search for Optical Counterparts of Gamma-ray Bursters at the 6-meter Telescope", Lecture Notes in Physics, in Proc. IAU Coll. 151, "Flares and Flashes", Sonnenberg-Germany, Dec. 5-9, 1994, eds.: J. Greiner et al., Springer, 389-392

[3] V. V. Sokolov, A. I. Kopylov, S. V.Zharikov, V. G. Kurt, Berezin A. V., "The search and investigation of weak blue star-like objects in small GRB error boxes", Astrophys. and Space Sci., 231: 343-346, 1995

[4] S.V.Zharikov, A.I. Kopylov, V.V. Sokolov, "The investigation of Moskalenko's 1959 Optical Transient field inside GRB 791101 error box", Astrophys. and Space Sci., 231: 347-350, 1995

[5] B.J.McNamara, T.V.Harrison, C.I.Williams, R.M.Wagner, V. V, Sokolov, A. I. Kopylov, S.V.Zharikov, "X-ray and optical observations

of the COMPTEL error box for GRB 910601", Astronomical Journal, 110: 232-237, 1995

[6] Kurt, V. G., Komberg, B. V, Sokolov, V. V., Zharykov, S. V., "Optical Observations of the Nearby Isolated Pulsar PSR 0656+14 at the SAO 6-meter Telescope", 1997a, Astrophysics and Space Science (A&SS), v. 252, Issue 1/2, p. 451-460.

[7] Kurt V.G., Komberg B.V., Sokolov V.V., Zharikov S.V., Pavlov G.G., "Optical Observations of the PSR 0656+14" 1997b, IAU Circ. 6533

[8] Соколов В.В., Курт В.Г., Копылов А.И., Жариков С.В. и Березин А.В., "Поиск слабых голубых звездообразных объектов в центральной части области локализации гамма-всплеска 13 июня 1979 года", Письма в АЖ, 22/8: 563-570, 1996

[9] V. V. Sokolov, A. I. Kopylov, V. G. Kurt, S. V.Zharikov, Berezin A.V., "The Deepest Optical Investigation of The GRB 790613 Error Box", in proc. of 3th Huntsville Symp. on GRB, AIP, 697-701, 1996

[10] V. V. Sokolov, A. I. Kopylov, V. G. Kurt, S. V.Zharikov, Berezin A.V., "Deep photometric study of the region of the gamma-ray burst localization of June 13, 1979". Bull. Spec. Astrophys. Obs., 1997, 43, 5-17

[11] Kurt, V.G., Sokolov V.V., Zharikov S.V., Pavlov G.G., Komberg B.V., "BVRI observations of PSR B0656+14 with the 6-meter telescope", 1998, A&A, 333, 547-556.

[12] A. I. Kopylov, V. V. Sokolov, S. V. Zharikov, M. Feroci, E. Palazzi, "GRB 970508: Optical multicolor observations", IAU Circulars No. 6663 and No. 6671, 1997 May 16

[13] S. V. Zharikov, V. V. Sokolov, and Yu. V. Baryshev, "GRB 970508 SAO RAS optical observations", 1998, GRB OBSERVATION REPORT GCN # 31, `http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3_archive.html`

[14] V. Sokolov, S. Zharikov, L. Piro, E. Costa, L. Nicastro and E. Palazzi "GRB 980613, optical observations", 1998, GCN #118, `http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3_archive.html`

[15] V. Sokolov, S. Zharikov, I. Panchenko, "GRB 980703, Host galaxy multicolor photometry", 1998, GCN #147, `http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3_archive.html`

[16] V. Sokolov, S. Zharikov, E. Palazzi, L. Nicastro, "GRB 980519, Optical observation", 1998, GCN #148, http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3_archive.html

[17] V. V. Sokolov, A. I. Kopylov, S. V. Zharikov, "Оптическое отождествление гамма-барстеров/ The GRB follow-up observations", Отчет САО – 1997 – SAO Report, Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН, 1998, стр. 52, 61

[18] V. Sokolov, S. Zharikov, L. Nicastro, M. Feroci, E. Palazzi, "GRB990123, Optical observation", 1999, GCN #209, http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3_archive.html

[19] V. V. Sokolov, S. V. Zharikov, "Исследование γ-всплесков/ Investigation of γ-bursts", Отчет САО – 1998 – SAO Report, Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН, 1999, стр. 23 - 25

[20] S. Dodonov, V. Afanasiev, V. Sokolov, V. Komarova, T. Fatkhullin, A. Moiseev., 1999, "GRB 991208 SAO RAS follow-up observations", GCN #461, http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3_archive.html

[21] S.N. Dodonov, V.L. Afanasiev, V.V. Sokolov, A.V. Moiseev, and A. Castro-Tirado., 1999, "GRB 991208 SAO-RAS Spectroscopy", GCN #475, http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3_archive.html

[22] A. Fruchter, P. Vreeswijk, V. Sokolov, A. Casto-Tirado, 2000, "GRB 991208: HST Imaging of the Host Galaxy", GCN #872, http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3_archive.html

[23] V.V. Sokolov , A.I. Kopylov , S.V. Zharikov, E. Costa, M. Feroci, L. Nicastro, and E. Palazzi, "Multicolor photometry of the GRB 970508 optical remnant Gamma Ray Burst", 4th Huntsville Symposium AIP Conf. Proc. 428, pp. 525-529 (AIP, New York, 1997) (astro-ph/9709093)

[24] V.V. Sokolov , A.I. Kopylov , S.V. Zharikov, M. Feroci, L. Nicastro, E. Palazzi. "BVR_cI_c photometry of GRB970508 optical remaint: May-August, 1997", (astro-ph/9802341) 1998 Astron. & Astrophys., 334, 117-123

[25] Zharikov S.V., Sokolov V.V., Baryshev Yu. V., BVR_cI_c light curves of GRB970508 optical remnant and colors of underlying host galaxy, 1998, Astron. & Astrophys., 337, 356-362

[26] V. V. Sokolov, S. V. Zharikov, Yu. V. Baryshev, M. O. Hanski, K. Nilsson, P. Teerikorpi, L. Nicastro, E. Palazzi, "Properties of the host galaxy of the gamma-ray burst 970508 and local star-forming galaxy", 1999, Astron. & Astrophys., 344, 43-50

[27] Zharikov S.V., Sokolov V.V., "BVR_cI_c light curves of GRB970508 optical remnant and magnitudes of underlying host galaxy", 1999, Astron. & Astrophys. Suppl. Ser. 138, 485-486

[28] Sokolov V.V., Fatkhullin T.A., Komarova V.N.. "BVR_cI_c photometry of GRB 980703 and GRB 990123 host galaxies", 2000, Bulletin SAO RAS, v.49, 14-19 (astro-ph/0001357)

[29] V. V. Sokolov, T. A. Fatkhullin, V. N. Komarova, "The multiband photometry of GRB host galaxies", in book of "Abstracts of JENAM-2000", 2000, p. 191 (astro-ph/0006207)

[30] V. V. Sokolov, "The optical afterglow of GRB970508 revisited: another case for GRB-Supernova connection", Abstracts of JENAM-2000, 2000, p. 190

[31] Piro L., et al. (Sokolov V.), "Observation of X-ray lines from a Gamma-Ray Burst (GRB991216): Evedence of moving ejecta from the progenitor." 2000, Science, 290, 955-958

[32] Kurt, V. G., Komarova, V. N., Fatkhullin T. A., Sokolov, V. V., Koptsevich A. V., Shibanov, Yu. A., "Photometric study of fields of nearby pulsars with the 6 m telescope", 2000, Bull. Spec. Astrophys. Obs. 49, 5-13

[33] Sokolov V.V. "Evidence for a Supernova in the I_c Band Light Curve of the Optical Transient of GRB 970508", Доклад на Римском совещании (ноябрь 2000, Рим, 2-nd Workshop, GRB in the afterglow era, astro-ph/0102492) Costa E., Frontera F., Hjorth J. (eds.), 2001, Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era, ESO Astrophysics Symposia Series, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 132-134 (SN underlying GRB9708508).

[34] Sokolov V.V., Fatkhullin T.A., Komarova V.N. et al. "The Multiband Photometry of GRB Host Galaxies: Comparison with the Spectral Energy Distributions of Nearby Galaxies and Theoretical Modeling", Доклад на Римском совещании (ноябрь 2000, Рим, 2-nd Workshop, GRB in the afterglow era, astro-ph/0102493) Costa E., Frontera F., Hjorth

J. (eds.), 2001, Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era, ESO Astrophysics Symposia Series, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 238-240 (multicolor photometry of hosts)

[35] Koptsevich A. V., Pavlov G. G., Zharykov, S. V., Sokolov, V. V., Shibanov, Yu. A., Kurt V. G., "Optical photometry of the PSR B0656+14 and its neighborhood", 2001, A&A, 370, 1004-1016

[36] Sokolov V.V., Fatkhullin T.A., Komarova V.N. et al. "Астрономия γ-всплесков на 6-м телескопе/ Astronomy of the γ-bursts with the 6 m telescope", Отчет САО – 1999-2000 – SAO Report, Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН, 2001, стр. 38,39

[37] Castro-Tirado A., Sokolov V.V., Gorosabel J., et al., "The extraordinarily bright optical afterglow of GRB 991208 and its host galaxy", 2001, A&A, 370, 398-406

[38] Sokolov V.V., Fatkhullin T.A., Castro-Tirado A.J. et al., "Host galaxies of gamma-ray bursts: Spectral energy distributions and internal extinction", 2001, A&A, 372, 438-455

[39] Sokolov V.V. "On the gamma-ray burst progenitors", Conf. on Physics of Neutron Stars, Ioffe Physico-Technical Institute, June 2001, St. Petersburg, in abstract book, p.40 (astro-ph/0106435)

[40] Fatkhullin T.A. and Sokolov V.V. "The modeling of spectra of GRB host galaxies", Conf. on Physics of Neutron Stars, Ioffe Physico-Technical Institute, June 2001, St. Petersburg, in abstract book, p.19 (astro-ph/0106435)

[41] Sokolov V.V., "On the GRB progenitors: possible consequences for supernovae connection with gamma-ray bursts", 2001, Bulletin SAO RAS, v. 51, pp.38-47 (см. е-препринт astro-ph/0107399).

[42] Sokolov V.V. & Fatkhullin T.A. "Modeling of GRB host galaxy spectra", 2001, Bulletin SAO RAS, v. 51, pp.48-60

Цитированная литература

Бисноватый-Коган Г. С., Зельдович Я. Б. 1968, Астрон. ж., 45, 241

Лучков, Б. И., Митрофанов, И. Г., Розенталь, И. Л., 1996, УФН, 166, 743

Мазец, Е.П., Голенецкиий, С. В., 1987, в сб. "Итоги науки и техники"

(под ред. Р.А. Сюняева, ВИНИТИ, Москва), 16-42
Постнов К. А., 1999, УФН, 169, 545
Прилуцкий, О. Ф., Розенталь, И. Л., Усов, В. В., 1975, УФН, 116, 517
Розенталь, И. Л., Усов, В. В., Эстулин, 1983, УФН, 140, 97
Akerlof, C. W., et al. 1999, GCN #205 and *IAUC*7100)
Amati, L., Frontera, F., Vietri M., et al., 2000, SCIENCE, 290, 953
Amati, L., Frontera, F., Tavani, M., et al., 2002, A&A, 390, 81 (astro-ph/0205230)
Antonelli, A., Piro, L., Vietri M., et al., 2000, ApJ, 545, L39
Barat C., Hurley K., Niel M. et al., 1984, ApJ, 280, 150
Barthelmy S. D., et al., 1995, Astrophys. and Sp. Sci., 231, 235
Binggeli B., Sandage A., Tammann G., 1988, ARA&A 26, 509
Bisnovatyi-Kogan G. S., Nadyozhin D. K., 1972, A&SS, 15, 353
Bisnovatyi-Kogan G. S., 2001, in Proceedings of 20th Texas Symposium on relativistic astrophysics, Austin, Texas, 10-15 Decem ber 2000, Melville, NY: American Institute of Physics, 2001, xix, 938 p. AIP conference proceedings, Vol. 586. Edited by J. Craig Wheeler and Hugo Martel. ISBN 0735400261, p.611 (asro-ph/ 0103319).
Bjornsson G., Hjorth J., Jakobsson P., Christensen L., Holland S., 2001, 552, ApJ, L121-L124 (astro-ph/0104174)
Bloom, J.S., Djorgovski, S.G., Kulkarni, S.R., Frail, D.A. 1998b, ApJ, 507, L25
Bloom J. S. et al. 1999, Nature, 401, 453
Bloom, J.S., Djorgovski, S.G., Kulkarni, S.R., 2001b, ApJ, 554, 678 (astro-ph/0007244, http://xxx.lanl.gov)
Bloom J. S., Kulkarni S. R., Price P. A., et al. 2002, ApJ, *572*, L45-L49 (astro-ph/0203391)
Boella, G., Bulter, R. C., Perolla, G. C., et al., 1997, A&AS, 122, 299
Boer M., Pizzichini G., Hartmann D. et al., 1993, A&A, 277, 503
Caraveo P.A., Bignami G.F., Mereghetti S., 1994, ApJ, 422, L87
Castro-Tirado, A.J. 2001a, Invited talk given at the Fourth INTEGRAL Workshop: Exploring the Gamma-ray Universe (Alicante, Spain, 4-8 Sep 2000). ESA-SP Conf. Proceedings, p. 121 (astro-ph/0102122)
Cherepashchuk A. and Postnov K. "Wolf-Rayet Stars and GRB Connection", in proc. "Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era", International workshop held in Rome, CNR headquarters, 17-20 October, 2000. Edited by Enrico Costa, Filippo Frontera, and Jens Hjorth. Berlin Heidelberg: Springer, 2001, p. 166.

Chevalier et al., 1981, A&A, 100, L1
Cline, D., 1999, ApJ 527, 827
Cline, D., Matthey, C., and Otwinowski, S., 2001, astro-ph/0110276
Connoly, A.J., Szalay, A.S., Bershady, M.A., Kinney, A.L., Calzetti, D. 1995, AJ, 110, 1071
Djorgovski, S.G., Kulkarni, S.R., Bloom, J.S., et al. 1998b, ApJ, 508, L17
Djorgovski S.G., Kulkarni S.R., Bloom J.S., et al., 2001, Invited review in proc. "Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era: 2nd Workshop", eds. N. Masetti et al., ESO Astrophysics Symposia, Berlin: Springer Verlag, p. 218 (asro-ph/0107535).
Djorgovski S.G., Frail D.A., S.R. Kulkarni S.R., et al., 2001a, to appear in: Proc. IX Marcel Grossmann Meeting, eds. V.Gurzadyan, R. Jantzen, and R. Ruffini, Singapore: World Scientific, in press (astro-ph/0106574).
Fernandez-Soto A., Lanzetta K.M., Yahil A., 1999, ApJ, 513, 34
Fishman G.J., Meegan C.A., Wilson R.B. et al., 1994, ApJS, 92, 229
Frontera, F., Amati, L., Costa, E., et al. 2000, ApJSS, 127, 59
Galama, T.J., Groot, P.J., van Paradijs, J.,q et al. 1998, ApJ, 497, L13
Galama, T.J., Tanvir, N., Vreeswijk, P.M., et al. 2000, ApJ, 536, 185
Gorosabel, J. & Castro-Tirado, A.J., 1998, A&A 337, 691.
Greiner J., Boer M., Kahabka P. et al., 1995, in The Lives of the Neutron Stars, M.A.Alpar et al.(eds.), Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands., 519
Groot P.J., Galama T. J., van Paradijs J., et al., 1997a, IAUC 6584
Groot, P.J. et al. 1997b, IAU Circ No. 6588
Hurley, K., 1992, in Gamma-Ray Bursts - Proceeding of the Gamma-Ray Burst Workshop - 1991, Hantsville, AL, (Eds. W. Paciesas and G. Fishman, AIP Conf. Proc. 265, (AIP Press- New York), p. 3
Harrison T.E., McNamara B.J., Klemola A.R.. 1994, AJ, 108, 600
Hjorth, J., Holland, S., Courbin, F., et al. 2000, ApJ, 539, L75; 534, L147
Jaunsen A.O., Andersen M.I., Hjorth J., et al., 2002, to appear in A&A, astro-ph/0204278
Kouveliotou C., et al., 1993, ApJ, 413, L101
Kulkarni, S. R., Djorgovski, S. G., Ramaprakash, A. N., et al. 1998, Nature, 393, 35
Kurt, V. G., Komarova, V. N., Fatkhullin T. A., Sokolov, V. V., Koptsevich A. V., Shibanov, Yu. A., 2001, Bull. Spec. Astrophys. Obs. 51, 21-37
Lazzatti, D., Covono, S., Ghisellini, G., et al., 2001a, A&A, 378, 996

(astro-ph/0109287)
Lloyd-Ronning, N. M., Fryer, C. L., Ramirez-Ruiz, E., 2001,
Luginbuhl, C.B., Vrba, F.J., Hudec, R., et al., 1995, Ap&SS 231, 289.
Mazets, E. P., and Golenetskii, S. V., 1981, Ap & SS 75, 47
Mazets, E.P., Golenetskii, S.V., Ilyinskii V.N., Panov V.N., Aptekar R.L., Guryan Yu. A., Proskura M.P., Sokolov I.A., Sokolova Z.Ya., Kharitonova T.V., Dyatchkov A.V., Khavenson N.G., 1981, Ap & SS, 80, 119
McNamara B.J., et al., 1995, Astrophys. and Sp. Sci, 231, 1/2, 251
McNamara B.J. and Harrison T.E., 1994, Astron. Journal, 107, 1825
McQuade K., Calzetti D., Kinney A.L., 1995, ApJS 97, 331
Meegan, C. A., et al., 1992, *Nature*, 355, 14
Metzger, M.R. et al. 1997a, IAU Circ No. 6588; 1997b, IAUC 6676
Motch, C., Hudec, R., & Christian, C. 1990, A&A, 235, 185
Moskalenko, E. I., et al., 1989, A&A, **223**, 141
Paczyn'ski, B., 1997, astro-ph/9710086.
Panaitescu, A. & Kumar, P., 2002, ApJ, 571, 779 (astro-ph0109124)
Piro L., Amati L., Antonelli L.A., et al., 1998, A&A., 331, L41
Piro, L., Costa, E., Feroci, M., et al., 1999, A&ASS., 138, 431
Ramirez-Ruiz, E., Dray, L.M., Madau, P., and Tout C.A., 2001, MNRAS, 327,829 (astro-ph/0012396)
Rhoads, J. R., 2001a, ApJ, 557, 943
Rhoads, J. R., 2001b, Invited review at Ninth Marcel Grossmann Meeting, astro-ph/0103028
Ricker G.R., Vanderspek R.K., Ajhar E.A., 1986, Adv. Space Research, 6, 75
Sahu, K.C. et al., 1997, Nature, 387, 476.
Sahu, K.C. et al. 1997b, ApJl, 489, 127
Sari, R., Piran, T., 1999, ApJ, 560, 641 (astro-ph/9902009)
Schaefer, B. E., et al. 1994, ApJS, *92*, 285
Schaefer, B. E., 1984, Nature, *294*, 722
Tavani, M. 1998, ApJ 497, L21
van Kerkwijk & Kulkarni, S. R., 2001, A&A, 378, 986
van Paradijs J., Groot P., Galama T., et al., 1997, Nature 386, 686
Vrba, F.J., Hartmann, D.H., & Jennings, M.C., 1995, ApJ 446, 115.
Walters F.M, & Matthews L.D., 1997, Nature 389, 358
Woosley, S.E., Wallace, R. K., 1982, ApJ., *258*, 716
Yoshida, A., Namiki, M., Yonetoku, D., et al., 2001, ApJ, 557, 27 (astro-ph/0107331)

Бесплатно

Зак. N45c Уч. изд. - 2.0 Тираж 100

Специальная астрофизическая обсерватория РАН