

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»



На правах рукописи
УДК xxx.xxx

Панков Николай Сергеевич

**Исследование оптических транзиентов методами
поточковой обработки астрономических данных**

Специальность 1.3.1 —
«Физика космоса, астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук, доцент
Позаненко Алексей Степанович

Москва — 2026

Оглавление

	Стр.
Введение	7
0.1 Характеристика работы	11
Глава 1. Гамма-всплески и сопутствующие транзиенты	19
1.1 Физическая модель гамма-всплеска	19
1.1.1 Проблема компактности	19
1.1.2 Модель огненного шара	20
1.1.3 Аккреция на черную дыру	21
1.1.4 Модель протомангнетара	22
1.2 Классификация гамма-всплесков	23
1.2.1 Эмпирическая и физическая классификация	23
1.2.2 Подклассы и спектральные зависимости	24
1.3 Послесвечения гамма-всплесков	26
1.3.1 Внешние ударные волны	26
1.3.2 Джеты в гамма-всплесках	26
1.3.3 Спектральная эволюция	32
1.4 Каноническая кривая блеска: феноменология	34
1.4.1 Активная фаза	34
1.4.2 Фаза послесвечения	37
1.5 Сопутствующие транзиенты	40
1.5.1 Сверхновые (SN)	40
1.5.2 Килоновые (KN)	43
1.6 Родительские галактики	45
1.7 Выводы по главе	47
Глава 2. Планирование наблюдений оптических транзиентов	49
2.1 Наблюдения оптических транзиентов	49
2.1.1 Целевые наблюдение	50
2.1.2 Мозаичный обзор	51
2.1.3 Комбинированные наблюдения – IKI-GRB-FuN	51
2.1.4 Обзор планировщиков наблюдений	52

2.2	Система потокового планирования наблюдений для наблюдательной сети телескопов	53
2.2.1	Архитектура	54
2.2.2	Обработка алертных сообщений	56
2.2.3	Планирование наблюдений	58
2.2.4	Рассылка алертных сообщений и планов наблюдений . . .	64
2.2.5	Взаимодействие с телескопами	65
2.2.6	Взаимодействие с пользователями-наблюдателями	66
2.2.7	Структура данных	69
2.2.8	Результаты	72
2.3	Выводы	72

Глава 3. Обработка астрономических изображений и поиск оптических транзиентов

		75
3.1	STARFALL – система обработки астрономических изображений .	75
3.1.1	Схема обработки изображений	75
3.1.2	Калибровка изображений	77
3.1.3	Входной контроль изображений	85
3.1.4	Комбинирование изображений	85
3.1.5	Выделение и измерение источников	86
3.1.6	Апертурная фотометрия	86
3.1.7	Фотометрическая калибровка	88
3.1.8	Астрометрическая калибровка	91
3.1.9	Поиск кандидатов в транзиенты	91
3.1.10	Визуальный контроль	94
3.1.11	Доставка результатов обработки	95
3.2	Выводы главы	95

Глава 4. Применение программных конвейеров к наблюдательным данным

		97
4.1	GRB 230328B	97
4.1.1	Регистрация и локализация	97
4.1.2	Спектральный анализ многоволнового послесвечения . . .	98
4.1.3	Результаты анализа и интерпретация	100

4.1.4	Обсуждение	100
4.2	GRB 231115A	102
4.2.1	Регистрация и локализация	102
4.2.2	Поиск оптического послесвечения	102
4.2.3	Результаты	104
4.3	GRB 240225B	107
4.3.1	Регистрация и локализация	107
4.3.2	Оптические наблюдения	107
4.3.3	Результаты	108
4.4	EP240801a/XRF 240801B	109
4.4.1	Регистрация и локализация	109
4.4.2	Оптические наблюдения	109
4.4.3	Результаты	110
4.5	Выводы главы	112

Глава 5. Многоволновый анализ послесвечения гамма-всплеска

	GRB 200829A	113
5.1	Наблюдения	113
5.1.1	Регистрация и локализация	113
5.1.2	Наземные наблюдения	114
5.2	Анализ данных послесвечения	115
5.2.1	Оптические данные	116
5.2.2	Рентгеновские данные	116
5.2.3	Многоволновая кривая блеска	119
5.3	Определение красного смещения	120
5.3.1	Возможная сверхновая	124
5.4	Родительская галактика	125
5.5	Обсуждение	127
5.5.1	Хроматизм кривой блеска	128
5.5.2	Вспышка в раннем послесвечении	129
5.6	Выводы главы	131

Глава 6. Многоволновое исследование послесвечения

	гамма-всплеска GRB 210610B	133
--	---	------------

6.1	Наблюдения	133
6.1.1	Регистрация и первые наблюдения	133
6.1.2	Наземные наблюдения	134
6.2	Анализ данных фазы послесвечения	137
6.2.1	Оптическая кривая блеска	137
6.2.2	Аналитическое моделирование многоволновой кривой блеска	138
6.2.3	Анализ цветовой эволюции	143
6.3	Поиск сверхновой	144
6.4	Родительская галактика	145
6.5	Обсуждение	147
6.5.1	Ахроматизм послесвечения	147
6.5.2	Плато	147
6.6	Выводы	151
Заключение		153
Список сокращений и условных обозначений		157
Словарь терминов		158
Список литературы		159
Список рисунков		188
Список таблиц		197
Приложение А. Алгоритм поиска кандидатов в транзиенты . . .		200
Приложение Б. Журнал оптических наблюдений GRB 231115A		202
Приложение В. Журнал оптических наблюдений EP240801a . .		203
Приложение Г. Журнал наблюдений оптического послесвечения GRB 240225B		205

Приложение Д. Журнал результатов оптических наблюдений GRB 200829A	206
Приложение Е. Журнал результатов оптических наблюдений GRB 210610B	211

Введение

Космические гамма-всплески (GRBs) представляют собой наиболее экстремальные по энерговыделению транзиентные события в наблюдаемой Вселенной. Характерная энергия излучения в гамма-диапазоне (10 кэВ – 1 МэВ) составляет $10^{48} \lesssim E_{\text{iso}} \lesssim 10^{54}$ эрг в изотропном эквиваленте, что на несколько порядков превышает показатели любых других известных астрономических источников [21] (см. рисунок 1).

Первая регистрация гамма-всплесков была осуществлена с помощью американских рентгеновских и гамма-детекторов спутниковой группировки VELA в 1967 г. [22] и советского спутника КОСМОС-461 в 1972 г. [23], однако природа источников оставалась предметом дискуссий на протяжении десятилетий. Переломным моментом стало разворачивание космической гамма-обсерватории им. Комптона CGRO (запуск 5 апреля 1991 г.), оснащенной всенаправленным прибором BATSE [24] и телескопом COMPTEL с угловым разрешением 1° . За период эксплуатации обсерваторией было обнаружено ~ 2700 всплесков [25]. Анализ этой выборки позволил подтвердить разделение событий на короткие

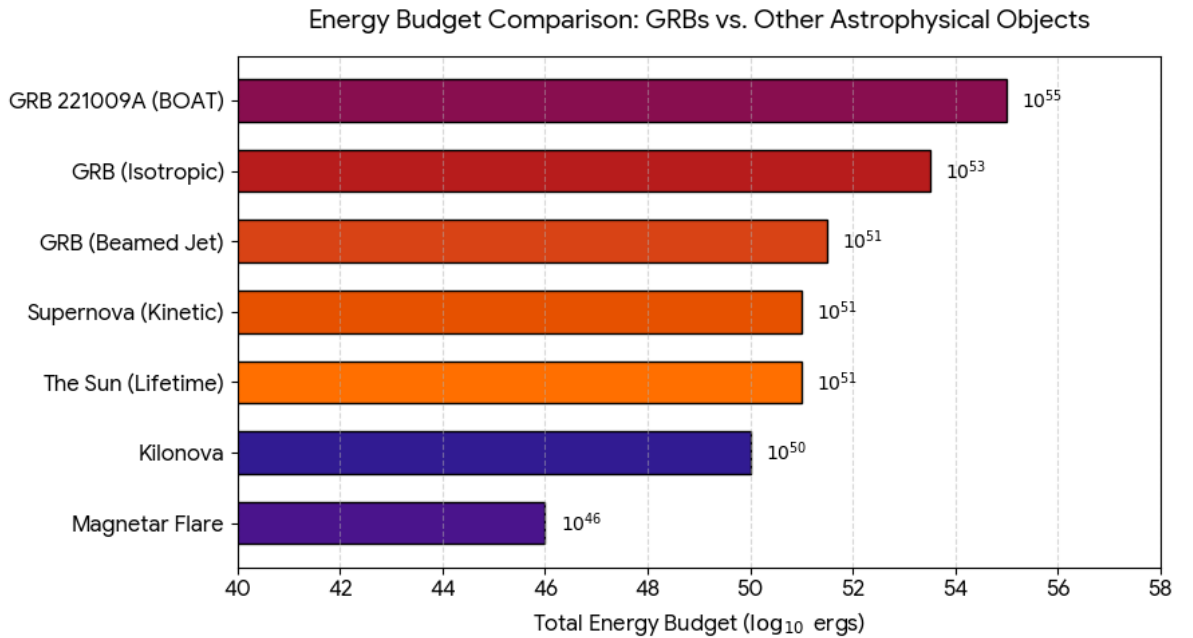


Рисунок 1 — Сравнение полной энергии гамма-всплесков с другими астрофизическими объектами.

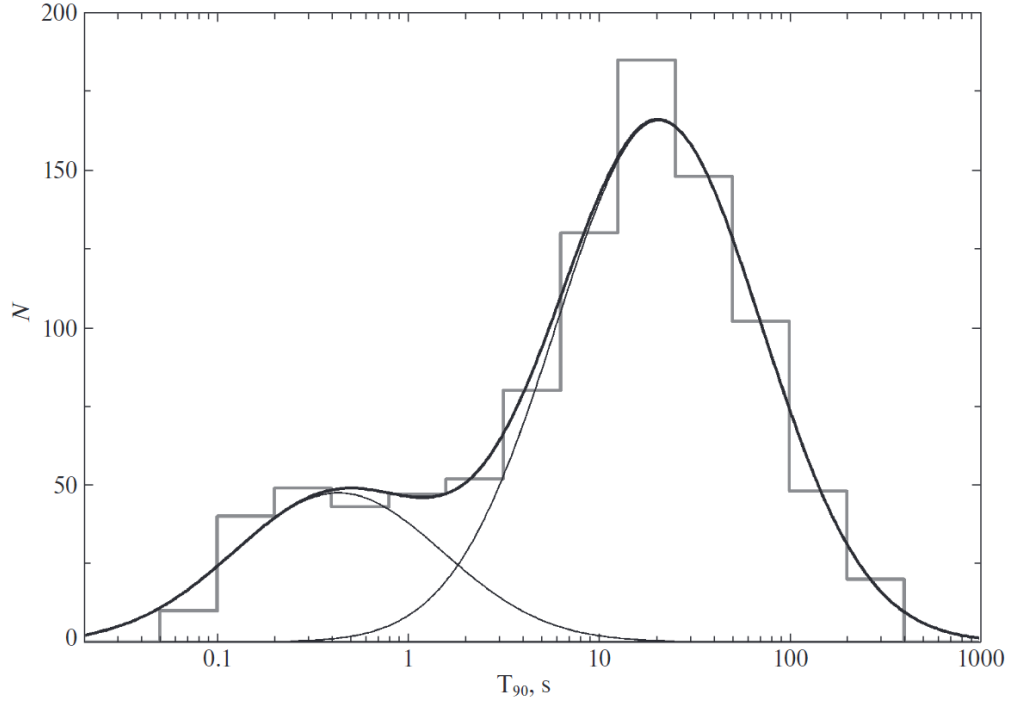


Рисунок 2 — Бимодальное распределение гамма-всплесков по длительности. Рисунок взят из работы [28].

(SGRBs, Type I) и длинные (LGRBs, Type II) по параметру длительности T_{90} ¹ с граничным значением ~ 2 с [26], что ранее было отмечено экспериментом KONUS [27]. Распределение гамма-всплесков по длительности, построенное на основе данных SPI-ACS/INTEGRAL в работе [28], изображено на рисунке 2.

Установленная по данным BATSE изотропия распределения GRBs по небесной сфере [29; 30] (см. рисунок 3) фактически исключила принадлежность к нашей Галактики и указала на их внегалактическую природу. Тем не менее, из-за ограниченного углового разрешения приборов CGRO прямое подтверждение космологических расстояний оставалось недостижимым.

Проблема локализации была решена с запуском европейского рентгеновского эксперимента VERRO-SAX [31], точность которого достигала $\sim 4'$. Это позволило впервые обнаружить рентгеновское послесвечение всплеска GRB 970228 [32], а затем и его оптический компонент [33] спустя 21 час после регистрации гамма-излучения. Идентификация родительской галактики с блеском $m_R \sim 24^m$ стала первым прямым доказательством космологических расстояний до GRB. В последующие годы многоволновые наблюдения выявили связь длинных всплесков со сверхновыми типа Ic (например, GRB 980425 [34] и SN1998bw

¹Интервал времени за которых регистрируется 90% отсчетов события в гамма-диапазоне.

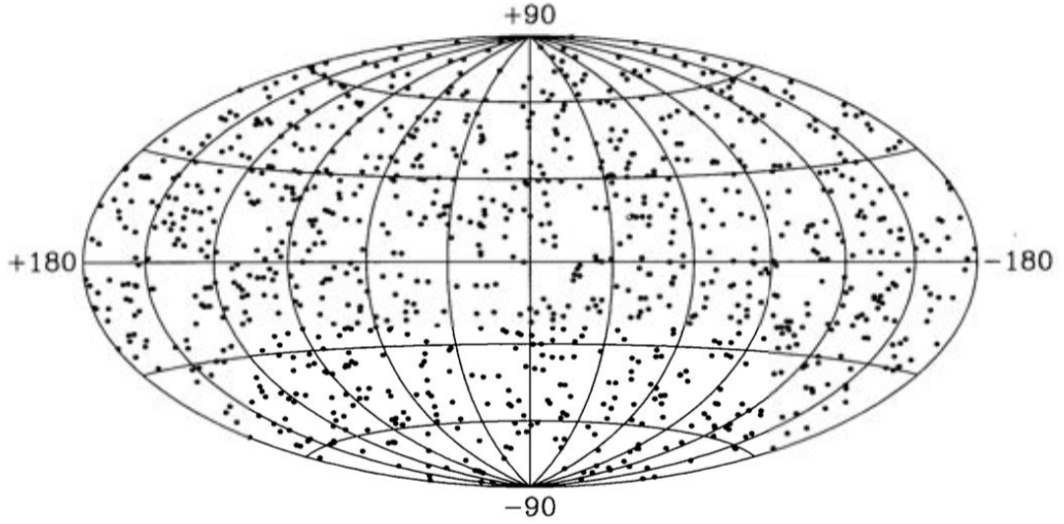


Рисунок 3 — Изотропное распределение гамма-всплесков по небу. Рисунок взят из работы [29].

[35]), что указало на их происхождение от массивных звезд типа Вольфа-Райе с массой $\gtrsim 15M_{\odot}$.

Новым этапом в изучении GRB стал переход к режиму оперативного реагирования, реализованному в многоволновой обсерватории SWIFT [36]. Благодаря интеграции трех инструментов — гамма-телескопа BAT (15–150 кэВ) [37], рентгеновского телескопа XRT (0.3–10 кэВ) [38] и УФ/оптического телескопа UVOT — обсерватория обеспечивает полностью автоматический поворот на источник в режиме реального времени. Такая архитектура позволила достичь точности локализации $\lesssim 10''$ в рентгеновском и $\lesssim 1''$ в оптическом диапазонах, что открыло возможность детального изучения ранних стадий послесвечения [39], выделения подкласса рентгеновских вспышек (XRF) и определения рекордных красных смещений (например, $z \sim 8.2$ для GRB 090423 [40] и $z \sim 9.4$ для GRB 090429B [41]).

В настоящее время астрономия гамма-всплесков вступила в эру многоканальных (multi-messenger) исследований. Ключевым достижением стало совместное обнаружение гравитационно-волнового сигнала от слияния двух нейтронных звезд (BNS) событием GW170817 ([42]) детекторами LIGO/VIRGO и соответствующего электромагнитного компаньона в виде короткого гамма-всплеска GRB 170817A ([43–46]) и килоновой AT2017gfo ([47]). Данный факт, наряду с событием GW190425 [48] / GRB 190425A [49], окончательно подтвердил связь коротких GRB со слияниями компактных объектов (BNS и NSBH). Несмотря на расширение сети детекторов в цикле O4 с привлечением KAGRA,

поиск новых электромагнитных транзиентов остается сложной задачей. Так за весь цикл О4 не было найдено ни одного электромагнитного транзиента от слияния двух нейтронных звезд или нейтронной звезды и черной дыры.

Современный наблюдательный инструментарий продолжает развиваться за счет новых миссий, запущенных в 2024 г., таких как рентгеновская обсерватория EINSTEIN PROBE, (EP) [50] с телескопами WXT и FXT, а также многоволновая обсерватория SVOM[51] с экспериментом ECLAIRS, рентгеновским телескопом MXT и оптическим телескопом VT. Миссия SVOM представляет собой логическое продолжение обсерватории Swift, орбиту которой не удалось поднять автономным космическим аппаратом LINK 26 августа 2026 г [52]. С помощью EP уже зарегистрировано более 20 мягких XRF для которых установили красные смещения [53], например, EP240801a [3]. SVOM регулярно регистрирует гамма-всплески, так по состоянию на 3 декабря 2025 г. были обнаружены или наблюдались оптические компоненты 111 гамма-всплесков [54].

Особую роль в современном поиске оптических компонентов GRBs играет разработка специализированного программного обеспечения для потоковой обработки данных (stream processing). Огромный объем данных, поступающих от современных роботизированных телескопов, например, ZTF[55], LSST[56], GOTO[57], NUTELLA[58] требует выделения транзиентных событий на фоне 10^{4-5} других источников. Применение потоковой обработки позволяет минимизировать задержку между регистрацией всплеска и отправкой координат оптического компонента на узкопольные телескопы, что критически важно для наблюдения быстрозатухающего послесвечения в первые минуты после регистрации. Реализация подобных систем требует создания программных конвейеров, объединяющих в себе процедуры автоматизированной обработки данных от калибровки изображений до поиска кандидатов в транзиенты. Интеграция таких систем с современными широкопольными обзорами позволяет обеспечить непрерывный мониторинг неба в режиме реального времени. Подобный подход также увеличивает вероятность наблюдения оптического излучения на ранней стадии (первые секунды после регистрации всплеска), а также особенностей на кривых блеска: вспышки, плато, поярчания [59].

Данная историческая и наблюдательная ретроспектива служит основанием для дальнейшего рассмотрения теоретических аспектов явления. В разделах Главы 1 будут рассмотрены физическая природа гамма-всплесков, механизмы

формирования их излучения, а также особенности сопутствующих им оптических транзиентов.

0.1 Характеристика работы

Актуальность работы. В эпоху современной многоволновой и многоканальной астрономии поиск и изучение транзиентов, таких как космические гамма-всплески и ассоциируемые с ними оптические компоненты (послесвечение, сверхновые и килоновые), представляют особый интерес. Однако, до сих пор количество обнаруженных оптических компонентов остается ниже ожидаемого из-за ограниченных возможностей наблюдений оптических транзиентов: невозможность покрытия больших областей локализации, недостаточная чувствительность телескопов, неподходящие погодные условия, — все это ограничивает наши возможности. Кроме того, быстрая переменность оптических транзиентов на масштабах от нескольких секунд до нескольких часов затрудняет их поиск и наблюдение. Сложности, связанные с низкой производительностью обработки астрономических изображений, также ограничивают время реакции на транзиентные события. Неэффективность выбранных алгоритмов поиска транзиентов в конкретных случаях, например, при использовании сравнения с каталогами, когда транзиент находится в яркой родительской галактике, также является проблемой. И, наконец, значительное разнообразие транзиентов в их наблюдательных свойствах не позволяет заранее определить оптимальное время накопления для поиска оптического компонента. Разработка и реализация потоковых методов (программных конвейеров) для оптимального планирования наблюдений, обработки исходных изображений, а именно, калибровки, суммирования, астрометрической и фотометрической привязки, поиска оптических транзиентов, ассоциированных с гамма-всплесками, приводит к увеличению скорости и количества обнаруженных оптических компонентов. Это, в свою очередь, позволяет определить параметры излучения и, следовательно, на более ранней стадии проводить моделирование физических параметров гамма-всплесков, таких как: полная энергия, излученная в электромагнитном диапазоне, параметры джета, угол раствора джета, угол между осью джета и направлением на наблюдателя и др. Кроме того, использова-

ние потокового планирования наблюдений позволяет эффективнее проводить наблюдения больших областей локализации источников гамма-всплесков и гравитационно-волновых источников (до сотен квадратных градусов). В связи с этим, наблюдение, обработка и исследование с помощью потоковых методов (конвейеров) оптических транзиентов, связанных с гамма-всплесками и, особенно, связанных с гравитационно-волновыми источниками, является актуальной задачей, имеющей важное значение для развития современной астрофизики.

Целью данной работы являются наблюдения и исследования методами потоковой обработки данных оптических транзиентов, ассоциируемых с космическими гамма-всплесками. Основная часть данных, используемых в работе, получена на телескопах наблюдательной сети IKI-GRB-FuN.

Для достижения этой цели поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать и реализовать программные конвейеры для поиска оптических компонентов гамма-всплесков и гравитационно-волновых событий.
2. При помощи программных конвейеров для обработки астрономических изображений провести обнаружение кандидатов в транзиенты.
3. Применить программные конвейеры для обработки астрономических изображений оптических послесвечений гамма-всплесков и получить фотометрические измерения.
4. Выполнить исследование отдельных транзиентов с применением методов потоковой обработки астрономических данных.

Научная новизна:

1. Впервые в многоволновых данных послесвечения гамма-всплеска GRB 200829A найдена хроматическая неоднородность.
2. Впервые в наблюдениях телескопом БТА/САО РАН была найдена родительская галактика гамма-всплеска GRB 200829A и оценены её основные параметры: абсолютная звездная величина, темп звездообразования и масса.
3. Впервые в многоволновых данных послесвечения гамма-всплеска GRB 210610B найдено ахроматическое плато.
4. Представлены новые фотометрические измерения родительской галактики гамма-всплеска GRB 210610B в фильтрах B, R и оценена абсолютная звездная величина в фильтре R .

5. Представлены новые фотометрические измерения оптических послесвечений гамма-всплесков GRB 240225B и EP240801a.

Научная и практическая значимость

1. Представлены новые наблюдательные данные, позволяющие расширить выборку послесвечений гамма-всплесков с неоднородностями на кривых блеска (плато, вспышки) и с обнаруженными родительскими галактиками.
2. Предложены оригинальные методы поиска кандидатов в оптические транзиенты, которые могут быть применены для поиска кандидатов в оптическое послесвечение гамма-всплесков для их последующего статистического анализа и моделирования.
3. Результаты анализа многоволновых данных космических гамма-всплесков GRB 200829A и GRB 210610B могут быть использованы в дальнейших исследованиях, например, в составе выборки гамма-всплесков.
4. Фотометрические значения, полученные для гамма-всплесков GRB 240225B и EP240801a, могут были использованы для аналитического/численного моделирования многоволновых кривых блеска перечисленных источников.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработаны и реализованы два программных конвейера для поиска оптических компонентов космических гамма-всплесков и гравитационно-волновых событий методом сравнения с каталогами и методом вычитания изображений. С помощью этих конвейеров независимо открыты оптические послесвечения гамма-всплесков GRB 230414B, GRB 230506C, GRB 230512A и GRB 231017A, а также проведена фотометрическая обработка оптических наблюдений гамма-всплесков GRB 200829A, GRB 210610B, GRB 240225B и EP240801a.
2. В многоволновой кривой блеска гамма-всплеска GRB 200829A обнаружена хроматическая неоднородность в фазе раннего послесвечения, которую можно объяснить моделью структурированного джета. Независимо получена оценка красного смещения источника гамма-всплеска GRB 200829A на основе спектральных (в рентгеновском диапазоне 0.3 – 10 кэВ) и фотометрических (в оптическом диапазоне) данных обсерватории Swift. Найдена и исследована родительская галактика источника

- этого гамма-всплеска. Получена оценка темпа звездообразования и массы родительской галактики.
3. В многоцветной оптической кривой блеска гамма-всплеска GRB 210610B проведено исследование природы ахроматического плато в раннем послесвечении. Проверены две модели, позволяющие объяснить такое плато: модель дипольного излучения сильно замагниченной нейтронной звезды (протомагнитара) и модель столкновения ударных волн. Обе модели адекватно описывают наблюдаемую кривую блеска.
 4. На основе ранних многоцветных фотометрических измерений, полученных на наземном телескопе NUTELLA-TAO, и рентгеновских спектральных данных телескопа XRT обсерватории Swift получены оценки колонковой плотности и поглощения на луче зрения в родительской галактике гамма-всплеска GRB 230328B. Полученные оценки типичны для выборки родительских галактик гамма-всплесков на таком же красном смещении, как и GRB 230328B.
 5. Выполнен поиск оптического компонента гигантской вспышки магнитара, получившего обозначение GRB 231115A, в галактике M82. В результате найдено ограничение на блеск в фильтре R ($>19^m.3$) возможного оптического компонента этой вспышки.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается общепринятым подходом к редукции исходных наблюдательных данных для фотометрии (в реализации соискателем), стандартных подходов к интерпретации полученных результатов. Для представленных данных степень достоверности подтверждается согласием с результатами, опубликованными в литературных источниках.

Личный вклад.

Соискателем совместно с научным руководителем разработаны и реализованы два программных конвейера для поиска оптических компонентов космических гамма-всплесков и гравитационно-волновых событий методом сравнения с каталогами и методом вычитания изображений (им была проделана основная работа по разработке алгоритмов и вся работа по программированию и выпуска рабочих версий конвейеров). С помощью этих конвейеров независимо открыты оптические послесвечения гамма-всплесков GRB 230414B, GRB 230506C, GRB 230512A и GRB 231017A, а также проведена фотометрическая обработка оптических наблюдений гамма-всплесков GRB 200829A, GRB 210610B,

GRB 240225B и EP240801a. Для этих событий полученные соискателем фотометрические данные являются основными. Для событий GRB 240225B и EP240801a соискатель обработал данные, полученные телескопами наблюдательной сети IKI GRB-FuN. Полученные фотометрические измерения внесли значительный вклад для построения и моделирования кривых блеска перечисленных событий.

В многоволновой кривой блеска (кривая блеска в диапазоне 0.3 – 10 кэВ и многоцветная кривая блеска в оптическом диапазоне) гамма-всплеска GRB 200829A обнаружена хроматическая неоднородность в фазе раннего послесвечения. Соискатель провел исследования и показал, что эту неоднородность можно объяснить с помощью модели структурированного джета. Соискателем независимо получена оценка красного смещения источника гамма-всплеска GRB 200829A на основе спектральных (в рентгеновском диапазоне 0.3 – 10 кэВ) и фотометрических (в оптическом диапазоне) данных обсерватории Swift. Соискателем проведено исследование родительской галактики источника этого гамма-всплеска и получена оценки темпа звездообразования и массы родительской галактики.

Соискателем проведено исследование природы ахроматического плато в раннем послесвечении на основе многоцветной (в фильтрах BVRI оптического диапазона) кривой блеска гамма-всплеска GRB 210610B. Соискатель выполнил исследование двух моделей, позволяющих объяснить такое плато: модель дипольного излучения сильно замагниченной нейтронной звезды (протомагнитара) и модель столкновения ударных волн.

Соискателем, на основе ранних многоцветных фотометрических измерений, полученных на роботизированном телескопе NUTELLA-TAO, и рентгеновских данных телескопа XRT обсерватории Swift, в результате моделирования, получена оценка оптического и рентгеновского (в диапазоне 0.3 — 10 кэВ) поглощения на луче зрения в родительской галактике гамма-всплеска GRB 230328B. Соискатель провел обработку данных оптических наблюдений послесвечения гамма-всплеска GRB 230328B, полученных наблюдательной сетью IKI-GRB-FuN, а именно телескопами АЗТ-ЗЗИК Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН и Сантел-400 обсерватории ИСОН-Мульта.

Соискателем выполнен поиск оптического компонента гигантской вспышки магнитара в галактике M82, получившего обозначение GRB 231115A, с помощью реализованного им программного конвейера по поиску оптических

транзиентов методом вычитания изображений и найдено ограничение на блеск в фильтре R ($>19^m.3$) возможного оптического компонента этой вспышки.

Результаты, представленные в диссертации, согласованы с соавторами.

Публикации автора по теме диссертации

В рецензируемых изданиях

1. Chromatic Afterglow of GRB 200829A / N. S. Pankov [et al.] // *Astronomy Letters*. — 2023. — Mar. — Vol. 49, no. 3. — P. 81—109. — arXiv: 2308.02090 [astro-ph.HE].
2. GRB 231115A – a Magnetar Giant Flare in the M82 Galaxy / P. Y. Minaev [и др.] // *Astronomy Letters*. — 2024. — Янв. — Т. 50, № 1. — С. 1—24. — arXiv: 2402.08623 [astro-ph.HE].
3. EP240801a/XRF 240801B: An X-Ray Flash Detected by the Einstein Probe and the Implications of Its Multiband Afterglow / S.-Q. Jiang [и др.] // *ApJL*. — 2025. — Июль. — Т. 988, № 1. — С. L34. — arXiv: 2503.04306 [astro-ph.HE].
4. Discovery and analysis of afterglows from poorly localized GRBs with the Gravitational-wave Optical Transient Observer (GOTO) All-sky Survey / A. Kumar [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2025. — Дек. — Т. 544, № 2. — С. 1541—1587. — eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/544/2/1541/64486897/staf1689.pdf>. — URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/staf1689>.
5. Система автоматической обработки изображений для поиска оптических транзиентов / Н. С. Панков [и др.] // *Научные труды ИНАСАН*. — 2026. — Т. 5, № 1.
6. Earliest simultaneous multicolour optical observations of GRB 230328B: from 41 s to the host-galaxy identification / T. Komesch [и др.] // *MNRAS*. — 2026. — Окт. — Т. 552, № 1. — *stag1595*. — arXiv: 2606.04585 [astro-ph.HE].

7. Ахроматическое плато гамма-всплеска GRB 210610B – следствие работы магнетара или результат столкновения ударных волн? / Н. С. Панков [и др.] // Письма в Астрономический журнал. — 2026. — Т. 52, № 6. — С. 287–325.

В сборниках трудов конференций, препринтах и циркулярах

8. Pipeline for Detection of Transient Objects in Optical Surveys / N. Pankov [и др.] // Data Analytics and Management in Data Intensive Domains / под ред. A. Pozanenko [и др.]. — Cham : Springer International Publishing, 2022. — С. 104–134.
9. AWARE: Alert Watcher and Astronomical Rapid Explorer / N. Pankov [и др.] // Data Analytics and Management in Data Intensive Domains / под ред. J. Baixeries [и др.]. — Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. — С. 225–245.
10. GRB 200829A: optical observations, a light curve in R-filter / A. Pozanenko [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2020. — Сент. — Т. 28359. — С. 1.
11. GRB 210610B: CrAO/ZTSH optical observations (correction to the GCN circ. 30212) / N. Pankov [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — Июнь. — Т. 30213. — С. 1.
12. GRB 210610B: AbAO optical observations / N. Pankov [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — Июнь. — Т. 30243. — С. 1.
13. GRB 210610B: CrAO/ZTSH continued optical observations and light curve / N. Pankov [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — Июнь. — Т. 30245. — С. 1.
14. GRB 210610B: Sintesiz-Newton/CrAO optical observations / N. Pankov [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — Окт. — Т. 30988. — С. 1.

Прочие публикации автора

15. GRB 201015A: from seconds to months of optical monitoring and supernova discovery / S. Belkin [и др.] // *MNRAS*. — 2024. — Февр. — Т. 527, № 4. — С. 11507–11520. — arXiv: 2401.03579 [astro-ph.HE].

16. Application of Neural Networks to Searching for Optical Transients in Astronomical Images Using the Subtraction Method / E. Shekotiĥin [и др.] // Pattern Recognition and Image Analysis. — 2024. — Окт. — Т. 34. — С. 870–876.
17. Early photometric and spectroscopic observations of the extraordinarily bright INTEGRAL-detected GRB 221009A / R. Sanchez-Ramirez [и др.] // *A&A*. — 2024. — Дек. — Т. 692. — A3.
18. GOTO identification and broad-band modelling of the counterpart to the SVOM GRB 250818B / S. Belkin [и др.] // *MNRAS*. — 2026. — Авг. — Т. 550, № 2. — stag1193. — arXiv: 2602.16559 [astro-ph.HE].
19. A fast X-ray transient with chromatic flares: signatures of violent collisions induced by late-time central engine reactivation / S.-Y. Fu [и др.] // arXiv e-prints. — 2026. — Апр. — arXiv:2604.14341. — arXiv: 2604.14341 [astro-ph.HE].
20. X-rays breaking out of pre-explosion ejecta mark a supernova’s first light / W. Yuan [и др.] // arXiv e-prints. — 2026. — Июнь. — arXiv:2606.10014. — arXiv: 2606.10014 [astro-ph.HE].

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях:

- Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН (Москва: 2020, 2021, 2022, 2023)
- Международная конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва: 2023, 2024)
- Всероссийская конференция «Современные инструменты и методы в астрономии» (Нижний Архыз: 2023)
- Школа-семинар «Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике» (Москва: 2023)
- BRICS Astronomy Working Group (BAWG) (ЮАР: 2023, Казань: 2024)

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и 6 приложений. Полный объём диссертации составляет 222 страницы с 53 рисунками и 19 таблицами. Список литературы содержит 301 наименование.

Глава 1. Гамма-всплески и сопутствующие транзиенты

В данной главе будет подробно рассмотрена теоретическая база, лежащая в основе стандартной модели гамма-всплесков. Кратко рассмотрены физические механизмы работы центральной машины всплесков, классификация событий, геометрия релятивистских джетов, каноническая кривая блеска, связь GRB с сопутствующими транзиентами, такими как сверхновые и килоновые. При этом основной упор сделан на наблюдательные проявления.

1.1 Физическая модель гамма-всплеска

1.1.1 Проблема компактности

Одной из наиболее фундаментальных теоретических трудностей при построении моделей компактных источников высокоэнергетического излучения является так называемая «проблема компактности» (compactness problem). Рассмотрим источник гамма-излучения со светимостью $L \sim 10^{50-53}$ эрг с^{-1} и характерным временем переменности $\delta \sim 1$ мс. Из условия причинности следует, что размер излучающей области ограничен величиной $R \lesssim c\delta t$, т.е. $R \lesssim 3 \times 10^2$ км (на порядок больше размера нейтронной звезды) [60; 61].

При таких параметрах плотность фотонов в объеме источника становится чрезвычайно высокой. Если излучение является изотропным, то вероятность взаимодействия двух гамма-квантов с энергиями выше порога рождения электрон-позитронных пар ($\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$) становится очень велика. Оптическая толщина $\tau_{\gamma\gamma}$ для таких процессов может достигать значений $\sim 10^{10}-10^{15}$, что означает, что источник должен быть абсолютно непрозрачен для самого своего излучения [60]. Однако наблюдения показывают наличие в спектрах GRB фотонов с энергиями в сотни кэВ и даже ГэВ, что прямо противоречит выводу о высокой оптической толщине. Отсюда следует, что излучающее вещество должно двигаться к наблюдателю с ультрарелятивистскими скоростями. Пусть источник движется с Лоренц-фактором $\Gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$. В этом случае всту-

пают в силу два ключевых эффекта: эффект Доплера и растяжение времени и объема. Наблюдаемая энергия фотона E_{obs} связана с энергией в системе покоя источника E_{rest} соотношением $E_{obs} \approx \Gamma E_{rest}$. Следовательно, для того чтобы наблюдаемый фотон имел энергию E_{obs} , в системе покоя он должен иметь гораздо меньшую энергию, что значительно сокращает количество фотонов, способных участвовать в процессе рождения пар. Эффективный размер источника в системе наблюдателя увеличивается как Γ^2 ($R \sim \Gamma^2 c \delta t$), что существенно снижает плотность фотонов. Таким образом, если $\Gamma \gtrsim 100$, оптическая толщина $\tau_{\gamma\gamma}$ падает ниже единицы, и среда становится прозрачной для гамма-излучения, что позволяет высокоэнергетическим фотонам покинуть область источника [60; 61].

1.1.2 Модель огненного шара

В рамках модели «огненного шара» (fireball) [60] предполагается, что центральная машина выбрасывает вещество не однородным потоком, а в виде серии релятивистских оболочек (shells) с различными значениями Лоренц-фактора Γ_i . Если более поздняя оболочка движется быстрее, чем предыдущая ($\Gamma_{fast} > \Gamma_{slow}$), происходит их столкновение.

Такое столкновение порождает внутренние ударные волны (internal shocks), которые эффективно преобразуют кинетическую энергию относительного движения оболочек в тепловую энергию плазмы. В области ударной волны электроны ускоряются до релятивистских энергий ($\gamma_e \gg 1$), а магнитное поле усиливается. Основным механизмом диссипации энергии является синхротронное излучение электронов в магнитных полях. Спектр этого излучения в активной фазе обычно описывается функцией Бэнда (Band function) [62], которая представляет собой степенную функцию с экспоненциальным завалом.

Характерная частота синхротронного излучения в системе наблюдателя определяется как:

$$\nu_s \propto \Gamma \gamma_e^2 B \quad (1.1)$$

где B — напряженность магнитного поля. Данное выражение объясняет быструю переменность гамма-всплесков, так как временной профиль излучения напрямую отражает историю выбросов центральной машины.

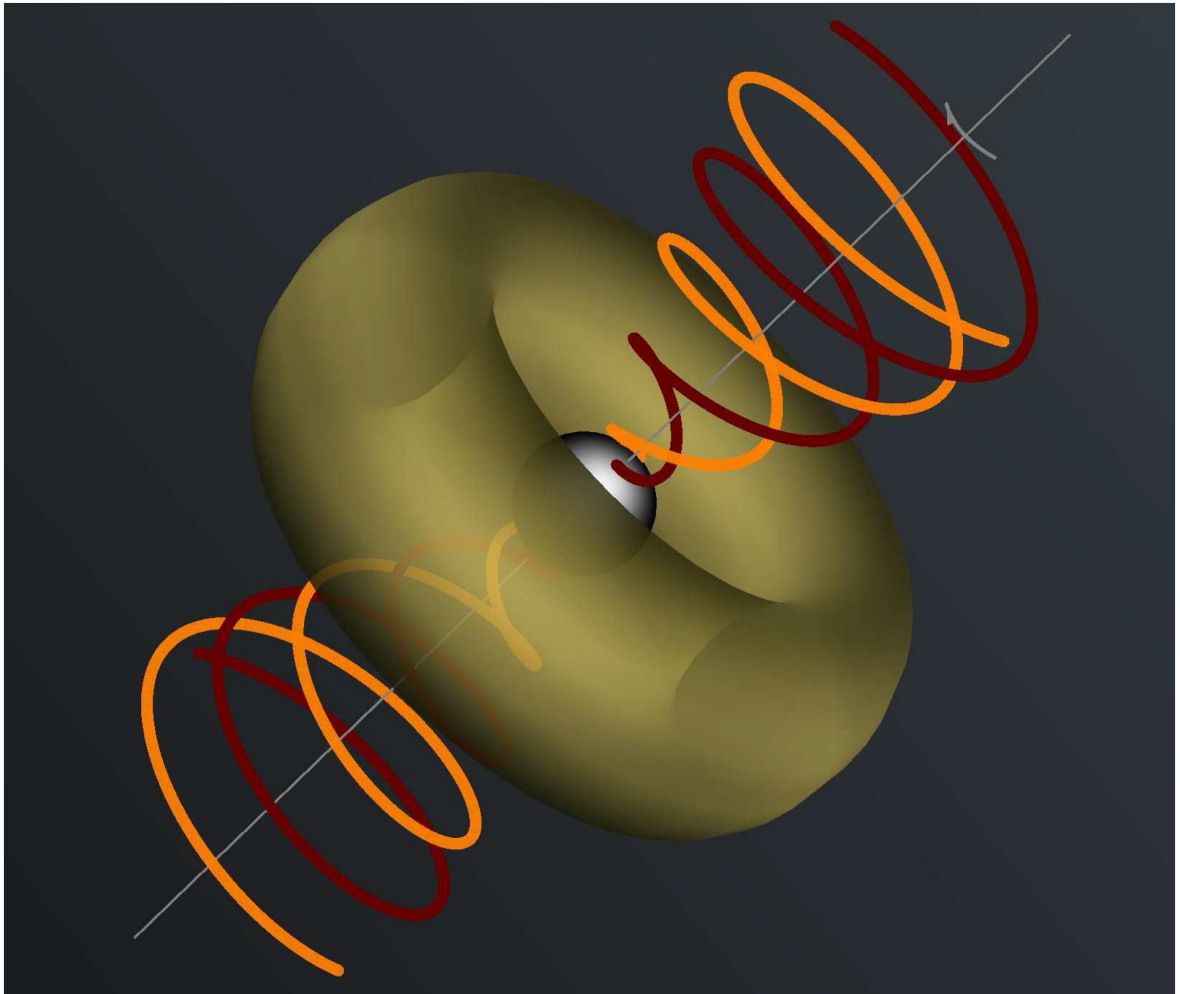


Рисунок 1.1 — Формирование джета в сценарии аккреции на ЧД. Джет формируется с помощью механизма BZ. Рисунок взят из работы [64].

1.1.3 Аккреция на черную дыру

В классическом сценарии в центре GRB находится компактный объект — черная дыра (ЧД) с массой нескольких солнечных масс. В случае коллапса массивной звезды (модель коллапсара) или слияния нейтронных звезд формируется гиперкритический аккреционный диск, через который вещество с огромной скоростью падает на ЧД. Энергия джета в таких системах может извлекаться через механизм Блэнфорда-Знаека (BZ) [63]. В случае Керровской ЧД вращательная энергия самой черной дыры может быть преобразована в электромагнитную энергию джета через взаимодействие магнитного поля с эргосферой ЧД. Схематично данный механизм изображен на рисунке 1.1

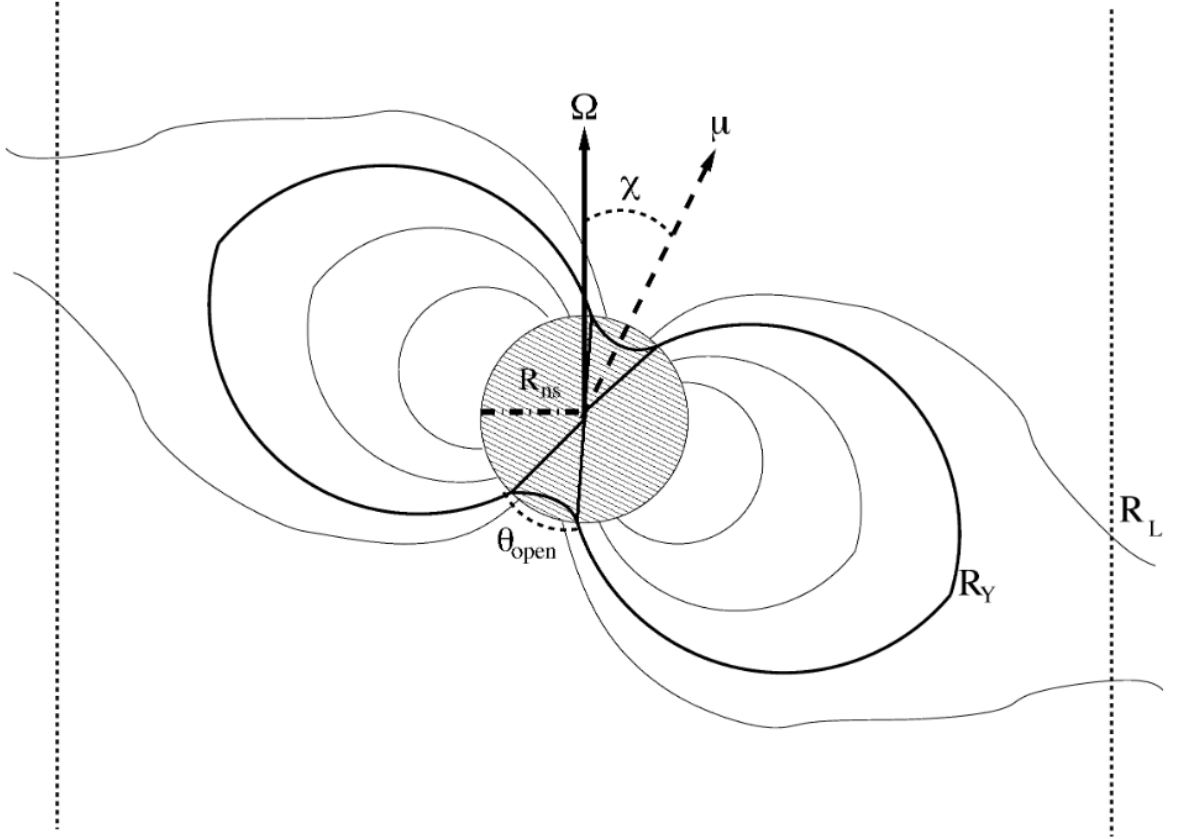


Рисунок 1.2 — Геометрия звездного ветра от протоманетара. Здесь, радиус нейтронной звезды $R_{NS} \approx 12$ км. μ — ось магнитного дипольного момента, χ — угол между осью вращения и магнитной осью, а Ω — угловая скорость вращения.

Рисунок взят из работы [68].

В работе [65] представлены результаты релятивистского МГД-моделирования и получены основные выражения для эффективности η_{jet} генерации джета через механизм BZ. При спине ЧД $a/M \rightarrow 1$ максимальная эффективность составляет около 100%.

1.1.4 Модель протоманетара

К качестве альтернативы аккреции на ЧД, рассматривается образование быстровращающейся, сильнозамагниченной нейтронной звезды — протоманетара ([66—68]), схематично представленного на рисунке 1.2.

В данной модели центральная машина представляет собой миллисекундный магнетар с магнитным полем $B \sim 10^{14}\text{--}10^{16}$ Гс. Основным источником энергии здесь выступает вращательная энергия нейтронной звезды. Потеря энергии происходит за счет дипольного излучения. Светимость такого источника L_{dip} описывается формулой:

$$L_{dip} \approx \frac{B^2 R^6 \Omega^4}{6c^3} \quad (1.2)$$

где, R — радиус нейтронной звезды, а Ω — угловая скорость вращения. Или в более применимом для анализа наблюдательных данных виде [67]:

$$L_{dip} \approx 1.0 \times 10^{49} \text{erg s}^{-1} B_{p,15}^2 P_{o,-3}^4 R_6^6 \quad (1.3)$$

Протомагнетар может поддерживать светимость на почти постоянном уровне в течение определенного времени, прежде чем скорость вращения Ω существенно снизится. Данный механизм теоретически объясняет возникновение фазы «плато» в кривых блеска послесвечения: непрерывная накачка энергии вращающейся нейтронной звездой в ударную волну компенсирует затухание послесвечения.

1.2 Классификация гамма-всплесков

1.2.1 Эмпирическая и физическая классификация

Исторически GRB делили на два класса по длительности T_{90} (время, за которое регистрируется 90% потока). Распределение T_{90} имеет выраженную бимодальность с разделением в районе 2 секунд [26; 27]. Однако, следует отметить случаи, когда классификация по T_{90} оказывается неоднозначной. В частности, зарегистрированы короткие GRB с выраженным продленным излучением (extended emission), которые по длительности напоминают LGRB, но по физической природе относятся к Типу I, например, GRB 060614 [69]. Также известны примеры LGRB, не имеющих ассоциации со сверхновыми, что ставит вопрос

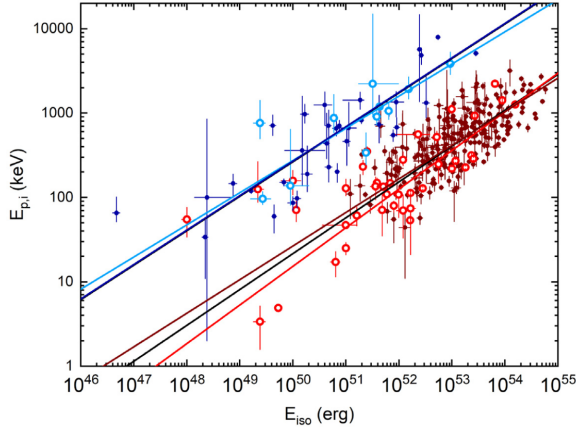
о существовании альтернативных каналов коллапса массивных звезд (например, прямой коллапс в черную дыру без выброса вещества). Примерами таких событий являются GRB 111005A [70] и GRB 060505 [71] – длинные GRB, не сопровождавшиеся вспышкой сверхновой.

В настоящее время в литературе принято выделять два физических типа всплесков:

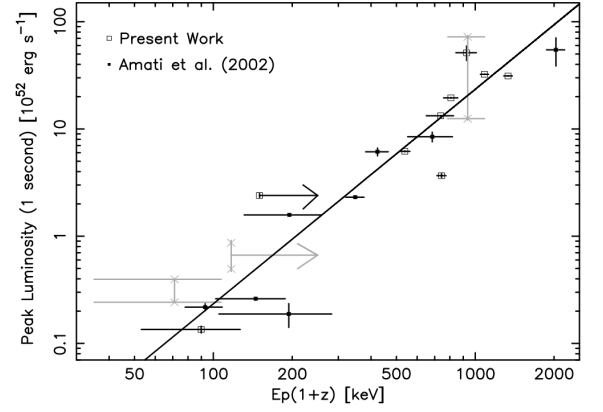
- **Тип I** – события, порождаемые слиянием двух компактных объектов (нейтронная звезда – нейтронная звезда, NS-NS, или нейтронная звезда – черная дыра, NS-BH). Эти всплески характеризуются короткой длительностью и жестким спектром излучения. Совместная регистрация гравитационных волн и электромагнитного сигнала в случае событий GW170817/GRB 170817A и GW190425/GRB 190425A подтвердила связь коротких GRB со слияниями компактных объектов.
- **Тип II («коллапсары»)** – события, возникающие в результате гравитационного коллапса ядра массивной звезды. Эти GRB характеризуются большей длительностью, более мягкими спектрами и тесной связью со сверхновыми типа Ic/Ic BL (broad-lined, т.е. с широкими линиями в спектре из-за большой скорости выброса $V \sim 10^3$ км с⁻¹).

1.2.2 Подклассы и спектральные зависимости

По-видимому, разнообразие наблюдаемых характеристик GRB связано с различными каналами коллапса и слияния, а также с углом наблюдения относительно оси джета. В итоге это приводит к выделению ряда подклассов гамма-всплесков: рентгеновские вспышки (X-ray Flashes, XRFs), рентгеновски-богатые GRB (X-ray Rich GRBs, XRRs) и малосветимые GRB (Low-Luminosity GRBs, LL-GRBs). XRFs и XRRs имеют спектральные характеристики, смещенные в сторону мягкого рентгеновского диапазона. Так XRFs характеризуются пиковыми энергиями $E_{\text{peak}} \lesssim 30$ кэВ, а XRRs – $30 \lesssim E_{\text{peak}} \lesssim 100$ кэВ [72]. Вероятно, они представляют собой классические LGRB, наблюдаемые под большим углом к оси джета или обладающие низкой Лоренц-фактором Γ . LL-GRBs характеризуется изотропной светимостью на несколько порядков ниже, чем у стандартных GRB (т.н. C-GRB) [73] – $L \sim 10^{50}$ erg s⁻¹. Существует гипотеза,



а) Диаграмма Амати. Связь E_{peak} с E_{iso} . Рисунок взят из [77].



б) Диаграмма Йонетоку. Связь E_{peak} с L_p . Рисунок взят из [76].

Рисунок 1.3 — Диаграммы классификации гамма-всплесков.

что LL-GRB порождаются не релятивистскими джетами, а ударными волнами, прорывающими оболочку звезды (shock breakout) [74].

Улучшение классификации GRB возможно за счет использования параметров энергетического спектра (например, пиковая энергия E_{peak}) и светимости, а также анализа послесвечения и поиска ассоциаций со сверхновыми, килоновыми и гравитационными волнами. В работах Амати и Йонетоку предложены диаграммы, позволяющие классифицировать GRB на основе спектральных свойств собственного излучения [75; 76].

Диаграмма Амати связывает пиковую энергию спектра E_{peak} с изотропной энергией E_{iso} , а диаграмма Йонетоку — с пиковой светимостью L_p (см. формулы 1.4).

$$\begin{aligned} E_{\text{iso}} &= \frac{4\pi D_L^2 F}{1+z} && \text{эрг} \\ L_p &= 10^{52.43} \times \left(\frac{E_{\text{peak}}}{335 \text{ keV}} \right)^{1.60} && \text{эрг с}^{-1} \end{aligned} \quad (1.4)$$

где, D_L — фотометрическое расстояние до источника в см, а z — соответствующее красное смещение.

В работе Минаева и Позаненко [77] рассмотрена выборка из 45 коротких и 275 длинных GRB и установлено, что оба типа всплесков подчиняются корреляции Амати ($E_{p,i} \propto E_{\text{iso}}^{0.4}$). Однако, в случае коротких всплесков линия корреляции проходит значительно выше, чем у длинных GRB. Поэтому с помощью данной диаграммы можно проводить классификацию всплесков. В той же работе [77] предложен новый метод классификации, который комбинирует в себе

параметры энергетического спектра $E_{p,i}$, E_{iso} с параметром длительности события $T_{90,i}$. Такой метод позволяет лучше разделить всплески на два типа, а также отделить гигантские вспышки магнетаров (soft gamma-repeaters, SGR) от коротких GRB.

1.3 Послесвечения гамма-всплесков

1.3.1 Внешние ударные волны

Релятивистский джет, запущенный центральной машиной гамма-всплеска, по мере движения начинает взаимодействовать с окружающей средой (СВМ): межзвездным газ и звездным ветром звезды-прародителя. В результате взаимодействия порождается внешняя ударная волна (external shock), состоящая из двух компонент: прямой ударной волны (forward shock, FS) и обратной ударной волны (reverse shock, RS). FS распространяется дальше в окружающую среду, разогревает ее и ускоряет частицы СВМ. Именно она ответственна за долгоживущее послесвечение в рентгеновском, оптическом и радиодиапазонах. RS движется внутрь самого джета, разогревая выброшенное вещество (ejecta). Она может породить яркую, но кратковременную оптическую вспышку (optical flash) в фазе раннего послесвечения (в течение первых 100 – 200 с).

1.3.2 Джеты в гамма-всплесках

Top-hat

Ранние исследования показали, что большинство кривых блеска послесвечения гамма-всплесков описываются простой моделью джета «top-hat» в рамках которой джет имеет строго определенный угол раскрытия θ_j , внутри

которого энергия E и Лоренц-фактор Γ распределены равномерно, а за пределами этого угла они равны нулю (выражение 1.5).

$$\begin{aligned} \frac{dE}{d\Omega} &= \begin{cases} E_0, & \theta \leq \theta_C \\ 0, & \theta > \theta_C \end{cases} \\ \frac{d\Gamma}{d\Omega} &= \begin{cases} \Gamma_0, & \theta \leq \theta_C \\ 0, & \theta > \theta_C \end{cases} \end{aligned} \quad (1.5)$$

где, θ – угол, отсчитанный от оси джета, θ_c – угол раскрытия джета. При этом присутствие в большой части случаев излома на кривых блеска объясняется коллимированностью излучения. По мере замедления джета пока Лоренц-фактор $\Gamma > 1/\theta$ с точки зрения наблюдателя излучающая поверхность еще не отличима от сферической. Однако, по мере все большего торможения ударной волны Лоренц-фактор становится равным $\Gamma_j b \sim 1/\theta$ и наблюдатель начинает видеть внешние границы джета. При этом дальнейшее уменьшение потока происходит быстрее. Данный эффект в литературе носит название «джет-брейк» (jet-break). Время излома в часах определяется следующим выражением [78; 79] (формула 1.6).

$$t_b \approx 6.2(E_{52}/n_1)^{1/3}(\theta_j/0.1)^{8/3} \quad (1.6)$$

где, E_{52} – изотропная энергия в единицах 10^{52} эрг, n_1 – плотность ISM в см^{-3} , θ_j – угол раскрытия джета. На практике t_b известная величина, определенная, например, из аппроксимации кривой блеска степенным законом с изломом, а неизвестен угол θ_b , который можно получить из формулы 1.6 путем простых математических преобразований и получить выражение 1.7 [80].

$$\theta_j \sim 0.161 \left(\frac{t_b}{1+z} \right)^{3/8} \left(\frac{\xi E_{52}}{n} \right)^{-1/8} \quad (1.7)$$

где $n = 1 \text{ см}^{-3}$, $\xi = 0.1$ – коэффициент преобразования кинетической энергии в излучение, а t_b выражено в сутках. Типичный угол θ_j для всплесков с джет-брейком составляет $\approx 2.5 \pm 1.0^\circ$ [81].

Поскольку джет-брейк зависит только от геометрии и динамики джета, он проявляется ахроматично. Это позволяет вычислить истинную энергию всплеска E_γ через изотропную энергию E_{iso} по формуле 1.8:

$$E_\gamma = E_{\text{iso}}(1 - \cos \theta_j) \approx E_{\text{iso}} \frac{\theta_j^2}{2} \quad (1.8)$$

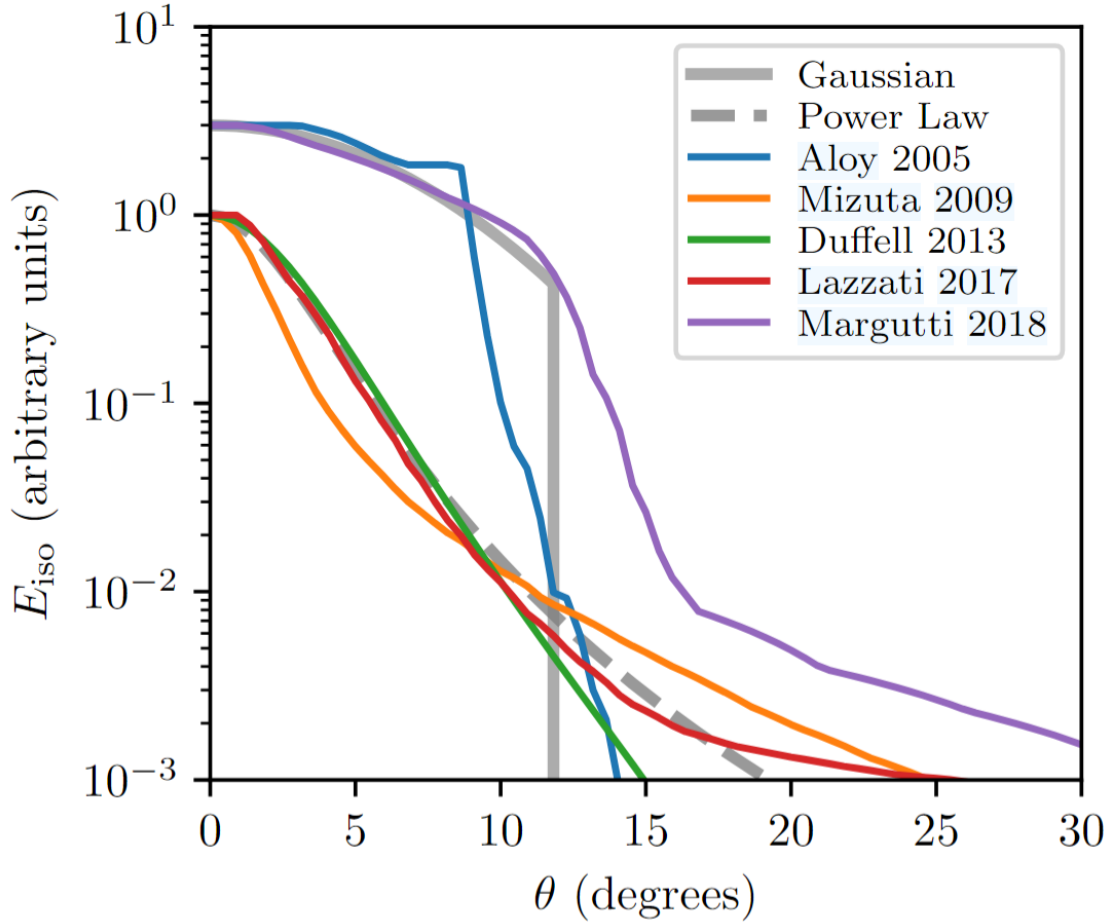


Рисунок 1.4 — Профили энергии моделей структурированных джетов. По вертикали – изотропная энергия в условных единицах, а по горизонтальной – угол, отложенный от оси джета. Сплошной серой линией показана Гауссова модель, а серой штрих-пунктирной линией – степенная модель. Рисунок взят из работы [82].

При характерном угле раскрытия джета $\theta_j \approx 2.5^\circ$ (0.044 рад) реальная энергия джета примерно в тысячу раз меньше, чем изотропная.

Структурированный джет

Реальные физические процессы в джете, вероятно, приводят к тому, что энергия и скорость распределены неравномерно. В моделях структурированных джетов параметры $E(\theta)$ и $\Gamma(\theta)$ являются функциями угла от оси джета.

Существуют разные модели структурированного джета, например, такие где профиль энергии заданы степенным законом или Гауссовым распределением [83] (см. выражение 1.9 и и рисунок 1.4).

$$\begin{aligned} E(\theta) &= E_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\theta}{\theta_c} \right)^2 \right\}, & \text{Гауссов профиль,} \\ E(\theta) &= E_0 \left(1 + \frac{1}{b} (\theta/\theta_c)^2 \right)^{-b/2}, & \text{степенной профиль.} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Это различие становится ключевым при наблюдении событий под углом к оси джета (т.н. off-axis события). В случае top-hat джета, если наблюдатель смотрит под углом $\theta_{obs} > \theta_j$, он практически не видит всплеска до момента сильного замедления волны. В случае структурированного джета наблюдатель видит излучение от «крыльев» (wings) джета с самого начала, хотя и с гораздо меньшей интенсивностью. На рисунке 1.6 представлено сравнение теоретических кривых блеска, построенных с помощью модели Гауссовского структурированного джета при разных углах раствора джета и при разном угле наблюдения для единственной частоты излучения $\nu_o = 10^{14}$ Гц (ближний ИК-диапазон).

Ярким примером стало событие GW170817/GRB 170817A. Анализ его послесвечения показал плавный рост потока в течение нескольких месяцев, что было бы невозможно в случае простого top-hat джета. На рисунке представлен результат аппроксимации многоволновой кривой блеска послесвечения GRB 170817A с помощью модели Гауссова структурированного джета из работы [83]. В моделировании дополнительно использована еще одна компонента для описания поздней рентгеновской кривой блеска в районе 1000 сут [84].

В результате моделирования [83] оптимальный угол раствора центральной части и «крыла» джета, а также угол наблюдения составили $\theta_c \approx 3.2^\circ$, $\theta_w \approx 23.7^\circ$ и $\theta_{obs} \approx 19.2^\circ$, соответственно.

Также можно заметить, что в теоретическом моделировании структурированного джета в зависимости от соотношения между углом наблюдения θ_{obs} и углами раствора джета θ_c , θ_w , получается три разных типа кривых блеска по своей морфологии (см. рисунок 1.8).

Из рисунка 1.8 следует, что наблюдатель, находящийся внутри конуса джета ($\theta_{obs} < \theta_c$, левая панель), видит классический ахроматичный джет (top-hat) с джет-брейком. Иначе, на кривой блеска наблюдается переходный участок между поздним и ранним послесвечением (до и после джет-брейка соответственно).

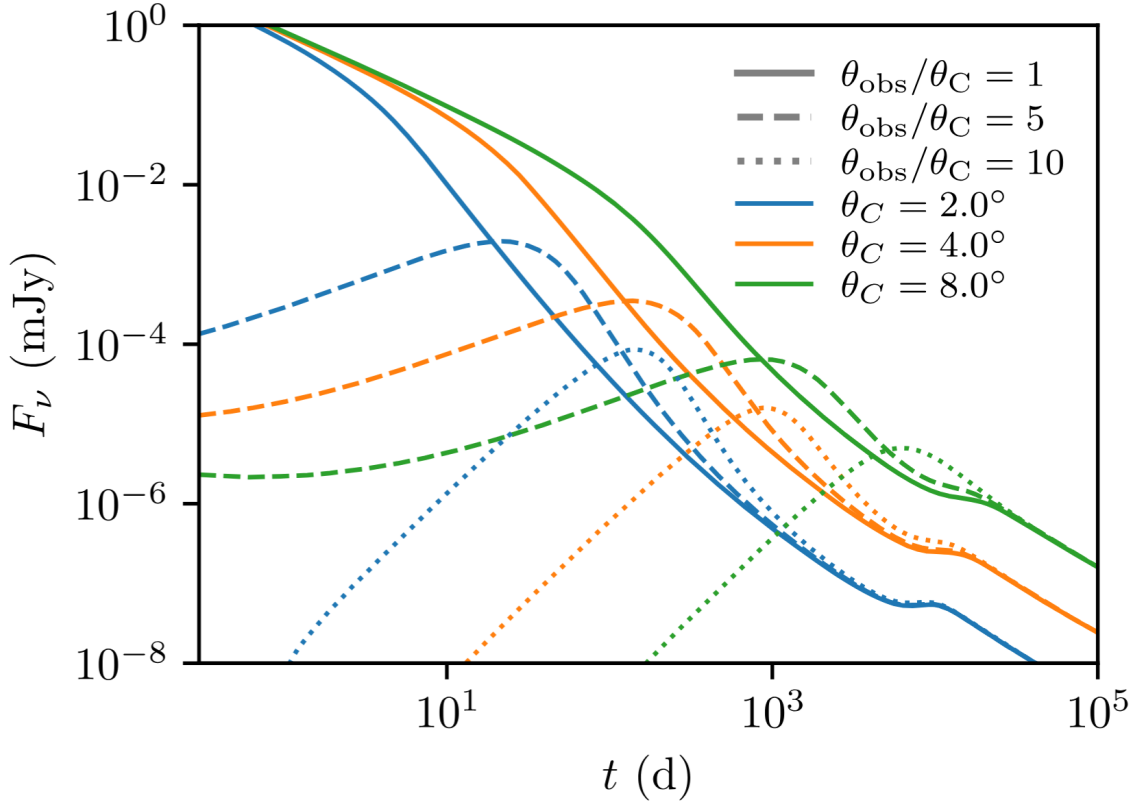


Рисунок 1.5 — Модельные кривые блеска послесвечения гамма-всплеска для частоты излучения $\nu_o = 10^{14}$ Гц при разных углах раствора джета θ_c для разных отношений угла наблюдения к углу θ_{obs}/θ_c , указанных в легенде в правом верхнем углу. В качестве модели использована модель Гауссовского структурированного джета со следующими параметрами: $\theta_{obs} = 19^\circ.4$, $E_o = 4.8 \times 10^{53}$ эрг, $\theta_w = 4.9\theta_c$, $n_0 = 2.4 \times 10^{-3}$ см $^{-3}$, $p = 2.13$, $\epsilon_e = 0.019$, $\epsilon_B = 0.00575$, $\xi = 1.0$, $d_L = 40$ Мпк, $z = 0.0973$. Рисунок взят из работы [82].

Причем в случае, когда $\theta_c < \theta_{obs} < \theta_w$ (средняя панель) этот переходный участок становится довольно пологим и напоминает фазу плато. А в случае $\theta_w > \theta_{obs}$ (третья панель на рисунке) кривая блеска напоминает по форме кривую блеска GRB 170817A.

Помимо аналитических подходов к описанию динамики послесвечения, значительный вклад в понимание физики джетов вносят методы численного моделирования. В частности, современное магнитогидродинамическое (МГД) моделирование позволяет детально исследовать процессы ускорения и коллимации релятивистских потоков (например, [85; 86]).

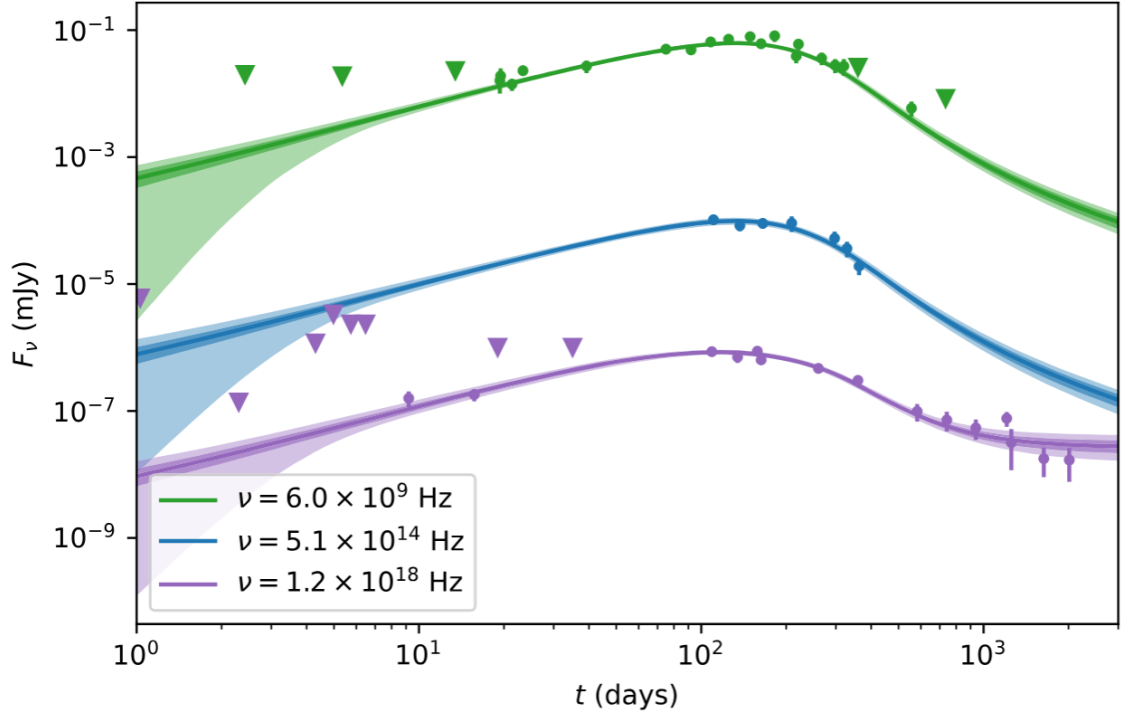


Рисунок 1.6 — Многоволновая кривая блеска GRB 170817A, аппроксимированная моделью Гауссовского структурированного джета и дополнительной рентгеновской компонентой на поздних временах (> 300 сут после триггера). Точками показаны измерения для соответствующих частот излучения. Рисунок взят из работы [83].

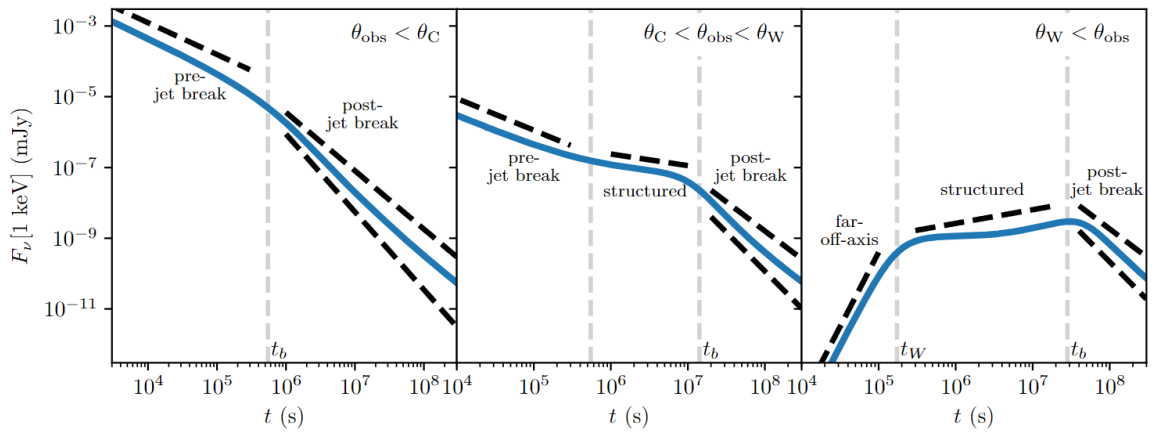


Рисунок 1.7 — Три возможных морфологических типа кривых блеска по результатам моделирования в зависимости от соотношения между углом наблюдения θ_{obs} и углами раствора джета θ_c , θ_w , указанным на легенде в правом верхнем углу на каждой из панелей. Рисунок взят из работы [82].

1.3.3 Спектральная эволюция

Частицы СВМ (в основном электроны) нагреваются на ударной волне и становятся релятивистскими. Они, сталкиваясь с локальными магнитными полями, ускоряются перпендикулярно линиям магнитного поля, что приводит к генерации синхротронного излучения. Спектр синхротронного излучения определяется несколькими характерными частотами: пиковой частотой ν_m (maximal frequency), частотой охлаждения ν_c (cooling frequency) или по-другому критической частотой и частотой самопоглощения (self-absorption frequency) ν_a . ν_m соответствует излучению электронов с минимальной энергией в распределении $N(E) \propto E^{-p}$, где p – показатель степенного спектра, ν_c – частота, выше которой электроны успевают полностью охладиться за время динамики системы, а ν_a – ниже которой плазма становится оптически непрозрачной.

По мере расширения джета и его замедления эти частоты эволюционируют. Для однородной среды $\nu_m \propto t^{-3/2}$. Это приводит к тому, что пик излучения постепенно смещается из гамма- и рентгеновского диапазонов в оптический и далее в радиодиапазон. Эволюция спектра делится на два режима: медленное и быстрое охлаждение. При этом в обоих режимах присутствует четыре степенных участка (см. рисунок).

В режиме быстрого охлаждения, характерном для ранней стадии послесвечения (первые секунды – минуты после всплеска), $\nu_m > \nu_c$, а в режиме медленного охлаждения (часы, дни после всплеска), наоборот, $\nu_c > \nu_m$. Спектральная плотность потока в зависимости от частоты неравенствами 1.10 в случае медленного охлаждения и неравенствами 1.11 в случае быстрого охлаждения [61; 87].

$$F_\nu = F_{\nu, max} \begin{cases} (\nu_a/\nu_m)^{1/3}(\nu/\nu_a)^2, & \nu < \nu_a \\ (\nu/\nu_m)^{1/3}, & \nu_a < \nu < \nu_m \\ (\nu/\nu_m)^{-(p-1)/2}, & \nu_m < \nu < \nu_c \\ (\nu_c/\nu_m)^{-(p-1)/2}(\nu/\nu_c)^{-p/2}, & \nu > \nu_c \end{cases} \quad (1.10)$$

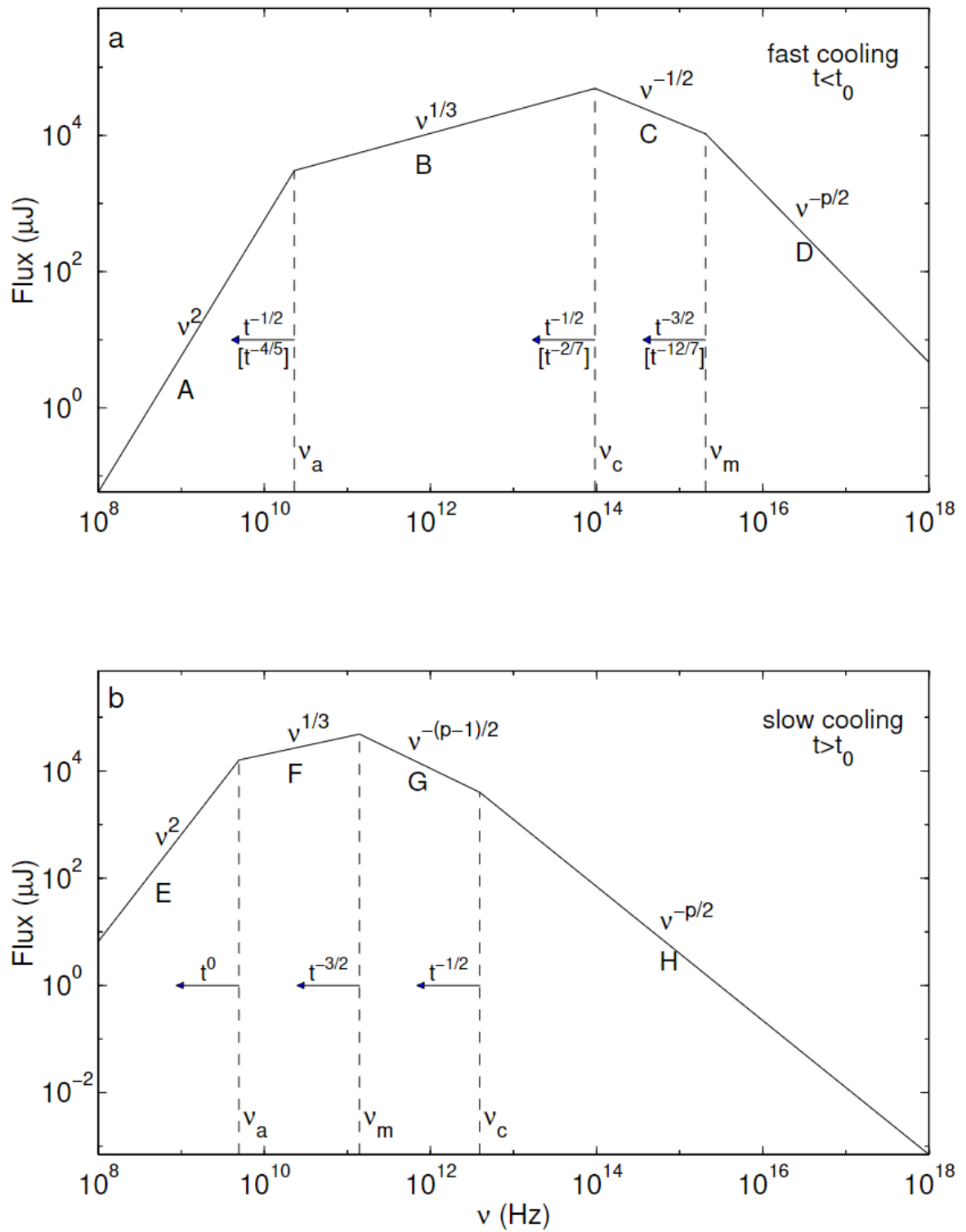


Рисунок 1.8 — Спектры синхротронного излучения. На верхней панели режим быстрого охлаждения, а на нижней панели режим медленного охлаждения. Рисунок взят из работы [87].

$$F_{\nu} = F_{\nu, max} \begin{cases} (\nu_a/\nu_c)^{1/3}(\nu/\nu_a)^2, & \nu < \nu_a \\ (\nu/\nu_m)^{1/3}, & \nu_a < \nu < \nu_c \\ (\nu/\nu_m)^{-(p-1)/2}, & \nu_c < \nu < \nu_m \\ (\nu_c/\nu_m)^{-(p-1)/2}(\nu/\nu_c)^{-p/2}, & \nu > \nu_m \end{cases} \quad (1.11)$$

где, а $F_{\nu, max}$ – максимальный наблюдаемый поток в спектре излучения. По результатам наблюдений характерное значение степенного индекса $p \sim 2.2 - 2.5$ [4; 6; 61], хотя у некоторых всплесков, например, у короткого GRB 250818B $p \simeq 1.67$ [18].

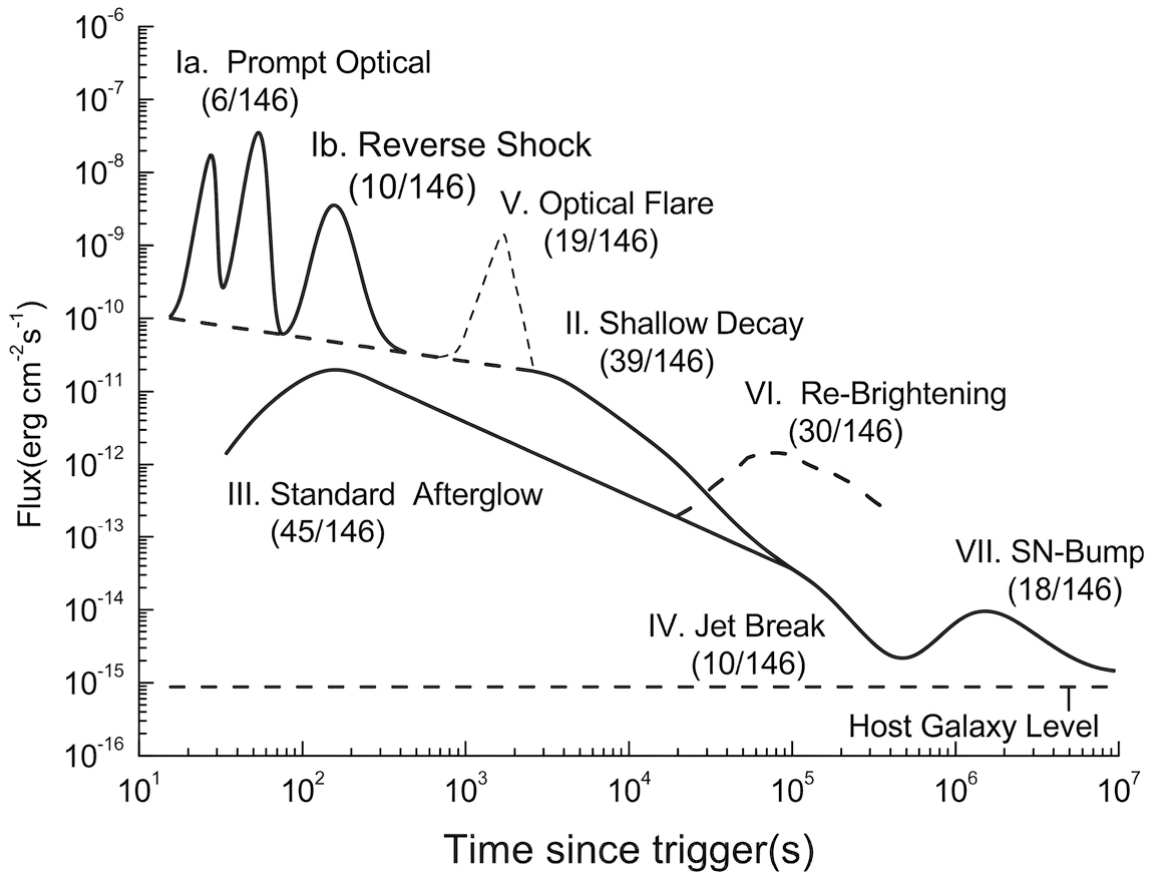
1.4 Каноническая кривая блеска: феноменология

Рассмотрим каноническую кривую блеска гамма-всплеска (рис. 1.9), которая описывает наблюдаемую морфологию потока от времени от активной фазы (собственного излучения всплеска) до выхода на уровень родительской галактики.

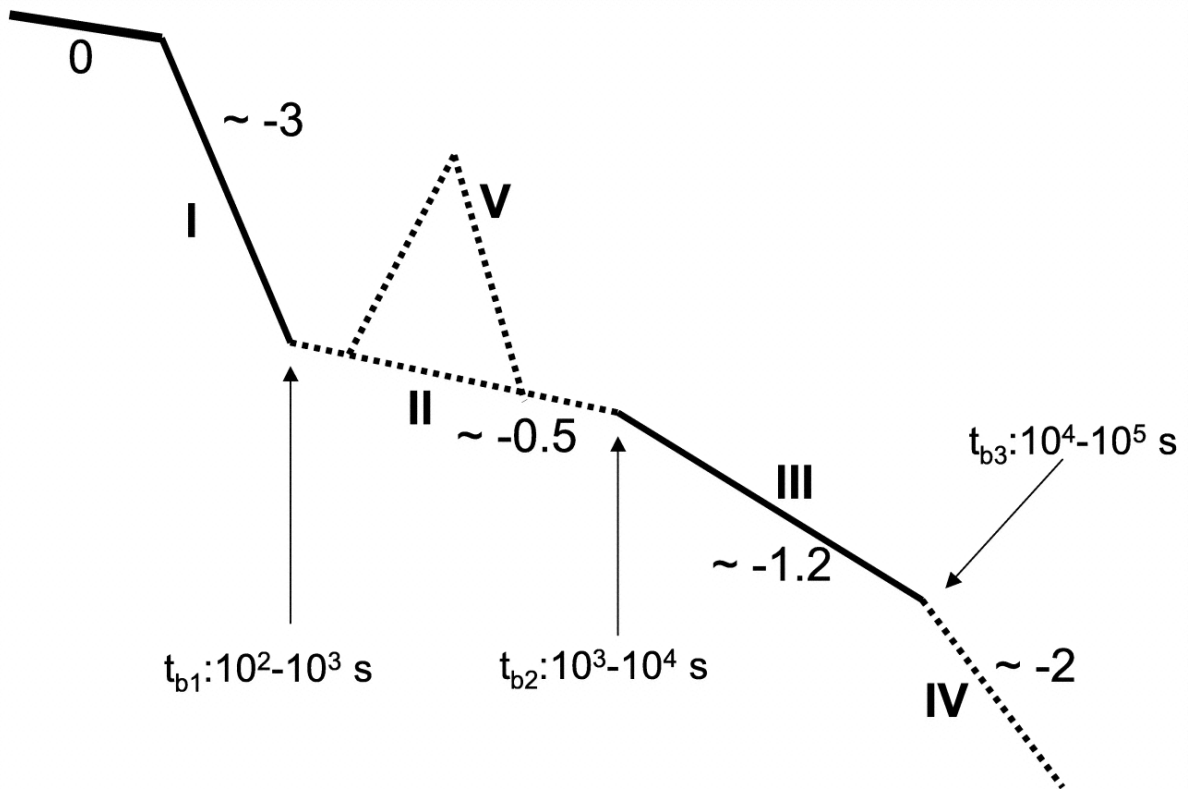
1.4.1 Активная фаза

В гамма-диапазоне кривая блеска гамма-всплеска в активной фазе представляет собой либо один яркий импульс с быстрым нарастанием фронта импульса и экспоненциальным затуханием (т.н., fast rise, exponential decay или FRED), либо многопульсовую структуру – суперпозицию большого числа импульсов [61; 89]. На рисунке 1.10 представлено разнообразие кривых блеска по данным данным SPI-ACS/INTEGRAL для всплесков GRB 031214, GRB 041212, GRB 100701 и GRB 160625B [28].

Важной особенностью активной фазы является возможность регистрации оптического излучения. Пионером в изучении этого процесса стал роботизированный телескоп ROTSE, который впервые задетектировал яркую оптическую



а) Оптическая кривая блеска. Рисунок взят из работы [88].



б) Рентгеновская кривая блеска. Рисунок взят из работы [39].

Рисунок 1.9 — Каноническая кривая блеска гамма-всплеска.

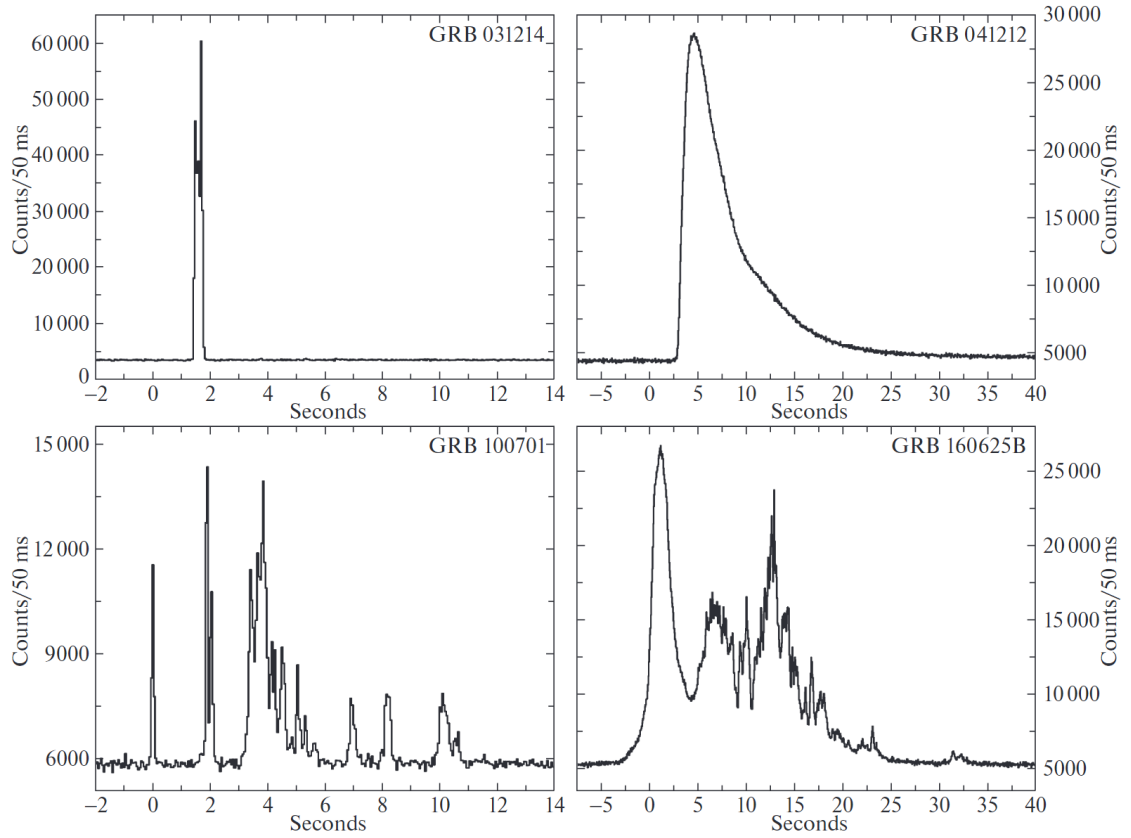


Рисунок 1.10 — Кривые блеска нескольких гамма-всплесков в гамма-диапазоне по данным SPI-ACS/INTEGRAL [28]. Рисунок взят из работы [89].

вспышку у всплеска GRB 990123 с блеском $m_V \sim 9$ уже через 22 с после регистрации гамма-излучения [90]. Однако регистрация таких вспышек крайне затруднена из-за временной задержки между срабатыванием гамма-детектора и началом наблюдений. Для современных роботизированных телескопов, таких как GOTO [57], MASTER [91], BOOTES [92] и NUTELLA [58], эта задержка составляет десятки секунд, в то время как для крупных обсерваторий она может достигать нескольких часов. Это делает практически невозможным фиксацию оптической фазы для большинства событий, особенно для коротких гамма-всплесков с длительностью менее 2 с [89]. Однако для длинных всплесков удастся получить довольно детальную оптическую кривую блеска активной фазы почти синхронно с гамма-излучением. Одним из примером, который наглядно демонстрирует такое синхронное наблюдение – гамма-всплеск GRB 080319B. Оптическая кривая активной фазы была получена телескопом REM с широкоугольной камерой TORTORA [93] и экспериментом PI OF THE SKY [94] синхронно с кривой в диапазоне 18 – 1160 кэВ по данным эксперимента KONUS-WIND (см. рисунок 1.11).

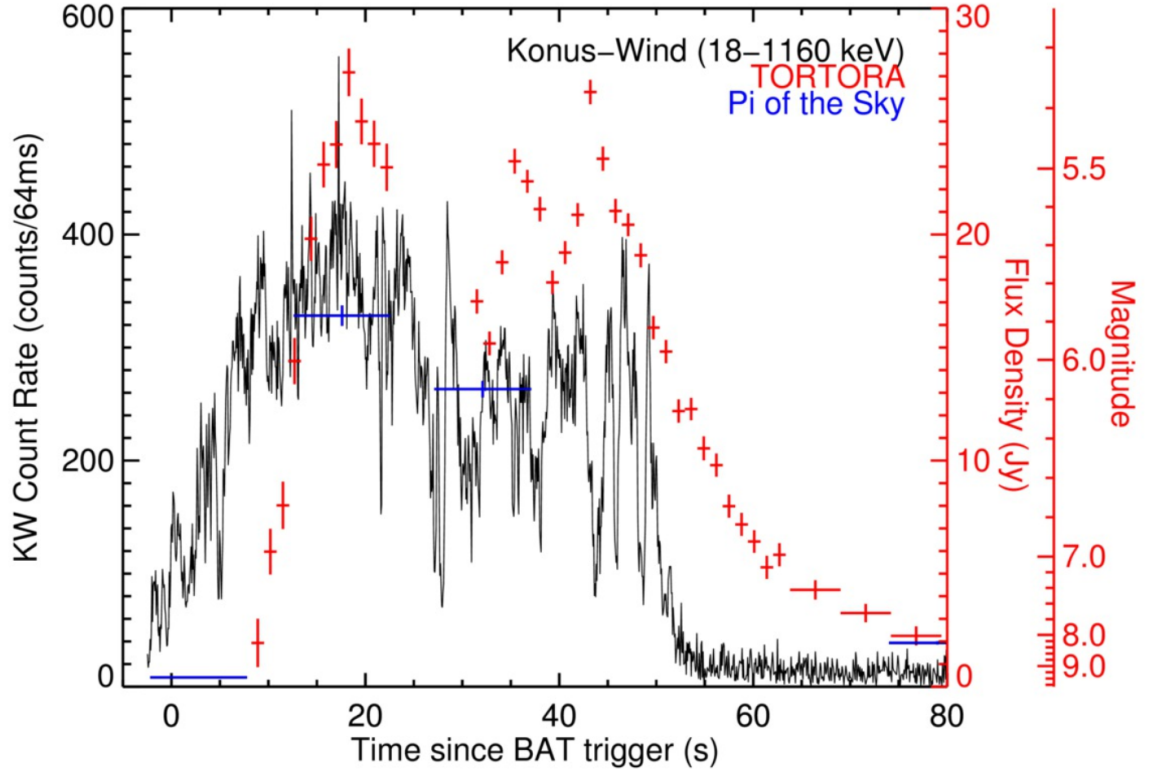


Рисунок 1.11 — Кривая блеска GRB 080319B по данным KONUS-WIND (черная кривая) в диапазоне 18 – 1160 кэВ и оптическим наблюдениям TORTORA (красные точки) и PI OF THE SKY (синие точки). Рисунок взят из работы [95].

Из рисунка 1.11 видно, что максимальный блеск источника был около $+5^{\text{m}}.5$, т.е. источник мог наблюдаться человеческим глазом, поэтому GRB 080319B получил название «naked eye GRB».

1.4.2 Фаза послесвечения

Из наблюдений кривая блеска рентгеновского и оптического послесвечения состоит из участков на которых поток спадает степенным образом по закону $F_{\nu} \propto t^{-\alpha}$ [21; 39; 88]. При этом на кривой блеска могут наблюдаться неоднородности в виде всплесков или плато [39; 88]. Данная фаза наблюдается у около 70% всплесков в рентгеновском диапазоне, а оптический компонент найден у примерно 40% событий [89].

Раннее послесвечение

Участок раннего послесвечения или крутого спада (steep decay) наблюдается сразу после активной фазы (порядка 100 – 1000 с после триггера). В рентгеновском диапазоне фаза обозначена римской цифрой I на рис. 1.9б, а в оптическом Ib на рис. 1.9а. Характерное значение показателя степенного наклона рентгеновской кривой блеска составляет $\alpha_{1,X} = 3 - 5$, а соответствующий спектральный индекс $\beta_{1,X} = 1 - 2$. По-видимому в рентгеновском диапазоне данная фаза является не послесвечением, а собственным излучением всплеска, наблюдаемого под большим углом к оси наблюдатель – источник. Тем временем в оптическом диапазоне может наблюдаться гладкий «горб» [88] – ранняя оптическая вспышка, вызванная обратной ударной волной, или пологий наклон с $\alpha_{1,o} = 0.2 - 1.2$ [96]. При этом в фазе раннего послесвечения в рентгеновском диапазоне могут проявляться вспышки, схожие с импульсами, формирующими активную фазу всплеска в гамма-диапазоне, если джет всплеска наблюдался под углом (например, $\theta_{obs} \lesssim 2\theta_j$ [97]).

Фаза плато

Кривая блеска в фазе плато уплощается вследствие накачки энергии из центральной машины – дипольного излучения быстровращающегося протоманетара или же медленных релятивистских оболочек. На практике кривая блеска плато имеет показатель наклона $\alpha_{plateau} \sim 0.0 - 0.5$. Данная фаза наблюдается в основном в рентгеновском диапазоне: по статистике у 30% – 40% рентгеновских послесвечений гамма-всплесков по данным наблюдений обсерватории Swift. Плато обычно длится $10^3 - 10^4$ с и затем сменяется характерным для послесвечения степенным затуханием потока с заметным изломом на кривой блеска в момент времени T_a . В работах [98; 99] найдена зависимость между светимостью в момент излома L_a и временем излом в система отсчета источника $T_{a,i} = T_a/(1+z)$, т.е. чем ярче всплеск, тем короче фаза плато. В рентгеновском диапазоне фаза плато обозначена римской цифрой II на рис. 1.9б, а соответ-

ствующая оптическая фаза на рис. 1.9а не выделена, но находится в интервале времен рентгеновского плато.

Позднее послесвечение

Данная фаза представляет собой излучение от прямой ударной волны, расширяющейся в СВМ или звездный ветер (т.е. согласно модели «огненного шара»). В англоязычной литературе данную фазу называют «нормальным» падением («normal» decay). На рис. 1.9б и 1.9а данная фаза обозначена цифрой III для рентгеновского и оптического диапазона, соответственно. Для позднего послесвечения характерный степенной индекс составляет $\alpha_{2,X} \sim 1.2$ в рентгеновском и $\alpha_{2,o} \sim 1.0$ в оптическом диапазонах. Примерно на 10^5 с на кривой блеска может образоваться излом, вызванный «джет-брейком» (обычно происходит синхронно в рентгеновском и оптическом диапазонах). После излома поток излучения синхронно спадает по более крутому закону с показателем $\alpha_3 \gtrsim 2.0$.

Сверхновая (килоновая)

На поздних стадиях эволюции послесвечения (через несколько дней или недель в системе покоя) в оптическом и ИК-диапазонах может наблюдаться рост потока (т.н. bump). Данная фаза отмечена цифрой VII на рис. 1.9а. Для длинных GRB это соответствует вспышке сверхновой типа Ic-BL. В случае коротких GRB аналогичный компонент проявляется в виде килоновой. Профиль СН на кривых блеска описывают либо простой параболлой для определения время пика излучения T_{max} и ширины профиля на полувысоте (FWHM), либо эмпирической функцией Базины следующего вида (выражение 1.12) [100].

$$F_{\nu}^{SN}(t) = C \frac{\exp\left\{-\frac{t-t_0}{\tau_{fall}}\right\}}{1 + \exp\left\{-\frac{t-t_0}{\tau_{rise}}\right\}} + D \quad (1.12)$$

где, τ_{rise} и τ_{fall} – время нарастания и спада блеска СН, соответственно, C – мультипликативный коэффициент, а D – аддитивная добавка.

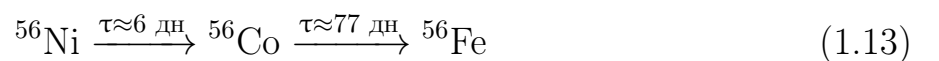
Уровень родительской галактики

На самых поздних этапах наблюдений (в зависимости от яркости галактики и послесвечения от нескольких дней до нескольких суток или месяцев) поток от послесвечения падает на примерно постоянный уровень, соответствующий потоку от родительской галактики всплеска (отмечен горизонтальной штриховой линией на рис. 1.9а). Измерение уровня родительской галактики позволяет точно вычислить поток от самого транзиента, вычтя вклад галактики из общего потока ОТ+галактика. Смещение (offset) всплеска относительно центра галактики дает важную информацию о динамике прародителей: например, значительные смещения для SGRB подтверждают гипотезу о «пинках» (kicks), которые придают двойным системам высокую скорость при рождении нейтронных звезд во время ассиметричного коллапса сверхновых.

1.5 Сопутствующие транзиенты

1.5.1 Сверхновые (SN)

Как уже было сказано в предыдущих разделах, СН проявляется на оптических кривых блеска длинных гамма-всплеска фотометрически через 10–20 дней после всплеска как повышение потока (фаза VII на рис. 1.9а). Кривая блеска СН быстро растет до максимума (экспоненциально), который в зависимости от яркости СН выглядит как «горб» или плато [89]. Затем происходит экспоненциальное спадение потока, более медленное чем рост, из-за высвечивания в результате радиоактивного распада:



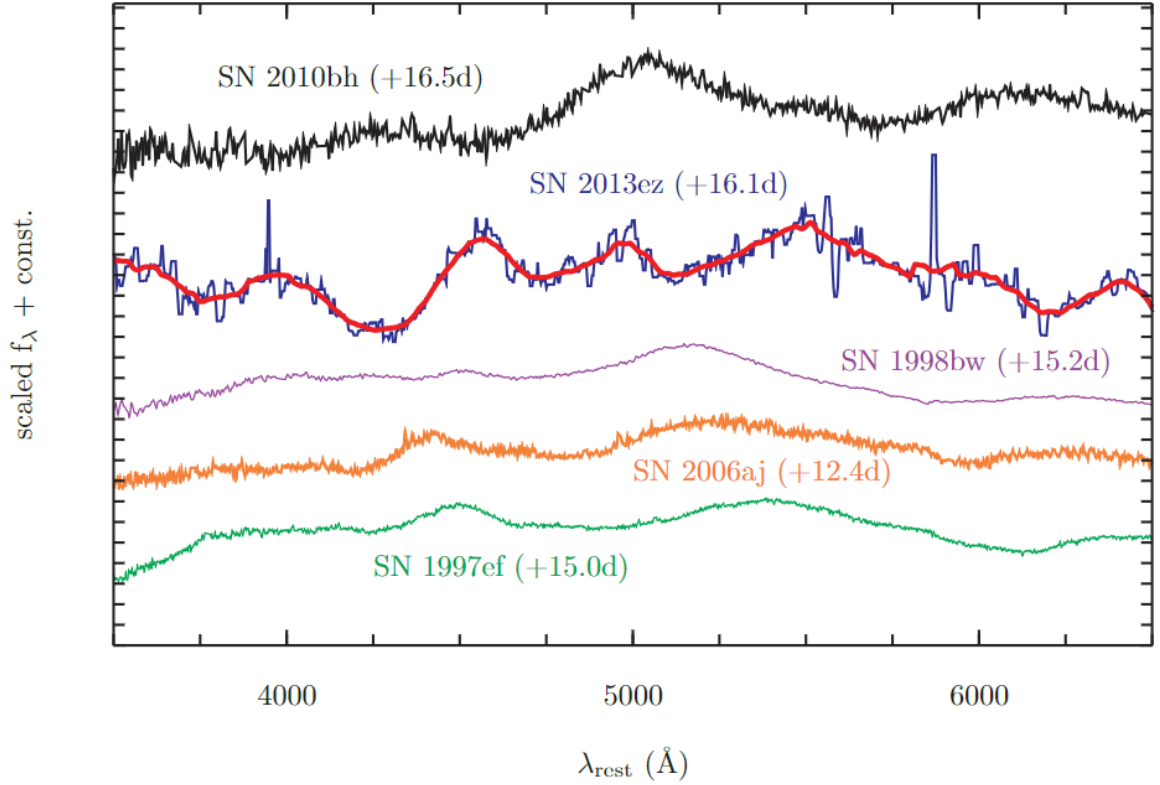


Рисунок 1.12 — Сверху вниз – спектры сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками: SN 2010bh, SN 2013ez, SN 199bw, SN 2006aj и SN 1997ef, полученные на примерное одинаковую эпоху. Рисунок взят из работы [107].

Светимость СН в максимуме связана с запасом энергии при распаде радиоактивных ^{56}Ni и ^{56}Co , т.н. законом Арнетта [101]. По расчетам, в случае SN 1998bw масса синтезированного ^{56}Ni была порядка $\sim 0.5 M_{\odot}$ [102]. Отметим, что SN 1998bw и SN 2003dh [103] остаются одними из самых ярких сверхновых, ассоциированных с GRB. У обоих перечисленных СН энерговыделение по оценкам составило $> 10^{52}$ эрг. В 1998 г. для подобных СН Пачинским был введен специальный термин «гиперновая» (hypernova) [104; 105].

Динамика кривой блеска СН, сопровождается спектральной эволюцией: появляются широкие линии в спектре (например, ИК-триплет CaII, OI, FeII) [89]. Широкие линии свидетельствуют об экстремально высоких скоростях расширения выброса $v > 20\,000 \text{ км с}^{-1}$ ($\sim 0.1c$) (например, [106]). Характерный спектр сверхновой типа Ic-BL, ассоциированной с гамма-всплеском представлен на рисунке 1.12.

В многоцветных наблюдениях СН можно заметить, что максимум в синих фотометрических полосах происходит быстрее, чем в красных, что свидетель-

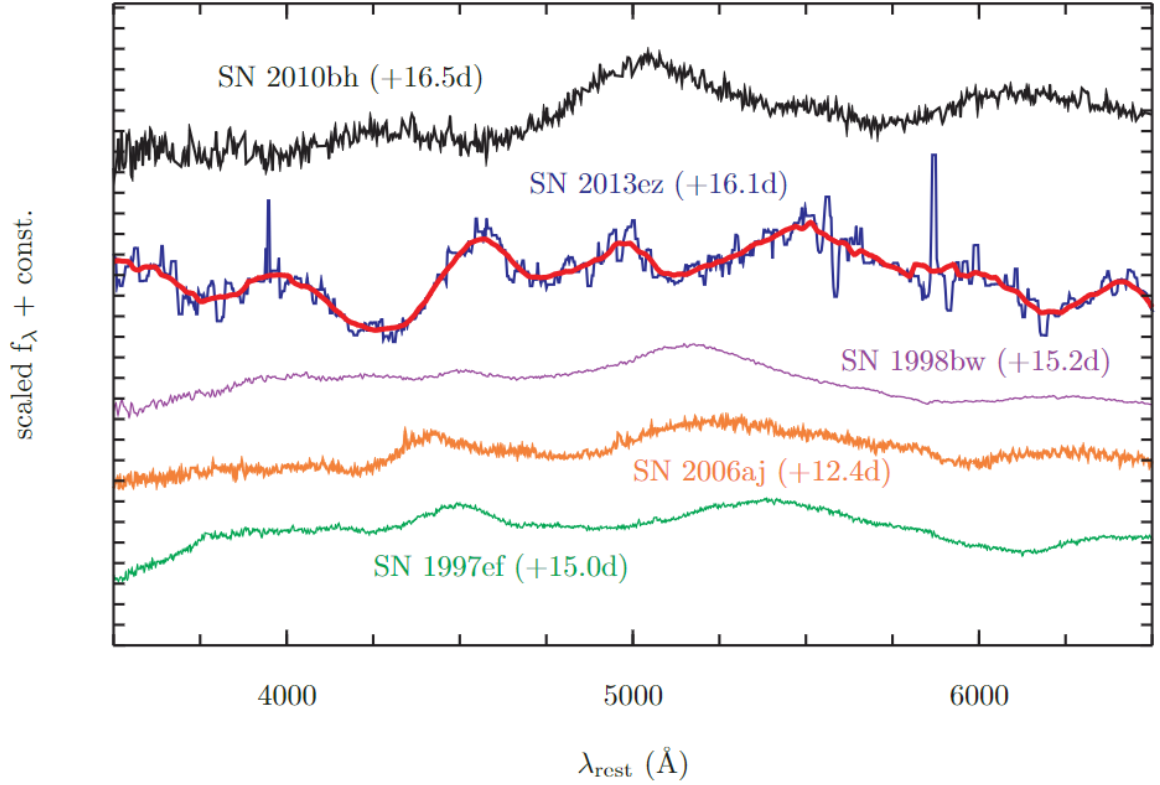


Рисунок 1.13 — Трехцветная кривая блеска SN 2006aj/XRF 060218. Видно, что максимум в самом синем фильтре наступает быстрее, чем в более красных.

Рисунок взят из работы [108].

ствует о расширяющейся фотосфере [89] (например, см. трехцветную кривую блеска SN 2006aj/XRF 060218 на рис. 1.13).

Моделирование кривых блеска СН Ic, ассоциированных с GRB осуществляют, например, следующими методами [89]: с помощью шаблона SN 199bw (т.к. считается, что форма болометрических кривых блеска отличается только сжатием по светимости и растяжением по оси времени) [107], а также численными МГД кодами, например STELLA [109; 110].

Количество обнаруженных СН-GRB на 2024 г. составляет всего около 50 шт., т.е. около 0.4% от всех зарегистрированных гамма-всплесков из-за эффектов селекции [111]. Долгое время самой далекой сверхновой, ассоциированной с гамма-всплеском, оставалась SN 2002lt/GRB 021211 на красном смещении $z = 1.006$ [112]. Более далекие СН не удастся зафиксировать, т.к. они становятся слишком тусклыми для обнаружения в видимом диапазоне. При этом у очень яркого гамма-всплеска GRB 250702B ($E_{\text{iso}} \sim 10^{54}$ эрг) на $z = 1.036$ СН обнаружена не была [113]. Однако, с помощью телескопа JWST [114] была найдена самая далекая СН-GRB – SN2024aihh от XRF240801a (EP240801a) [115]. Она находи-

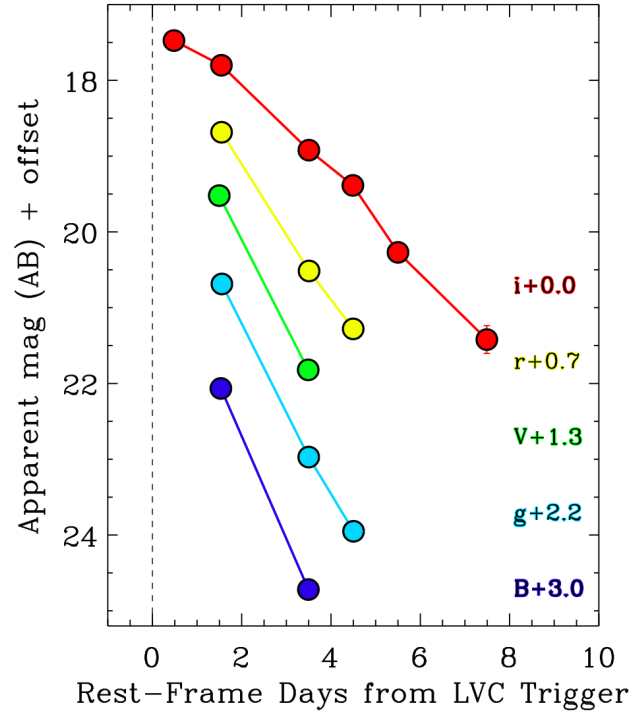
лась на спектроскопическом красном смещении $z = 1.67$. Есть и гораздо более далекое событие, которое может быть СН-GRB от всплеска GRB 250314A у которого спектроскопическое красное смещение $z \approx 7.3$ [116]. Однако, обнаружение СН было только фотометрическим и основан на малом количестве наблюдений.

SN 2026fgk – самая последняя на текущий момент из найденных СН-GRB [117], находилась на $z = 0.153$. Каждое фотометрическое и спектроскопическое обнаружение СН-GRB позволит расширить скудную статистику по данному типу событий. Расширений выборки возможно за счет наблюдений телескопом JWST в ИК-диапазоне далеких СН, которые невозможно обнаружить в оптическом диапазоне.

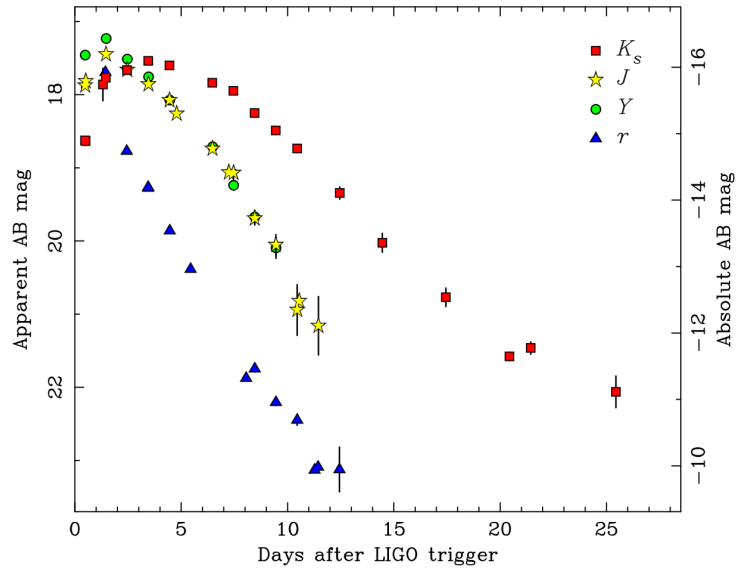
1.5.2 Килоновые (KN)

В случае коротких GRB сопутствующим транзиентом выступает килоновая. Она возникает при слиянии двух нейтронных звезд, когда часть богатого нейтронами вещества выбрасывается из системы. В этом веществе происходит нуклеосинтез тяжелых элементов (тяжелее железа) по r-процессу (rapid neutron capture). Радиоактивный распад этих тяжелых элементов нагревает выброс, который затем излучает в оптическом и ИК-диапазонах. Теоретически такие события были предсказаны еще в работах [118–120], а механизм синтеза тяжелых элементов в работе [121]. Килоновые, предсказанные теоретически, наблюдались фотометрически по крайней мере в 12 случаях [122], например, для GRB 130603B [123; 124], GRB 160821B [125], GRB 200522A [126]. Однако, до обнаружения GW170817/AT2017gfo статистика наблюдений KN была скудной и строилась по нескольким фотометрическим точкам – превышениям над степенным падением послесвечения на 1 – 2 сут. после регистрации всплеска. Именно в случае AT2017gfo удалось построить многоцветную кривую блеска с хорошим покрытием, например, в одних из ранних работ [47; 127] (кривые блеска показаны на рис.).

Широкополосные спектры (SED), полученные из многоцветных фотометрических наблюдений [47; 127] показывают цветовую эволюцию от синего к красному – следствие быстрого охлаждения, расширяющейся фотосферы из выброшенного в ходе слияния вещества. Моделирование спектров оптических



а) Кривая блеска по данным наблюдений телескопами сети Swope Supernova Survey. Рисунок взят из работы [47].



б) Кривая блеска по данным наблюдений телескопами HST, VLT, VISTA, NOT. Рисунок из работы [127].

Рисунок 1.14 — Оптические/ИК кривые блеска AT2017gfo.

и ИК спектров показало наличие двух компонент излучения: голубой и прозрачной с долей электронов $Y_e \gtrsim 0.25$ (из полюсов) и красной, малопрозрачной ($Y_e \lesssim 0.2$) компоненты из аккреционного диска, где много тяжелых элементов (в том числе лантаноидов) [127; 128].

В прошедшем цикле О4 было зарегистрировано всего два события слияния нейтронной звезды и черной дыры GW230518 и GW230529 в начале цикла [129]. В работе [130] был оценен темп образования двойных систем в локальной Вселенной на основе каталога событий GWTC-4.0. Оценки составили $8.8 - 250 \text{ Гпк}^{-3} \text{ год}^{-1}$ для событий BNS и $9.3 - 86 \text{ Гпк}^{-3} \text{ год}^{-1}$ для NSBH. С учетом максимальной чувствительности детекторов LIGO $\sim 150 \text{ Мпк}$ к слияниям нейтронных звезд, ожидаемая вероятность регистрации таких событий составляет от 0.12 до 3.5 событий в год. Возможно, это объясняет, что за все время работы детекторов LVK не было обнаружено событий подобных AT2017gfo. Поэтому открытие «новой AT2017gfo» существенно увеличит выборку по данному типу объектов. На октябрь 2026 г. запланирован т.н. промежуточный цикл наблюдений LVK IR1. Максимальное расстояние регистрации событий BNS возрастет: со 150-170 Мпк до 160-180 Мпк¹, т.е. ожидаемая вероятность регистрации BNS практически не изменится.

1.6 Родительские галактики

Первое обнаружение родительской галактики было осуществлено в наблюдениях поля GRB 970228 [131]. В последующих наблюдениях за гамма-всплесками родительские галактики открыли в примерно 60% случаев у коротких событий [132], в то время как у длинных событий в примерно 80% случаев [133]. Красное смещение родительских галактик GRB варьируется от $z = 0.0085$ у GRB 980425 [134] до $z = 6.782$ у GRB 240218A [135]. Красное смещение родительских галактик гамма-всплесков с высокой точностью (доли %) определяют спектроскопически у достаточно ярких (до 24^m) и не очень далеких галактик ($z \lesssim 1$). Однако часто спектроскопические наблюдения невозможны (т.к. требуют гораздо большей апертуры телескопов – порядка 5 – 15 м), поэтому выполняют широкополосные наблюдения как минимум в 3 достаточно

¹<https://observing.docs.ligo.org/plan/>

разнесенных полосах (например, grz) телескопами с апертурой 1 – 3.5 м и получают спектральное распределение энергии (SED – по сути спектр очень низкого разрешения). Затем SED подгоняют под уже готовые шаблонные спектры галактик, относя их на разные z (методика описана в работе [136]). Похожая методика основанная на совместной подгонке оптического SED и квазисинхронного рентгеновского спектра послесвечения моделью поглощенного степенного (или степенного с изломом) спектра, применена в работе [137]. В данном случае варьируя z , происходит изменения параметров поглощения в родительской галактике и наклона спектра. Оценки фотометрического красного смещения по методам [136; 137] существенно менее точны оценок спектроскопического z , при этом систематическая ошибка методов не изучена.

По наблюдениям обсерваторий Swift и ВЕРРО-SAX отмечено, что большинство длинных всплесков принадлежат голубым звездообразующим галактикам раннего типа. Высокий темп звездообразования (star-formation rate, SFR) в таких галактиках указывает на связь LGRB с популяцией молодых массивных звезд, время жизни которых ограничено 10^7 – 10^8 лет. При этом важно отметить низкую металличность (Z) родительских галактик LGRB по сравнению со средними показателями массивных звездообразующих галактик SN Ic без гамма-всплесков (например, [138]). С физической точки зрения это обусловлено тем, что при низкой металличности потери массы через звездный ветер минимизируются, что позволяет ядру массивной звезды сохранить достаточный угловой момент для формирования аккреционного диска/тора вокруг новорожденной черной дыры (или протомagnetара) и запуска релятивистского джета. При этом родительские галактики в которых происходят длинные GRB меньше, чем галактики поля того же типа, по крайней мере в диапазоне красных смещений $z < 2$ [139].

Напротив, короткие GRB демонстрируют гораздо более разнообразную популяцию родительских галактик. Они обнаруживаются как в поздних спиральных (реже), так и в ранних эллиптических галактиках (чаще), где процессы звездообразования давно прекратились [61]. Проекционное расстояние от центра родительской галактики у коротких всплесков в среднем в 5 раз больше, чем у длинных (например, [89; 132; 140]). Вышеперечисленные факты свидетельствует о том, что предшественники SGRB – компактные двойные системы (NS-NS или NS-BH), которые обладают значительным временем слияния 10^8 – 10^9 лет [61].

1.7 Выводы по главе

В данной главе был проведен обзор теоретических основ и наблюдательных характеристик космических гамма-всплесков и сопутствующих оптических транзиентов для формирования целостной физической картины данных объектов. Главные выводы следующие:

- Гамма-всплески – компактные ультрарелятивистские источники излучения с огромной светимостью в гамма-диапазоне 10 кэВ – 1 МэВ. Самые яркие в изотропном эквиваленте излучают 10^{54} эрг. При учете коллимации джета, энергетика становится примерно на два порядка ниже – сравнимо с самыми яркими СН.
- Механизмы аккреции на черную дыру (в частности, механизм «вытягивания» энергии из вращающейся ЧД – механизм Блэнфорда-Знаека) и энергия вращения протомagnetаров способны обеспечить необходимую светимость всплесков.
- Модель протомagnetара естественным образом объясняет происхождение фазы «плато» на кривых блеска послесвечений гамма-всплесков за счет дипольного излучения.
- Морфология кривой блеска зависит от угла наблюдения θ_{obs} . Так, если θ_{obs} значительно больше угла растора джета, то излучение джета на ранней стадии будет подавлено (например, случай события GW170817/GRB170817A/AT2017gfo [46; 82; 83]).
- Источниками коротких GRB являются слияния компактных двойных систем.
- Источниками длинных GRB является коллапс ядер массивных быстро вращающихся звезд.
- Длинные гамма-всплески преимущественно возникают в молодых голубых галактиках с активным звездообразованием, в областях с металличностью меньше солнечной.
- Короткие гамма-всплески возникают в основном в старых эллиптических галактиках в которых по статистике ожидается больше двойных систем НЗ-НЗ или НЗ-ЧД.
- Каноническая кривая блеска гамма-всплеска состоит из четырех основных фаз: активной, послесвечения, сверхновой или килоновой и уровень

родительской галактики. Наиболее успешно в рентгеновском (70% случаев) и оптическом (40% случаев) диапазонах удастся зарегистрировать фазу послесвечения.

- Короткие гамма-всплески ассоциируют с килоновыми – транзиентами, образующимися двойной компактной системы BNS или NSBH, а длинные GRB со сверхновыми типа Ic BL, в том числе, т.н. гиперновыми (очень яркими СН, со светимостями $\sim 10^{52}$ эрг с^{-1}). Хорошо изучена была только килоновая AT2017gfo от слияния GW170817, зарегистрированного детекторами LVK. В цикле наблюдений О4 было обнаружено только два слияния NSBH для которых не нашли ЭМ-компонент. Малое количество обнаруженных слияний NSBH и BNS объясняется малой ожидаемой вероятностью регистрации таких событий: от 0.12 до 3.5 событий в год.
- На текущий момент найдено всего около 50 СН (менее 1% от числа гамма-всплесков), ассоциированных с GRB. При этом практически все находятся на красном смещении $\lesssim 1.0$ что связано с селективными эффектами – СН становится тусклой для обнаружения фотометрически, а характерные линии смещаются в ИК-часть спектра. С помощью дальнейших наблюдений на телескопе JWST, по-видимому, удастся увеличить выборку далеких SN-GRB.

Теоретический базис, изложенный здесь, является необходимым условием для анализа реальных наблюдательных данных, которые позволили получить результаты, обсуждаемые в данной диссертации.

Глава 2. Планирование наблюдений оптических транзиентов

В данной главе особое внимание уделено планированию наблюдений оптических компонентов гамма-всплесков, в том числе ассоциируемых со слияниями компактных двойных систем нейтронных звезд или систем из нейтронной звезды и черной дыры. В качестве основного материала для настоящей главы использованы результаты авторской статьи [9].

2.1 Наблюдения оптических транзиентов

Области локализации астрофизических транзиентов варьируются по порядку величины: от нескольких квадратных угловых секунд для гамма-всплесков (в оптическом или мягком рентгеновском диапазонах) до нескольких сотен квадратных градусов для событий, связанных с гравитационными волнами, и гамма-всплесков, обнаруженных в жестком рентгеновском или гамма-диапазоне и связана с конструкции детектора и его чувствительности в соответствующем диапазоне. В первом случае, когда область неопределенности не превышает нескольких квадратных градусов, наблюдение обычно возможно даже с помощью узкопольных телескопов [141–143]. Однако наблюдений областей локализации гравитационно-волновых событий требует использования сети оптических телескопов. В данном случае планирование наблюдений должно учитывать локальную видимость объектов над горизонтом, а также распределять объекты или площадки небесной сферы между телескопами. В зависимости от поля зрения (FOV) используемых телескопов применяются две основных тактики наблюдения: наблюдение вероятных родительских галактик транзиентов, расположенных внутри области ошибки, и мозаичное покрытие области локализации (размер площадки $\sim$ полю зрения). Также применяется комбинация обеих тактик наблюдения, особенно в гетерогенных наблюдательных сетях. На рис. схематично изображены все тактик наблюдений.

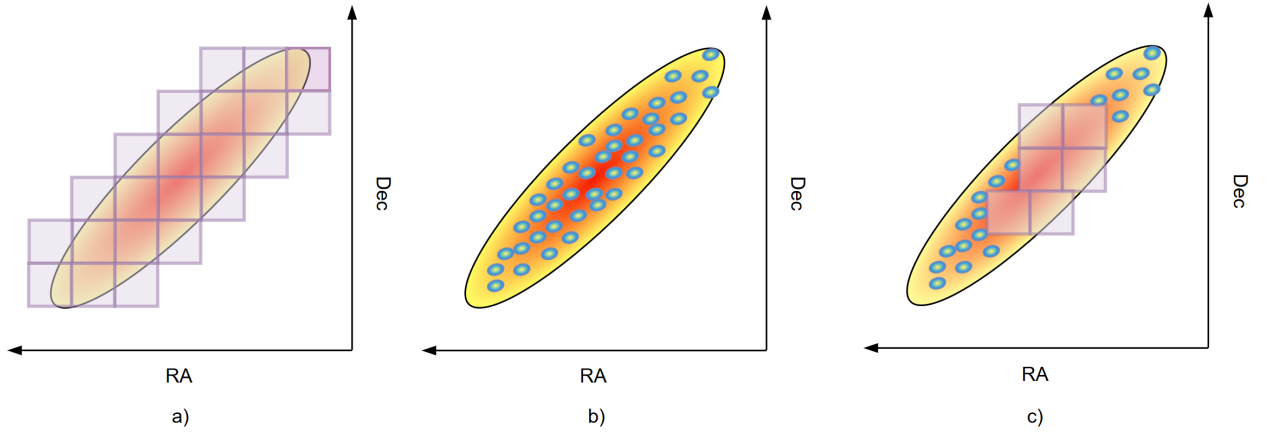


Рисунок 2.1 — Схематичное представление наблюдательных тактик: а) мозаичный обзор, б) целевые наблюдения, с) комбинированные наблюдения. По горизонтальной оси отложено прямое восхождение α в часах, а по вертикальной оси — склонение (δ) в град. Квазиэллиптическим контуром указана область локализации. Цветом обозначена плотность вероятности: чем краснее цвет, тем выше плотность. Фиолетовыми квадратами на панелях а) и с) указаны площадки неба на которые наводится широкоугольный телескоп. Синими эллипсами на панелях б) и с) указаны галактики GLADE+.

2.1.1 Целевые наблюдения

Для событий BNS и NSBH целесообразно проводить наблюдения потенциальных родительских галактик по каталогу GLADE+¹ [144], с целью обнаружения оптических транзиентов (например, [145; 146]). Средняя по небу плотность галактик в GLADE+ оценивается как $\rho = N/A_{sky} \approx 561 \text{ град}^{-2}$, где $N \sim 25 \times 10^6$, а $A_{sky} \approx 41309 \text{ град}^2$ соответственно — общее количество источников и площадь всего неба. Несмотря на высокую плотность галактик на квадратный градус, если учесть типичное поле зрения телескопа, ограничение на расстояние до гравитационного события и полноту каталога, то плотность уменьшится значительно. Оценим максимальную производительность целевых наблюдений в сессии О4, основываясь на использовании телескопа АЗТ-3ЗИК ССО РАН (Монды), чей FOV составляет 0.015 град^2 . В данном расчете принимаются первоначальная область локализации LVK S230518h [147] $A \approx 1002 \text{ град}^2$ (на уровне значимости 90%), плотность галактик $\rho = 13 \text{ град}^{-2}$ (фото-

¹<https://glade.elte.hu>

метрическое расстояние $D_L = 276 \pm 79$ Мпк), время единичной экспозиции $\Delta t = 120$ с и скорость перенаведения телескопа $\Delta T = 3$ град мин⁻¹. Следовательно, область локализации будет наблюдаться в течение $\tau \sim A\rho(\Delta T + \Delta t) \sim 2$ суток только с использованием одного телескопа. Использование сети из 5 телескопов значительно уменьшит время наблюдения до, примерно, 9.6 часов. Таким образом, целевые наблюдения с использованием одного телескопа обладают относительно низкой эффективностью по сравнению с сетью телескопов. Однако, для координации наблюдательной сети требуется автоматизированная программная система.

2.1.2 Мозаичный обзор

Мозаичный обзор представляет собой покрытие областей локализации последовательными наведениями, наблюдая площадки площадью, примерно равной полю зрения телескопа [148]. Данный подход используется во многих широкопольных обзорах, например, *ZTF* [149; 150], *BOOTES* [151], *Pan-STARRS* [152], *GOTO* [153], *MASTER* [154]. В случае области локализации LVK S230518h время обзора телескопа с $FOV = 0.5$ град², например, AS-32 Абастуманской Астрофизической Обсерватории (АбАО) составит $\tau \sim 30$ ч. С помощью более широкоугольных телескопов мозаичный обзор можно выполнить быстрее. Например, *ZTF* с $FOV = 47.7$ град² может покрыть всю область локализации LVK S230518h менее чем за час. Один широкопольный телескоп покрывает область локализации значительно быстрее, чем 5 узкопольных инструментов. Несмотря на это, узкопольные телескопы обычно имеют большую апертуру, что позволяет регистрировать более слабые транзиенты.

2.1.3 Комбинированные наблюдения – IKI-GRB-FuN

В более реалистичном сценарии наблюдательная сеть задействует как широкоугольные, так и узкопольные телескопы, что предполагает совместное планирование мозаичного обзора и целевых наблюдений галактик GLADE+.

Так, например, коллаборация IKI-GRB-FuN [143] и имеет доступ к широкоугольным телескопам малой апертуры (менее 1 метра) и узкопольным телескопам большой апертуры. Основная часть измерений оптических транзиентов, сделанных в данной работе, выполнена на основе наблюдений сетью IKI-GRB-FuN.

Таким образом, мозаичный обзор с использованием широкоугольных телескопов демонстрирует значительно лучшую скорость обхода области локализации по сравнению с целевыми наблюдениями. Однако целевые наблюдения позволяют обнаруживать более слабые и удаленные транзиенты из-за применения телескопов с большим диаметром зеркала (обычно). Наблюдательная сеть телескопов может состоять как из широкоугольных, так и узкопольных телескопов. Тем не менее, координация множества телескопов требует наличия централизованного программного, обеспечивающего автоматическое планирование наблюдений.

2.1.4 Обзор планировщиков наблюдений

Разработка универсальных планировщиков наблюдений описана, например, в работах [155—158]. Система планирования SALT [155] представляет собой систему планирования, где объект ставится в очередь и требует подачи пропозалов для начала наблюдений заданных объектов. Создание пропозалов осуществляется с помощью специальной утилиты PIPT[156], которая предоставляет калькуляторы экспозиции на основе модельных спектров источников, видимости (visibility) и расчета движения телескопа (slew utilities). Однако, заметим, что данное решение разработано исключительно для одного телескопа SALT, а не сети телескопов. В работах [159; 160] предложен планировщик для наблюдательной сети LCOGT, а в работе по прибору SPHERE[157] для телескопа VLT, предложен алгоритм оптимального планирования наблюдений за множеством целей на протяжении нескольких ночей с использованием нескольких телескопов. В отличие от них, в работе [161] предложили планировщик GWEMOPT², специально предназначенный для оптимального планирования наблюдений областей локализации гравитационно-волновых событий LVK с использованием распределенной сети узкопольных телескопов. В [161] рассмотрены алгоритмы

²<https://github.com/skyportal/gwemopt>

планирования наблюдений с помощью GWEMOPT, основная идея которых заключается в построении сетки площадок неба, которые комбинируются в блоки наблюдений. Алгоритмы [161] оптимизированы для оптимального обхода области локализации. Площадкам неба назначается вес (число от 0 до 1) на основе значения воздушной массы X и плотности вероятности p_i по координатам площадки. Отдельно следует рассмотреть пакет ASTROPLAN[158] для Python. Он позиционируется как базовый пакет для создания пользовательских планировщиков наблюдений и предоставляет следующие возможности:

- задание ограничений (например, по высоте Солнца над горизонтом, углового расстояния до Луны, углам поворота телескопа и т.д.)
- группировка целей в блоки
- выполнение ранжирования объектов по атмосферной массе (объекты с более низкой атмосфере масс получают более высокий балл)

Кроме того, ASTROPLAN поддерживает расчет времени смены фильтров, скорости вращения телескопа и время считывания прибора.

Рассмотренные выше решения обладают рядом недостатков:

- отсутствие возможности планировать мозаичный обзор и целевые наблюдения совместно
- нет возможности выбрать режим распределения целей наблюдения (площадок неба в мозаичном обзоре) между телескопами
- не предусмотрен механизм распространения планов наблюдения телескопам

В связи с обнаруженными недостатками известных планировщиков с открытым исходным кодом, была начата разработка собственной системы планирования, которая будет рассмотрена далее.

2.2 Система потокового планирования наблюдений для наблюдательной сети телескопов

AWARE³ представляет собой асинхронное Python-приложение для автоматического планирования областей локализации транзиентов и гравитаци-

³<https://github.com/mickolaua/aware-repo>

онно-волновых событий в оптимальном порядке обхода для сети оптических телескопов.

2.2.1 Архитектура

С точки зрения архитектуры AWARE представляет собой монолитное асинхронное Python приложение, которое совмещает в себе несколько сервисов:

- парсер алертных сообщений и планировщик наблюдений
- Telegram-бот, который отправляет планы наблюдений, графики с планом обхода, а также алертные сообщения в удобном для восприятия человеком виде
- TCP Socket сервер, который передает планы наблюдений напрямую на телескоп.

Монолитная схема была выбрана для ускорения процесса разработки, тестирования и упрощения развёртывания. Архитектура приложения представлена на Рис.2.2.

Приложение работает следующим образом:

1. Сначала приложение подключается к кластеру CONFLUENT KAFKA GCN NASA и в потоковом режиме получает алертные сообщения.
2. Затем алертные сообщения обрабатываются для получения из них информации о транзиентном событии: локализации и некоторых параметров специфичных для конкретного инструмента (например, набор параметров LIGO/Virgo/KAGRA включает идентификатор алгоритма регистрации гравитационного-волнового сигнала, а также классификацию события: BBH, NSBH, BNS).
3. Далее формируется сообщение в человекочитаемом формате, содержащее контент алертного сообщения, которое затем рассылается подписчикам в Telegram.
4. Затем производится планирование наблюдений области локализации транзиентного события. Наконец, сформированные планы наблюдений отправляются через Telegram (подписчикам) и TCP сокет напрямую на телескопы. Заметим, что описанные шаги происходят асинхронно, не блокируя исполнения основного цикла программы.

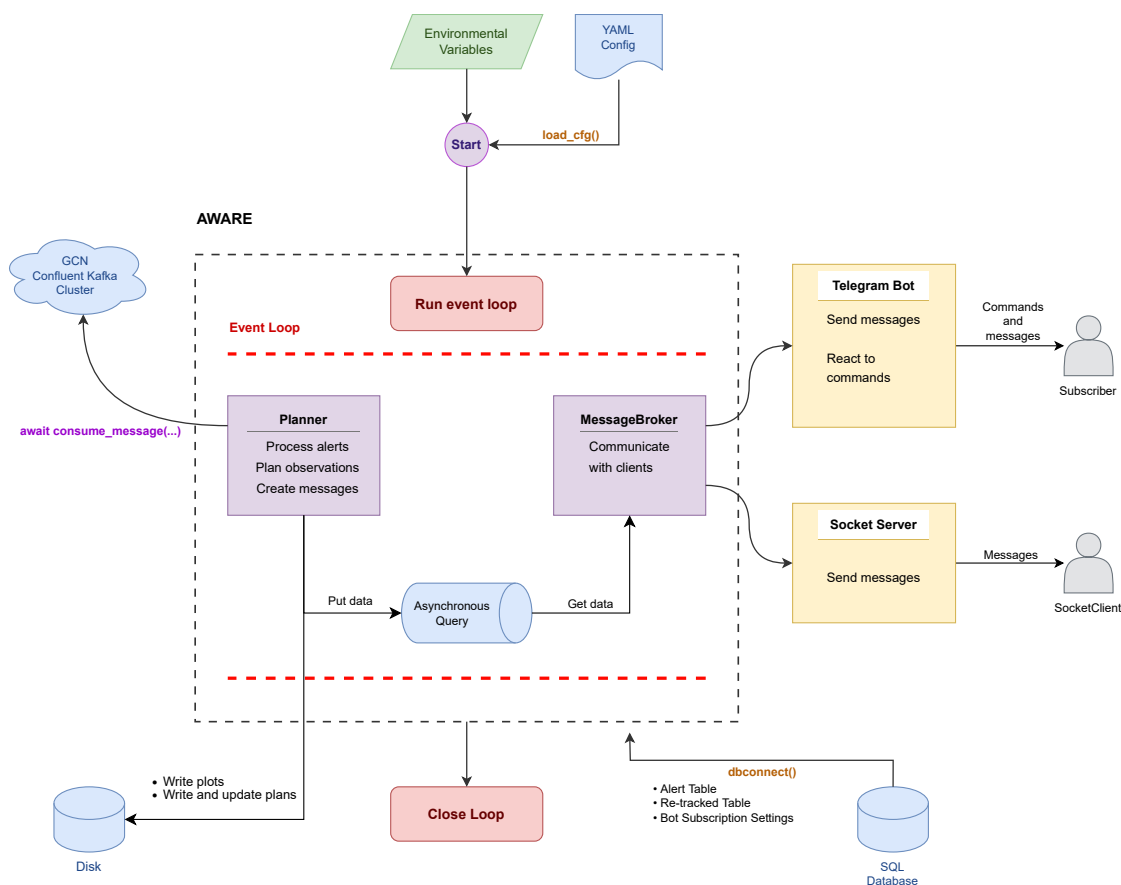


Рисунок 2.2 — Монолитная архитектура приложения AWARE.

Конфигурация приложения хранится в виде YAML-файла. Специально для AWARE был разработан класс `CfgOption`, который позволяет задать имя параметра, значение по умолчанию и тип в зависимости от его расположения в дереве модулей. По умолчанию файл `aware.yaml` будет загружен, если он находится в текущей рабочей папке. В противном случае необходимо указать путь к файлу конфигурации в переменной окружения `AWARE_CONFIG_FILE`. Однако для использования AWARE наличие файла конфигурации не является обязательным условием (будут использованы значения по-умолчанию).

На текущий момент бот функционирует исключительно в режиме (long-polling mode), то есть сам опрашивает сервер `https://api.telegram.org/` на предмет обновлений. Взаимодействие между планировщиком и ботом обеспечивается посредством асинхронной очереди, реализованной в стандартной библиотеке `ASYNCIO`. Перед запуском бота, необходимо определить переменную окружения `AWARE_TG_API_TOKEN`, которая будет содержать токен, полученный от *BotFather*⁴. Однако, приложение можно запустить и с отключенным функ-

⁴<https://t.me/botfather>

ционалом Telegram-бота, например, если необходима только прямая передача планов наблюдений на телескоп с помощью передачи сообщений по TCP-сокету.

2.2.2 Обработка алертных сообщений

AWARE подключается к кластеру GCN Kafka через клиент Confluent Kafka для Python (пакеты `gcn_kafka`⁵ и `confluent_kafka`⁶). В целях безопасности учётные данные, необходимые для аутентификации клиента, передаются через переменные окружения `GCN_KAFKA_CLIENT_ID` и `GCN_KAFKA_CLIENT_SECRET`. В AWARE реализован специальный объект `ConsumerLoop` для асинхронного получения алертов и предотвращения блокировки цикла событий. Для сравнения, клиент `HOP CLIENT`⁷ в составе SCiMMA [162; 163] предоставляет только синхронный интерфейс. Далее, поток алертов проходит парсинг для извлечения необходимых параметров о транзиенте и его области локализации. При этом GCN NASA предоставляет несколько форматов алертных сообщений:

- простые текстовые сообщения
- двоичные сообщения
- XML-сообщения (`VOEvent` [164; 165])
- JSON-сообщения

При этом алерты от одного и того же инструмента могут быть в нескольких форматах. В данной версии приложения реализован парсинг сообщений только в форматах XML и JSON.

Каждое алертное сообщение имеет определенный `id`, по которому можно определить, во первых, к какому инструменту оно относится, а, во-вторых, его тип (например, информации о регистрации, кривая блеска и др.). В зависимости от типа алертного сообщения приложение подбирает необходимый парсер. Для парсинга XML-алертов использован пакет `LXML`⁸ (v4.9.2), обеспечивающий высокую производительность в парсинге XML-деревьев. Дополнительно, использован пакет `VOEVENT-PARSE`⁹, который предоставляет удобный интерфейс

⁵<https://github.com/nasa-gcn/gcn-kafka-python>

⁶<https://github.com/confluentinc/confluent-kafka-python>

⁷<https://github.com/scimma/hop-client>

⁸<https://lxml.de>

⁹<https://github.com/timstaley/voevent-parse>

для представления деревьев VOEvent в виде объектов с атрибутами, используя внутри `lxml.objectify`.

После обработки алерта извлекаются параметры события:

- его название
- дата и время регистрации (T_0)
- область локализации (в виде HEALPix-карты)
- координаты барицентра области локализации (α_0, δ_0) и эквивалентный радиус ошибки r_{90} при аппроксимации кругом
- параметры для конкретного инструмента (например, S/N)

Набор параметров сначала хранится в объекте-контейнере `TargetInfo`, а затем загружается в реляционную базу данных.

Кросс-отождествление событий

При получении новых алертных сообщений о транзиентных событиях необходимо установить соответствие с событиями, уже сохранёнными в базе данных. Соответствие необходимо проводить, т.к. одни и те же события, зарегистрированные разными инструментами, могут быть записаны под разными идентификаторами. Соответствие событий выполняется по времени и координатам, согласно следующим условиям (2.1):

$$matching = \begin{cases} M_1 \cap M_2 \neq \{0\} \\ |T_1 - T_2| < \Delta T \end{cases} \quad (2.1)$$

где, M_1, M_2 — МОС-карты соответствующих событий, T_1, T_2 — даты регистрации событий, ΔT — допустимая погрешность при сравнении дат.

Карты локализации событий LVK уже представлены в формате (МОС) HEALPix [158] (МОС – multi-ordered coverage, т.е. карта переменного разрешения). Однако для других инструментов, например, рентгеновского телескопа EP FXT, создаются простые конические МОС-карты на основе координат центра локализации и радиуса ошибки, полученных из алертного сообщения. Плотность вероятности внутри конических областей локализации подчиняется двумерному нормальному распределению, плотность которого определяется

формулой Работа с МОС HEALPix картами реализована с помощью пакетов МОСРУ¹⁰ [166] и MHEALPIX.

Как правило, ΔT выбирается равной $\sim$ нескольким минутам, поскольку разные инструменты могут регистрировать на разные фазы одного и того же события из-за различий в чувствительности детекторов в зависимости от энергии, особенно если есть эволюция спектра события. В случае отождествления электромагнитных событий с гравитационно-волновыми событиями, ΔT выступает в роли меры задержки между гравитационным и ЭМ-сигналом.

2.2.3 Планирование наблюдений

AWARE составляет планы наблюдений на основе следующих параметров телескопов: длительности единичной экспозиции, количестве экспозиций, поля зрения и локализации телескопа. На текущий момент реализовано два формата файлов планов наблюдений: простая текстовая ASCII-таблица и .list-формат для систем автоматического управления телескопами KDS, FORTE и HOUSE. Схема форматов ASCII-таблицы и .list приведены в Листинге 2.2, в первой и второй строках, соответственно:

$$\begin{aligned} & \text{hh:mm:ss.s} \pm \text{dd:mm:ss.s} \text{ T.T N F} \\ & \text{Jhhmmss.ss} \pm \text{ddmmss.ss} = 0 \text{ hhhmmss.ss} \pm \text{ddmmss.ss} \text{ m.mm NxT.T[*F]} \end{aligned} \quad (2.2)$$

где, hh:mm:ss.s (hhmmss.ss) – прямое восхождение в часах, dd:mm:ss.s (ddmmss.ss) – склонение в градусах, T.T – время экспозиции в секундах с точностью до одного знака после точки, N – количество экспозиций, F – название фильтра. Дополнительно для формата .list указаны следующие поля: $\text{Jhhmmss.ss} \pm \text{ddmmss.ss}$ – название цели (или код площадки и мозаичном обходе), 0 – флаг, указывающий, что цель наблюдения стационарная, m.mm – оценка блеска цели, а в квадратных скобках также указывается фильтр.

¹⁰<https://github.com/cds-astro/mospy/mospy/>

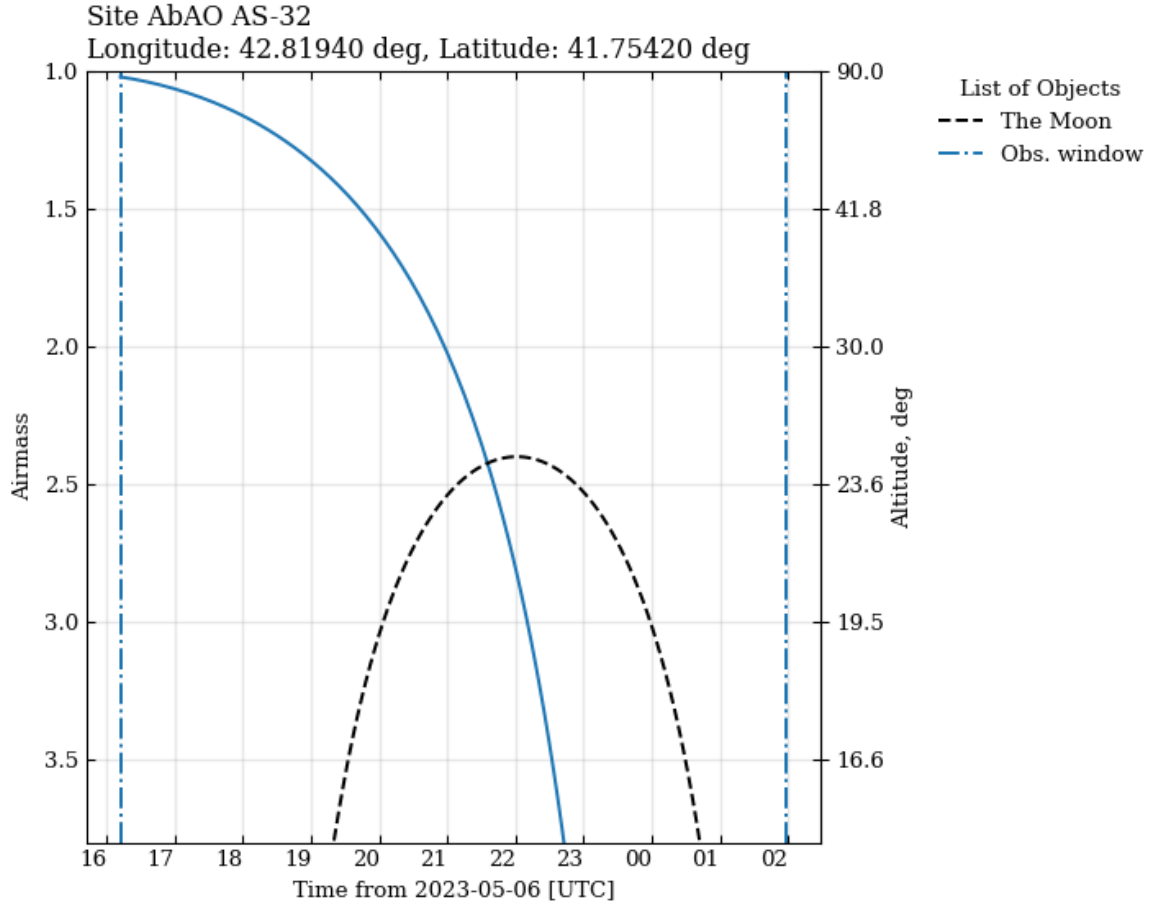


Рисунок 2.3 — График видимости для события Swift BAT 1167288 (GRB 230506C), рассчитанный для телескопа AS-32 Абастуманской астрофизической обсерватории (АбАО). Синяя сплошная линия показывает воздушную массу цели, чёрная штриховая — положение Луны, а синие штрих-пунктирные линии обозначают границы наблюдательного окна. Левая и правая вертикальные оси соответствуют воздушной массе и соответствующей высоте на горизонте (в градусах), соответственно. Горизонтальная ось — всемирное координированное время (UTC).

Планирование наблюдений немного различается в зависимости от площади области локализации. Если для данного телескопа область локализации занимает меньше 90% поля зрения¹¹, то план наблюдения будет состоять только из одной цели с координатами центра области локализации. При этом наблюдатели получают график (см. пример на Рис.2.3) видимости цели над горизонтом в 24-часовом окне относительно времени регистрации события космическим

¹¹10% остается на возможные краевые артефакты на отснятых изображениях.

аппаратом (т.н. ближайшее наблюдательное окно)¹². При этом накладываеся ограничение на высоту цели над горизонтом, при которой она может наблюдаться телескопом (по-умолчанию, 30 градусов). Дополнительно, проверяется, что на момент наблюдения угловое расстояние между Луной и целью больше 50°. Пример плана наблюдения GRB 230506C представлен в Листинге 2.1.

Листинг 2.1: Пример плана наблюдения GRB 230506C в двух форматах.

```
# Output of .txt file
ra dec exp filter
10:13:14.9 +48:12:13 120.0 3 R

5 # Output of .list file
J101314.90+481213.00 = F 101314.90 +481213.00 0.00 3x120.0*R
```

Области локализации гравитационно-волновых событий, регистрируемых LVK обычно имеют нерегулярную форму (в виде «бананов» или «островов») и гораздо большую площадь в сравнении с областями локализации определяемыми космическими обсерваториями. Наблюдение больших областей локализации требует более совершенную методику планирования. Процедура планирования выполняется в два этапа. На первом этапе с помощью вычисляются контуры области локализации на уровне значимости 90%. На втором этапе для каждого телескопа из заданного списка планировщик применяет метод наблюдения в зависимости от поля зрения (см. раздел 2.1). Если $FOV \leq 0.25 \text{ deg}^2$, вычисляется план целевых наблюдений, в противном случае для широкопольного телескопа формируется план мозаичного обхода.

Планирование целевых наблюдений

Планирование целевых наблюдений выполняется следующим образом:

¹²Ближайшее наблюдательное окно определяется двумя моментами времени, когда высота Солнца оказывается ниже заданного для каждого телескопа значения. Обычно это соответствует восходу и заходу Солнца на широте и долготе данного телескопа. Однако, например, в случае Саянской Солнечной Обсерватории РАН (с. Монды), Солнце в течение нескольких месяцев в году может никогда не пересекать горизонт. По этой причине ограничения по высоте Солнца над горизонтом задаются для каждого инструмента отдельно.

1. Загружается редуцированный каталог GLADE+, содержащий лишь необходимые поля RA (прямое восхождение в градусах), Dec (склонение в градусах), B_{mag} (видимая звёздная величина в фильтре B) и d_L (фотометрическое расстояние в Мпк);
2. Каталог сверяется с 90% кумулятивным объёмом локализации, глубина которого определяется ограничением по расстоянию до события (выражение 2.3).

$$d_{L,GLADE+} \in [\hat{d}_L - \sigma_{d_L}, \hat{d}_L + 2\sigma_{d_L}] \quad (2.3)$$

где $d_{L,GLADE+}$ — фотометрические расстояния галактик из GLADE+, $\hat{d}_L$ — оценка среднего фотометрического расстояния до события LVK, а σ_{d_L} — стандартная ошибка d_L . Такие асимметричные границы выбраны вместо $\pm 1\sigma$ с учётом полноты каталога GLADE+, которая значительно снижается после 50 Мпк (см. рис. 2 в [144]), а ошибки на расстояние в каталоге не указаны. Затем объекты сортируются в соответствии с алгоритмом 1.

Алгоритм оптимальной сортировки целей, реализованный в AWARE, представляет собой модифицированный метод поиска ближайших соседей и выполняется следующим образом.

1. В качестве первой цели для наблюдения выбирается та, у которой наибольшая воздушная масса (или наименьшая высота над горизонтом) на протяжении всей ночи. Построение кривых воздушной массы (видимости) $X_i(T_{obs})$ производится с помощью объекта `astroplan.Observer.altaz` из пакета ASTROPLAN. Здесь $i = 1 \dots n$ — индекс цели, а n — общее число целей. Используется стандартное временное разрешение 150 точек на продолжительность ночи (около 3 минут).
2. Для каждой последующей цели выбирается ближайший сосед в пределах круга радиусом в несколько угловых минут. Радиус выбирается с целью минимизации резких переходов от одной цели к другой, поскольку быстрое перенаведение и одновременная стабилизация телескопа обычно затруднены.
3. Далее, алгоритм повторяет шаг 2 пока не получит список целей в порядке обхода.

Оценка временной сложности алгоритма составляет $O(N^3)$, где N — число целей для сортировки. Ее можно снизить до $O(N^2) + O(N \log N) = O(N^2)$ в

Algorithm 1 Алгоритм сортировки объектов для целевых наблюдений.

Require: $\exists X_i \geq 3.5$

```

1:  $R \leftarrow 5 \text{ arcmin}$  ▷ Initial look-up radius for nearest neighbors
2:  $Step \leftarrow 5 \text{ arcmin}$  ▷ Radius increment step
3:  $N \leftarrow \frac{\Delta t}{\Delta T \times n}$  ▷ Maximum observable targets during the night
4:  $t_0 \leftarrow Targets[\arg \min X]$  ▷ First target
5:  $SortedTargets \leftarrow t_0$ 
6: for  $i = 0$  to  $i = N$  do
7:    $j \leftarrow i + 1$ 
8:    $D \leftarrow \{0\}$ 
9:    $d \leftarrow R$ 
10:  while  $D = \{0\}$  do
11:     $D \leftarrow \{s \leftarrow dist(t_i, t_k), k = j..N, k \neq i, t_k \notin SortedTargets, s \leq d\}$  ▷ Distances to all other targets from previous one
12:     $d \leftarrow d + Step$  ▷ Increase radius with this step, if no neighbors found
13:  end while
14:   $j \leftarrow \arg \min D$ 
15:   $t_j \leftarrow Targets[j]$  ▷ Next target (closest)
16:   $SortedTargets.append(t_j)$ 
17: end for

```

случае предварительного вычисления матрицы угловых расстояний. Здесь предполагается, что матрица угловых расстояний представлена в виде k-d дерева.

Планирование мозаичного обхода

Метод планирования мозаичного обхода предполагает проекцию карты области локализации в формат **HEALPix**, а затем преобразование его в декартову сетку с размером пикселя, соответствующим полю зрения телескопа. Этот процесс реализуется с использованием пакета **HEALPY** для Python. Порядок обхода определяется градиентом вероятности: от наиболее вероятных к наименее вероятным пикселям. Такой подход также позволяет избежать больших угловых смещений при переходе между соседними полями.

SkymapPlanner

Совместное планирование мозаичного обзора и целевых наблюдений реализовано в специальном классе **SkymapPlanner**, который сначала осуществляет планирование мозаичного обзора, а затем планирует целевые наблюдения галактик GLADE+. В **SkymapPlanner** реализовано два режима распределения галактик/площадок неба между телескопами: режим уникального распределения и режим пересечения. В режиме уникального распределения предотвращается планирование одних и тех же площадок неба и галактик GLADE+. В режиме пересечения планы наблюдений для отдельных телескопов сети могут содержать одинаковые площадки неба или галактики GLADE+, что позволяет, во-первых, улучшить надежность проведения наблюдений указанных объектов (т.к., один из телескопов может не приступить к наблюдением, например, из-за плохой погоды или поломки), а, во-вторых, проверить переменность запланированных объектов (если промежуток времени между наблюдениями будет достаточным, $\propto$ нескольких часов). Планировщик хранит информацию о планировании на диске в JSON-файле (реестре планов наблюдений), чья структура описана в таблице 1.

Путь к атрибуту	Тип данных	Пример значения	Описание
event	String	"Fermi GBM TEST"	Идентификатор события.
planday	Integer	3	Текущий порядковый номер суток наблюдения.
prob	Float	0.9	Интегральная вероятность (доля покрытия) области локализации события.
skymap	String	"work/.../plan_3.fits"	Путь к HEALPix-карте локализации для текущих суток наблюдений.
galaxies	String	"work/.../plan_galaxies.txt"	Путь к файлу со списком галактик GLADE+.
plans	Array (Objects)	[...]	Планы наблюдений, распределённые по инструментам и датам.
plans[].site_id	String	"khureltogoot_ori40"	Идентификатор телескопа.
plans[].day	Integer	1	Порядковый номер суток наблюдения.
plans[].epoch	String	"2024-05-25T21:43:03Z"	Дата и время начала наблюдений в формате ISO 8601 (UTC).
plans[].file	String	"work/.../fields_...txt"	Путь к файлу со списком целей (площадок) для наведения телескопа.
plans[].plot_file	String	"work/.../plot_...png"	Путь к PNG-изображению для визуализации плана наблюдений.
plans[].comment	String	"Observe the fields in the given order"	Комментарий к данному плану.

Таблица 1 — Структура JSON-файла реестра планов наблюдений сети телескопов

С помощью копии исходной HEALPix карты области локализации происходит контроль уже запланированных площадок неба. Если площадка неба уже запланирована, то соответствующие пиксели на HEALPix карте зануляются. Похожим образом устроен учет уже запланированных галактик GLADE+. Для этого обновляется CSV-файл со списком галактик – запланированные галактики удаляются из файла. Таким образом, можно вести реестр планов наблюдения на последующие сутки наблюдений.

2.2.4 Рассылка алертных сообщений и планов наблюдений

Сервис ConsumerLoop планировщика наблюдений создает и рассылает сообщения через бот в мессенджере TELEGRAM и/или TCP-сокеты. Сообще-

ния для TELEGRAM представлены в двух форматах: `TelegramAlertMessage` для рассылки алертных сообщений в человекочитаемом формате и `TelegramDataPackage` в котором содержатся планы наблюдений и PNG-изображения с визуализацией планов. При этом сообщения с типом `TelegramAlertMessage` имеют более высокий приоритет при рассылке – они практически сразу доставляются клиентам после получения сырых алертных сообщений из GCN NASA.

2.2.5 Взаимодействие с телескопами

С целью автоматического проведения наблюдений роботическими телескопами производится рассылка планов через TCP-сокеты. Для этого используется кастомный класс на основе асинхронного TCP-сервера `TCP_SERVER` из пакета `AIOMISC`¹³. Рассылка планов осуществляется только по белому списку IP-адресов, указанных в конфигурации `AWARE` (по-умолчанию, ограничений по IP-адресам нет). Сообщения с планами рассылаются в формате plain text со следующей структурой (листинг 2.2).

Листинг 2.2: Пример сообщения плана наблюдения GRB 230506C, рассылаемого по TCP-сокетам.

```

| assy_azt20
| event=GRB230506
| origin=Swift BAT
| --START\_PROGRAM--
5 J101314.90+481213.00 = F 101314.90 +481213.00 0.00 3x120.0*R
| --STOP\_PROGRAM--

```

Согласно листингу 2.2, сначала, в первой строке обязательно указывается идентификатор телескопа. Затем в отдельных строках указываются метаданные, например, `event=GRB230506` – название объекта наблюдения, `origin=Swift BAT` – инструмент, который создал алерт по данному объекту. Блок метаданных опционален и имеет произвольную длину. Далее, обязательно указывается блок с планом наблюдений, который начинается со строчки `-START_PROGRAM-` и заканчивается строкой `-STOP_PROGRAM-`.

¹³<https://github.com/aiokitchen/aiomisc>

2.2.6 Взаимодействие с пользователями-наблюдателями

Планировщик AWARE также реализует взаимодействие с пользователями через TELEGRAM-бот. Разработка бота выполнена с помощью асинхронного фреймворка AIOGRAM¹⁴, который предоставляет широкий функционал: обработчики сообщений, конечные автоматы состояний (FSM), различные методы рендеринга текста и поддержку клавиатур. В добавок к AIOGRAM, был использован пакет AIOGRAM_DIALOG¹⁵ для обеспечения более быстрого и простого процесса создания диалогов.

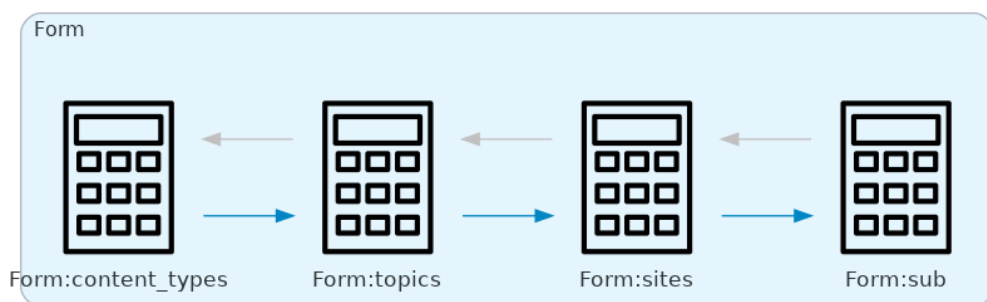


Рисунок 2.4 — Схема работы машины состояний при вызове команды `/sub`. Состояния обозначены прямоугольниками с клавишами. Синие стрелки, указывающие направо, обозначают прямой переход (от начального состояния к конечному). Серые стрелки, указывающие налево, обозначают обратный переход (например, пользователь хочет перевыбрать список типов алертных сообщений). Данная диаграмма отрисована с помощью пакета `aiogram_dialog`.

Взаимодействие начинается с подписки, которая осуществляется с помощью команды `/sub`. В план подписки входит список типов алертных сообщений и список телескопов для которых будут присылаться планы наблюдений данному пользователю. Причем можно выбрать: получать только алертные сообщения, только планы или же всё вместе. AIOGRAM_DIALOG инкапсулирует работу FSM. Соответствующая диаграмма переходов состояний приведена на рисунке 2.4. Наконец, пользователь должен согласиться с настройками подписки, либо отменить её. NB: на каждом шаге, кроме первого, пользователь может вернуться к предыдущему шагу, например, если необходимо изменить список выбранных типов алертных сообщений.

¹⁴<https://aiogram.dev>

¹⁵https://github.com/Tishka17/aiogram_dialog

Команда	Описание
/findchart	Получить поисковое изображение размером 15' × 15' по обзору DSS2
/mysettings	Показать текущую подписку
/start	Начать взаимодействие с ботом
/sub	Подписаться на рассылку
/status	Показать статус работы (если бот активен, то ответит на команду)
/topics	Показать список типов алертных сообщений, доступных для рассылки
/telescopes	Показать список телескопов для которых доступна рассылка планов наблюдений
/visplot	Получить график видимости данного объекта на указанную дату и для указанного телескопа
/unsub	Отписаться от рассылки

Таблица 2 — Полный список команд Telegram-бота.

Помимо команды /sub в Telegram боте реализованы несколько удобных команд для удобства планирования. Полный список команд указан в таблице 2.

На рисунке 2.5 показан пример построения графика видимости командой /visplot EP240801a 23:00:39hr 32:35:37deg 2024-08-02 crao_ztsh, а на рис. 2.6 представлен пример и поискового изображения, полученного командой /findchart EP240801a 23:00:39 32:35:37.

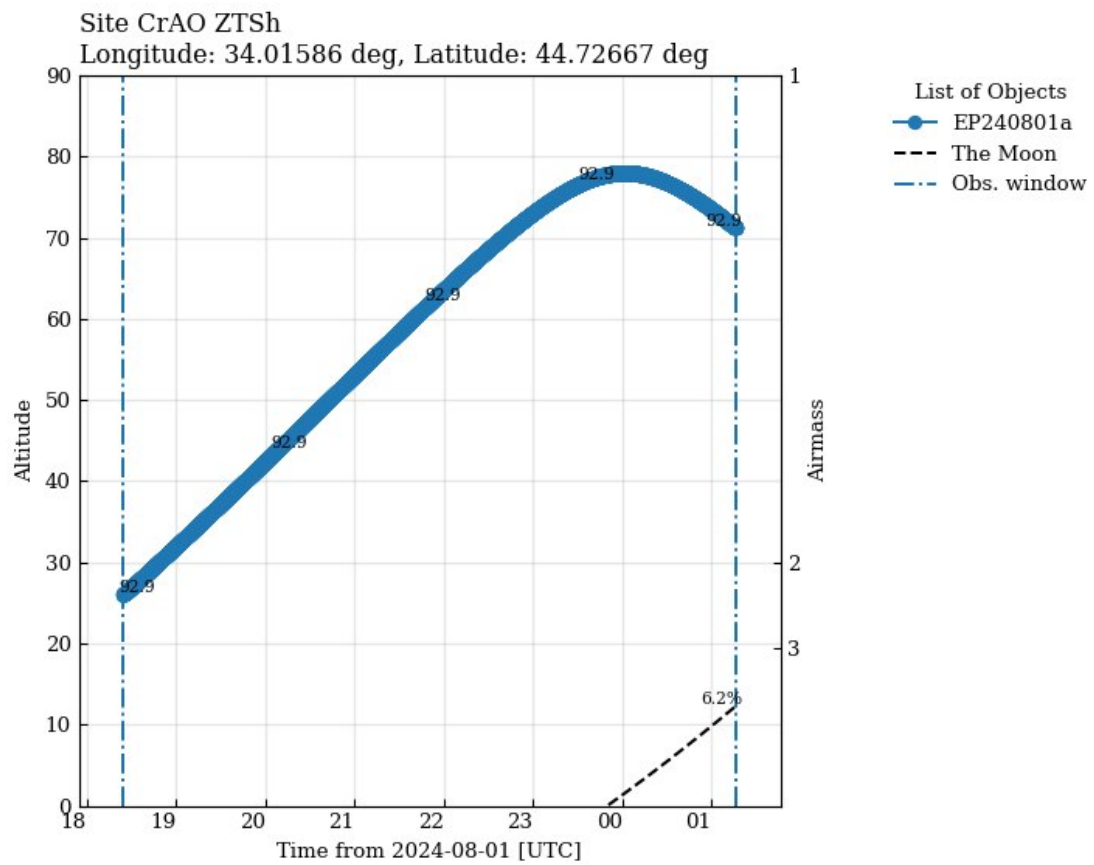


Рисунок 2.5 — График видимости источника EP240801a для телескопа ЗТ-Ш/КраО на эпоху 2024-08-01.

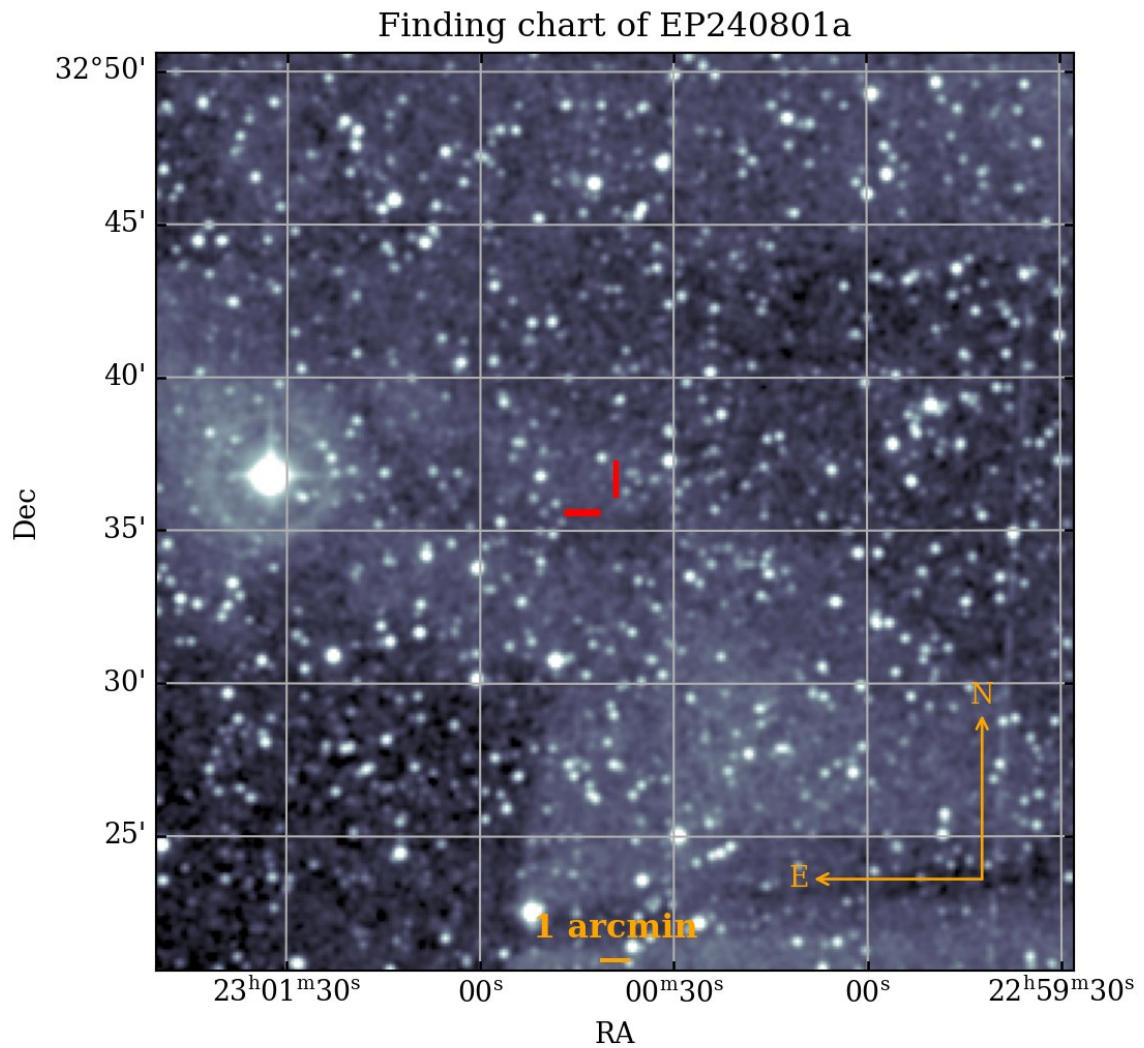


Рисунок 2.6 — Поисковое изображение источника EP240801a. По горизонтальной оси отложено прямое восхождение в часах, а по вертикальной — склонение в градусах. Координаты источника показаны красным крестиком. Примеры графиков рассылаемых Telegram-ботом.

2.2.7 Структура данных

AWARE хранит данные на диске в рабочей директории, указанной в файле конфигурации. Характерный объем данных для одного события составляет несколько мегабайт. При запуске AWARE создает два каталога внутри рабочей

директории: **products** and **cache**. Каталог **products** хранит планы и гарфики наблюдений, а каталог **cache** служит для хранения кэшированных данных, например, скачанных HEALPix карт областей локализации. Полная структура директорий представлена на рисунке 2.7.

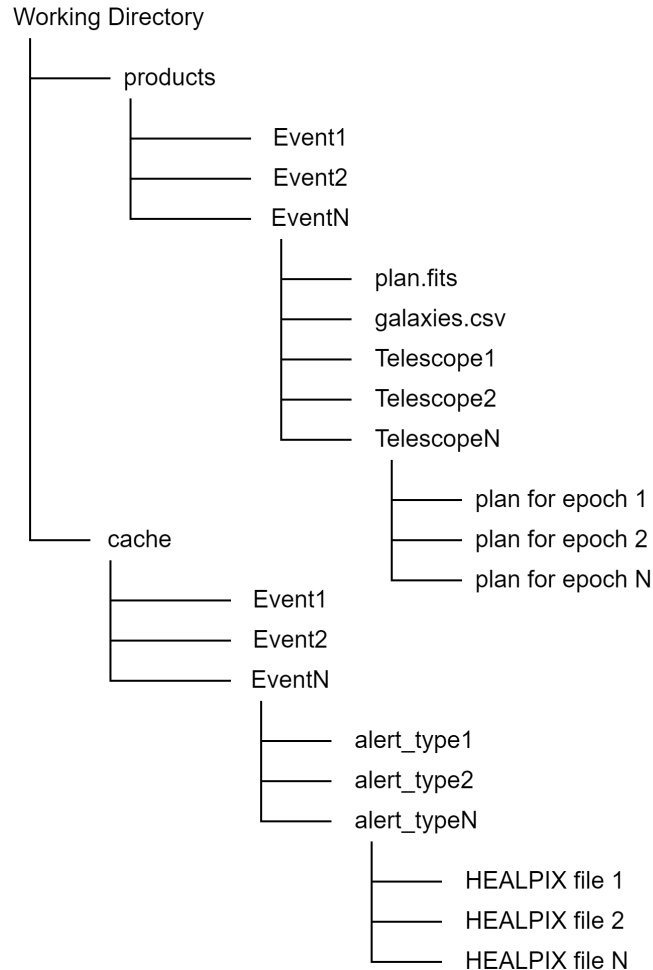


Рисунок 2.7 — Структура директорий, создаваемая приложением AWARE. Данные по планированию размещаются в отдельных подкаталогах внутри каталога **products**. Подкаталог содержит отдельную папку с наблюдательными данными для каждого использованного телескопа. Загруженные HEALPix карты областей локализации хранятся в каталоге **cache**.

Помимо кэширования в каталог **cache**, реализовано кэширование команд бота в локальную SQLite базу данных с помощью пакета **diskcache**¹⁶. В результате, отсутствует необходимость, например, в очередном построении графика видимости для объекта, для которого он уже построен. Время жизни (TTL) данных в кэше ограничено (по-умолчанию, TTL = 86400 с).

¹⁶<https://github.com/grantjenks/python-diskcache>

AWARE хранит информацию по алертам и настройки подписки для пользователей Telegram бота в реляционной базе данных. При запуске приложения, создается (при необходимости) структура таблиц (см. рисунок 2.8).

alert	
PK	<u>id</u>
	alert_message
	ra_center
	dec_center
	error_radius
	localization
	trigger_date
	event
	origin
	importance

settings	
PK	<u>chat_id</u>
	content_type
	alert_type
	telescopes

Рисунок 2.8 — Структура таблиц реляционной базы данных для приложения AWARE. В левой части рисунка представлена схема таблицы **alert**, предназначенная для хранения информации из алертных сообщений. В правой части рисунка представлена схема таблицы **settings** в которой хранятся настройки подписки для пользователей Telegram бота.

В таблице **alert** хранятся сами алертные сообщения и информация по событиям, содержащаяся в алертных сообщениях (полученная после обработки). Таблица **settings** содержит настройки подписки пользователей TELEGRAM бота. Выполнение запросов к базе данных в объектно-ориентированном стиле осуществляется при помощи пакета SQLALCHEMY¹⁷. Данный пакет предоставляет API для большинства движков баз данных, таких как PostgreSQL, MySQL или SQLite. Поскольку SQLite не поддерживает подключение к БД по логину/паролю применяется пакет SQLCIPHER3¹⁸ для шифрования БД

¹⁷<https://github.com/sqlalchemy/sqlalchemy>

¹⁸<https://github.com/coleifer/sqlcipher3>

с помощью алгоритма хэширования AES-512. Ключевая фраза (keyphrase), необходимая для шифрования/дешифрования сохраняется в переменной окружения `AWARE_SQL_KEYPHRASE`. Данное решение обусловлено необходимостью обеспечения безопасного хранения конфиденциальных данных, а именно идентификаторов подписчиков Telegram-бота и информации об их подписках в виду отсутствия аутентификации подключения к БД.

2.2.8 Результаты

Приложение AWARE было впервые запущено в продуктивном контуре в начале 2023 г. За всё время работы, приложение отреагировало на сотни алертов по космическим гамма-всплескам от инструментов *Swift*, *Fermi*, *SVOM*, *EP* и др. Запуск в 2023 г. совпал с началом цикла О4 наблюдений гравитационно-волновых событий LIGO/Virgo/KAGRA. Так, например, с помощью AWARE были построены планы первого в цикле NSBH-события S230518h и BNS-события S230528a. В таблице 3 представлен список первых гамма-всплесков для которых оптическое послесвечение было независимо открыто телескопами сети *IKI-GRB-FuN* после получения сигнала от AWARE.

2.3 Выводы

В данной главе были рассмотрены тактики наблюдения больших областей локализации космических гамма-всплесков и гравитационно-волновых событий LIGO/Virgo/KAGRA. Приведены основные достоинства и недостатки целевых наблюдений и мозаичного обзора. Показано, что использование обширной наблюдательной сети позволяет значительно ускорить время наблюдения больших областей локализации при использовании даже узкопольных телескопов, что особенно важно при поиске быстрозатухающих оптических транзиентов. Однако, координация наблюдательной сети требует наличия автоматической системы планирования наблюдений и доставки планов наблюдений на телескопы (в случае их полной роботизации) и/или наблюдателям.

Название	T_0^a UTC	Регистрация ^b	Послесвечение ^c	$t-T_0^d$ сут.	Блеск ^e з.в.	Фильтр ^f	GCN ^g
GRB 230414B ^h	2023-04-14 16:14:21	XRT/Swift	АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН	0.01859	19.2 ± 0.2	R	33615
GRB 230506C	2023-05-06 17:09:19	BAT/Swift	ТШАО Цейсс-1000	0.02914	20.1 ± 0.1	R	33734
GRB 230512A	2023-05-12 06:27:45	LAT/Fermi	РС-36/Китаб-ИСОН	0.57624	19.43 ± 0.25	Без фильтра	33796
GRB 231017A	2023-10-17 08:05:03	XRT/Swift	АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН	3.43519	22.98 ± 0.20	R	34867

^a Дата и время регистрации

^b Название инструмента, с помощью которого зарегистрировали событие.

^c Название инструмента, с помощью которого зарегистрировано оптическое послесвечение

^d Время после триггера, сут.

^e Звездная величина в фильтре ^f, опубликованная в GCN циркуляре №^g.

Таблица 3 — Кандидаты в оптическое послесвечение гамма-всплесков, независимо найденные в наблюдениях телескопами сети *IKI-GRB-FuN*.

Кратко рассмотрены существующие программные решения для планирования наблюдений. В рассмотренных случаях обнаружены существенные недостатки, например, отсутствие планирования одновременно по двум тактикам наблюдений, отсутствие получения и обработки алертных сообщений или же доставки планов наблюдений. В виду указанных недостатков, была предложена система планирования, реализованная в виде Python-проекта AWARE с открытым исходным кодом. Представлен всеобъемлющий обзор системы планирования. AWARE имеет значительно более широкий функционал по сравнению с аналогами. В режиме времени, близком к реальному, система производит прием и обработку алертных сообщений по гравитационно-волновым событиям LIGO/Virgo/KAGRA и космическим гамма-всплескам, планирует наблюдения для сети телескопов, обеспечивает доставку планов наблюдений на телескопы с помощью TCP-сокетов, а также оперативно уведомляет наблюдателей через мессенджер Telegram. При этом модуль планирования осуществляет оптимальную Систему планирования сортировку галактик GLADE+ для целей целевых наблюдений, а также в оптимальном порядке выполняет планирование мозаичного обзора. Асинхронная реализация системы позволяет выполнять все указанные задачи без значительных задержек. Система планирования AWARE развернута в продуктивном контуре с 2023 г. и уже показала свою эффективность. Практически сразу после запуска, AWARE отреагировала на алерты от LIGO/Virgo/KAGRA и построила планы первого в цикле O4 события слияния нейтронной звезды и черной дыры S230518h и слияния двух нейтронных звезд – события S230528a. Благодаря автоматической рассылке алертных сообщений и планов наблюдений удалось независимо зарегистрировать оптическое послесвечение нескольких гамма-всплесков: GRB 230414B, GRB 230506C, GRB 230512A и GRB 231017A.

Глава 3. Обработка астрономических изображений и поиск оптических транзиентов

В данной главе рассмотрен реализованный прототип системы автоматической обработки изображений и поиска оптических транзиентов STARFALL.

3.1 STARFALL – система обработки астрономических изображений

STARFALL – автоматическая программная система для полного цикла обработки астрономических изображений: от калибровки исходных изображений до поиска кандидатов в оптические транзиенты. В реализации STARFALL использован опыт и исходный код проектов с открытым исходным кодом: COSMIC-CONN [167; 168], SKYLIB, HOTPANTS [169], SEP [170], ASTROMETRY.NET [171], SEXTRACTOR [172], SWARP [173], PSFEX [174], и STDWEB [175]. При этом основная часть функционала по обработке изображений, используемая в STARFALL, реализована в пакете APEX [8] для PYTHON.

3.1.1 Схема обработки изображений

Блок-схема на рисунке 3.1 наглядно иллюстрирует процесс обработки изображений с помощью STARFALL.

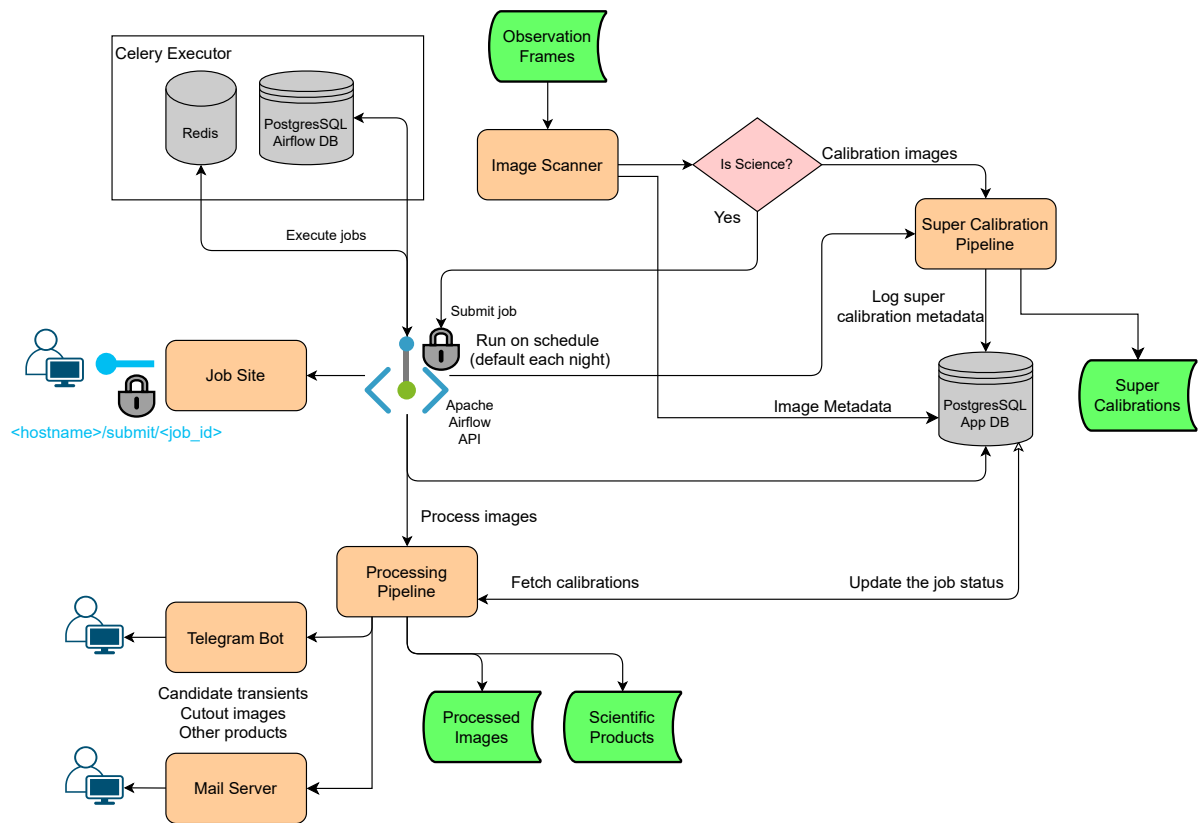


Рисунок 3.1 — Архитектура системы автоматической обработки астрономических изображений STARFALL.

В центре системы находится ПО `APACHE AIRFLOW`, которое управляет задачами обработки изображений (в терминах `APACHE AIRFLOW` они называются DAGs – Direct Acyclic Graphs). Сервис `image-scanner`, основанный на пакете `WATCHDOG`¹ ищет новые изображения на диске и обращается к `APACHE AIRFLOW` для запуска задачи обработки. Подразумевается, что данный сервис будет установлен на сервере на котором хранятся изображения. Сервис `JOB VIEWER` представляет собой Web-UI для удобного запуска и отслеживания пользовательских задач обработки. Обработка научных изображений осуществляется с помощью `process_image` DAG. Сборка калибровочных изображений выполняется при помощи `create_supercals` DAG. В качестве распределенной очереди задач используется `CELERY`². Метаданные по запускаемым задачам хранятся в реляционной базе данных (например, `POSTGRESSQL`³). Быстрое хранилище ключ-значение (т.н. «кэш») `REDIS`⁴ используется для хранения за-

¹<https://github.com/gorakhargosh/watchdog>

²<https://docs.celeryq.dev/en/stable/>

³<https://www.postgresql.org/>

⁴<https://redis.io/>

пускаемых команд. Процесс автоматической обработки изображений (когда изображения в потоковом режиме снимаются телескопом) в STARFALL происходят по следующим шагам:

- Сначала сервис **image-scanner** ищет новые изображения на диске, обрабатывает заголовки FITS-файлов и сохраняет необходимые поля в SQL базе данных.
- Затем **image-scanner** отправляет веб-запрос к APACHE AIRFLOW REST API для запуска **process_image** на тех изображениях, которые надо обработать.
- **process_image** запускает в свою очередь программные конвейеры APEX для обработки изображений (схема обработки представлена на рис.3.2).
- **process_image** проверяет, что есть подходящие калибровочные изображения. В случае их отсутствия запускается **create_supercals** DAG для создания подходящих калибровочных изображений.
- После обработки изображений, результаты обработки, а именно, списки кандидатов в транзиенты и визуальная разметка для SAOIMAGE DS9 рассылаются через почтовый сервис MAIL SERVER или через Телеграм с помощью сервиса TELEGRAM BOT.

Далее будет более детально рассмотрен процесс обработки изображений, согласно рис. 3.2, начиная с калибровки изображений, которая выполняется программным конвейером **apex_calibrate**.

3.1.2 Калибровка изображений

Сначала входные изображения проходят проверку заголовков на предмет необходимости в калибровке. Проверяются следующие флаги: **DARKCORR** – флаг, указывающий на выполненную калибровку на темновое изображение (dark image correction), **FLATCORR** – флаг, указывающий на выполненную калибровку на изображение плоского поля (flat-field correction), **CRCORR** – флаг, указывающий на выполненное очистку изображение от следов КЛ (CR removal), а **BACKCORR** – флаг, указывающий на устранение градиента фона неба (sky background subtraction). В случае калибровки на темновое изображение или изображение плоского поля используются комбинированные

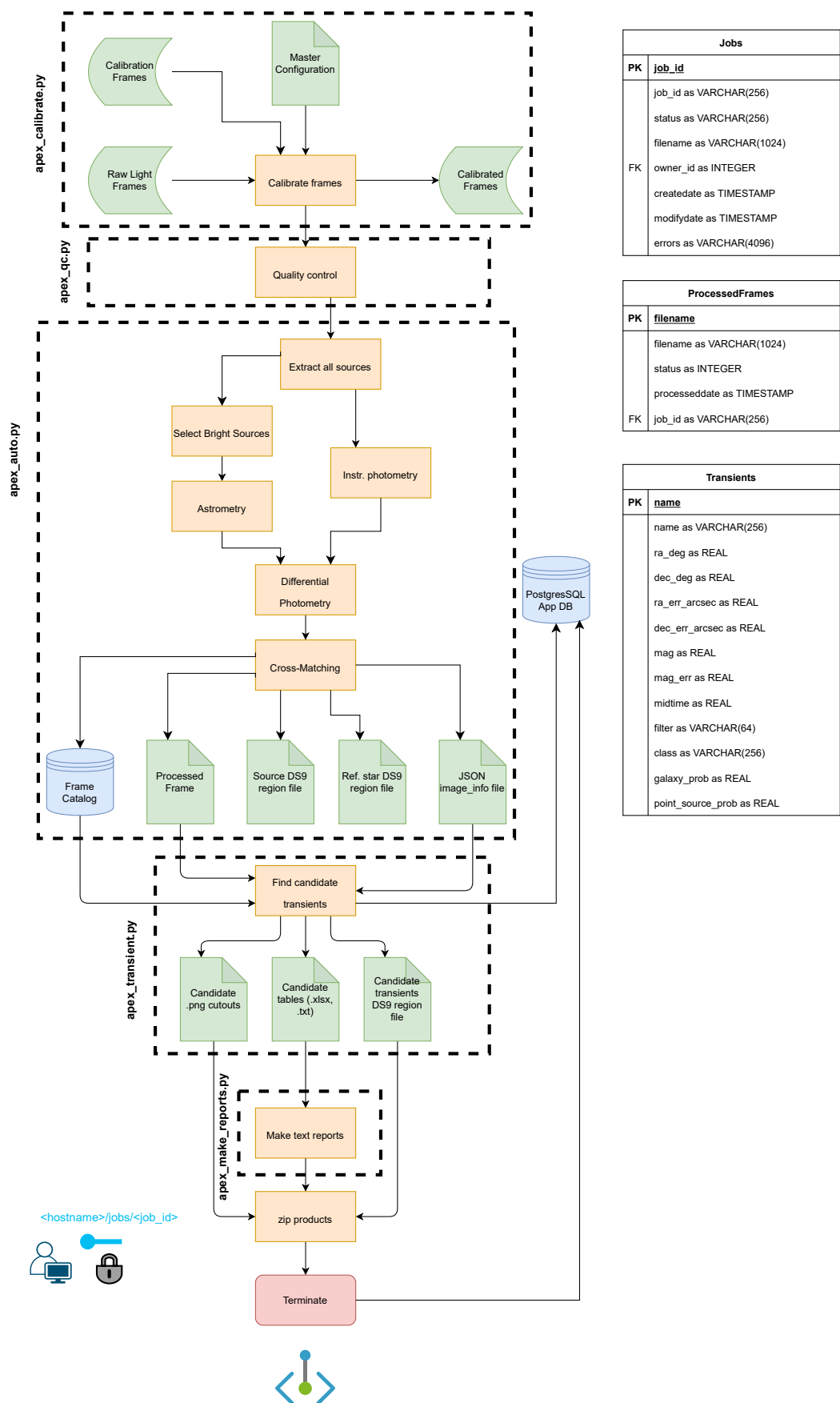


Рисунок 3.2 — Диаграмма обработки серии изображений process_image DAG. Описание представлено в тексте главы.

калибровочные изображения (т.н. «суперкалибровки»). Для комбинирования изображения группируются по нескольким параметрам: разрешению, длительности экспозиции, фильтру, дате съемки и др. Комбинирование осуществляется при помощи `create_supercals`, который запускается по-умолчанию каждую ночь или же при необходимости, если отсутствует необходимое комбинированное калибровочное изображение. `create_supercals` запускает программные конвейеры `apex_superdark` и `apex_superflat` для создания комбинированных темновых изображений и изображений плоского поля, соответственно.

Калибровка на темновое изображение

Цифровой приемник излучения (CCD/CMOS-матрица) является источником теплового шума (dark noise). Он возникает из-за термической активности электронов в полупроводнике и накапливается пропорционально времени экспозиции. Этот шум постоянный для данной камеры при заданной температуре. Для точной калибровки темнового шума необходимо использовать "темновые" изображения (dark frames, рис.3.3), который снимаются с закрытым затвором (без освещения) при той же температуре и экспозиции, что и научные изображения.

В процессе калибровки конвейер `apex_calibrate` автоматически выбирает темновые изображения исходя из разрешения, температуры и длительности экспозиции научных изображений. Затем производится вычитание комбинированного темнового изображения из научных изображений: $\hat{S}_D = \hat{S} - \hat{D}$, где S – научное, а D – темновое изображение, соответственно. Данный процесс проиллюстрирован на рис.3.4.

Калибровка на плоское поле

Изображения «плоского поля» (flat-field images) автоматически подбираются согласно фильтру научных изображений. Затем последовательность

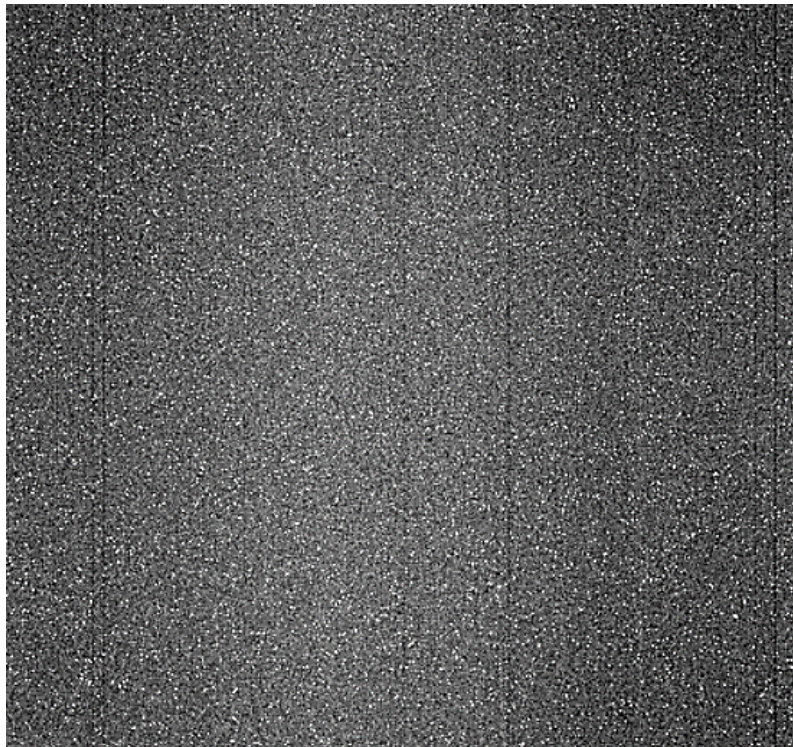


Рисунок 3.3 — Темновое изображение. Время экспозиции $t = 90$ с, $T = -20^{\circ}\text{C}$.
Взято из работы Панков, 2021.

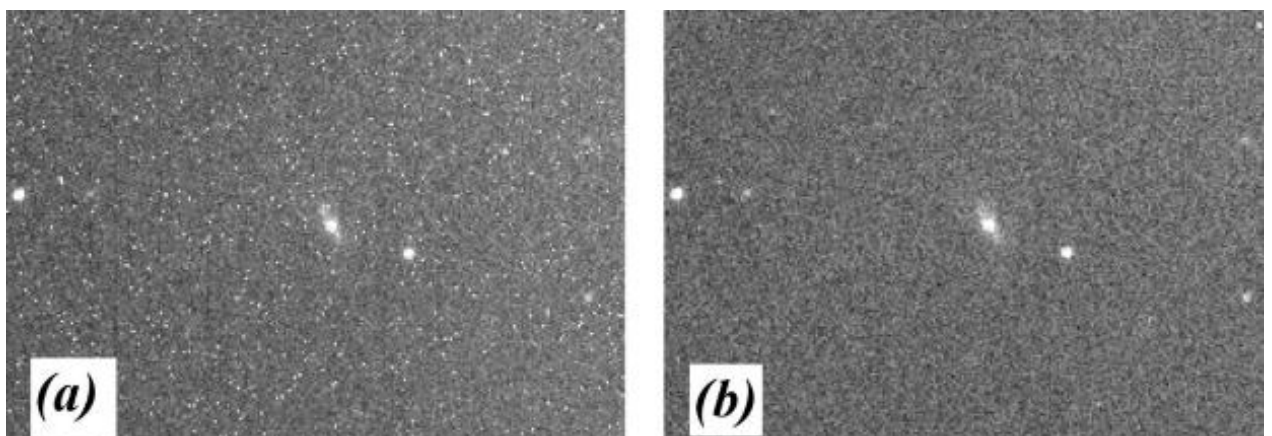


Рисунок 3.4 — Калибровка на темновое изображение. а) Фрагмент исходного изображения. Маленькие яркие точки – следы темнового шума. б) Изображение после калибровки. Взято из работы Панков, 2021.

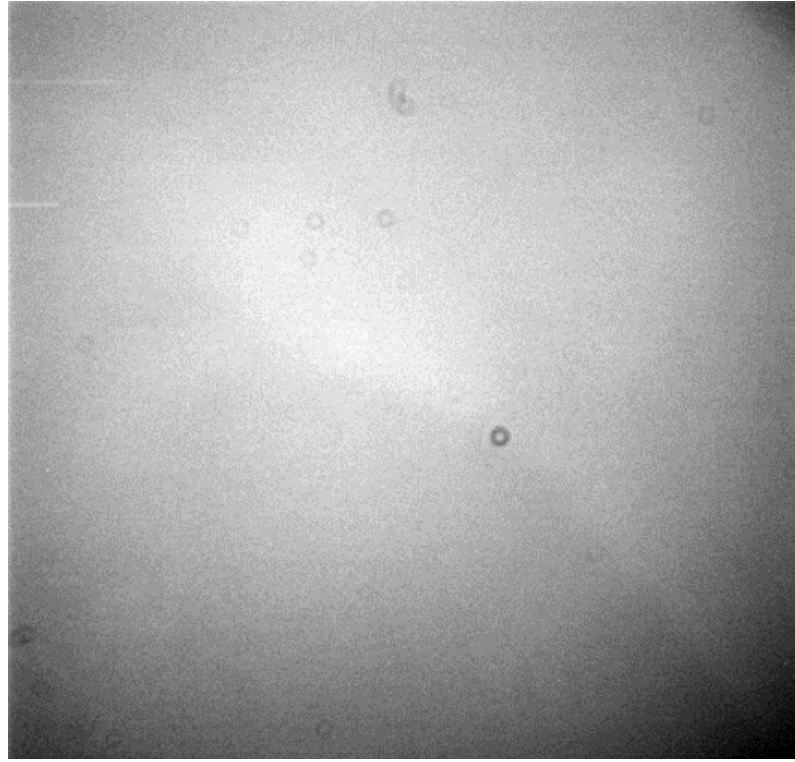


Рисунок 3.5 — Изображение плоского поля. Неоднородность чувствительности по полю изображения и виньетирование по углам хорошо видны. Темные кольца – несфокусированные пылинки на зеркале телескопа. Взято из работы Панков, 2021.

изображений плоского поля $\{\hat{F}_i\}$ объединяется в единое изображение (superflat image) $\hat{F} = \text{median}\{\hat{F}_i\}$.

В процессе комбинирования отбрасываются т.н. «горячие» пиксели, находящиеся в состоянии сбоя (bad pixels), с использованием метода сигма-клиппинга (sigma-clipping)⁵. Затем, комбинированное изображение плоского поля нормализуется, так, чтобы его среднее значение $\langle \hat{F} \rangle \sim 1$: $\hat{F}_N = \hat{F} / \langle \hat{F} \rangle$. Наконец, научное изображение делится на результирующее изображение плоского поля: $\hat{S}_{F,D} = \hat{S}_D / \hat{F}_N$. Визуально результат процесса калибровки на плоское поле представлен на рис.

⁵ Данный метод заключается в пошаговом отбрасывании пикселей, чья интенсивность значительно отклоняется от окружающих.

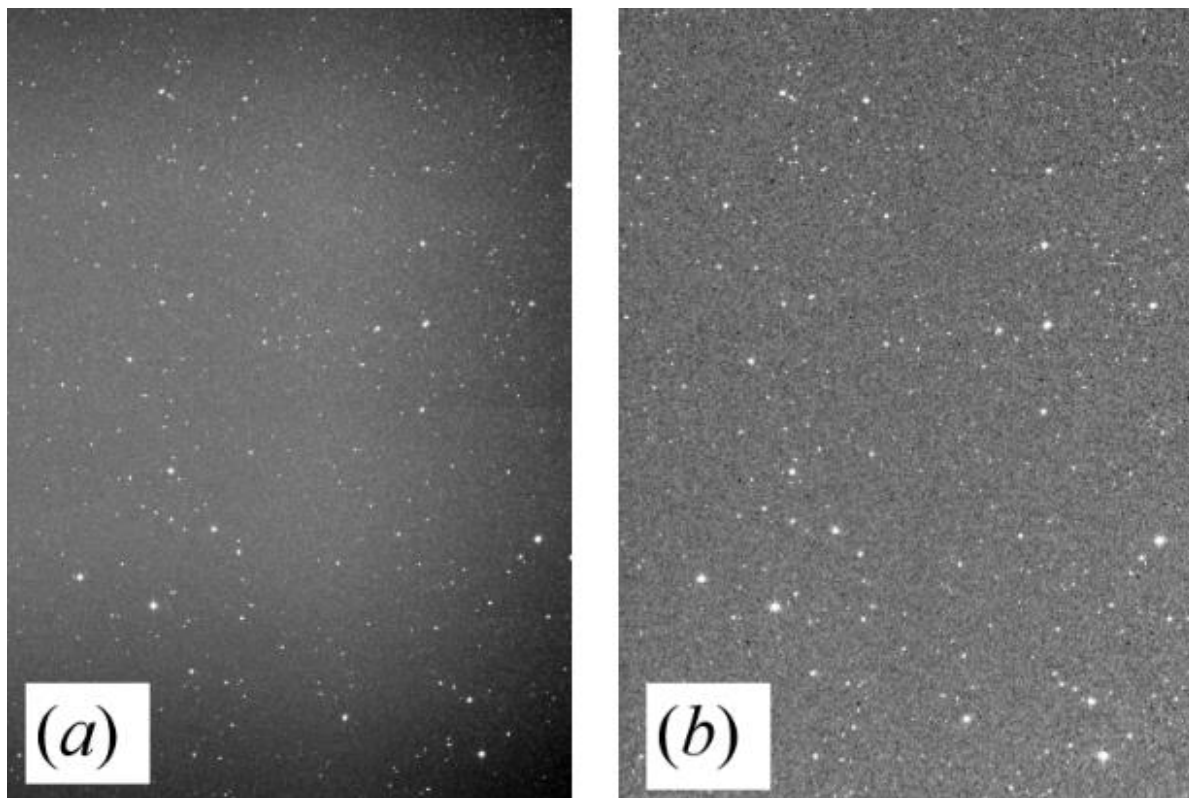


Рисунок 3.6 — Калибровка на плоское поле. а) Исходное изображение, б) после калибровки. Неравномерности в освещенности изображения, в том числе и виньетирование в углах, скорректированы. Взято из работы Панков, 2021.

Устранение неоднородности фона неба

Устранение неоднородности фона неба (Sky Background Subtraction) является важным этапом обработки, который позволяет отделить сигнал интересующих объектов от неравномерно изменяющегося фона неба, возникающем из-за:

- кратковременной засветки в подкупольном пространстве телескопа
- засветки от ярких источников (например, близких звезд)
- облаков и/или Луны, которые временно попали в поле зрения

Методика устранения неоднородности фона неба заключается в формировании карты фона неба, которая вычитается из научного изображения. В конвейере `apex_calibrate`, вычисление карты фона осуществляется с помощью нескольких алгоритмов:

- `clean` — перцентильный фильтр ([ссылка на работу](#)).
- `grid estimator` (как в ПО SExtractor)
- `null` — глобальная оценка уровня фона неба: $\langle B \rangle = \text{median}\{\hat{S}\}$

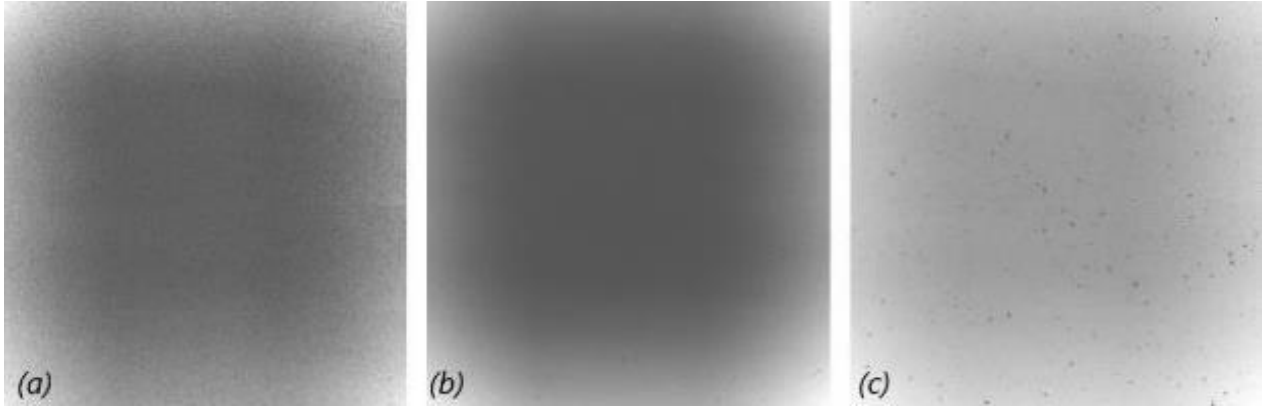


Рисунок 3.7 — Фон неба на изображении. (a) Сильная облачность; (b) полная Луна; (c) Ясная ночь без Луны. Объекты видны только на изображении (c).

Взято из работы Панков, 2021.

Метод `grid estimator`, аналогичный тому, что реализован в программе `SEXTRACTOR` производит построение карты фона путем разделения изображения прямоугольной сеткой (`grid`) и последующее вычисление локального уровня фона в каждой ячейке этой сетки по формуле: $\langle \hat{B}_{b,h}(x_i, y_i) \rangle = 2.5 \times \text{median} - 1.5 \times \text{mean}$, где b, h – ширина и высота ячейки фона, а x_i, y_i – координаты центра ячейки в системе координат изображения. Затем карта фона вычитается из научного изображения (откалиброванного на темновое изображение и плоское поле): $\hat{S}_B = \hat{S}_{D,F} - \hat{B}$.

Устранение следов космических лучей

Следы от КЛ – образования с резкими границами (рис. 3.8), могут быть в виде горячих одиночных пикселов или в виде протяженных треков.

Следы от КЛ возникают при регистрации детектором вторичных частиц КЛ (мюонов). Чем выше над уровнем моря находится обсерватория и чем длиннее экспозиция изображения, тем вероятнее возникновение следов от КЛ. Устранение следов КЛ осуществляется двумя методами:

- `L.A. Cosmic`, реализованный в пакете `ASTRO-SCRAPPY`
- `COSMIC-CONN`

Основной принцип алгоритма `L.A. Cosmic` заключается в поиске источников на изображении с резкими краями путем свертки биннированного

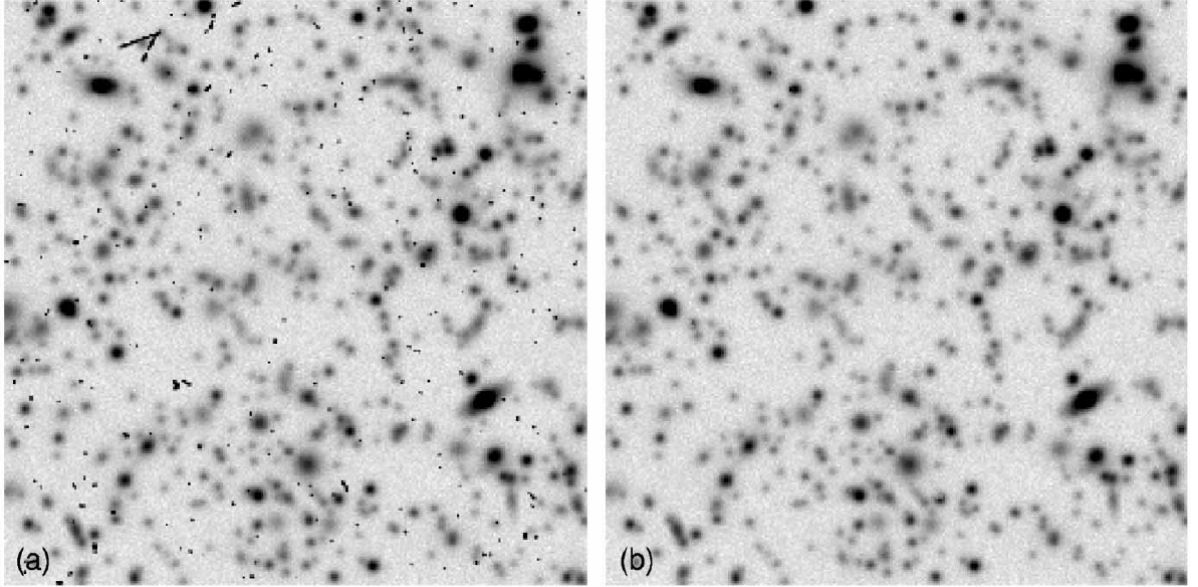


Рисунок 3.8 — Следы от КЛ. а) Искусственное астрономическое изображение, содержащее источники и следы от КЛ; b) изображение, очищенное от следов КЛ с помощью алгоритма L.A.COSMIC [176].

изображения с дискретным лапласианом: $\mathcal{L}' = \max \{ \nabla_{2 \times 2}^2 * S_{2 \times 2}, 0 \}$, где $\nabla^2 = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$ – оператор Лапласа, а $S_{2 \times 2}$ – 2- $\times$ бинированное изображение. Пиксели, которые удовлетворяют условию по отношению сигнала к шуму: $S/N > \frac{\mathcal{L}'}{2\sigma}$, где σ – локальный шум (вычисляется по сглаженному изображению) помечаются как следы от КЛ.

Метод COSMIC-CONN представляет собой CNN, натренированную для детектирования следов от КЛ на изображениях телескопа Hubble и 1-м телескопов LCO с разрешением $0.2 - 0.3''$ на пиксель (т.н. режим `ground_imaging`). Пиксели помечаются как следы от КЛ согласно условию: $p_i > p_{\text{threshold}}$, где $0 \leq p_i \leq 1$ – классификация пикселя: чем выше значение, тем выше уверенность модели в том, что пиксель относится к следу от КЛ, а $p_{\text{threshold}}$ – некий порог уверенности (обычно 0.5).

Пиксели изображения, которые отмечены L.A. Cosmic или COSMIC-CONN как следы от КЛ затем заменяется усредненным значением соседних пикселей.

3.1.3 Входной контроль изображений

Изображения, откалиброванные по шагам, описанным выше, проходят входной контроль, позволяющий отобрать изображения, которые обеспечат наилучшую проникающую способность комбинированного изображения. Алгоритм входного контроля оперирует следующими критериями:

- количество объектов ($N_{sources}$)
- средний FWHM, пикселей
- средний уровень фона ($\langle B \rangle$), отсч.
- средняя эллиптичность объектов ($\varepsilon_i = a_i/b_i$)

Далее, применяется ранжирование и отбор качественных изображений с помощью статистического подхода по следующему алгоритму:

- $r_i = 0$
- $r_i = r_i + 1$, если $c_i \in [\langle c \rangle - k\sigma_c, +\infty]$
- $passed = \frac{|r_i - \langle r \rangle|}{\sigma_c} < k$

где, r_i – ранг i -го изображения, $\langle r \rangle$ – средний ранг изображений в серии, c_i – значение параметра i -го изображения, $\langle c \rangle$ – среднее значение параметра в серии изображений, k – уровень статистической значимости (в ед. СКО) и $passed$ – логический флаг, указывающий на прохождение i -ым изображением входного контроля.

В среднем, с помощью выполнения входного контроля позволяет улучшить предельную звездную величину комбинированного изображения на $0^m.3$.

3.1.4 Комбинирование изображений

Изображения, прошедшие входной контроль, комбинируются в глубокое изображение (deep stacked image). Для комбинирования используется программный конвейер `apex_stack`, который сначала выравнивает изображения по общим источникам, а затем выполняет их стекирование. Как было указано ранее, стекирование позволяет увеличить предел чувствительности на величину $\sim \sqrt{N}$, где N – количество изображений. Для ускорения процесса количество общих источников ограничивается: $N \sim 30$ для алгоритма DIST-ORIENT и до

$N \sim 150$ для алгоритмов сопоставления треугольников, в зависимости от углового масштаба изображений. Более подробно процесс комбинирования описан в работах [8; 177].

3.1.5 Выделение и измерение источников

Важным этапом обработки изображений выступает процесс выделения источников и измерения их основных параметров: X, Y -координат, FWHM, и др. В данной работе реализован плагин для выделения и измерения источников `conn_sep` для пакета `APEX`. Плагин основан на пакете `SEP` для Python, который в свою очередь основан на кодовой базе `SEXTRACTOR`. Благодаря переходу на новый плагин удалось, во-первых, совместить процедуры выделения, деблендирования и измерения источников, которые выполнялись отдельно. а, во-вторых, значительно повысить производительность. При этом сами алгоритмы обработки не изменились по сравнению с представленными в работах [8; 177; 178].

3.1.6 Апертурная фотометрия

Изначальная реализация инструментальной апертурной фотометрии, разработанная для `APEX` на Python с использованием массивов NumPy, имела ряд существенных недостатков. В связи с этим данный модуль был переписан с использованием фреймворка `SEP`. Во-первых, появилась необходимость оптимизации этапов создания апертур, несмотря на уже имеющуюся многопоточную реализацию данного процесса, выполненную с помощью библиотеки `DASK`⁶. Во-вторых, необходимо было добавить поддержку растеризации апертур на субпиксельном уровне для работы с изображениями, имеющими крупный масштаб пикселя ($\gtrsim 1''.5$). В-третьих, необходимо было добавить кривую роста апертуры для определения оптимального размера апертуры. Наконец, требовалось реализовать маскирование пикселей близлежащих источников и артефактных

⁶<https://www.dask.org/>

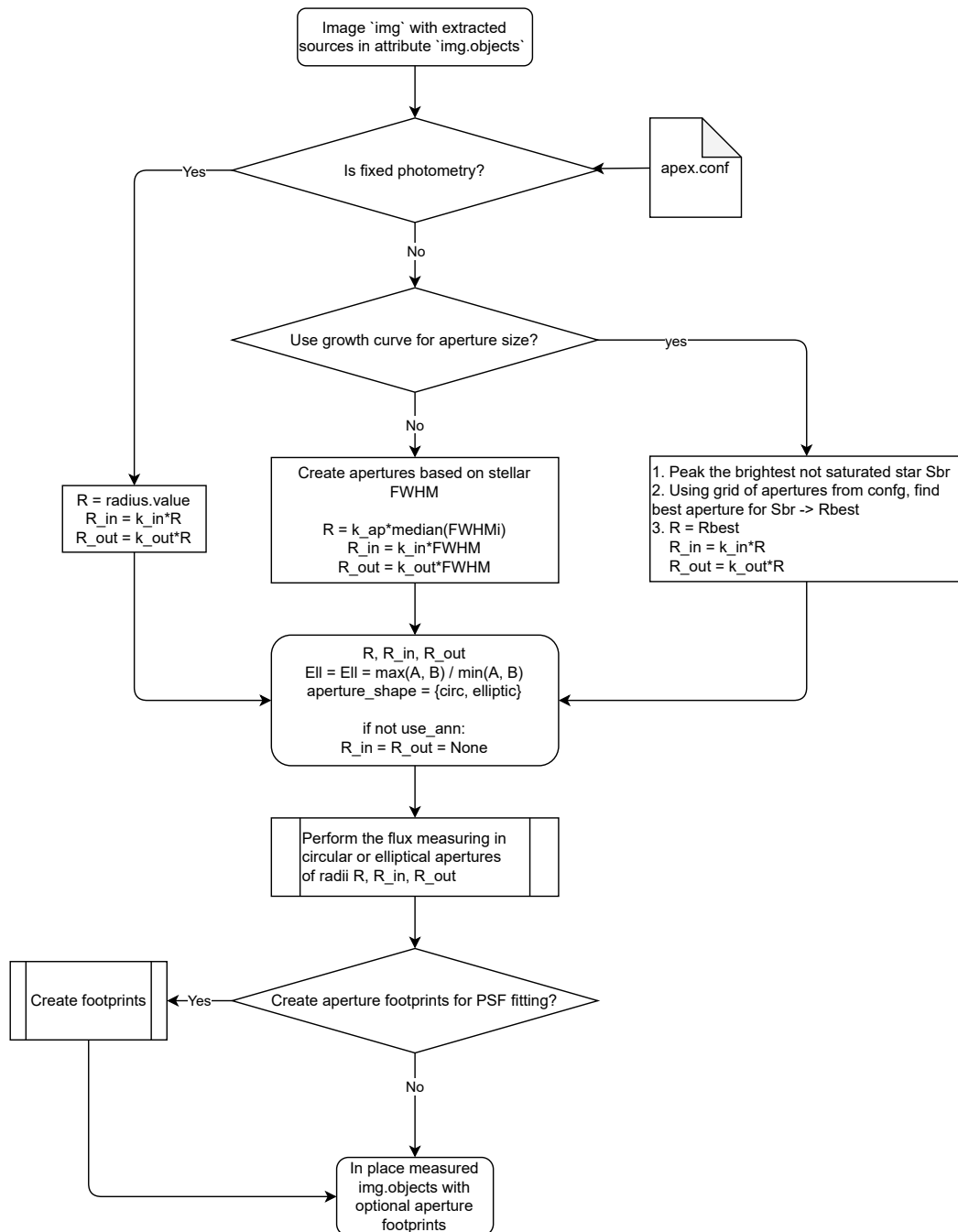


Рисунок 3.9 — Блок-схема апертурной фотометрии.

пикселей для уменьшения их вклада в измерение потока от данного источника. Для реализации апертурной фотометрии был выбран фреймворк SEP т.к. он удовлетворяет приведенным выше требованиям. Блок-схема обновленной реализации апертурной фотометрии представлена на рис.3.9.

На вход процедура апертурной фотометрии принимает изображение на котором уже выделены источники и измерены их основные параметры. Измерение

потока источников происходит с помощью построения апертур с радиусами R , R_{in} и R_{out} . Здесь R – радиус центральной апертуры, а R_{in} и R_{out} – радиусы кольцевой апертуры (annuli ring, используется опционально), внутри которой определяется статистика фона неба. Если кольцевая апертура отключена в настройках, то статистика фона определяется на карте фона неба. По умолчанию, радиусы определяются следующим образом: $R = \text{FWHM}$, $R_{in} = 2R$, а $R_{out} = R_{in} = 4R$, где FWHM – FWHM точечных источников на изображении. Более подробно процесс апертурной фотометрии описан в работе [8]. Также предусмотрено измерение потоков с помощью апертуры с адаптивным диаметром, согласно методу, представленному в работе Крона [179]. Согласно данному методу, почти весь поток от источника находится внутри апертуры радиусом $\varepsilon k r_1$, где ε – эллиптичность источника, k – некий множитель, т.н. Kron Factor (`kron_factor`), а r_1 – первый момент, рассчитываемый по формуле:

$$r_1 = \frac{\sum r I(r)}{I(r)} \quad (3.1)$$

где, $I(r)$ – яркостный профиль источника, а r – радиус-вектор из центра источника. Интегрирование происходит в пределах от $r = 0$ до $r = 6\sigma_{iso}$, где σ_{iso} – второй момент яркостного профиля источника. Реализация данного метода доступна из пакета SEP. Согласно работе [172], оптимальное значение $k \approx 2 \dots 2.5$.

3.1.7 Фотометрическая калибровка

Реализовано два режима работы фотометрической калибровки: автоматическая фотометрия всех источников на изображении и принудительная фотометрия только указанных источников.

Автоматическая фотометрия

В автоматическом режиме сначала производится выбор вторичных стандартов из каталога USNO-B1.0[180]. Затем список стандартов фильтруется по критериям, определенным в работе [8]. Среди критериев используется критерий переменности, показателей цвета, классификации на звезду/галактику и др. Критерий переменности, показателей цвета, классификации на звезду/галактику определяются в виде выражений на языке Python и указываются в конфигурационном файле. Например, выражения для критерия показателей цвета может выглядеть следующим образом: $0.5 < B2-R2 < 1.5$ and $0.5 < B1-R1 < 1.5$. Далее, производится вычисление видимого блеска источников путем минимизации функционала следующей модели:

$$m_{calib} = c_0 + c_1 m_{inst} + c_2 m_{inst}^2 + \dots + c_n m_{inst}^n + Z + \kappa X(z) \quad (3.2)$$

где, c_i полиномиальные коэффициенты, m_{inst} – инструментальные звездные величины (например, получены из процедуры апертурной фотометрии), Z – фотометрический нуль-пункт (считается из видимых звездных величин звезд-стандартов), κ – экстинкция, а $X(z)$ – воздушная масса. Суммарная ошибка видимой звездной величины σ_m включает в себя ошибки на Z и m_{inst} вторичных стандартов и измеряемых источников. В качестве функционала используется ошибка нуль-пункта σ_m (т.н. ошибка разброса около звезд-стандартов) σ_m . Минимизация происходит итеративно пока $\sigma_m > \sigma_{m,thresh}$, где $\sigma_{m,thresh}$ – некое пороговое значение. По-умолчанию $\sigma_{m,thresh} = 0^m.05$, что обеспечивает достаточную точность измерений.

Принудительная фотометрия

С целью реализации принудительной фотометрии заданного списка источников был разработан программный конвейер `apex_forced_phot`. Данный инструмент находит практическое применение, например, при определении видимого блеска оптических послесвечений гамма-всплесков и их родительских галактик. В качестве входных данных подаются как минимум два аргумента:

астрометрически откалиброванное изображение и список источников для измерения. Данный список должен включать координаты и каталожный блеск звезд-стандартов. Список источников подается из JSON-файла (шаблон такого файла представлен в листинге 3.1).

Листинг 3.1: A JSON input file template

```

1  [
2    {
3      "ra": <RA in degrees>,
4      "dec": <Dec in degrees>,
5      "name": "Source name",
6      "refstar": false,
7      "img_type": "science (or difference)"
8      "aperture_radius": <aperture radius in arcsec>
9    },
10   {
11     "ra": <RA in degrees>,
12     "dec": <Dec in degrees>,
13     "name": "Reference star #1",
14     "mag": <magnitude>,
15     "mag_err": <magnitude error>,
16     "refstar": true
17   },
18   {
19     "ra": <RA in degrees>,
20     "dec": <Dec in degrees>,
21     "name": "Reference star #2",
22     "mag": <magnitude>,
23     "mag_err": <magnitude error>,
24     "refstar": true
25   },
26 ]

```

Предусмотрена возможность работы с разностными изображениями. При необходимости измерения остаточных источников на разностных изображениях на вход подается научное изображение и разностное изображения. В данном случае фотометрическая калибровка осуществляется относительно звезд-стандартов на научном изображении. При этом необходима нормализация разностного изображения к научному. В частности, разностные изображения, получаемые с помощью конвейера `apex_subtract` уже нормализованы

нужным образом. Для активации данного режима требуется указать атрибут `"img_type": "difference"` у измеряемых объектов в JSON-файле. В дополнение к этому, для достижения согласованности измерений диффузных источников (например, родительских галактик транзиентов) может быть задан фиксированный угловой радиус апертуры с помощью атрибута `"aperture_radius"` в JSON-файле.

3.1.8 Астрометрическая калибровка

Для обработки изображений без астрометрической информации в заголовках FITS, выполняется последовательность шагов астрометрической калибровки. Данная процедура включает два ключевых этапа. На первом этапе создается предварительная структура астрометрического решения по на основе оценки координат центра поля наблюдения (допустимая ошибка составляет порядка 50%), фокусного расстояния и линейного размера пикселя детектора (или же пиксельный масштаб в единицах угловых секунд на пиксель). Далее производится привязка поля наблюдения к системе небесных координат WCS (т.н. процесс *plate solving*) на основе опорного астрометрического каталога, например, USNO-B1.0 [180] (по умолчанию) с применением алгоритмов, реализованных в APEX ([8; 177; 178]). Данный процесс рассмотрен в работе Панкова и др., 2022 более подробно.

3.1.9 Поиск кандидатов в транзиенты

С целью поиска транзиентов разработано два программных конвейера: `apex_transient` и `apex_subtract`. Метод поиска кандидатов в транзиенты, реализованный в конвейере `apex_transient`, представляет собой сравнение локального каталога источников, выделенного на изображении с известными каталогами, в то время как в `apex_subtract` для поиска кандидатов в транзиенты применяется оптимальное вычитание изображений.

Сравнение с каталогами

apex_transient работает согласно алгоритму представленному в приложении А. Процедура отбора кандидатов начинается с исключения близких и переменных звезд согласно данным каталогов CNS5 [181] и NSVS[182]. Далее проводится фильтрация объектов со значимым собственным движением (например, астероидов) через запросы к центру малых планет (MPC) [183]. Затем отбираются кандидаты из числа тех источников, которые либо отсутствуют в каталогах USNO-B1.0, PS1 [184] или GLADE+ [144], либо красные точечные источники (т.е. удовлетворяющие цветовым ограничениям $g - r > 0$ или $B2 - R2 > 0.5$), обладающие существенным избытком яркости ($> 2.5\sigma$) на изображении по сравнению с каталогом. Конечная оценка кандидатов основывается на пространственной вероятности внутри контура локализации $p(\alpha, \delta)$, избытка яркости Σ и отклонения от заданных границ расстояния $\sigma_{GW}/(|D - D_{GW}|)$. Последняя составляющая применяется исключительно к галактикам GLADE+ в случае поиска кандидатов в транзиенты от событий НЗ-НЗ или НЗ-ЧД LVK.

Оптимальное вычитание изображений

Обнаружения транзиентных источников путём применения метода оптимального вычитания изображений (optimal image subtraction – OIS), описанного в [185], было реализовано в виде программного конвейера **apex_subtract**. Процедура OIS состоит из двух основных шагов. Первоначально производится вычитание карты фона из шаблонного и научного изображений. Затем шаблонное изображение попиксельно совмещается с научным посредством общих источников, найденных на обоих изображениях. Сопоставление общих источников обеспечивается алгоритмами, реализованными в **APEX**, а дальнейшее выравнивание выполняется с помощью аффинной трансформации из библиотеки **scikit-image** [186]. Шаблонное изображение может быть либо задано пользователем, либо автоматически загружено через сервис **HIPS2PIX** (поддерживаются обзоры DSS2, PS1, SDSS-DR12[187], LS DR9[188], UKIDSS[189] и 2MASS[189]). Далее шаблонное изображение размывается (т.е. выполняется

свертка с ядром функции PSF), чтобы соответствовать PSF научного изображения. `apex_subtract` поддерживает два режима согласования PSF: а) глобальный и б) локальный. В глобальном режиме подразумевается, что PSF не изменяется значительно по полю изображения. В данном случае более резкое изображение (с лучшим сиингом) размывается с помощью фильтра Гаусса с $FWHM = \sqrt{FWHM_{blur}^2 - FWHM_{sharp}^2}$, где $FWHM_{blur}$ и $FWHM_{sharp}$ – медианная ширина (FWHM) более размытого и более резкого изображения, соответственно. Размытое изображение вычисляется как $\hat{I}(x,y)_{blurred} = \hat{I}(x,y) * \hat{G}(FWHM)$, где $\hat{G}$ – ядро Гауссова фильтра (PSF). Затем шаблонное изображение нормализуется на научное для обеспечения фотометрии источников на разностном изображении, звёзд-стандартов на научном снимке. Коэффициент нормировки вычисляется по наиболее ярким общим источникам, присутствующим на обоих изображениях: $s_{bright} = \text{Med} s_i, s_2, \dots, s_{n-1}, s_n$, где $s_i = f_{i,sci}/f_{i,tmp}$ – масштабирующий коэффициент, $f_{i,sci}$ – потоки источников на научном изображении, а $f_{i,tmp}$ – потоки источников на шаблонном изображении. Разностное изображение получается просто вычитанием: $\hat{D}(x,y) = \hat{I}(x,y) - \hat{T}_{scaled}(x,y)$. Данный режим реализован с помощью библиотеки SCIKIT-IMAGE для Python и подходит для узкопольных телескопов у которых вариации PSF по полю изображения малы. В случае широких полей (выше $\varnothing \gtrsim 0.5^\circ$) предпочтителен локальный режим, который реализован путем создания интерфейса к ПО HOTPANTS⁷ на PYTHON в виде конвейера `apex_subtract`. В локальном режиме изображение разбивается на сегменты (например, 3×3) внутри которых происходит определение PSF. В качестве значений по умолчанию для параметров HOTPANTS были приняты эвристики из работы [190]. Количество разбиений подгоняется под изображения получаемые конкретным телескопом. После выполнения вычитания, точечные источники на разностном изображении записываются в качестве кандидатов в транзиенты. Пример использования `apex_subtract` представлен на рис. 3.10.

⁷<https://github.com/acbecker/hotpants>

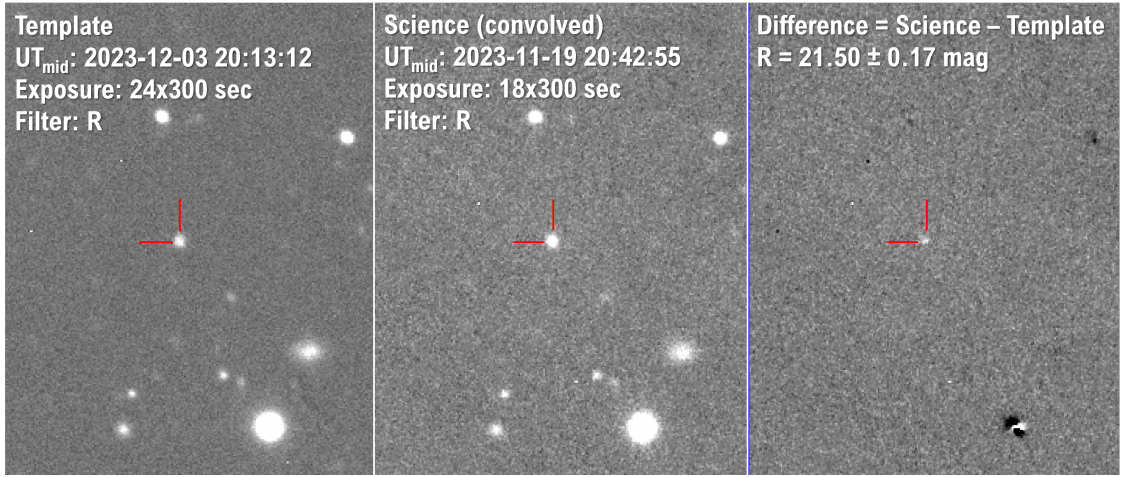


Рисунок 3.10 — Обнаружение оптического послесвечения GRB 231117A с помощью конвейера оптимального вычитания изображений `apex_subtract`. Слева представлено шаблонное изображение, снятое 03.12.2023 в 20:13 UT. Центральное изображение — это свертка научного изображения, полученного 19.11.2023 в 20:42 UT. Общая экспозиция составила 24×300 с для шаблона и 18×300 с для научного изображения. Оба изображения получены в фильтре R на 1.5 м телескопе АЗТ-22 Майданакской обсерватории (МАО). Оптическое послесвечение (отмечено красным перекрестием) отчетливо выделяется на разностном изображении после вычитания фона родительской галактики SDSS J220933.34 + 133119.5. Блеск оптического послесвечения составил $m_R = 21^{\text{m}}.50 \pm 0.17$.

3.1.10 Визуальный контроль

Конвейеры для поиска кандидатов в транзиенты потенциально могут зафиксировать артефактные источники. Следовательно, для исключения таких ложноположительных срабатываний необходим визуальный анализ и ручная верификация. Для облегчения процесса проверки конвейеры генерируют визуальную разметку (markup) в формате .reg для приложения для визуализации FITS-изображений SAOIMAGE DS9. После тщательного отсеивания артефактных источников обычно остается не более 10 окончательных кандидатов (для стандартных полей диаметром ~ 15 угловых минут).

3.1.11 Доставка результатов обработки

Результаты обработки изображений, а именно, списки кандидатов в транзиенты в формате .xlsx и ASCII таблиц, визуальная разметка для SAOIMAGE DS9, фрагменты изображений с кандидатами в формате PNG упаковываются в zip-архивы и рассылаются подписчикам в TELEGRAM, а также по электронной почте. В текущей реализации рассылка в TELEGRAM осуществляется с использованием запросов к REST-API через библиотеку REQUESTS. Отправка по электронной почте выполняется с помощью SMTP-оператора `airflow.providers.smtp.operators.smtp` из стандартной библиотеки APACHE AIRFLOW.

3.2 Выводы главы

Представлен прототип системы потоковой обработки астрономических изображений и поиска оптических транзиентов STARFALL. По сравнению с аналогами, такими как STDWEB, STARFALL реализует полный цикл обработки не только единичных изображений, но и серий изображений: калибровку, входной контроль (контроль качества), сложение изображений (image co-adding), построение локального каталога источников, астрометрическую и фотометрическую калибровку, обнаружение кандидатов в транзиенты. В качестве ядра системы обработки выступает библиотека и набор программных конвейеров APEX. Реализован как потоковый режим обработки новых изображений, появляющихся в файловом хранилище, так и создание задач обработки через веб-интерфейс в интернет-браузере. Произведены работы над улучшением библиотеки APEX:

- реализован новый плагин для построения локального каталога источников `conn_sep` с существенно лучшей производительностью по сравнению с существующим плагином `conn`
- улучшена производительность апертурной фотометрии и добавлены новые функции за счет использования библиотеки SEP:
 - маскирование попадающих в апертуру источников

— определение оптимального радиуса апертуры по кривой роста

Разработаны программные конвейеры, обеспечивающие фотометрию объектов в указанных координатах (`apex_forced_phot`) и поиск кандидатов в оптические транзиенты методами сопоставления каталогов (`apex_transient`) и вычитания изображений (`apex_subtract`). Программные конвейеры были применены на данных по реальным событиям. Например, при помощи `apex_transient`, был открыт оптический компонент GRB 230506C.

Глава 4. Применение программных конвейеров к наблюдательным данным

В данной представлены результаты применения программных конвейеров `apex_forced_phot`, `apex_transient`, `apex_subtract`, а также конвейера на базе пакета PYXSPEC к данным наблюдений гамма-всплесков GRB 230328B, GRB 240225B, EP240801a и гигантской вспышки магнетара GRB 231115A.

4.1 GRB 230328B

4.1.1 Регистрация и локализация

GRB 230328B был зарегистрирован как длинный гамма-всплеск длительностью $T_{90} = 19.23 \pm 3.82$ с космическим гамма-телескопом BAT/Swift 28 марта 2023 года в 14:54:48 UT (далее T_0 или время триггера). Соответствующее сообщение было разослано через систему NASA GCN [191]. Через 110.3 с после BAT, наблюдения были начаты рентгеновским телескопом XRT, в результате которых был найден затухающий источник в координатах. Практически сразу после BAT, соосно направленный телескоп UVOT на борту Swift, обнаружил оптический компонент в координатах (J2000) R.A. = $19^{\text{h}}24^{\text{m}}01.84^{\text{s}}$, Dec = $+80^{\circ}00'34''.5$ ошибкой $0.''62$ на уровне значимости 90%. Анализ кривой блеска BAT, показал сложную временную структуру. Помимо основного импульса, в данных наблюдалось мягкое излучение с энергией ниже 25 кэВ в течение ~ 200 с после момента триггера [191].

GRB 230328B был независимо открыт обсерваторией GBM/Fermi, срабатывания триггера GBM на 1 с предшествует срабатыванию в BAT. Последующий анализ данных GBM/Fermi также показал, что длительность события составляет $T_{90} = 21.6 \pm 0.4$ с, а спектр лучше всего описывается степенной моделью с экспоненциальным затуханием с параметрами $\alpha = -1.22 \pm 0.04$, $E_p = 164_{-12}^{+14}$ кэВ. Таким образом, всплеск однозначно классифицируется как длинный (тип II) [6].

Среди наземных телескопов первым среагировал на алертное сообщение от BAT/Swift роботический телескоп NUTTELA-TAO [192; 193], расположенный в обсерватории Ассы-Тургень. Оптические наблюдения начались в 14:55:29 UT, т.е. всего через 41 с после триггера и продолжались ещё примерно 6.7 кс синхронно в трех фильтрах *gri* [194]. Причем, наблюдения на NUTTELA-TAO были проведены на ~ 70 с раньше, чем на UVOT/Swift. Дальнейшие оптические наблюдения послесвечения проводились в том числе на телескопах сети IKI-GRB-FuN и других групп (подробный журнал наблюдений приведен в работе [6]).

4.1.2 Спектральный анализ многоволнового послесвечения

Спектральный анализ позволяет разделить вклад межгалактического поглощения (в Млечном Пути) и поглощения в родительской галактике всплеска, что, в свою очередь, дает возможность оценить плотность газопылевой среды и сделать выводы о локализации всплеска внутри неё. Для построения многоволнового спектра были использованы данные фотометрических наблюдений оптического телескопа NUTELLA-TAO в фильтрах *gri* и рентгеновский спектр, полученный телескопом XRT/Swift¹ в диапазоне 0.3 – 10 кэВ и охватывающие временной интервал $[10^3, 10^4]$ с после триггера. Выбор данного временного интервала был обусловлен отсутствием значимой спектральной эволюции. Обработка данных осуществлялась с использованием пакета RYXSPEC, предоставляющего удобный интерфейс к инструменту для спектрального анализа XSPEC из набора программ HEASOFT v6.29 [195; 196] в программной среде языка PYTHON. Сначала спектральные и фотометрические данные прошли предобработку. Измерения в фильтрах *gri* были преобразованы в формат PHA (Pulse Height Amplitude) с помощью утилиты `flx2pha` (т.е. был получен т.н. оптический SED), что позволило интегрировать их в общую среду спектрального анализа. Для повышения сигнала исходные спектральные данные XRT/Swift, представленные в формате PHA, были сгруппированы по 25 шт. с помощью инструмента `grppha` из состава HEASOFT.

¹Данные получены с помощью сервиса *Swift Burst Analyzer*

Аппроксимация многоволнового спектра выполнялась с использованием модели поглощенного степенного закона [137]. Данная модель учитывает фотоэлектрическое поглощение рентгеновского излучения газом и поглощение оптического излучения, вызванное частицами пыли. В виде т.н. компонент, которыми оперирует программа XSPEC, спектральная модель имела следующий вид:

$$\text{Model} = \text{zdust}_{\text{MW}} \times \text{zdust}_{\text{host}} \times \text{phabs}_{\text{MW}} \times \text{zphabs}_{\text{host}} \times \text{powerlaw} \quad (4.1)$$

где, **zdust** - кривые поглощения оптического излучения отдельно для Млечного Пути (MW) и родительской галактики гамма-всплеска [197], **phabs** и **zphabs** – тоже самое, только для фотоэлектрического поглощения рентгеновского излучения, а **powerlaw** – модель степенного спектра $F_E \propto E^{-\Gamma}$ (Γ – фотонный индекс). В процессе аппроксимации были фиксированы параметры поглощения в Млечном Пути: избыток цвета $E_{B-V} = 0.069$ mag [198] и колонковая плотность $N_H = 0.0507 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ (рассчитан по карте поглощения, встроенной в XSPEC), а также красное смещение $z = 1.54$ ([6]) для компонент, ответственных за поглощение в родительской галактике. Вместо солнечной распространенности элементов использована распространенность элементов, характерная для ISM (модель **wilm** в XSPEC) [199].

Для определения наиболее вероятного состава пыли в родительской галактике были проверены три различных закона поглощения: Млечного Пути (MW), Большого Магелланова Облака (LMC) и Малого Магелланова Облака (SMC). Оптимизация параметров модели проводилась методом Левенберга-Марквардта. Стоит отметить, что модель степенного закона с изломом показала неудовлетворительное согласие с наблюдаемыми данными, в связи с чем результаты её аппроксимации не приводятся.

Процедуры предобработки спектральных данных и аппроксимации были объединены в виде программного конвейера PHOTOREDSHIFT.PY. На вход подавались пути к таблице фотометрических измерений оптического послесвечения и рентгеновскому спектру. На выходе формировалась сводная таблица с результатами аппроксимации для разных кривых поглощения.

Закон	E_{B-V}	A_V	N_H	β	$\chi^2/d.f.$
Поглощения	mag	mag	10^{22} см^{-2}		
MW	0.26 ± 0.02	0.80 ± 0.06	0.22 ± 0.16	-0.80 ± 0.02	14.7/12
LMC	0.22 ± 0.02	0.68 ± 0.06	0.18 ± 0.16	-0.78 ± 0.02	36/12
SMC	0.18 ± 0.02	0.53 ± 0.06	0.11 ± 0.16	-0.73 ± 0.02	60/12

Таблица 4 — Результаты аппроксимации многоволнового спектра послесвечения в интервале $10^3 - 10^4$ с после триггера. Значения поглощения в Млечном Пути $E_{B-V} = 0.069$ mag, $R_V = 3.08$ и $N_H = 0.0507 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$, а также красное смещение родительской галактики $z = 1.54$ были зафиксированы.

4.1.3 Результаты анализа и интерпретация

Результаты аппроксимации многоволнового спектра представлены в Таблице 4.

Сравнительный анализ показал, что законы экстинкции MW и LMC обеспечивают значительно лучшее согласие с данными по сравнению с законом SMC, что подтверждается более низкими значениями редуцированного χ^2 . Это указывает на то, что свойства пыли вдоль луча зрения в родительской галактике GRB 230328B более близки к распределению пыли в Млечном Пути или LMC, чем SMC. Для наилучшей модели (MW) были получены следующие значения параметров поглощения: $A_V = 0^{\text{m}}.80 \pm 0^{\text{m}}.06$, избыток цвета $E_{B-V} = 0^{\text{m}}.26 \pm 0^{\text{m}}.02$ и колонковая плотность водорода на луче зрения $N_H = (0.22 \pm 0.16) \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Данные значения находятся в согласии со значениями, полученными в ходе анализа SED родительской галактики [6].

4.1.4 Обсуждение

Проведем сравнение полученных параметров поглощения с выборкой родительских галактик гамма-всплесков, рассмотренных в работе [200]. На рис. 4.1 представлена корреляция $N_H - A_V$ для GRB 230328B относительно данной выборки.

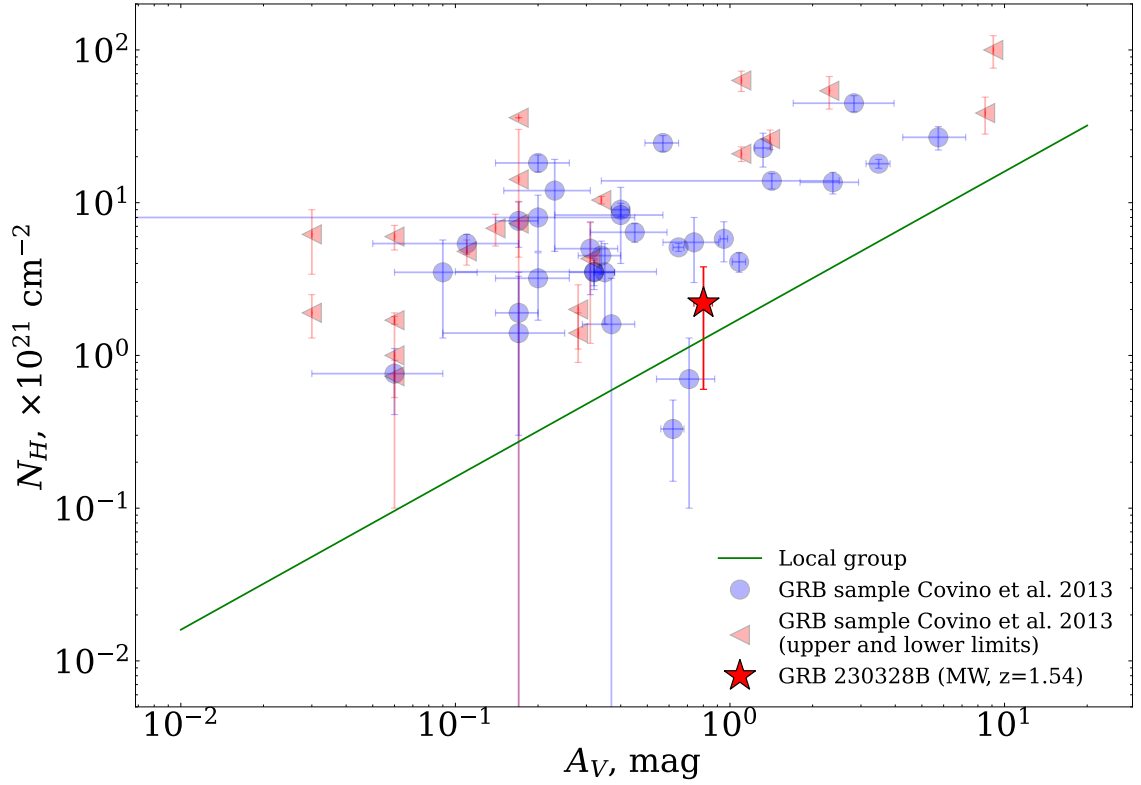


Рисунок 4.1 — Отношение газа к пыли в родительской галактике GRB 230328B (красная звезда; для закона поглощения Млечного Пути) в сравнении с выборкой [200]. Синие точки обозначают измеренные значения, а красные треугольники — верхние или нижние пределы. Зеленая линия соответствует отношению газа к пыли для Местной группы галактик ($N_H/A_V \sim 1.6 \times 10^{21} \text{ см}^{-2} \text{ з.в.}^{-1}$).

Анализ показывает, что поглощение на луче зрения в родительской галактике GRB 230328B не противоречит родительским галактикам других гамма-всплесков на красном смещении $z \sim 1.5$ из выборки [200]. На основе полученных параметров поглощения можно предположить, что всплеск произошел в области активного звездообразования, либо располагался на дальней от наблюдателя стороне диска родительской галактики, что привело к увеличению оптической толщи вдоль луча зрения.

4.2 GRB 231115A

4.2.1 Регистрация и локализация

Всплеск GRB 231115A длительностью ~ 0.1 с и жестким спектром, характерным как для коротких GRB, так и для гигантских вспышек магнитаров (SGR), был зарегистрирован 2023-11-15T15:21:20 UT несколькими космическими гамма-инструментами: GBM/Fermi [201], INTEGRAL/IBIS/ISGRI [202], Konus-Wind [203], Glowbug [204], Insight-HXMT/HE [205] и Swift/BAT [206].

Благодаря регистрации события телескопом IBIS/ISGRI, его локализация была определена с ошибкой менее $2'$, что позволило сразу ассоциировать всплеск с галактикой M82 [202; 207; 208]. При этом сигнал от источника не был обнаружен рентгеновскими телескопами XRT/Swift и NuSTAR, радиотелескопами и экспериментом MAGIC. Также не был зарегистрирован гравитационно-волновой сигнал детекторами LVK, что ставит под сомнение интерпретацию события как SGRB, возникшего в результате слияния двух нейтронных звезд.

4.2.2 Поиск оптического послесвечения

Благодаря высокой точности локализации, произведены попытки наблюдения оптического послесвечения на разных телескопах в оптическом диапазоне на различных телескопах [209—222], но оптический компонент не был найден.

Первым среди них на сигнал о регистрации GRB 231115A экспериментом GBM/Fermi [223] отреагировал обзор GROWTH-India, приступив к съемке области локализации 2023-11-15 в 16:47:58.140 UT. Спустя 1.19 часа после триггера GBM/Fermi было заявлено об обнаружении кандидата в оптическое послесвечение всплеска — источника AT 2023xvj, расположенного в крыле галактики M82. На момент регистрации объект имел координаты $\alpha = 09 : 56 : 00.2 \pm 0.6''$, $\delta = 69^\circ 40' 29.2'' \pm 0''.6$ (эпоха J2000) при блеске $r' \sim 19.2$ mag [209]. Параллельный поиск оптического компонента GRB 231115A велся и другими телескопами,

Обсерватория	Телескоп	D, м ¹	FoV, $l \times l$ ²	Местонахождение
АбАО	АС-32	0.7	44×44	Абастумани, Грузия
Китаб-ИСОН	RC-36	0.36	48×48	Китаб, Узбекистан

¹ – диаметр зеркала телескопа

² – поле зрения телескопа

Таблица 5 — Телескопы GRB-IKI-FuN, использованные в наблюдениях GRB 231115A.

однако обнаружить объект AT 2023xvj никому не удалось. Позднее команда GROWTH-India сообщили об ложной идентификации оптического источника из-за ошибки в процедуре вычитания поля источника из обзора PanSTARRS-DR1, содержавшего артефакты.

Две независимые группы исследователей заявили об обнаружении кандидатов в оптические транзиенты в пределах области локализации всплеска, построенной системой IBAS обсерватории INTEGRAL. В циркуляре [218] было сообщено о регистрации красного объекта с координатами RA = 09:55:53.07, Dec = +69° 40' 23" 28. В то же время в циркуляре [222] сообщили о другом красном источнике — W231115b (RA=09:55:58.81, Dec=+69° 41' 28".5) с блеском $r = 21.26 \pm 0.08$ mag. Кроме того, [222] независимо переоткрыли объект [218], обозначив его как W231115a (его блеск составил $r = 20.54 \pm 0.04$ mag).

Вероятнее всего, оба кандидата – переменные или фоновые объекты в диске галактики M82, не имеющие отношения к GRB 231115A. Их пропуск в предшествующих обзорах объясняется несколькими причинами: высоким градиентом галактического фона M82, высокой плотностью звездного населения в диске, сильным пылевым поглощением, а также недостаточной проникающей способностью ранее использовавшихся инструментов.

Фотометрические наблюдения были выполнены также сетью телескопов IKI-GRB-FuN, для поиска и мониторинга возможного оптического послесвечения GRB 231115A. Перечень задействованных инструментов и их технические характеристики приведены в Табл. 5.

Наблюдения телескопом АС-32/АбАО производились в фильтре R , в то время как наблюдения на RC-36/ИСОН-Китаб были выполнены в чистом свете (без фильтра). Кроме того, использована фотометрия, опубликованная в циркулярах сети NASA GCN. Журнал оптических наблюдений представлен в Табл. 15.

Обработка полученных изображений проводилась с помощью программных конвейеров APEX [8]. В соответствии с методикой, изложенной в работе [8], изображения прошли этап входного контроля и калибровки, астрометрическую привязку, сложение и дифференциальную фотометрию. Для поиска переменных объектов применялся метод вычитания изображения-шаблона родительской галактики M 82, полученного на тех же инструментах в более позднюю эпоху (в спокойном состоянии). Процедура вычитания выполнялась с помощью конвейера программного конвейера `apex_subtract`. Из-за значительных угловых размеров M 82 (порядка $4' \times 4'$) вычитание шаблона было критически важной процедурой для устранения сильного градиента галактического фона. В результате вычитания в пределах области локализации, полученной IBIS/ISGRI (Рис. 4.2), достоверных кандидатов в оптическое послесвечение GRB 231115A обнаружено не было. Кандидаты ранее заявленные в циркулярах GCN [218; 222], также не удалось зарегистрировать ввиду недостаточной проникающей способности, достигнутой в ходе наблюдений.

На Рис. 4.3 красными треугольниками показаны верхние пределы на поток от возможного оптического компонента GRB 231115A, полученные как в собственных наблюдениях (отмечены стрелками), так и другими научными группами (таблица 15). Для сравнения на том же рисунке приведены данные оптических наблюдений выборки коротких гамма-всплесков с известным красным смещением из работы [224], а также кривая блеска килоновой GRB 170817A [225], перенесенные на расстояние до GRB 231115A $D_L = 3.5$ Мпк.

Наиболее глубокие верхние пределы на оптическое излучение GRB 231115A были получены спустя 10 часов после триггера ($r \sim 22^m$). Для сравнения, оптические послесвечения большинства коротких гамма-всплесков (включая килоновую, сопровождавшую GRB 170817A), расположенные на фотометрическом расстоянии $D_L = 3.5$ Мпк, на этот момент времени были бы как минимум в 2500 раз ярче ($r \sim 13.5^m$).

4.2.3 Результаты

Таким образом, полученные ограничения на оптический поток надежно исключают интерпретацию GRB 231115A как классического короткого гамма-

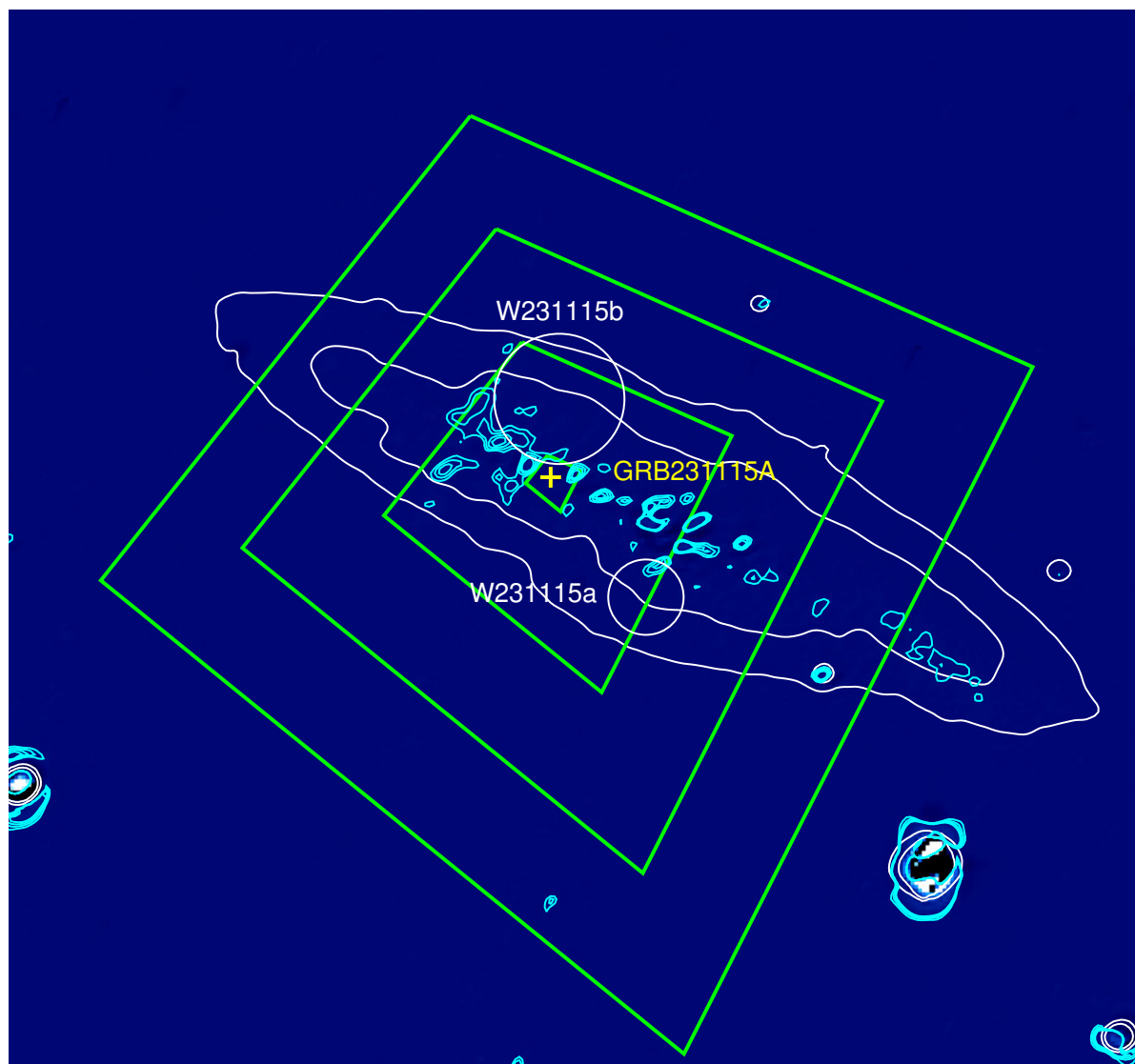


Рисунок 4.2 — Разностное изображение области локализации всплеска GRB 231115A, полученное после вычитания изображения-шаблона галактики M82 в спокойном состоянии (данные телескопа AC-32 от 8 декабря 2023 г., когда предполагаемый оптический компонент уже затух). Зелеными ромбами обозначена область локализации всплеска в рентгеновском диапазоне, белыми кружками — позиции двух ранее заявленных оптических кандидатов (см. текст). Белые тонкие изофоты показывают контуры галактики M82 на исходном снимке, голубые контуры — остаточный сигнал после процедуры вычитания.

всплеска. С другой стороны, оптический компонент мог испытать экстремально сильное межзвездное поглощение вдоль луча зрения в том случае, если источник находился за толщей пылевого диска галактики M82. К сожалению,

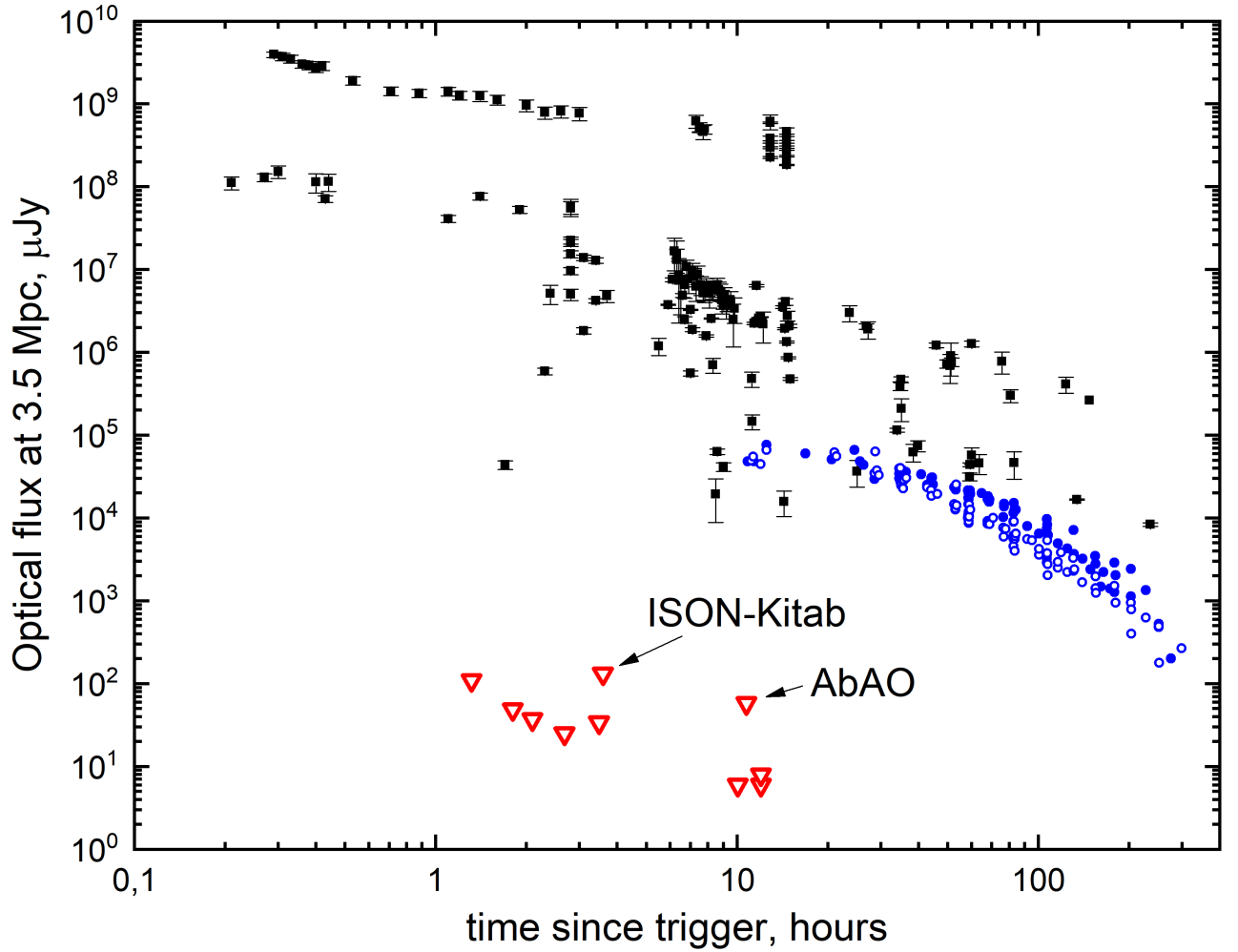


Рисунок 4.3 — Сравнение оптических наблюдений GRB 231115A с кривыми блеска других коротких гамма-всплесков, перенесенных на расстояние $D_L = 3.5$ Мпк. Красными незаполненными треугольниками обозначены верхние пределы на оптический поток по данным из табл. ???. Черные квадраты — фотометрия коротких гамма-всплесков с измеренным красным смещением из работы [224]. Синие кружки — кривая блеска килоновой GRB 170817A в фильтрах r и i , соответственно [225].

имеющаяся точность локализации всплеска не позволяет полностью исключить данный сценарий.

4.3 GRB 240225B

4.3.1 Регистрация и локализация

Гамма-всплеск GRB 240225B был зарегистрирован 2024-02-25 в 20:15:46 UT рентгеновским телескопом GSC/MAXI, работающим на МКС, в диапазоне энергий (4, 10) кэВ [226] и локализован внутри эллипса с центром в координатах (J2000) $\alpha = 08^{\text{h}}33^{\text{m}}49^{\text{s}}$ и $\delta = +27^{\circ}29'13''$. Статистическая ошибка локализации на уровне значимости 90% составила 0.13° по главной оси эллипса и 0.11° по побочной, соответственно. Всплеск также был зарегистрирован несколькими рентгеновскими и гамма-инструментами: *AstroSat* – детекторами CZTI в диапазоне (20, 200) кэВ и антисовпадательными детекторами CsI в диапазоне 100–500 кэВ [227], антисовпадательной защитой обсерватории INTEGRAL (SPI-ACS) в диапазоне энергий $\gtrsim 80$ кэВ, детектором GBM/CALET в диапазоне (100, 500) кэВ [228], детектором *Konus-Wind* в диапазоне (10, 3000) кэВ [229] и гамма-телескопом *Glowbug* в диапазоне 10–10000 кэВ [230].

4.3.2 Оптические наблюдения

Оптическое послесвечение GRB 240225B было открыто телескопом GOTO-N, который случайно охватил область локализации рентгеновского телескопа GSC/MAXI в ходе обзора неба. На момент открытия источник был назван GOTO24tz/AT2024dgu². Оптический компонент в координатах (J2000) RA=08^h33^m26^s.67, Dec=+27°04'32".71 впервые был обнаружен 2024-02-25 в 21:45:51 UT (т.е. через 1.5 ч после триггера MAXI) с блеском $L = 17.12 \pm 0.04$ mag

²<https://www.wis-tns.org/object/2024dgu>

и последний раз детектировался на следующую ночь в 22:10:38 UT (через 25.91 ч) с блеском $L = 19.69 \pm 0.18 \text{ mag}$ [231].

Наблюдения оптического послесвечения проводились в том числе на 1.5-метровом телескопе АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН наблюдательной сети IKI-GRB-FuN, начиная с 2024-02-27 13:01:23 UT. С помощью КМОП-фотометра Andor NEO, установленного в фокусе телескопа, была получена серия из 30 кадров с экспозицией по 120 секунд в фильтре R . Апертурная фотометрия суммарного изображения всей серии дала значение звездной величины оптического послесвечения $R = 19.72 \pm 0.07$ (AB), поэтому наблюдения на АЗТ-ЗЗИК были продолжены вплоть до 2024-03-17. Обработка всех полученных данных выполнялась с помощью конвейеров APEX. Фотометрия оптического послесвечения на разностных изображениях проводилась с помощью программного конвейера `apex_forced_phot`. Вычитание изображения-шаблона родительской галактики выполнялось с помощью программного конвейера `apex_subtract`. В качестве шаблонного выбрано изображение поля GRB 240225B из обзора Pan-STARRS-DR1 в фильтре r , полученного через сервис HIP2FITS³ [232], доступ к которому реализован в `apex_forced_phot`. Процедура вычитания шаблонного изображения гарантировала, что даже малый вклад родительской галактики, присутствующей в обзоре Legacy Survey DR9 с блеском $r \sim 24.2$ и фотометрическим красным смещением $z \sim 0.9$, не влияет на результаты фотометрии послесвечения.

Оптический мониторинг послесвечения GRB 240225B производился также следующими телескопами: 0.5-м HMT, NOT, LT, MITSUME-AKENO, 3.6-м DOT, 1.25-м PALOMAR, 1.0-м ZEISS-1000 CAO РАН и VLT. Полный журнал оптических наблюдений приведен в работе [4] и продублирован в таблице 17.

4.3.3 Результаты

В результате полученных измерений послесвечения в работе [4] была построена кривая блеска, вклад в которую у данных, полученных на телескопе АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН был определяющим. В той же работе [4] с помощью Монте-Карло моделирования простой моделью джета «top-hat» были получены

³<https://alasky.cds.unistra.fr/hips-image-services/hips2fits>

микрофизические параметры источника и СМВ, такие как угол раскрытия $\theta \approx 4^\circ.0$ джета гамма-всплеска, угол наблюдения $\theta_v \approx 5^\circ.4$, плотность СМВ $n_0 \approx 74 \text{ см}^{-3}$, полная изотропная энергия $E_0 \approx 1.9 \times 10^{54}$ эрг. Полученные значения характерны для длинных всплесков, наблюдающихся под малым углом к оси джета. Высокая плотность СМВ свидетельствует о прохождении джета через звездный ветер от звезды-прародителя гамма-всплеска.

4.4 EP240801a/XRF 240801B

4.4.1 Регистрация и локализация

EP240801a – рентгеновский транзиент (мягкий гамма-всплеск), впервые зарегистрированный обсерваторией EP 2024-08-01 в 09:06:20.7 UT с помощью широкоугольного телескопа WXT. В последующих наблюдениях телескопа FXT на борту EP были получены более точные координаты рентгеновского источника (на эпоху J2000): RA=23^h00^m39^s.12, Dec= +32°35'33".72 с ошибкой 10" (со значимостью 90%, см. рисунок 4.4). Из-за мягкого спектра события не было автоматически зарегистрировано экспериментом GBM на борту обсерватории Fermi. Дальнейший подпороговый поиск в данных GBM показал наличие сигнала в диапазоне (8, 900) кэВ.

4.4.2 Оптические наблюдения

Оптический компонент EP240801a был найден 2024-08-01 в 11:06:18 UT, т.е. спустя ~ 2.2 часа после триггера EP с помощью 0.7-м Тайландского роботического телескопа (TRT) в координатах (J2000) RA=23°00^m39^s.12, Dec=+32°35'37".95 с погрешностью в 0".5 (66.7%).

Затухающее оптическое послесвечение наблюдалось в том числе и телескопами АЗТ-22/МАО, ЗТШ/КрАО РАН, Zeiss-1000 и БТА/САО РАН, АС-32/АбАО, координируемыми в рамках наблюдательной сети IKI-GRB-FuN.

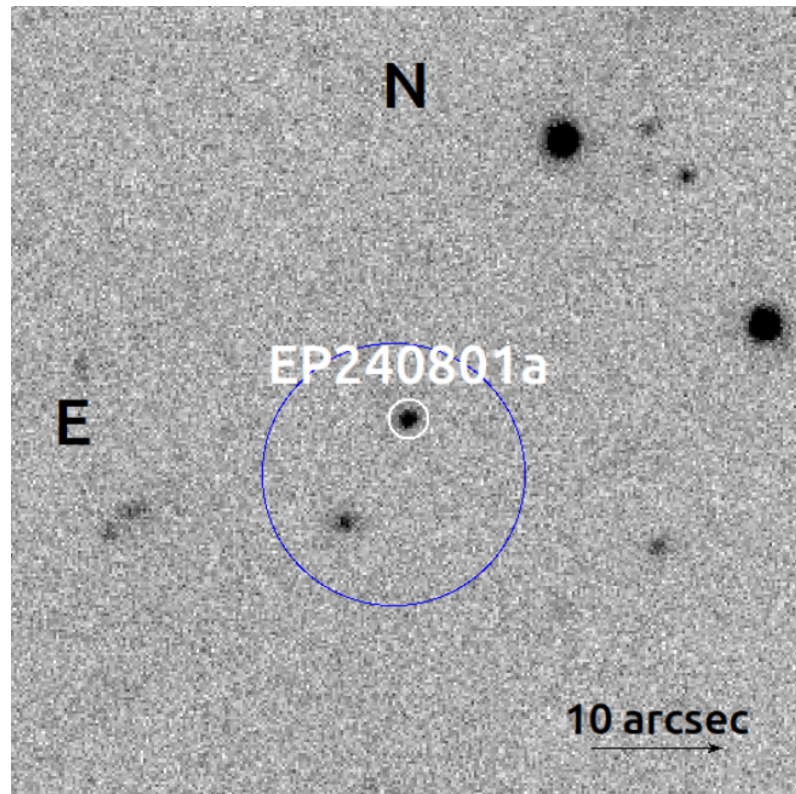
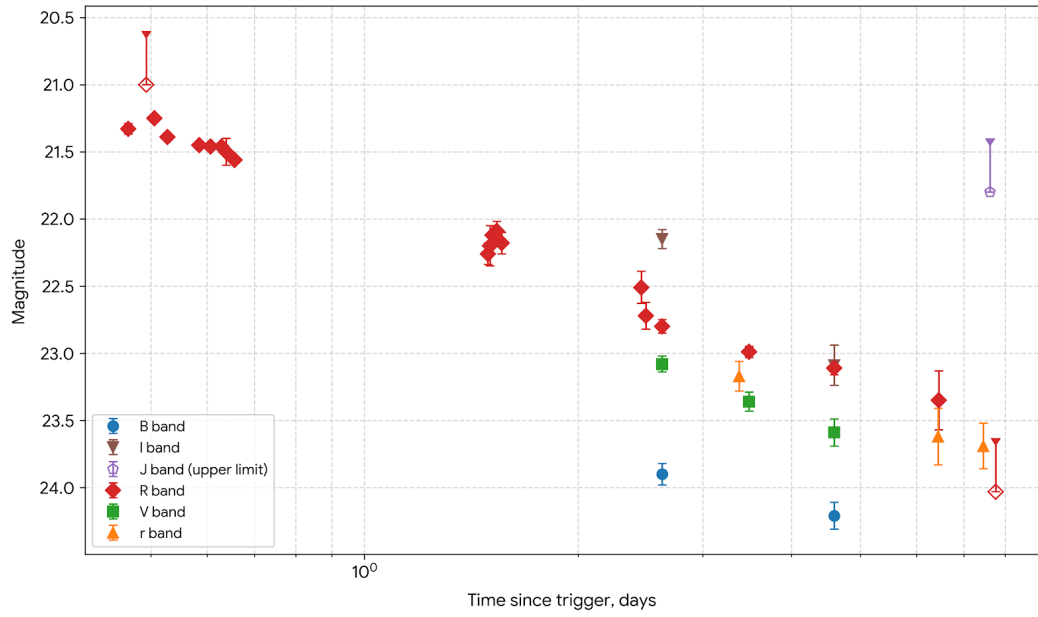


Рисунок 4.4 — Локализация рентгеновского компонента EP240801a по данным FXT/EP (синий кружок) и его оптического компаньона (белый кружок), нанесенные на изображение, снятое телескопом NOT. Рисунок взят из работы [3].

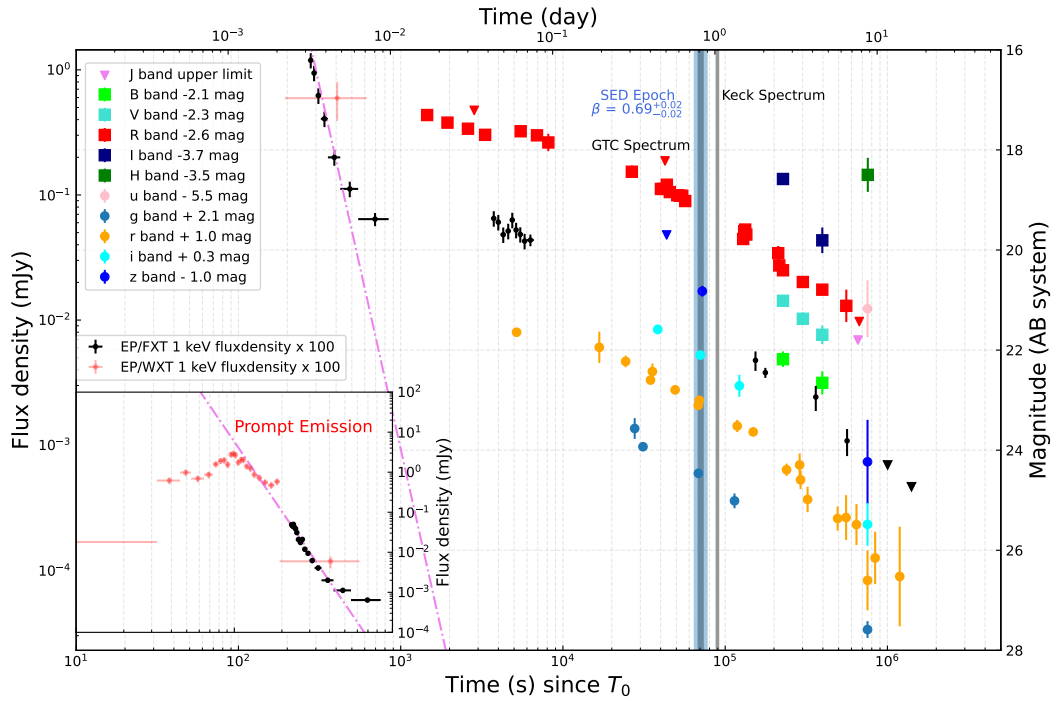
Через примерно 7.6 сут. после регистрации EP240801a проведено наблюдение поля транзиента телескопом SAI-25/КГО с целью измерения блеска родительской галактики. Полученные изображения единообразно обрабатывались программными конвейерами АРЕХ. В частности, конвейер `apex_forced_phot` применялся для получения измерения блеска оптического источника, которые использованы при построения кривой блеска. Журнал наблюдений телескопов IKI-GRB-FuN приведен в таблице 16, а кривая блеска, построенная по данным наблюдений, представлена на рис. 4.5а.

4.4.3 Результаты

В работе [3] на основе многоволновых данных (полная кривая блеска представлена на рис. 4.5б), в том числе и оптических, приведенных в таблице 16, произведено физическое моделирование моделями двухкомпонентного дже-



а) Многоцветная оптическая кривая блеска EP240801a/XRF 240801B, полученная по результатам наблюдений телескопов сети IKI-GRB-FuN.



б) Многоволновая кривая блеска по данным наблюдений в рентгеновском, оптическом и ИК диапазонах. Рисунок взят из работы [3].

Рисунок 4.5 — Кривые блеска EP240801a.

та, прямой и обратной ударных волн (отдельно пик для прямой и обратной ударных волн) и моделью инжекции энергии из центральной машины всплеска (протомагнетар и BZ-механизм). В результате наблюдаемая кривая блеска не противоречит всем трем рассматриваемым моделям. Однако, наблюдается общая особенность – наличие широкой, низкоэнергетичной компоненты джета с другой популяцией электронов ($p = 2.3 - 2.4$) по сравнению с центральной частью джета ($p = 2.0 - 2.2$). По-видимому, джет EP240801a наблюдался под значительным углом, что объясняет слабое гамма-излучение в диапазоне (8, 900) кэВ, обнаруженное только в результате подпорогового поиска.

4.5 Выводы главы

Выполнен поиск оптического компонента гигантской вспышки магнетара GRB 231115A с помощью программного конвейера `apex_subtract` для поиска кандидатов в транзиенты методом вычитания изображений. В результате были получены ограничения на поток от возможного оптического компонента GRB 231115A, которые составили 58.4 мкЯн в фильтре R ($>19^m.3$) и 92.5 мкЯн в чистом свете. Применены программные конвейеры `APEX` для обработки наблюдательных данных, полученных телескопами сети IKI-GRB-FuN, для гамма-всплесков GRB 240225B и EP240801a/XRF 240801B. Полученные в результате обработки данных измерения блеска послесвечений GRB 240225B и EP240801a/XRF 240801B были использованы в физическом моделировании перечисленных источников в работах [3; 4]. Произведен многоволновый спектральный анализ послесвечения гамма-всплеска GRB 230328B по данным наблюдений в оптическом диапазоне телескопом NUTELLA-TAO и в мягком рентгеновском диапазоне 0.3–10 кэВ телескопом XRT/Swift. По результатам аппроксимации спектра степенной моделью с учетом поглощения на луче зрения можно предположить, что источник гамма-всплеска находился либо в области активного звездообразования или же за ней.

Глава 5. Многоволновый анализ послесвечения гамма-всплеска GRB 200829A

Настоящая глава посвящена многоволновому исследованию многоволновых данных послесвечения гамма-всплеска GRB 200829A. При проведении расчетов использовалась Λ CDM модель Вселенной со следующими космологическими параметрами: $H_0 = 69.6 \pm 0.7$ км с⁻¹ Мпк⁻¹, $\Omega_m = 0.286 \pm 0.008$, $\Omega_\Lambda = 0.714 \pm 0.008$ (Беннетт и др., 2014). Статистические неопределенности, если не указано иное, приведены на уровне значимости 1σ (66.7%). Материалом для данной главы послужили результаты работы [1].

5.1 Наблюдения

5.1.1 Регистрация и локализация

Событие GRB 200829A было зафиксировано инструментом BAT/Swift как яркий длинный гамма-всплеск с длительностью ~ 30 с. Соответствующее алертное сообщение было распространено через систему NASA GCN (Сигель и др., 2020). Рентгеновский компонента GRB 200829A была обнаружен телескопом XRT/Swift 29 августа 2020 г. в 14:01:43.1 UT, т.е. через 128.7 с после триггера BAT; источник находился в $27''$ от центра области локализации гамма-компонента (Сигель и др., 2020, Гoad и др., 2020). Оптическое послесвечение с блеском $White = 14.28 \pm 0.14$ было открыто телескопом UVOT на борту Swift в координатах (J2000) R.A. = 16:44:49.14, Dec. = +72:19:45.63 со статистической ошибкой $\pm 0.35''$ (90%, Куин и др., 2020). В ходе последующего мониторинга с помощью UVOT/Swift наблюдалось дальнейшее снижение блеска источника [233].

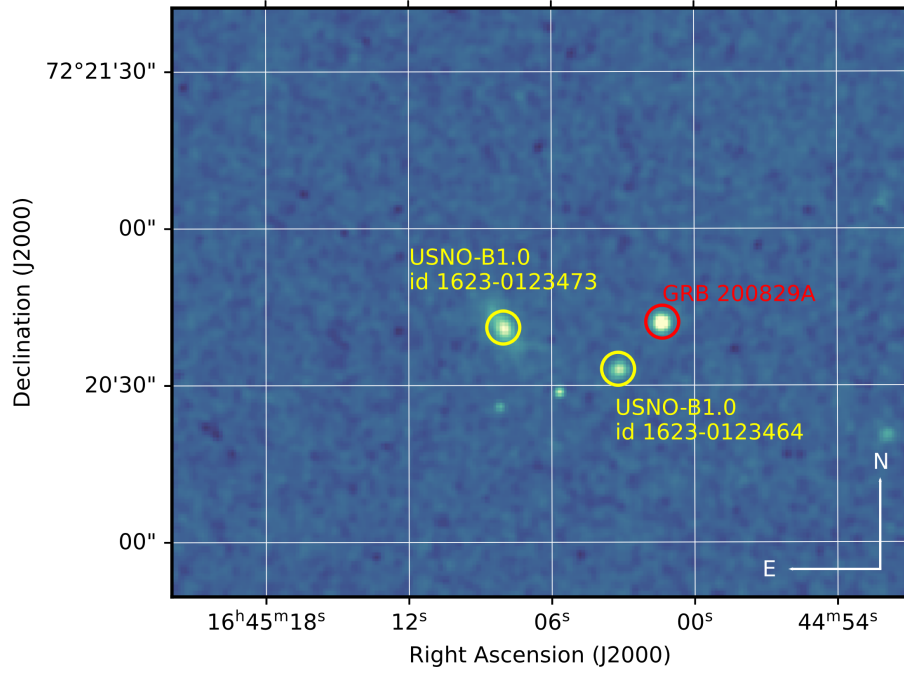


Рисунок 5.1 — Изображение поля GRB 200829A (объект выделен красным кружком), полученное Zeiss-1000/ТШАО/через ~ 1 ч после триггера БАТ. Объекты из каталога USNO-B1.0 отмечены желтыми кружками с соответствующими идентификаторами. На рисунке север — вверх, восток — влево.

5.1.2 Наземные наблюдения

Среди наземных оптических телескопов первым на сообщение о регистрации GRB 200829A отреагировал 1-м телескоп ТШАО/Zeiss-1000 сети IKI-GRB-FuN. Наблюдения начались в 14:49:05 UT, т.е. через ~ 1 ч после триггера БАТ/Swift [10]. На единичном изображении (рис.5.1) с экспозицией 60 с блеск источника составил $R = 16^{\text{m}}.8 \pm 0^{\text{m}}.1$.

Наблюдения продолжались в течение последующих 2.83 ч, что позволило сформировать детальную кривую блеска в фильтре R . Мониторинг оптического послесвечения был продолжен за счет других инструментов сети IKI-GRB-FuN, приведенных в таблице

С помощью 36-см телескопа РК-36/Китаб-ИСОН проводились квазисинхронные с ТШАО наблюдения в чистом свете. Начиная с 2020-08-29 17:25 UT, к наблюдениям были подключены телескоп Zeiss-1000 Симеизской обсерватории на г. Кошка (ИНАСАН) для наблюдений в фильтрах R и I , а также АЗТ-11/КрАО РАН (фильтр R). Благодаря скоординированным действиям

Расположение	Обсерватория	Телескоп	Апертура м	Поле зрения угл. мин	Прибор
Научный, Крым	КрАО РАН	ЗТШ	2.6	9.5×9.5	FLI PL4240
Научный, Крым	КрАО РАН	АЗТ-11	1.25	10.9×10.9	CCD photometer
Абастумани, Грузия	АбАО	АС-32	0.7	44×44	FLI PL4240
Китаб, Узбекистан	Китаб-ИСОИ	РК-36	0.7	44×44	ML0160911
Тянь-Шань, Казахстан	ТШАО	Zeiss-1000	1.0	19×19	FLI
Симеиз, Крым	Симеиз	Zeiss-1000	1.0	9.9×9.9	FLI
Майданак, Узбекистан	МАО	АЗТ-22	1.5	18.3×18.3	SNUCAM
Монды, Россия	ССО СО РАН	АЗТ-33ИК	1.6	6.7×7.9	Andor NEO
Нижний Архыз, Россия	САО РАН	Zeiss-1000	1.0	7.3×7.3	CCD photometer
Нижний Архыз, Россия	САО РАН	БТА	6.0	6.1×6.1	SCORPIO-1

Таблица 6 — Основные параметры телескопов сети IKI-GRB-FuN, задействованных в наблюдениях поля grb200829a.

нескольких обсерваторий была получена подробная кривая блеска за первые 12 часов. Оптический транзиент также фиксировался телескопами АС-32/АбАО (фильтр R) и Zeiss-1000/САО РАН (фильтры R, I). Поздние наблюдения в фильтре R выполнялись с помощью 1.5-метрового телескопа АЗТ-22/МАО. С помощью АЗТ-22 была предпринята попытка детектирования возможной СН в интервале от 13 до 45 суток после всплеска, а также поиск родительской галактики (спустя приблизительно один год после триггера).

5.2 Анализ данных послесвечения

Эмпирической базой анализа послужили публичные данные экспериментов BAT, XRT и UVOT обсерватории Swift, а также фотометрические данные из циркуляров NASA GCN¹, [234—237]. Также были использованы изображения в фильтре r' с Северного Оптического Телескопа (NOT), полученные через архив THE NOT FITS HEADER ARCHIVE². Аппроксимация кривых блеска реализована с использованием пакета LMFIT³ [238] для языка PYTHON.

¹<https://gcn.nasa.gov/circulars/events/grb-200829a?view=group&query=200829a>

²<http://www.not.iac.es/observing/forms/fitsarchive/>

³<https://github.com/lmfit/lmfit-py/>

5.2.1 Оптические данные

Рентгеновское и оптическое послесвечение GRB 200829A регистрировалось на протяжении ~ 3 суток. Для получения однородных оптических измерений была проведена унифицированная обработка изображений, полученных телескопами сети IKI-GRB-FuN и телескопом NOT, с использованием программных конвейеров APEX. Стандартная обработка изображений проведена по алгоритму из Главы (см. текст и рис. 3.2). В отдельных случаях, при низком отношении сигнал/шум ($S/N < 5$), дополнительно применялся инструментальный PYRAF [239]. Астрометрическая привязка осуществлялась по опорному каталогу USNO-B1.0. Фотометрия источника на основе звезд из каталогов USNO-B1.0 и PanSTARRS-PS1. Фотометрия в чистом свете выполнялась относительно звездных величин в фильтре R . Журнал наблюдений приведен в табл. 5.1. На рис.5.2 представлена многоцветная оптическая кривая блеска.

Из рассмотрения кривой блеска в фильтре R наблюдается излом, который может быть интерпретирован как геометрический эффект угла зрения, характерный для релятивистских джетов [60; 79]. В дальнейшем анализе предполагается отсутствие спектральной эволюции оптического послесвечения. В рамках данного предположения кривые блеска фильтрах $ubgvrizI, uvw1, uvw2$ и чистом свете (в том числе фильтре $white_{\text{swift}}$) были приведены к кривой в фильтре R умножением потока на соответствующий коэффициент, обеспечивающий наилучшее согласие согласно критерию χ^2 .

5.2.2 Рентгеновские данные

Рентгеновская кривая блеска GRB 200829A (рис.5.3) была построена на основе данных, полученных из сервиса SWIFT BURST ANALYZER⁴. Данные (время и поток в режимах WT и PC) представлены в текстовом формате .qdr и охватывают период ~ 2 суток. Поток был сгруппирован в бины с логарифмически возрастающей длительностью (начиная с 60 с) для учета степенного характера

⁴https://www.swift.ac.uk/burst_analyser/00993768/

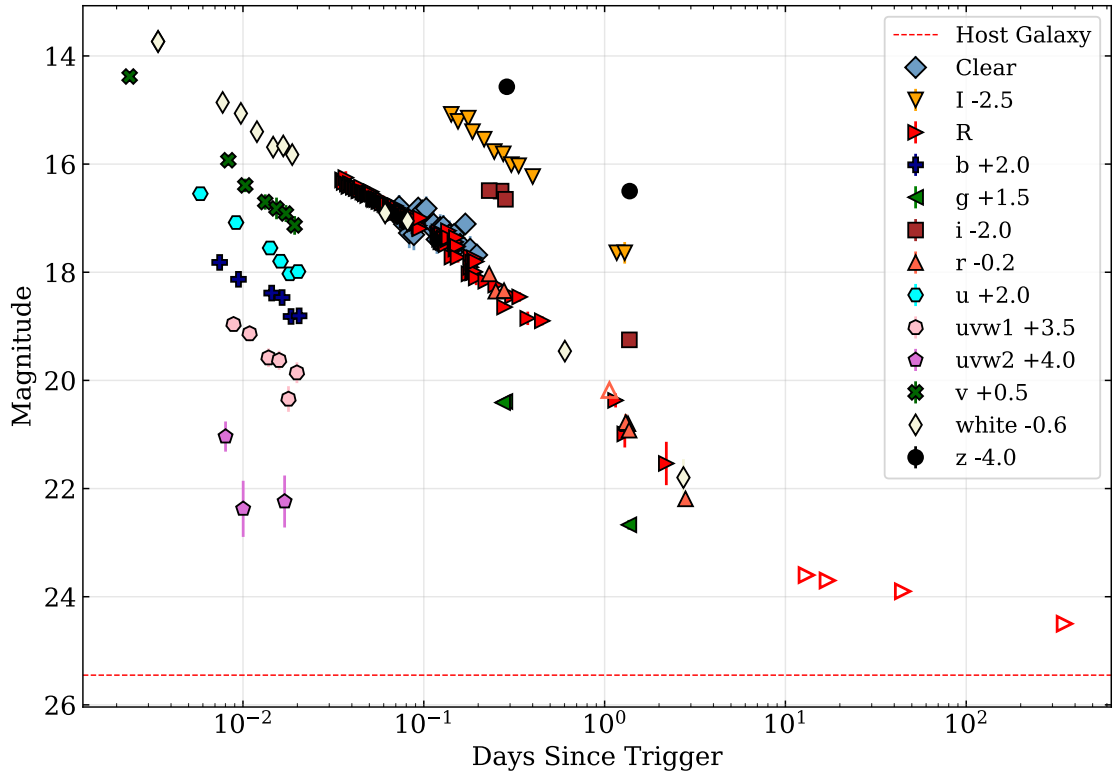


Рисунок 5.2 — Многоцветная оптическая кривая блеска GRB 200829A. По горизонтальной оси отложено время после триггера GBM (сут), по вертикальной — видимая звездная величина. Символы соответствуют фотометрическим измерениям в различных фильтрах. Штриховая линия обозначает уровень яркости родительской галактики. Незакрашенные символы представляют верхние пределы (3σ).

затухания послесвечения. С помощью группировки кривую блеска была сглажена, а значимость отдельных измерений улучшена. Результаты представлены на.

Характер рентгеновской кривой блеска повторяет (качественно) оптическую кривую блеска, но излом в кривой блеска наступает раньше. Отдельно для рентгеновской кривой блеска было проведено моделирование степенным законом с изломом [240], что позволило определить показатели наклоны кривой до и после излома, а также временную координату самого излома. Показатель наклона до излома составил $\alpha_1 = 1.06 \pm 0.03$, а после излома — $\alpha_2 = 1.88 \pm 0.06$. Заметим, что значение α_1 хорошо согласуется с наклоном продленного излучения в мягком гамма-диапазоне (15–50 кэВ) $\beta = 1.28 \pm 0.18$ [1]. Данное наблюдение позволяет предположить, что рентгеновское послесвечение это мяг-

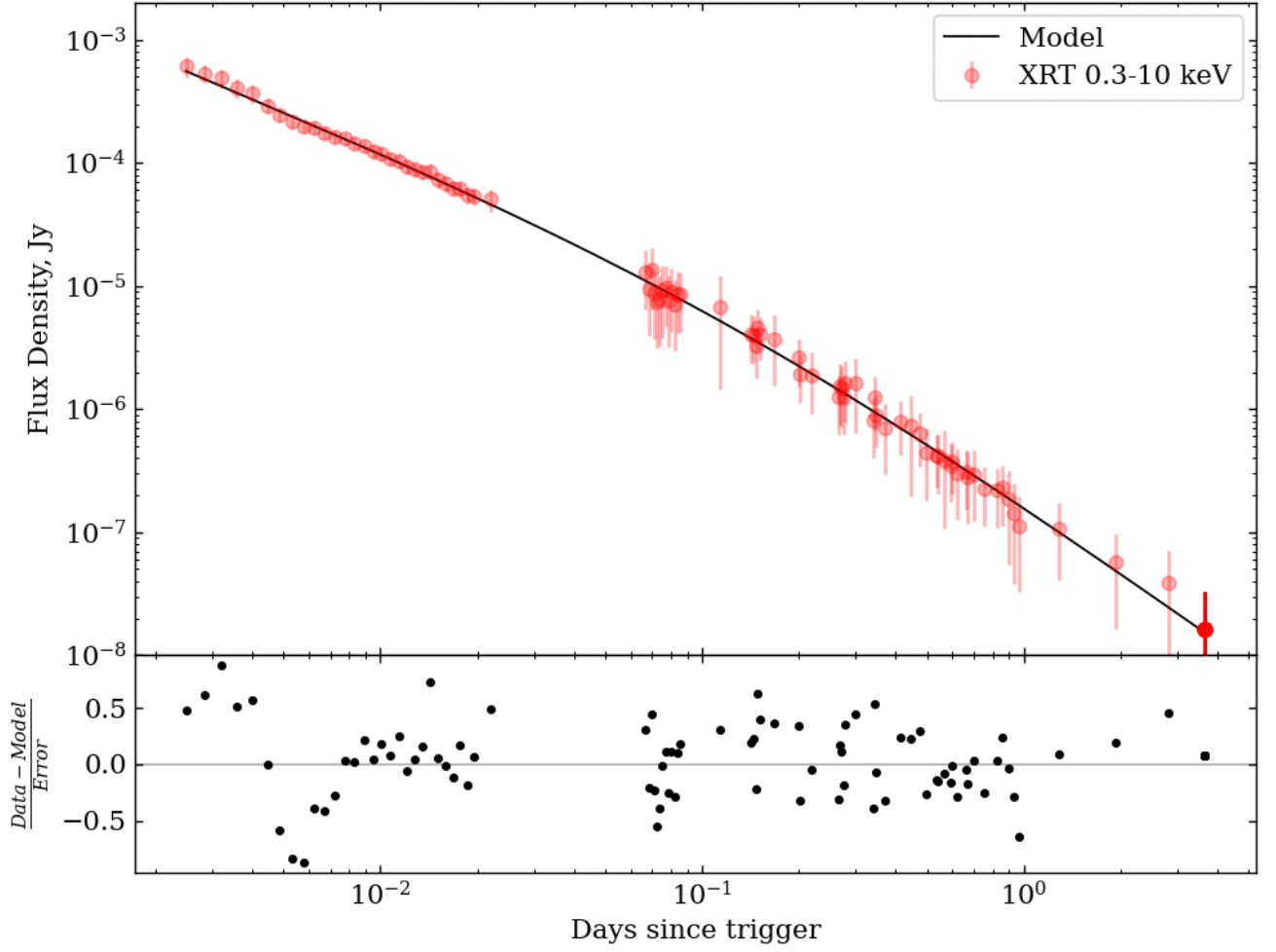


Рисунок 5.3 — Верхняя панель: рентгеновская кривая блеска GRB 200829A. По горизонтальной оси – время после триггера GBM (сут), по вертикальной – наблюдаемая плотность потока (Ян). Экспериментальные значения обозначены кружками, аппроксимирующая зависимость – жирной сплошной линией. Нижняя панель: отклонение экспериментальных данных от модели в единицах σ .

кий «хвост» продленного мягкого гамма-излучения. Исходя из этого, кривая блеска в гамма-диапазоне была приведена к рентгеновской в интервале 100–1000 с относительно T_0 при допущении ахроматичности излучения в данных диапазонах. Коэффициент приведения, полученный в результате минимизации функционала χ^2 , составил $k = F_{XRT}/F_{BAT} = 4.54$.

5.2.3 Многоволновая кривая блеска

Проведем совместное моделирование кривых блеска в рентгеновском и оптическом диапазонах (рис.5.4), полученных в предыдущих подразделах.

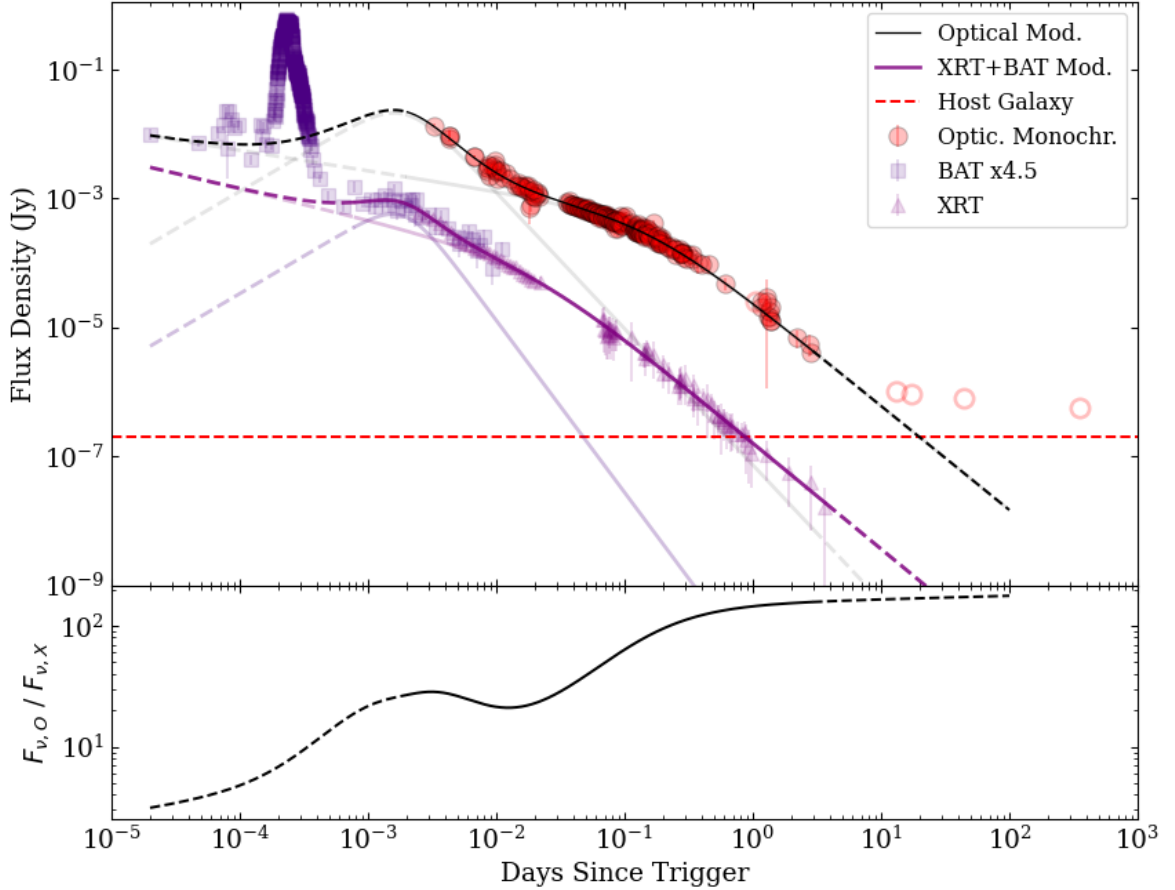


Рисунок 5.4 — Верхняя панель: совместная кривая блеска GRB 200829A. Горизонтальная ось – время после триггера GBM $t - T_0$ (сут), вертикальная – спектральная плотность потока (Ян). Оптические данные (красные кружки) объединены в монохроматическую кривую. Рентгеновская кривая (фиолетовые треугольники) совмещена с данными в гамма-диапазоне (синие квадраты) в предположении ахроматизма. Незакрашенные символы – верхние пределы. Сплошные линии – модельные кривые. Нижняя панель: эволюция отношения оптического и рентгеновского потоков.

Визуальный анализ оптической и рентгеновских кривых блеска (см. рис.6.2) показывает наличие трех общих фаз (не считая активной фазы всплеска): вспышки, плавно переходящей в степенное затухание потока, последующего хроматического излома, после которого поток затухает быстрее (начинается фаза позднего послесвечения). Передний фронт вспышки на фоне степенного падения характеризуется сравнительно пологим профилем. Ввиду недостатка данных в оптической кривой, временная координата максимума вспышки была принята равной соответствующему значению, определенному по рентгеновской кривой.

В качестве модели использовалась функция, представляющая собой сумму двух степенных законов с гладким изломом (выражение 5.1):

$$F(t) = (F_1^{-n} + F_2^{-n})^{-\frac{1}{n}} + (F_3^{-n} + F_4^{-n})^{-\frac{1}{n}} \quad (5.1)$$

где $F_i = (\frac{t-T_0}{t_{b_j}})^{\alpha_i}$, t – время относительно триггера (сут), t_{b_i} – ордината излома кривой блеска (сут), α_i – показатели степенного наклона до и после излома, n – параметр сглаживания ($n > 0$), $i = 1, 2, 3, 4$, $j = 1$ при $i = 1, 2$ и $j = 2$ при $i = 3, 4$. В таблице 7 приведены результаты моделирование кривых блеска. Моделирование рентгеновской кривой проводилось на интервале ~ 50 с – 3.66 сут, а оптической в интервале 283 с – 2.80 сут. Также был построен график жесткости излучения – отношения потока в оптическом диапазоне к потоку в рентгеновском диапазоне 0.3 – 10 кэВ (см. нижнюю панель на рис.6.2).

5.3 Определение красного смещения

Для GRB 200829A не было проведено спектроскопических наблюдений для определения красного смещения. Однако, красное смещение это необходимый параметр для определения других физических параметров всплеска. Определим оценку красного смещения фотометрически по методу совместной аппроксимации наблюдаемого оптического спектрального распределения энергии (SED) и рентгеновского спектра послесвечения [137]. Для определения оценки красного смещения использован квазисинхронный рентгеновский спектр (time-sliced spectra) XRT и оптические изображения UVOT, полученные через сервис SWIFT BURST ANALYZER. Данные были выбраны за временной

Энерг. диапазон	F_1 мЯн	α_1	α_2	t_{b_1} $\times 10^{-3}$ сут	F_2 мЯн	α_3	α_4	t_{b_2} сут	χ^2_ν
Рентген.	0.52 ± 0.10	-1.2 ± 1.0	2.7 ± 0.5	1.9 ± 0.4	0.06 ± 0.03	0.5 ± 0.2	1.6 ± 0.1	0.02 ± 0.01	0.34
Оптич.	10 ± 3	-1.2^*	1.9 ± 0.2	1.9*	0.27 ± 0.04	0.3 ± 0.1	1.64 ± 0.08	0.15 ± 0.03	1.1

Таблица 7 — Результаты аппроксимации послесвечения GRB 200829A суммой двух степенных законов с изломом. Параметр гладкости излома был фиксирован во время аппроксимации $n = 1$.

интервал (1554–1638 с от T_0) в котором отсутствует значимая цветовой эволюция. Обработка данных выполнялась с помощью набора программ HEASOFT⁵ [195]. На рисунке 5.5 представлен многоволновый спектр послесвечения GRB 200829A, аппроксимированный модельной кривой.

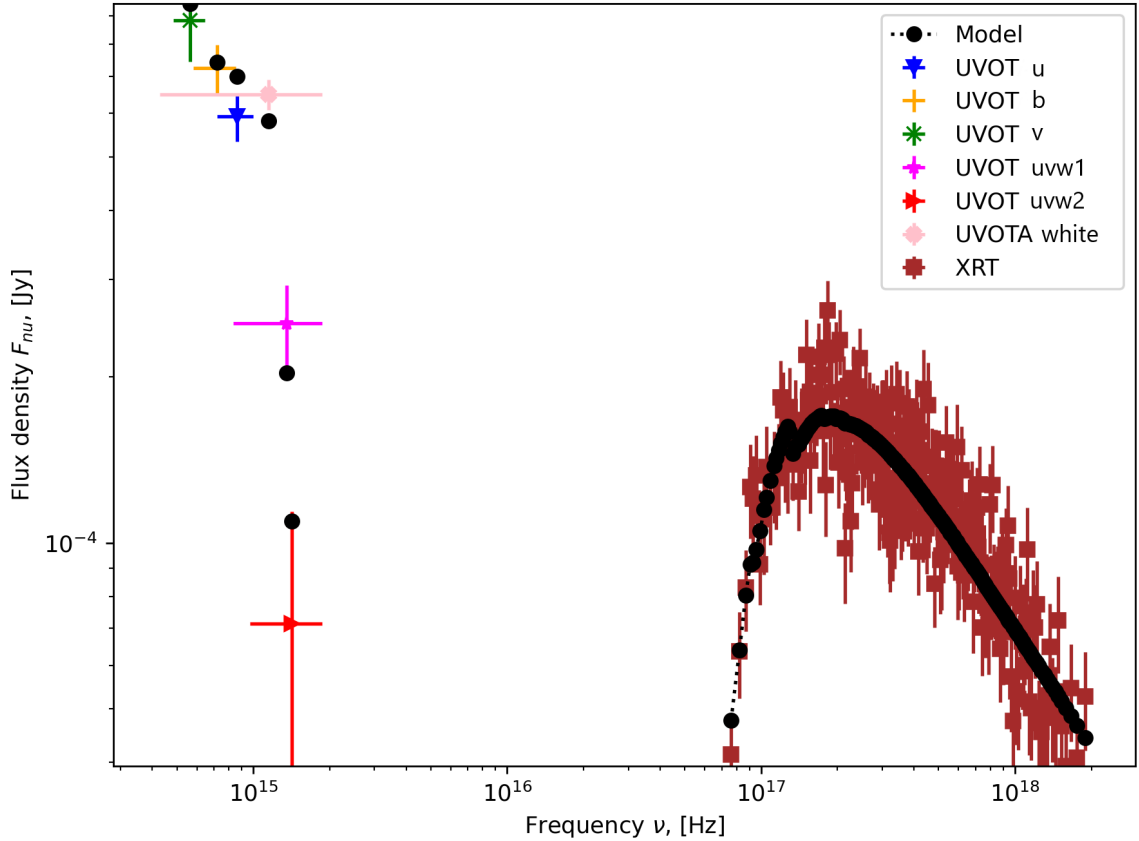


Рисунок 5.5 — Спектр GRB 200829A в интервале 1554–1638 с относительно T_0 . По горизонтальной оси – частота излучения (Гц), по вертикальной – плотность энергетического потока (Ян). Модель представлена черными кружками.

В качестве спектральных моделей рассматривались степенной закон и степенной закон с изломом. Однако, конечный выбор был сделан в пользу первой модели, обеспечивающей лучше согласие с наблюдательными данными. Согласно [137], к модели спектра были добавлены мультипликативные компоненты оптического излучения на межзвездной пыли и фотоэлектрической абсорбции рентгеновского излучения на электронах. В терминах XSPEC (HEASOFT) модель представлена выражением 5.2.

⁵<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools>

Модель кривой поглощения	E(B-V)	R(V)	A(V)	z	nH 10 ²² см ⁻²	β	χ ² /d.f.
MW	0.36 ± 0.02	3.08*	1.11 ± 0.02	1.29 ± 0.04	0.26 ± 0.03	1.72 ± 0.02	248/236
LMC	0.31 ± 0.21	3.16*	0.98 ± 0.21	0.40 ± 0.75	0.42 ± 0.59	1.56 ± 0.01	329/236
SMC	0.19 ± 0.04	2.93*	0.56 ± 0.04	1.36 ± 0.33	0.17 ± 0.06	1.60 ± 0.02	316/236

Таблица 8 — Результаты аппроксимации многоволнового спектра раннего послесвечения. Параметры $E(B-V)$, $R(V)$, $A(V)$ и N_H приведены для родительской галактики. Параметры Галактических компонент поглощения были фиксированы: $E(B-V) = 0.0364$, $R(V) = 3.08$, $A(V) = 0.20$, $N_H = 0.039 \times 10^{-22}$ см⁻². Символом «*» обозначены фиксированные значения.

$$F = \text{zdust} \times \text{zdust} \times \text{phabs} \times \text{zphabs} \times \text{powerlaw} \quad (5.2)$$

где, компоненты **zdust** описывают поглощение в оптике согласно эмпирической кривой [197], а компоненты **phabs** и **zphabs** отвечают за поглощение на водороде в нашей Галактике и родительской галактике гамма-всплеска, соответственно. Пылевая компонента **zdust** характеризуется избытком цвета $E(B-V)$, селективностью поглощения $R(V) = A(V)/E(B-V)$ (A_V – поглощение в фильтре V) и красным смещением z . Компоненты фотоэлектрической абсорбции определяются колонковой плотностью N_H в 10⁻²² см⁻². **powerlaw** – модель степенного спектра излучения, определяемая фотонным индексом $\Gamma = \beta + 1$ и нормировкой. Параметры поглощения Галактических компонент фиксировались: $E(B-V) = 0.0364$ [241], $R(V) = 3.08$ [197], $N_H = 0.039 \times 10^{-22}$ см⁻² [242], $z = 0$. В рамках моделирования спектра проверены три закона поглощения на пыли, доступные в XSPEC: Млечного Пути (MW), Большого Магелланова Облака (LMC) и Малого Магелланова Облака (SMC). Результаты моделирования представлены в табл. 8.

Модель аппроксимировалась методом Левенберга-Марквардта, реализованном в XSPEC. Наилучшая модель, выбранная согласно критерию функционала χ^2/dof , достигается при использовании закона поглощения MW для родительской галактики. Для данной модели оценка фотометрического красного смещения составила $z = 1.29 \pm 0.04$. Полученная оценка в рамках интервалов ошибок согласуется с независимой оценкой $z = 1.25 \pm 0.02$ [243], полученной тем же методом. Однако, в отличие от [243] в данной главе приведены также оценки поглощения в родительской галактике. Отметим, что указанные ошибки на

параметры являются только статистическими. В дальнейшем за красное смещение GRB 200829A в настоящей работе принимается значение $z = 1.29 \pm 0.04$.

5.3.1 Возможная сверхновая

Учитывая природу длинного гамма-всплеска, GRB 200829A мог быть сопровождаться сверхновой (СН). Кампания по поиску СН была проведена на телескопе АЗТ-22МАО в интервале [10, 46] суток после регистрации гамма-всплеска. Данный интервал соответствует типичному времени наступления максимума СН в системе отсчета источника (8–40 сут) (см., напр., [111]). Однако, в ходе наблюдений фотометрического признака СН не было обнаружено. Верхний предел на блеск возможной СН в максимуме светимости составил $m_R > 24^m$ (3σ). Верхний предел на абсолютный блеск возможной СН на $z = 1.29$ был определен по формуле:

$$M_{R,SN} < m_R + 5 - 5 \lg D_L \quad (5.3)$$

где m_R — верхний предел на видимую звездную величину, а D_L — фотометрическое расстояние до источника в парсеках. Отсюда, абсолютный блеск составляет $M_R > -23^m$ с учетом поглощение за Галактику и родительскую галактикой всплеска, $A_{R,MW} = 0.083^m$ и $A_\lambda = 2.14 \pm 0.04$, соответственно. Здесь $\lambda = 0.641 \times (1 + z)$ мкм — эффективная длина волны фильтра R в системе отсчета источника. Значение поглощения в родительской галактике A_λ вычислялось по формуле 5.4:

$$A_V \simeq \frac{E(B - R)}{\xi(\frac{\lambda_B}{1+z})\xi(\frac{\lambda_R}{1+z})} \quad (5.4)$$

где $E(B - R)$ — показатель цвета между фильтрами B и R , ξ — закон поглощения [197], а λ_B и λ_R — эффективные длины волн соответствующих фильтров.

Полученный предел не противоречит известному распределению абсолютных величин СН, ассоциированных с гамма-всплесками [111]. Отметим, что в наблюдениях АЗТ-22МАО также не было обнаружено и родительской галактики GRB 200829A.

5.4 Родительская галактика

В связи с необнаружением родительской галактики на телескопе АЗТ-22МАО были проведены наблюдения в фильтре R на телескопе БТА/САО РАН, начавшиеся 31 июля 2022 г. в 18:30 UT, т.е. через ~ 2 года после регистрации гамма-всплеска. В качестве инструмента наблюдений использовался редуктор фокуса SCORPIO-1 [244] с установленной в фокусе матрицей E2V CCD42-40. На суммарном изображении с экспозицией 2910 с была обнаружена родительская галактика в координатах послесвечения GRB 200829A с точностью $\pm 0.1''$ (см. рис.5.6).

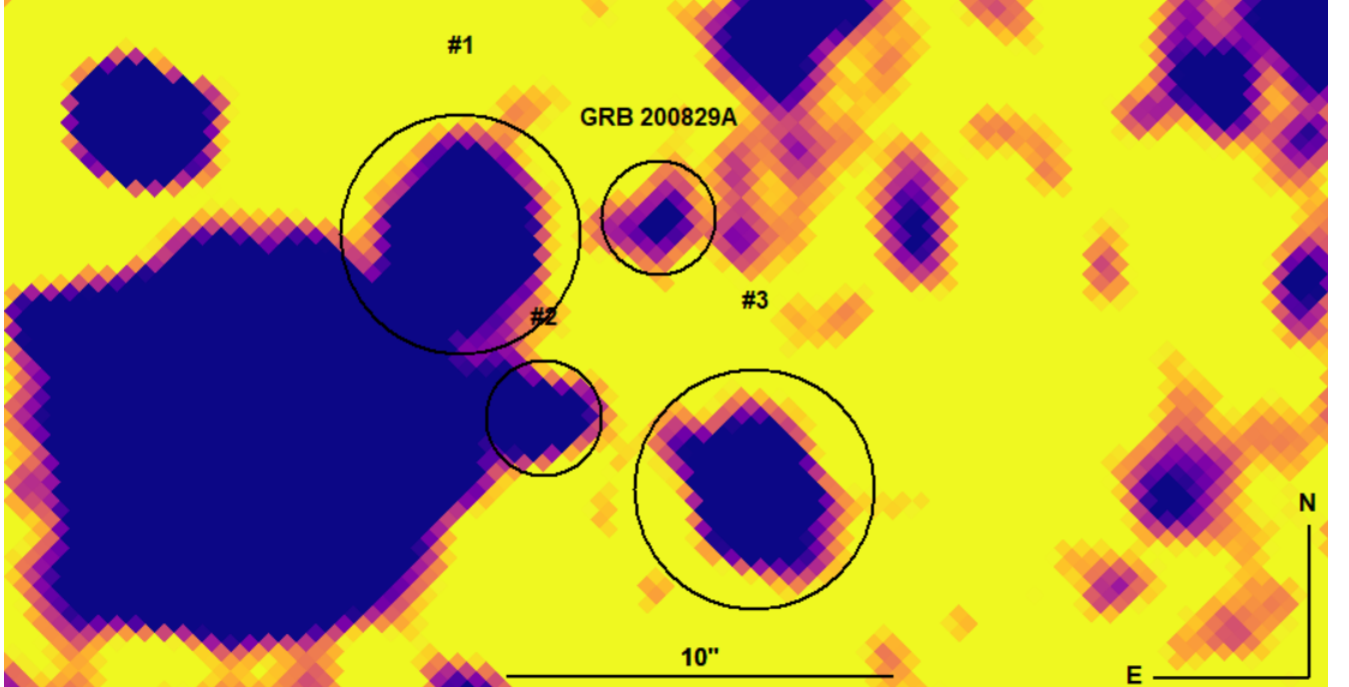


Рисунок 5.6 — Фрагмент изображения поля GRB 200829A в фильтре R , полученное телескопом БТА САО РАН. На месте транзиента виден диффузный объект — родительская галактика (кружок в центре).

Блеск объекта при учете галактического поглощения $A_R = 0.083$ [198] составил $m_R = 25.4^{+0.4}_{-0.3}$, что соответствует типичным значениям для выборки родительских галактик при $z = 1.29$ (см., например, [133; 139; 245]). Отсюда абсолютная звездная величина родительской галактики составит $M_R \sim -19.4^m$.

Оценим темп звездообразования, а из него получим оценку массы родительской галактики. Темп звездообразования (SFR) оценивался с помощью

известной в литературе корреляции абсолютного блеска галактики и темпа звездообразования (например, [246]): $\log SFR M_{\odot} \text{год}^{-1} = -0.381 M_r - 8.029 \pm 0.486$, где M_r – абсолютная звездная величина спиральной галактики в фильтре r . Т.к. родительская галактика GRB 200829A не наблюдалась в фильтре r , но наблюдалась в близком к нему фильтре R , то на основе полученного выше блеска галактики оценивалась звездная величина в фильтре r с помощью стандартного преобразования для спектра Веги ($r = R + 0.21$)⁶. С учетом коррекции за поглощение в Галактике $A_r = 0.088$ [198] абсолютная величина составила $M_r \approx -19.20$. Отсюда оценка темпа звездообразования составляет $\log SFR \approx -0.715 \pm 0.486 M_{\odot} \text{год}^{-1}$. Оценим массу родительской галактики как $M_{\text{host}} \approx SFR \times T_{\text{age}}$, где T_{age} – возраст галактики. Тогда оценка массы получается $M_{\text{host}} \sim 8.5 \times 10^9 M_{\odot}$. Оценки абсолютного блеска получились схожими с таковыми для родительской галактики GRB 181201A, приведенными в работе [247]: $M_R = -18.5 \pm 0.2$, $M_{\text{host}} \sim 1.2 \times 10^9 M_{\odot}$.

Результаты аппроксимации спектра (табл. 8) позволяют определить свойства среды, например, отношение газа к пыли ($N_H/A(V)$) в родительской галактике на луче зрения. Данное отношения для родительской галактики GRB 200829A составляет $N_H/A(V) \approx 2.4 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ (см. рис. 5.7).

⁶<https://astroweb.case.edu/ssm/ASTR620/alternateabsmag.html>

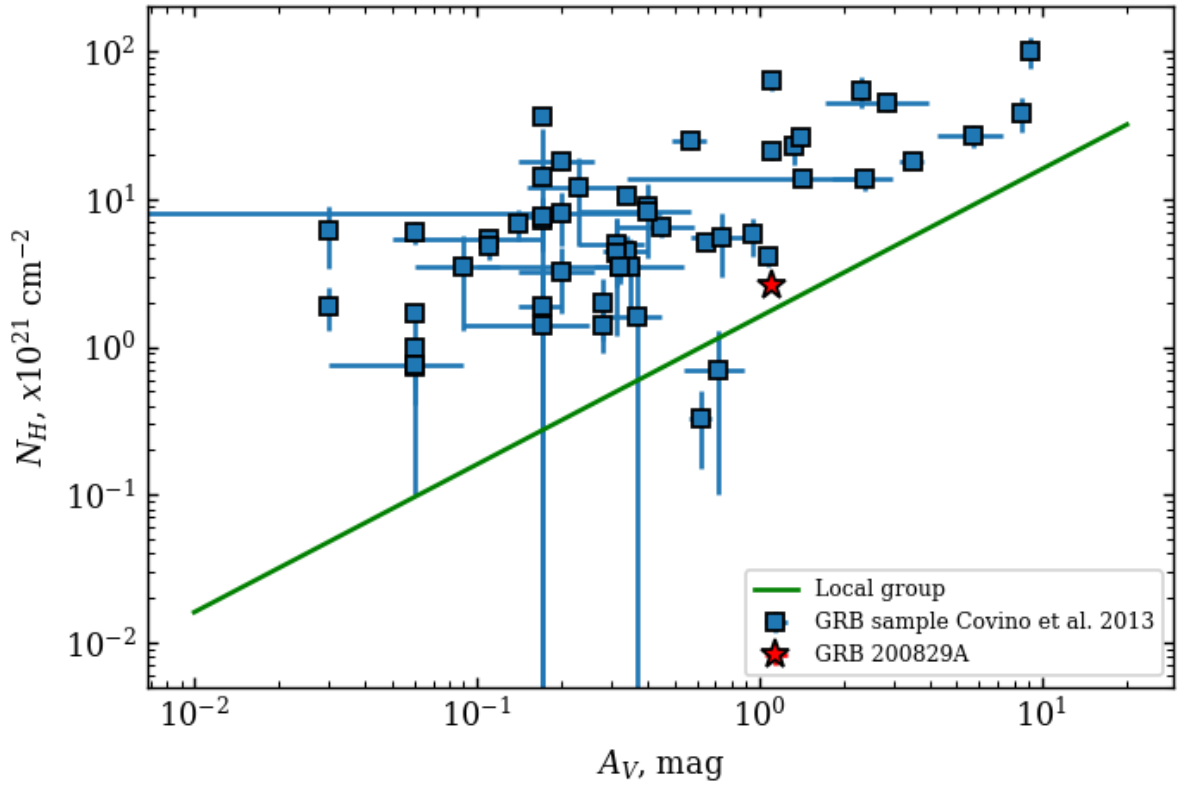


Рисунок 5.7 — Зависимость N_H от A_V . Синие квадраты — данные по родительским галактикам гамма-всплесков [200]. Зеленая линия — линейный закон $\log(y) = 1.6 \log(x)$, характерный для Местной группы галактик. Красная звезда — значение N_H/A_V для родительской галактики GRB 200829A.

Полученное значение отношения $N_H/A(V)$ для родительской галактики GRB 200829A находится в пределах статистического разброса значений из выборки [200] для галактик с $z \sim 1.3$.

5.5 Обсуждение

5.5.1 Хроматизм кривой блеска

Анализ многоволновой кривой блеска раннего послесвечения GRB 200829A (рис.6.2) выявил хроматическое поведение, наблюдаемое в период от фазы вспышки до момента наступления джет-брейка. Подобный эффект может быть объяснен в рамках модели структурированного джета [97], согласно которой излучение в разных энергетических диапазонах генерируется в областях с различными значениями Лоренц-фактора. В частности, рентгеновское и гамма-излучение, обладающее большей жесткостью, возникает в более узком центральном ядре джета с максимальным Γ , в то время как оптическое излучение вносит вклад из более широких внешних оболочек с меньшим значением Лоренц-фактора.

Для проверки данной гипотезы было проведено сравнение расчетных начальных Лоренц-факторов Γ_0 для рентгеновского и оптического диапазонов по формуле (см., напр., [248]):

$$\Gamma_0 = 2 \left[\frac{3E_\gamma(1+z)^3}{32\pi n m_p c^5 \eta t_p^3} \right]^{1/8} \quad (5.5)$$

где m_p – масса протона, c – скорость света, E_γ – энергия джета в гамма-диапазоне с учетом коллимации, $\eta = E_\gamma / \xi E_{iso}$, $t_p = t_b(-\alpha_1/\alpha_2)^{1/\omega(\alpha_2-\alpha_1)}$, t_b – ордината излома в кривой блеска (сут), α_1, α_2 – показатели наклона до и после излома, $\omega = 1$. Ввиду того, что джет-брейк на кривой блеска однозначного не выделяется, для оценки θ_j рассматривались три сценария временной координаты излома t_b (см. табл.??):

1. $t_b = T_0 + 1.9 \times 10^{-3}$ сут (соответствует максимуму вспышки в раннем послесвечении);
2. $t_b = T_0 + 0.02$ сут (излом второй компоненты в рентгеновском диапазоне);
3. $t_b = T_0 + 0.15$ сут (излом второй компоненты в оптическом диапазоне).

Угол раствора конуса джета θ_j определялся согласно выражению 1.6. Результаты расчетов показали следующие значения:

1. $\theta_j \approx 0.474_{-0.039}^{+0.035}^\circ$
2. $\theta_j \approx 1.15_{-0.32}^{+0.47}^\circ$
3. $\theta_j \approx 2.44_{-0.35}^{+0.71}^\circ$.

Сравнение с типичными значениями угла раствора для всплесков с джет-брейком ($\theta_j \approx 2.5 \pm 1.0^\circ$, [81]) позволяет исключить связь вспышки в раннем послесвечении с джет-брейком, так как значение $\theta_j(a) \sim 0.5^\circ$ является аномально малым. Варианты 2 и 3 выглядят физически обоснованными. При этом угол θ_j , вычисленный по времени излома на рентгеновской кривой, оказывается меньше угла, полученного по излому на оптической кривой. Для данных случаев оценка энергии джета составила $E_{\gamma,O} = 7.04_{-1.85}^{+4.72} \times 10^{51}$ эрг для оптической и $E_{\gamma,X} = 1.55_{-0.75}^{+1.51} \times 10^{51}$ эрг для рентгеновской кривых, рассчитанные по формуле 1.8. Значение изотропной эквивалентной энергии в гамма-диапазоне $E_{\text{iso}} = 1.30 \pm 0.01 \times 10^{54}$ эрг взято из работы [1]. Соответствующие Лоренц-факторы составили $\Gamma_X = 197_{-99}^{+170}$ и $\Gamma_O = 120_{-34}^{+85}$. Попытка количественной проверки модели структурированного джета путем сравнения Лоренц-факторов в разных диапазонах не привела к однозначному результату: значения Γ_X и Γ_O совпадают в пределах ошибок. Таким образом, в рамках имеющихся данных не представляется возможным количественно подтвердить связь структурированного джета с наблюдаемым хроматизмом раннего послесвечения, хотя качественные предсказания модели остаются в согласии с наблюдениями.

5.5.2 Вспышка в раннем послесвечении

Проведенный в предыдущих разделах анализ показал наличие вспышке на кривой блеска GRB 200829A в фазе раннего послесвечения. Природа подобных вспышек является предметом активных дискуссий в литературе (например, [249–253]). В частности, на основе данных UVOT/Swift было установлено, что для 80% событий выполняется условие $\Delta t/t_{\text{peak}} < 0.5$ [251]. Кроме того, работы [252; 253] указывают на наличие линейной корреляции между длительностью вспышки ($FWHM$) и временем наступления её максимума (t_{peak}). С целью детального получения профиля вспышки (рис.5.8) из рентгеновской кривой блеска GRB 200829A была вычтена модель послесвечения.

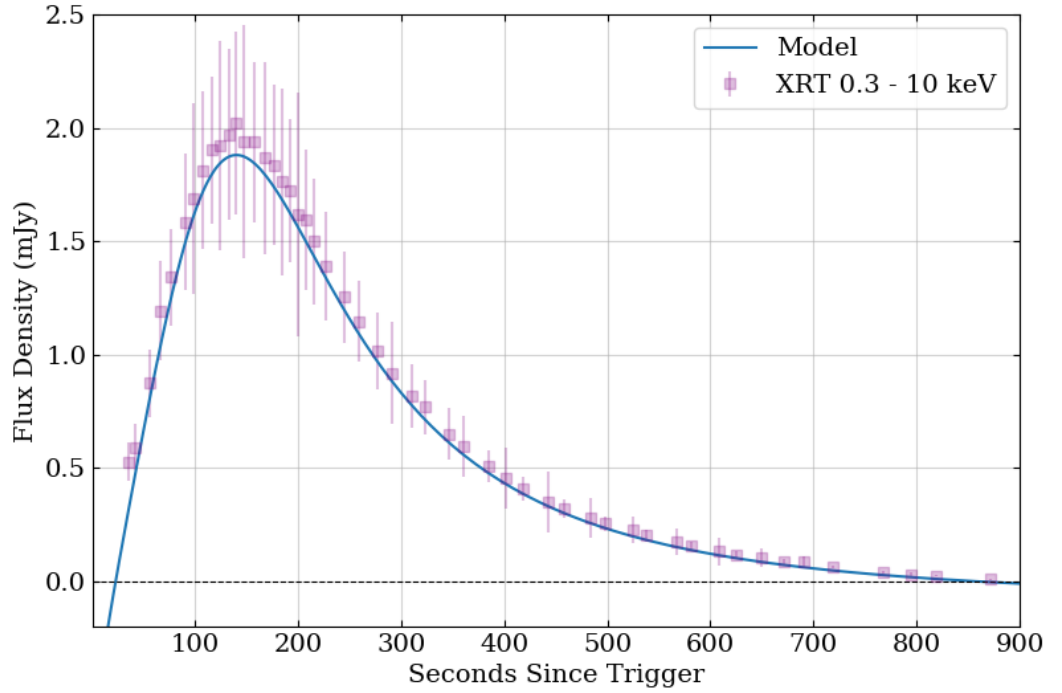


Рисунок 5.8 — Профиль вспышки на рентгеновской кривой блеска GRB 200829A (за вычетом модели послесвечения). По вертикальной оси – спектральная плотность потока (мЯн), по горизонтальной – время относительно T_0 (с). Синяя сплошная линия – модель, фиолетовые квадраты – данные. Данные по мощному импульсу активной фазы исключены.

Затем была проведена аппроксимация профиля вспышки лог-нормальным законом и определены её параметры: $FWHM \approx 146$ с и $t_{peak} \approx 132$ с. Полученные значения не противоречат линейной корреляции $FWHM$ – t_{peak} и свидетельствует в пользу единой физической природы таких событий. Возможными механизмами возникновения вспышек могут быть столкновения релятивистских оболочек, выбрасываемых центральной машиной гамма-всплеска ([38; 254]), одновременное наблюдение различных зон структурированного джета [97] или вариации темпа аккреции $\dot{M}$ [250].

Анализ первых ~ 250 с рентгеновской кривой блеска (см. рис. 6.2) также не позволяет отвергнуть гипотезу о наличии плато. В рамках современной теории подобные особенности объясняются механизмом дополнительной подкачки энергии в ударную волну от центрального компактного объекта, в частности – новообразованной сильнозамагниченной нейтронной звезды (магнетара). Мощное магнитное поле и быстрое вращение магнетара обеспечивают светимость

послесвечения на постоянном уровне в течение определенного периода [66; 68; 254].

Энерговыделение на стадии плато в диапазоне 0.3–10 кэВ ($\Delta\nu = 7.3 \times 10^{16} - 2.4 \times 10^{18}$ Гц) определялось по формуле 5.6:

$$F_{plat} = \int_{t_1}^{t_2} f_\nu(t) dt \Delta\nu \quad (5.6)$$

где временной интервал $[t_1, t_2] = [51.8, 86.4]$ с соответствует участку с показателем степенного закона $\alpha \approx 0$ – плато. Тогда поток плато составит $F_{plateu} = 1.3 \times 10^{-10}$ эрг см⁻², а соответствующая изотропная энергия $E_{plateu} = 5.8 \times 10^{47}$ эрг (согласно формуле 1.4). Отсюда, пиковая светимость плато будет определяться формулой $L_{plateu} = E_{plateu}(1+z)/(t_2 - t_1)$. Подставив все необходимые значения получим, $L_{plateu} = 3.83 \times 10^{46}$ эрг с⁻¹. Полученные значения не противоречат корреляции между светимостью плато L_X и временем его завершения в системе отсчета источника $T_a = t_2/(1+z)$ [98; 255].

5.6 Выводы главы

На основе совместного анализа данных UVOT/Swift и XRT/Swift была получена независимая оценка фотометрического красного смещения $z = 1.29 \pm 0.04$. В ходе оптического мониторинга в интервале 10–40 суток после T_0 признаков ассоциированной сверхновой обнаружено не было. Установленный верхний предел на абсолютный блеск возможной СН $M_R > -23$ не противоречит известному распределению абсолютных звездных величин СН, ассоциированных с гамма-всплесками [111]. С помощью телескопа БТА САО РАН была обнаружена родительская галактика GRB 200829A с абсолютной звездной величиной $M_R \sim -19.44$, поправленной за Галактику, темпом звездообразования $\log SFR \sim -0.7 M_\odot$ в год и массой $\sim 8 \times 10^9 M_\odot$. Поглощение излучения на луче зрения не противоречит линейной корреляции $N_H \gtrsim 1.6 A(V)$, наблюдаемой для родительских галактик гамма-всплесков [200]. Анализ кривой блеска многоволнового послесвечения выявил хроматическое поведение на раннем этапе (до момента излома). Проверена модель структурированного джета; однако из-

за значительных погрешностей измерений не удалось однозначно подтвердить применимость данной модели для объяснения наблюдаемого хроматизма.

Глава 6. Многоволновое исследование послесвечения гамма-всплеска GRB 210610B

В данной главе представлены результаты многоволнового исследования послесвечения гамма-всплеска GRB 210610B. В расчетах использовалась Λ CDM модель Вселенной со следующими космологическими параметрами: $H_0 = 69.6 \pm 0.7 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$, $\Omega_m = 0.286 \pm 0.008$, $\Omega_\Lambda = 0.714 \pm 0.008$ (Беннетт и др., 2014). Статистические ошибки приведены на уровне значимости 1σ (66.7%), если не указано иное. Основным материалом для написания данной главы послужила статья [7].

6.1 Наблюдения

6.1.1 Регистрация и первые наблюдения

Впервые сообщение о регистрации яркого гамма-всплеска длительностью ~ 100 с гамма-телескопом BAT на борту космической обсерватории Swift было разослано через NASA GCN [256]. Регистрация всплеска состоялась 10 июня 2021 г. в 19:51:27 UTC. Спустя 83.9 с помощью телескопа Swift/XRT был обнаружен и рентгеновский компонент GRB 210610B, локализованный в $77''$ от центра области локализации гамма-компонента [256]. Затем с помощью оптического телескопа Swift/UVOT было обнаружено яркое оптическое послесвечение с блеском $m_{\text{White}} = 13^{\text{m}}.70 \pm 0^{\text{m}}.14$ в координатах (J2000) R.A. = 16:15:40.41, Dec. = +14:23:56.7 со статистической ошибкой $\pm 0.61''$ (на уровне 90%; [256]).

GRB 210610B также был зарегистрирован другими космическими гамма-экспериментами Fermi-GBM [257; 258], AGILE ([259]) и Konus-Wind [260].

6.1.2 Наземные наблюдения

Яркое послесвечение GRB 210610B наблюдалось от оптического до радиодиапазона множеством наземных обсерваторий [258—289], в том числе авторским коллективом [11—14; 289—291]. Спектроскопическое красное смещение GRB 210610B $z = 1.1341$ было независимо определено телескопами NOT, GTC и HCT. Данное значение согласуется с фотометрической оценкой красного смещения родительской галактики $z = 0.96 \pm 0.44$, полученной в обзоре Legacy Survey DR9.

Собственные фотометрические наблюдения поля GRB 210610B осуществлялись в основном на телескопах сети IKI-GRB-FuN (Вольнова и др., 2014), а также на телескопе BOOTES-2 (UMA-CSIC). Наблюдения начались на телескопе ЗТШ в 20:19 UT, т.е. через ~ 28 мин после T_0 [290; 291] с помощью CCD-фотометра в фильтрах $BVRI$. Время экспозиции одиночных кадров варьировалось от 10 с до 120 с для обеспечения достаточной значимости сигнала. На рис.6.1 представлен цветной фрагмент поля GRB 210610B, полученный путем суммирования трех изображений в фильтрах BVR .

Наблюдения проводились на протяжении всей ночи, по результатам которых была построена многоцветная кривая блеска [12; 13] с высоким временным разрешением. Мониторинг в фильтре R был продолжен в последующие ночи (11, 12 и 14 июня 2021 г.). В первые две эпохи суммарная экспозиция составляла 2×120 с, в третью эпоху количество кадров было увеличено до 25 в фильтре R в связи с затуханием блеска источника.

Через ~ 15 мин после начала наблюдений на ЗТШ (June10 июня 2021 г. в 20:34 UT) были начаты наблюдения на 1-м телескопе Zeiss-1000/CAO РАН. Серии изображений в фильтрах B, V, R_c снимались с помощью CCD-фотометра. В результате удалось получить кривую блеска в области раннего послесвечения и фазы плато, квазисинхронно с данными ЗТШ. Наблюдения на Zeiss-1000 продолжились 11 и 12 июня.

2 июня 2024 г. в 23:13 UT (~ 1150 сут. после регистрации всплеска) были проведены наблюдения родительской галактики с помощью Большого Телескопа Азимутального (CAO РАН). Съемка в фильтрах BR_c выполнялась при помощи прибора SCORPIO-1 (Афанасьев и Моисеев, 2005).

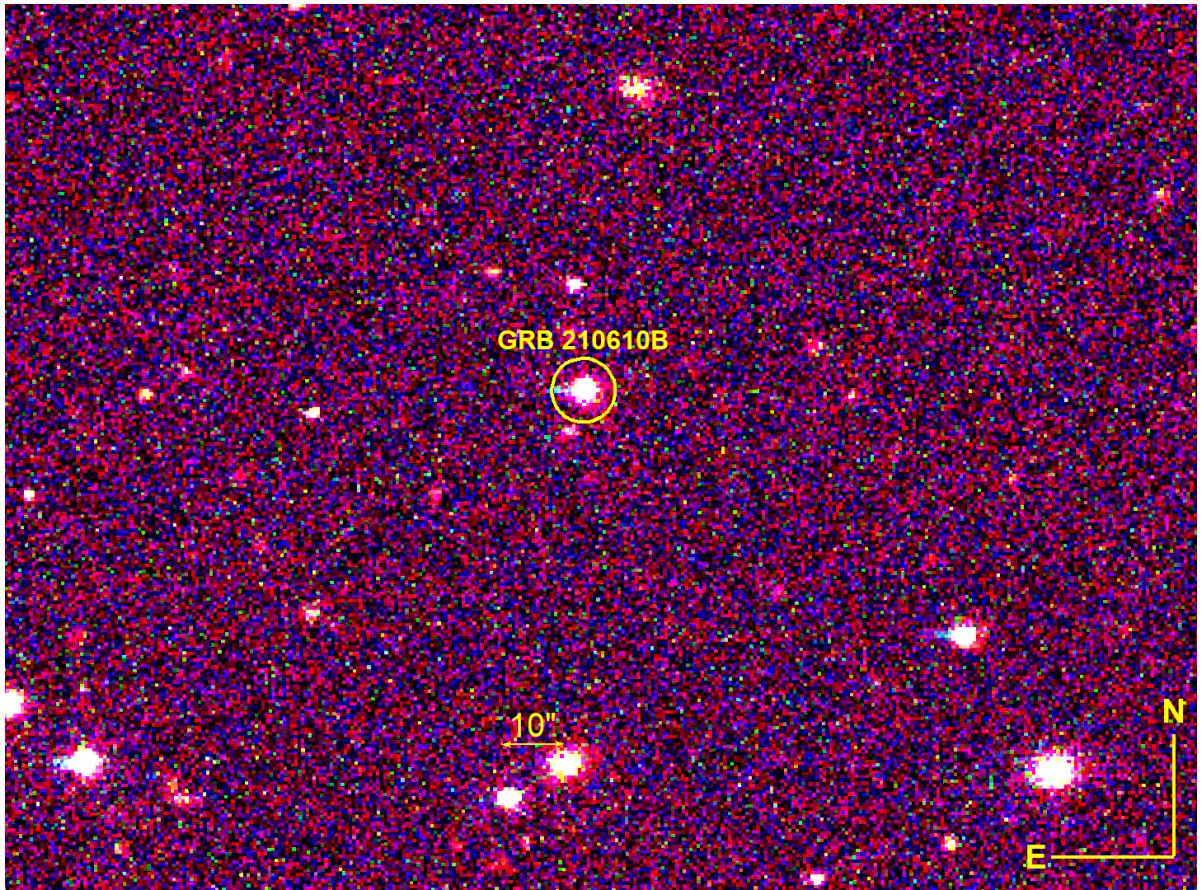


Рисунок 6.1 — Цветной фрагмент изображения поля GRB 210610B, полученный путем сложения трех изображений, снятых телескопом ЗТШ в фильтрах BVR (время съемки примерно соответствует началу фазы плато).

Наблюдения оптического послесвечения проводились на 0.35-м телескопе системы Ньютона (КрАО РАН) 10, 11 и 13 июня в чистом свете (без фильтра) с помощью CMOS-фотометра QHY9S-M.

0.6-м телескоп BOOTES-2 (Малага, Испания) начал наблюдения в чистом свете 10 июня 2021 г. в 21:21:18 UT с помощью CCD-фотометра Andor Tech. На основе полученных серий изображений было сформировано 9 суммарных снимков. Данные BOOTES позволили дополнить кривую блеска в переходном временном интервале от фазы плато к позднему послесвечению ($\sim [0.1, 0.3]$ сут. после триггера) и более точно определить момент излома в кривой блеска.

Наблюдения телескопом АЗТ-22 МАО проводились в фильтрах B, R с помощью прибора SNUCAM (Им и др., 2010). Серии наблюдений охватили период с 11 по 16 июня, а также включали эпохи поиска возможной сверхновой и измерения блеска родительской галактики (начиная с 3 июля 2021 г.).

Расположение	Обсерватория	Телескоп	Апертура ^a м	Поле зрения угл. мин	Прибор
Научный, Крым	КрАО РАН	ЗТШ	2.6	9.5×9.5	FLI PL4240
Научный, Крым	КрАО РАН	0.35м	0.35	35.3×26.7	QHY9S-M
Абастумани, Грузия	АбАО	AS-32	0.7	44×44	FLI PL4240
Ассы-Тургень, Казахстан	АТО	АЗТ-20	1.5	22×22	FLI
Майданак, Узбекистан	МАО	АЗТ-22	1.5	18.3×18.3	SNUCAM
Монды, Россия	ССО РАН	АЗТ-33ИК	1.6	6.7×7.9	Andor NEO
Нижний Архыз, Россия	САО РАН	Zeiss-1000	1.0	7.3×7.3	CCD photometer
Нижний Архыз, Россия	САО РАН	БТА	6.0	6.1×6.1	SCORPIO-1
Малага, Испания	UMA-CSIC	BOOTES-2	0.6	10.2×10.2	Andor Tech

^aДиаметр главного зеркала.

Таблица 9 — Основные параметры телескопов сети, задействованных в собственных наблюдениях поля GRB 210610B.

Название	$\lambda_{min}, \text{\AA}$	$\lambda_{max}, \text{\AA}$	$\lambda_{cen}, \text{\AA}$
<i>B</i>	3633	5497	4358
<i>V</i>	4733	6875	5439
<i>R</i>	5504	8833	6436
<i>R_C</i>	5500	7950	6471
<i>I</i>	7041	9166	8054

Таблица 10 — Характеристики оптических фильтров¹. λ_{min} — минимальная длина волны, λ_{max} — максимальная длина волны, а λ_{cen} — центральная длина волны (см. пояснение на рисунке А.2 в работе Родриго и др., 2024).

13 июня 2021 г. в рамках мониторинга позднего оптического послесвечения был задействован 0.7-м телескоп AS-32 системы Максудова (АбАО). Наблюдения проводились в фильтре *R* с помощью CCD-фотометра.

Наблюдения на телескопе АЗТ-33ИК ССО СО РАН проводились в несколько эпох, первая из которых — 16 июня 2021 г. Все наблюдения выполнялись в фильтре *R* с использованием CCD-фотометра Andor Neo.

Начиная с 5 июля 2021 г. с целью поиска возможной СН использовался 1.5-м телескоп АЗТ-20/АТО. Все наблюдения проводились в фильтре *r'* с помощью CCD-фотометра FLI.

Параметры инструментов на которых проводились собственные наблюдения приведены в табл. 9, а характеристики использованных фильтров указаны в табл. 10.

¹Характеристики взяты из онлайн-сервиса SVO Filter Profile Service, доступного по адресу: <https://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/index.php>.

Полная таблица наблюдений, использованных в анализе послесвечения GRB 210610B и его родительской галактики в данной работе, приведена в приложении Е.

6.2 Анализ данных фазы послесвечения

6.2.1 Оптическая кривая блеска

Обработка оптических изображений выполнялась по стандартным процедурам, описанным в (Панков и др., 2021). С помощью конвейера `apex_calibrate` проводилась первичная калибровка: вычитание темнового кадра, коррекция на плоское поле, устранение следов космических лучей и удаление градиента фона неба. Затем изображения в фильтрах *BVRI*, полученные на ЗТШ/КрАО РАН, прошли процедуру редукции для устранения интерференционной картины (fringing). Для повышения значимости сигнала отдельные изображения суммировались с помощью конвейера `apex_stack`. Построение каталога источников и астрометрическая привязка сложенных изображений выполнялись конвейером `apex_auto`. Поточковая дифференциальная фотометрия проводилось с помощью конвейера `apex_forced_phot`. Измерение звездных величин проводилось методом PSF-фотометрии с аппроксимацией профиля источника функцией Гаусса ($I(\mathbf{r}) \propto A \exp\{-\frac{|\mathbf{r}|^2}{\text{FWHM}^2}\}$). Для калибровки изображений снятых в фильтрах *BRI* были отобраны вторичные звезды-стандарты из каталога USNO-B1.0 согласно алгоритму, описанному в работе [8]. Полученный список звезд был кросс-отождествлен с каталогом Pan-STARRS DR1 для калибровки изображений, полученных фильтрах Слоуна $g'r'i'z'$, а также с каталогом NOMAD для калибровки изображений снятых фильтре *V*. Фотометрия изображений, полученных в чистом свете (без фильтра), проводилась относительно звездной величины *R2* из каталога USNO-B1.0. Список опорных звезд приведен в табл. 11.

При построении многоцветной оптической кривой блеска (см. рис. 6.2) собственные измерения были дополнены данными из работы [292] и выше

R.A.	Dec	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>R</i>	<i>I</i>	<i>g</i>	<i>r</i>	<i>i</i>	<i>z</i>
hms	dms	mag	mag	mag	mag	mag	mag	mag	mag
16:15:46.60	+14:23:07.7	17.70	16.23	16.25	15.67	16.961	16.376	16.158	16.077
16:15:41.24	+14:22:52.9	18.73	16.99	17.44	17.24	18.042	17.643	17.466	17.437
16:15:48.17	+14:22:46.7	17.43	15.97	16.20	15.86	16.681	16.396	16.279	16.277

Таблица 11 — Опорные звезды, использованные для фотометрической калибровки. Первые два столбца – координаты (на эпоху J2000), а остальные – звездные величины. Блеск в фильтрах *BVRI* представлен в фотометрической системе Вега, в то время как блеск в фильтрах *griz* выражен в системе AB. Значения звездных величин в фильтрах *BRI* взяты из каталога USNO-B1.0, а для фильтра *V* выбран каталог NOMAD. Блеск в фильтрах *griz* получен из каталога PanSTARRS-DR1.

указанных GCN-циркуляров. За точку отсчета временной шкалы (T_0) было принято время триггера BAT/Swift: 2021-06-10 19:51:27 UTC.

Как видно из рис.6.2, оптическая кривая блеска состоит из нескольких фаз. Сначала наблюдается оптическая вспышка (покрыта наблюдениями только в чистом свете) с максимумом на 0.015 сут. после триггера. Затем наблюдается степенное падение потока, характерное для раннего послесвечения. Через ~ 0.03 сут степенное падение плавно переходит в фазу плато длительностью ~ 12 кс и характеризуется почти постоянным уровнем блеска $m_R \sim 17^{\text{m}}.3$ ($F_V \sim 2 \times 10^4$ Ян). Далее фаза плато сменяется более крутым степенным падением потока, характерным для позднего послесвечения. Спустя ~ 5 сут после триггера наблюдается плавный выход на уровень блеска родительской галактики ($m_R \sim 22^{\text{m}}.9$), который достигается к 20 сут. после регистрации гамма-всплеска.

6.2.2 Аналитическое моделирование многоволновой кривой блеска

Для построения многоволновой кривой блеска ((см. рис. 6.3)) были дополнительно использованы данные наблюдений рентгеновского телескопа XRT/Swift. Рентгеновская кривая блеска в диапазоне $[0.3, 10]$ кэВ, скоррек-

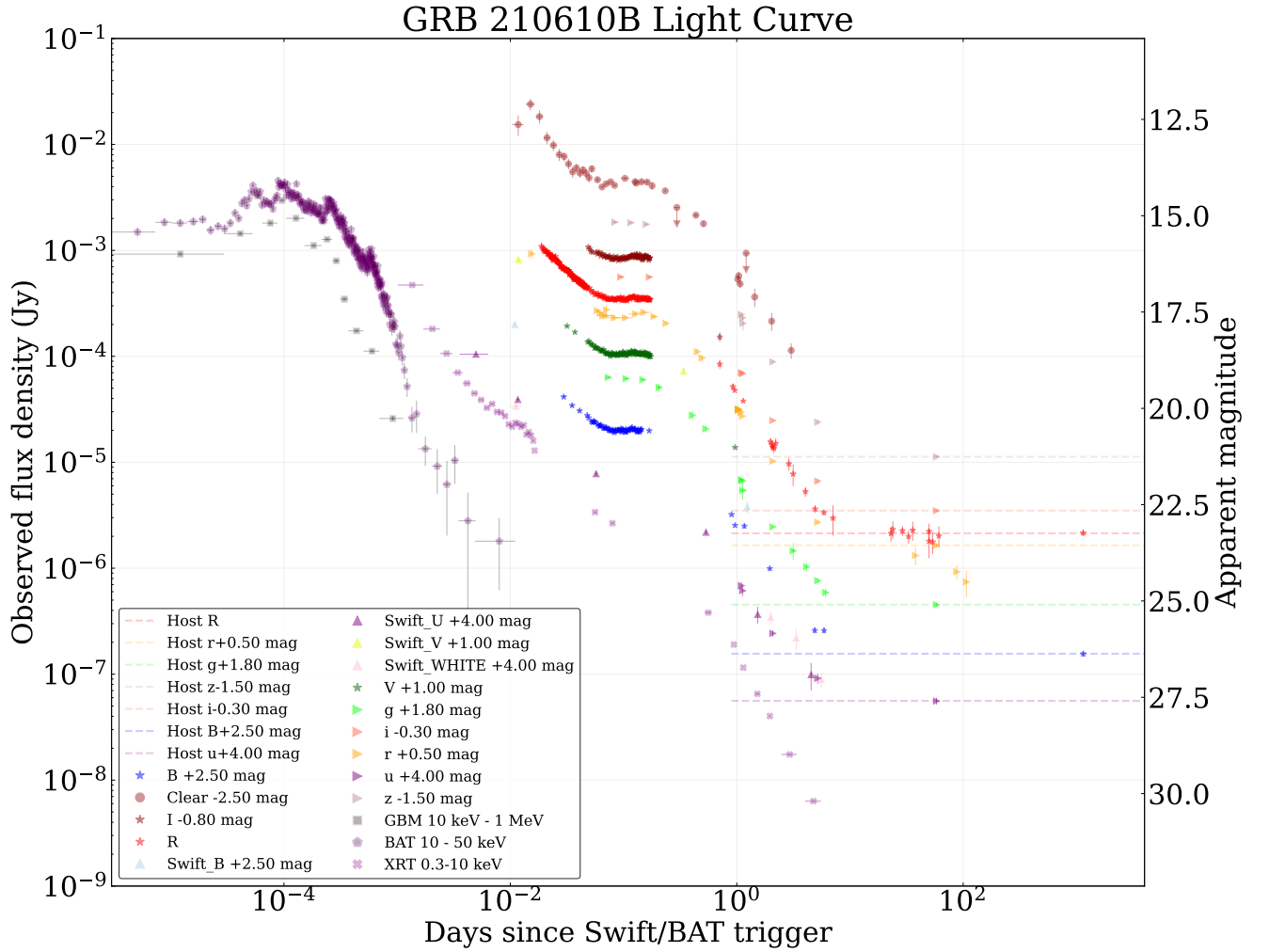


Рисунок 6.2 — Верхняя панель: многоцветная оптическая кривая блеска GRB 210610B. По горизонтальной оси время после триггера Swift/BAT $t - T_0$ (сут). По вертикальной оси слева наблюдаемая плотность потока, а справа соответствующая ей звездная величина. Фотометрические измерения обозначены разной комбинацией из цвета и тип символа в зависимости от фильтра в котором получены измерения (см. легенду в правом верхнем углу). Цветными горизонтальными штриховыми линиями показаны уровни блеска родительской галактики в соответствующих фильтрах. Для удобного визуального анализа кривые блеска разнесены относительно их номинального значения путем соответствующего сдвига, указанного в легенде.

тированная за поглощение на луче зрения, была получена через сервис SWIFT BURST ANALYSER².

Перед моделированием оптические измерения были скорректированы за поглощение в Галактике и родительской галактике гамма-всплеска, а также за уровень излучения родительской галактики (в фильтрах *ugrizBR*). Поглощение в каждом фильтре определялось по кривой поглощения [293], реализованной в библиотеке EXTINGTION [294] для PYTHON. В качестве параметра модели (поглощение в фильтре *V*) было выбрано значение $A_V = 0.19 \pm 0.10$, полученное в результате моделирования спектра родительской галактики [292]. Значения уровня родительской галактики в фильтрах *ugriz* также заимствованы из работы [292], в то время как значения в фильтрах *BR* получены из собственных наблюдений (подробнее в разд. 6.4). Аналитическое моделирование было выполнено с помощью библиотеки LMFIT [238] для PYTHON.

Для аппроксимации данных была выбрана комбинированная модель, состоящая из простого степенного закона (PL) и степенного закона с гладким изломом (BPL) (выражение 6.1).

$$F_v(t) = F_1 t^{-\alpha_1} + F_2 \times \{(t/t_b)^{-\alpha_2 \omega} + (t/t_b)^{-\alpha_3 \omega}\}^{-1/\omega} \quad (6.1)$$

где F_1 и F_2 — нормировки степенной и степенной с изломом компонент соответственно, t_b — момент излома кривой блеска, α_1 — показатель наклона PL-компоненты, α_2 и α_3 — показатели наклона BPL-компоненты, а ω — параметр гладкости излома. Данная двухкомпонентная модель позволяет описать как начальный степенной участок, так и фазу плато, плавно переходящую во второй степенной участок послесвечения.

Процедура аппроксимации состояла из трех этапов:

- визуальный подбор начальных значений параметров для каждого фильтра;
- аппроксимация методом Левенберга-Марквардта;
- моделирование методом Марковских цепей Монте-Карло (MCMC).

В реализации MCMC моделирования использовалось 16 цепей с периодом «прогрева» (burn-in) в 1000 шагов и последующим выполнением еще 24000 шагов для поиска наилучших параметров модели (приведены в табл. 12).

Из-за пропусков в данных на некоторых участках послесвечения часть параметров была зафиксирована на основе результатов аппроксимации кривой

²https://www.swift.ac.uk/xrt_curves/01054681/

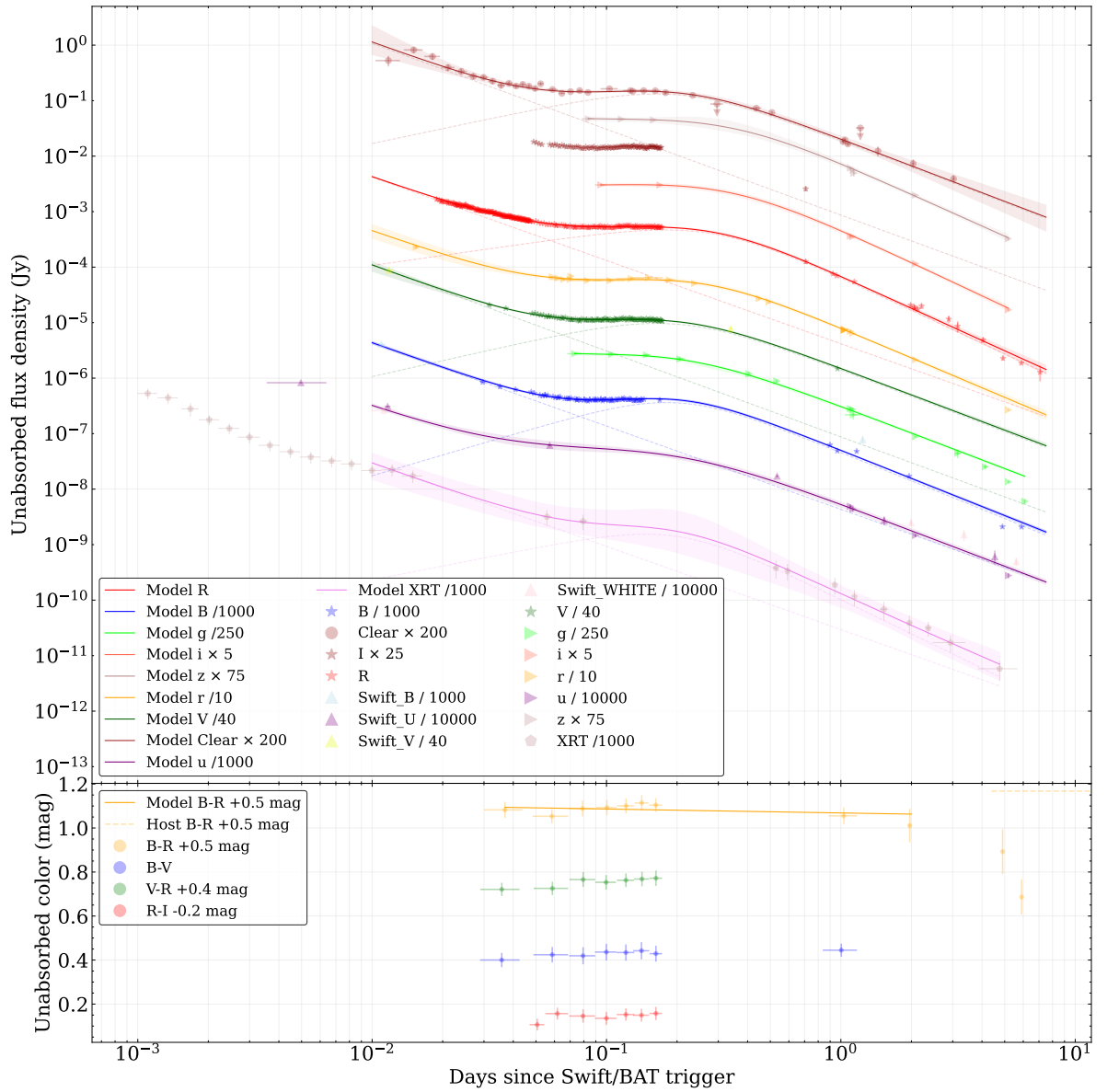


Рисунок 6.3 — Верхняя панель: многоволновая кривая блеска GRB 210610B. По горизонтальной оси время после триггера Swift/BAT $t - T_0$ (сут). По вертикальной оси плотность потока, скорректированная за поглощение в Галактике и родительской галактике всплеска, а также на уровень яркости родительской галактики (кроме рентгеновских измерений *Swift/XRT*). Фотометрические измерения обозначены разной комбинацией из цвета и тип символа в зависимости от фильтра в котором получены измерения (см. легенду в правом верхнем углу). Цветными сплошными линиями показаны модельные кривые для соответствующих фильтров. Широкими цветными линиями обозначены области определения модельной функции на уровне статистической значимости 3σ . На нижней панели отложены показатели цвета (см. легенду в левом верхнем углу). Для удобного визуального анализа кривые блеска и кривые показателей цвета разнесены относительно их номинального значения путем соответствующего множителя, указанного в легенде.

Фильтр	F_1 мкЯн	α_1	F_2 мЯн	α_2	α_3	t_b сут.	ω	χ^2/ν
B	4.34 ± 0.08	1.5*	0.72 ± 0.08	-1.24 ± 0.03	1.71 ± 0.01	0.2*	1*	304/71
g	-	-	3.5 ± 2.8	-0.9 ± 0.2	2.1 ± 0.2	0.2*	0.36 ± 0.12	29.5/8
V	3.50 ± 0.06	1.55 ± 0.04	0.75 ± 0.07	-0.96 ± 0.03	1.6*	0.2	1*	123/101
r	4.45 ± 0.05	1.5*	0.94 ± 0.04	-0.69 ± 0.09	1.82 ± 0.04	0.25 ± 0.01	1*	14.9/16
R	10.5 ± 0.05	1.28 ± 0.01	0.84 ± 0.06	-1.16 ± 0.02	1.75 ± 0.01	0.2*	1*	418/254
i	-	-	5.5 ± 2.3	-1.3 ± 0.1	2.3 ± 0.1	0.2*	0.30 ± 0.05	2.04/2
z	-	-	10 ± 13	-1.3 ± 0.2	2.3 ± 0.2	0.2*	0.24 ± 0.07	5.31/5
без фильтра	4.5 ± 4.1	1.5 ± 0.2	1.26 ± 0.06	-0.9 ± 0.2	1.62 ± 0.09	0.21 ± 0.02	1*	45.4/28
u/U_{Swift} кэВ	3.00 ± 0.08	1.5*	0.70 ± 0.02	0.37 ± 0.07	1.62*	0.2*	1.0*	54/6
0.3-10 кэВ	$(3.0 \pm 0.6) \times 10^{-2}$	1.5*	429 ± 355	3.0 ± 0.7	4.3 ± 0.4	0.2*	$(5.3 \pm 0.5) \times 10^{-2}$	0.61/8

Таблица 12 — Результаты аппроксимации многоволновой кривой блеска GRB 210610B аналитической двухкомпонентной моделью. Символом «*» отмечены зафиксированные параметры.

блеска в чистом свете. Также из анализа были исключены две последние точки в каждой полосе (кроме фильтра U) во избежание систематических ошибок, связанных с возможной переоценкой вклада излучения родительской галактики. В результате аппроксимации установлено, что показатели наклона $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ степенных участков согласуются в пределах 3σ интервалов ошибок, что указывает на ахроматическое поведение кривой блеска. Расхождения в определении времени излома t_b для различных фильтров, вероятно, обусловлены неравномерной плотностью данных в интервале $[0.1, 1.0]$ сут после T_0 .

6.2.3 Анализ цветовой эволюции

Для изучения цветовой эволюции источника были исследованы кривые показателей цвета $B - V$, $B - R$, $V - R$ и $R - I$. Наблюдательные данные предварительно были поправлены за межзвездное поглощение в Галактике и в родительской галактике гамма-всплеска, а также произведено вычитания вклад излучения родительской галактики (его оценка описана в разделе 6.4 данной главы).

Группировка данных по времени (бинирование) проводилось с использованием адаптивных интервалов:

- в период от $[0.025, 0.05]$ сут после T_0 ширина бина составляла 1200 с;
- на интервале от $[0.05, 0.8]$ сут ширина бина была увеличена до 1800 с;
- на более поздних временах группировка выполнялась с интервалом около от 0.5 до 1 сут.

Для сравнения цвета послесвечения с родительской галактикой было дополнительно определено значение показателя цвета $B - R$ родительской галактики GRB 200829A на эпоху 1151 сут после триггера.

Оценка характера цветовой эволюции проводилась с помощью аппроксимации кривых показателей цвета кусочно-линейной функцией в логарифмическом масштабе времени. Итоговые параметры моделирования приведены в табл. 13.

На большинстве рассмотренных временных интервалов ($t < 2$ сут) коэффициент наклона $\alpha \approx 0$ в пределах погрешностей. Начиная с эпохи $t > 2.0$ сут,

Цвет	t , сут	α	A , mag	$\chi^2/\text{d.f.}$
B-R	[0.15, 2.0]	-0.007 ± 0.012	0.57 ± 0.03	3.43/7
B-R	>2.0	-0.23 ± 0.09	0.69 ± 0.13	1.52/1
B-V	[0.03, 0.10]	0.01 ± 0.01	0.45 ± 0.03	0.48/6
V-R	[0.03, 0.15]	0.03 ± 0.03	0.44 ± 0.07	0.43/4
R-I	[0.03, 0.15]	-0.001 ± 0.036	0.34 ± 0.09	0.23/3

Таблица 13 — Результаты моделирования кривых показателей цвета оптического послесвечения линейным законом. Здесь α — коэффициент наклона, а A — нормировка.

фиксируется статистически значимое изменение цвета $B - R$, описываемое степенным трендом $\sim t^{-0.23}$.

6.3 Поиск сверхновой

С целью поиска возможной сверхновой, которая могла быть ассоциирована с GRB 210610B, была проведена наблюдательная кампания на телескопах АЗТ-22/МАО, ЗТШ/КраО РАН, АЗТ-3ЗИК/ССО СО РАН и АЗТ-20/АТО. Предел чувствительности данных инструментов позволяет обнаруживать источники с блеском до $\sim 24^{\text{m}}$. Наблюдения проводились в интервале времен [20, 110] сут после T_0 . Однако фотометрического признака сверхновой в полученных данных обнаружено не было, что указывает на то, что её блеск был ниже порога чувствительности, примененных в наблюдениях телескопов.

Верхний предел на абсолютную звездную величину возможной СН $M_R > -20^{\text{m}}.78$ был определен по данным телескопа ЗТШ/КраО РАН (обладающего наилучшей чувствительностью) по формуле 5.3. Полученный предел известным распределением абсолютных звездных величин сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками.

6.4 Родительская галактика

Родительская галактика GRB 210610B зафиксирована в современных обзорах всего неба: PanSTARRS-PS1, LS и SDSS. В самом глубоком из них, обзоре LS, галактика находится в координатах (J2000): RA = 16:15:40.37, Dec = +14:23:56.4. Согласно данным собственных наблюдений, яркостный центр галактики в пределах ошибок измерения совпадает с координатами оптического послесвечения всплеска. Блеск галактики по каталогу LS DR9 составляет $m_g = 22^{\text{m}}.99$, $m_r = 23^{\text{m}}.01$, $z = 22^{\text{m}}.65$.

В собственных наблюдениях были определены звездные величины родительской галактики в фильтрах R, r и B , составившие $R = 22.78 \pm 0.07$, $r = 22.90 \pm 0.18$ и $B = 23.27 \pm 0.06$. Блеск в фильтрах B и R был получен на основе наблюдений телескопом БТА/CAO РАН спустя ~ 3 года после всплеска, а значение в фильтре r — путем усреднения данных телескопа АЗТ-20/АТО (интервал [10, 70] сут). Отметим, что значение R согласуется с оценкой, полученной по данным телескопов АЗТ-22/МАО и ЗТШ/КрАО РАН ($R = 22.79 \pm 0.13$). Также наблюдается согласие значения блеска в фильтре r с данными каталога LS DR9. В дальнейших расчетах использовалось спектроскопическое красное смещение $z = 1.1341$ ([265; 292]).

Темп звездообразования (SFR) оценивался через корреляцию между абсолютной звездной величиной в фильтре r и логарифмом темпа звездообразования: $\log \text{SFR} = -0.381 M_r - 8.029 \pm 0.486$ (Махаджан и др., 2018). При $M_r \sim -21.5$ (без коррекции за поглощение) темп звездообразования составляет $\log \text{SFR} \sim 0.16 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. Возраст системы, рассчитанный на основе красного смещения и космологических параметров (Врайт, 2006), составляет $T_{\text{age}} \sim 5.4 \times 10^9$ лет. Следовательно, масса родительской галактики оценивается как $M_{\text{host}} \approx T_{\text{age}} \times \text{SFR} \approx 7.5 \times 10^9 M_{\odot}$. Данная оценка не противоречит результатам работы Аги Фернандеза и др. (2024), несмотря на различие в темпе звездообразования на порядок. На рис. 6.4 представлены значения для родительской галактики GRB 210610B на зависимости темпа звездообразования от массы выборки родительских галактик длинных всплесков ($1 < z < 3.1$) из работы [139]. Как видно из рисунка, исследуемая галактика относится к числу наименее массивных объектов с умеренным темпом звездообразования.

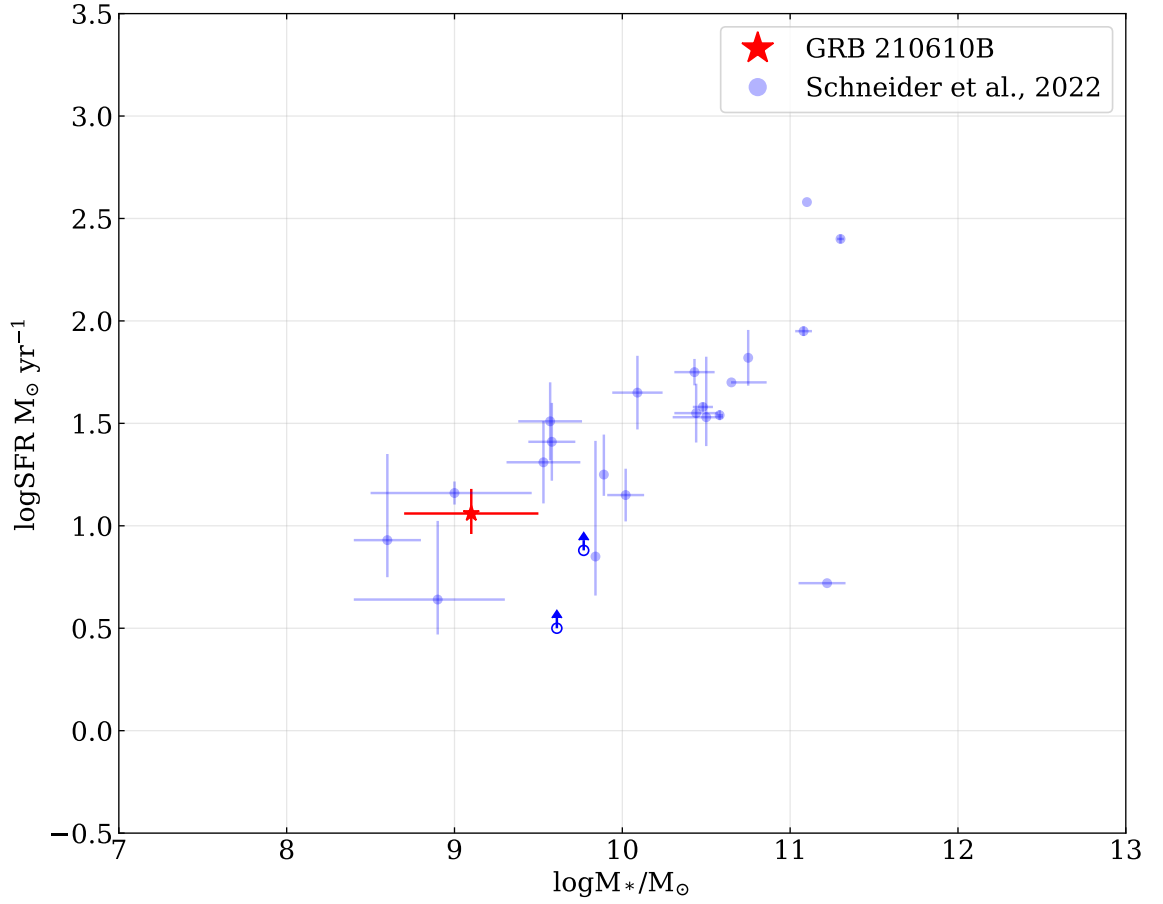


Рисунок 6.4 — Зависимость логарифма темпа звездообразования от логарифма массы родительской галактики длинного гамма-всплеска. Синими кружками отмечены значения из работы Шнайдера и др., 2022. При этом выколотые кружки обозначают нижний предел, а закрашенные — сами значения. Красной звездой отмечено значение для родительской галактики GRB 210610B (масса и темп звездообразования взяты из работы [292]).

Заметим, что оценки SFR и массы родительской галактики GRB 210610B сопоставимы с таковыми для родительских галактик GRB 200829A

6.5 Обсуждение

6.5.1 Ахроматизм послесвечения

В многоцветной оптической кривой блеска не обнаружено признаков хроматического поведения, в том числе и в фазе плато. При этом данная фаза была измерена квазисинхронно в четырех фильтрах $BVRI$ с высокой скважностью. Средний наклон зависимости цвета от времени в пределах ошибок измерения не отличается от нуля (см. табл. ??). Эволюция цвета $B - R$, наблюдаемая при $t > 2.0$ сут, по всей видимости, связана не с изменениями в спектре самого оптического послесвечения, а с возрастающим влиянием фонового излучения родительской галактики, доля которого через ~ 5 сут после момента T_0 достигает порядка 30%. Визуальный анализ формы кривой блеска указывает на то, что на интервалах $t \gtrsim 5$ сут вклад родительской галактики мог быть завышен.

6.5.2 Плато

Фаза плато в оптическом послесвечении GRB 210610B начинается примерно через 0.06 сут после триггера и длится около 3.4 часа. Рассмотрим основные теоретические модели, объясняющие данное явление.

Сильно замагниченная нейтронная звезда (протомагнитар)

Согласно одной из гипотез, постоянная яркость плато поддерживается за счет накачки энергии нестабильным протомагнитаром, образующимся при коллапсе железного ядра массивной быстро вращающейся звезды. Благодаря быстрому вращению ($P \sim 1$ мс) объект не коллапсирует сразу в черную дыру. Излучение магнитара происходит за счет формирования магнитных башен, которые запускают джет, пробивающий оболочку звезды и создающий ударную

A	β_o	$\chi^2/\text{d.f.}$
$(1.5 \pm 1.1) \times 10^6$	0.64 ± 0.02	3.32/2

Таблица 14 — Результаты аппроксимации оптического спектра плато.

волну [86; 89]. По мере замедления протомангнитара поток энергии уменьшается, что приводит к излому на кривой блеска, после которого поток спадает по степенному закону.

Ограничения на параметры протомангнитара были оценены с использованием дипольной формулы 1.3. При фиксированном радиусе $R = 10$ км, оптическая светимость плато L_o определялась на основе спектрального распределения энергии (SED) фазы плато (см. рис.??). SED хорошо аппроксимируется простой степенной моделью: $f_\nu = A\nu^{-\beta_o}$, где A – нормировка в единицах мкЯн $\cdot$ Гц $^{\beta_o}$, а β_o – спектральный индекс. Результаты аппроксимации, выполненной с помощью метода Левенберга-Марквардта в библиотеке LMFIT, приведены в табл. 14.

Оптическая светимость вычислялась по формуле: $L_o = 4\pi D_L^2 F_o$, где $D_L = 2.4 \times 10^{28}$ см – фотометрическое расстояние до источника, $F_o = 10^{23} f_{\nu_o} \Delta\nu_o$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$ – оптический поток плато, а $\nu_o = 4.98 \times 10^{14}$ Гц – диапазон частот, ограниченный снизу минимальной частотой фильтра I , а сверху максимальной частотой фильтра B . В результате получено значение светимости $L_o = (2.1 \pm 2.1) \times 10^{46}$ эрг с $^{-1}$. Магнитное поле B и период вращения P связаны соотношением: $B_{p,15}^2 P_{o,-3}^4 \approx L_o / (10^{49} \text{ эрг с}^{-1} R_6^6)$ (из формулы 1.3). Отсюда следует, что ограничение на магнитное поле будет определяться условием: $B \lesssim 5.5 \times 10^{13} P^{-2}$ Гс. С помощью данного условия была получена граница разрешенной области значений магнитаров, которые могли бы обеспечить плато на кривой блеска GRB 210610B (см. рис. 6.5).

Тогда, например, при $P = 1$ мс магнитное поле составит $B \approx 5.5 \times 10^{13}$ Гс, а при $P = 0.1$ мс оно возрастет в 100 раз до $B \approx 5.5 \times 10^{15}$ Гс. В литературе типичные оценки для магнитаров с периодом $P \sim 1$ мс составляют $B \sim 10^{14-15}$ Гс [295–297], что выходит за пределы разрешенной области значений, полученной выше. Расхождение объясняется тем, что в наших расчетах использовалась только оптическая светимость, которая может быть на 1–3 порядка ниже болометрической или рентгеновской светимости, обычно используемых в статьях. Тем не менее, полученная оценка не противоречит известной корреляции L_o

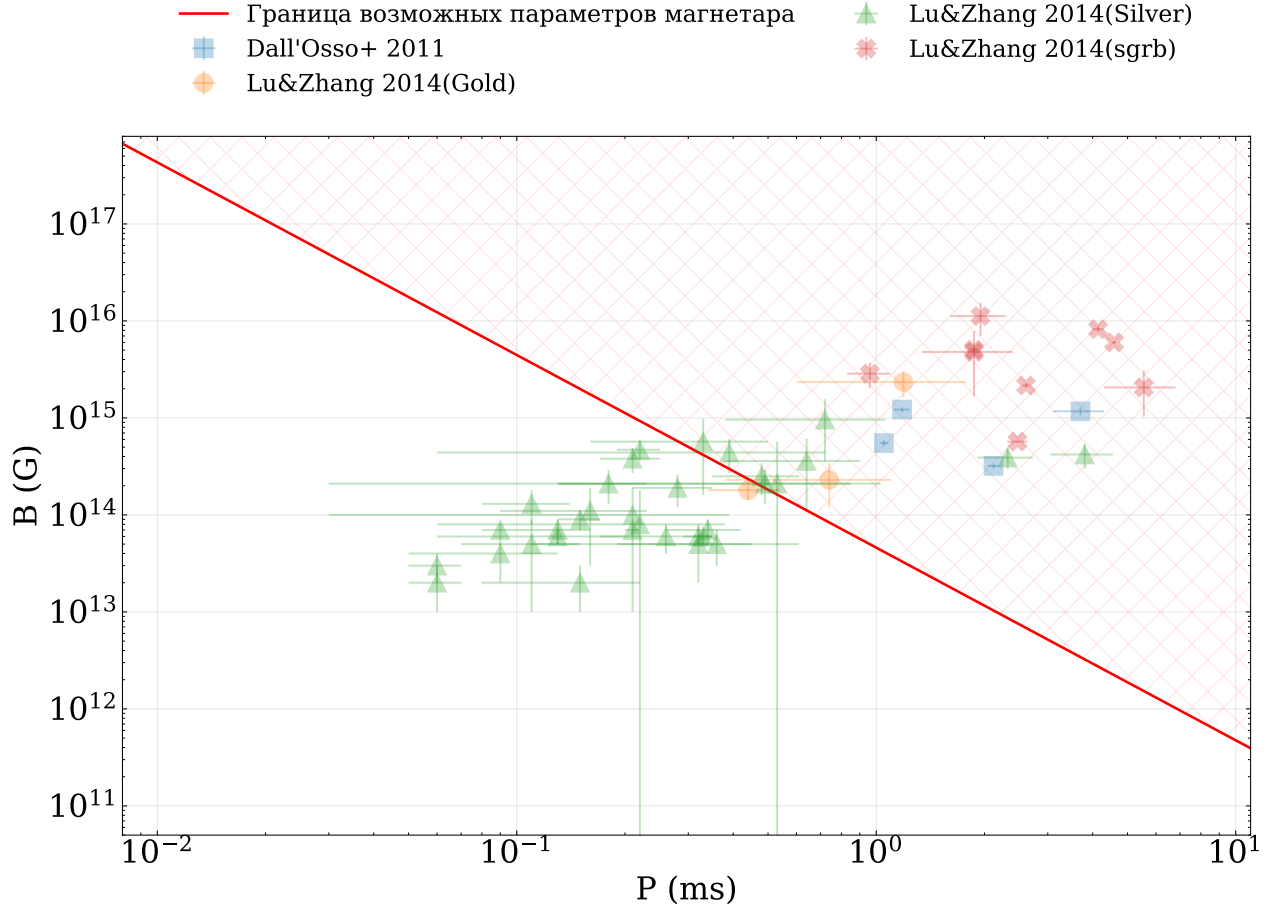


Рисунок 6.5 — Зависимость параметров дипольное магнитное поле (B) – период вращения (P) для магнитаров, которые могли бы обеспечивать плато в послесвечении различных гамма-всплесков. Обозначения символов приведены в легенде над рисунком. Возможные параметры магнитного поля и периода для GRB 210610B находятся ниже заштрихованной области.

– $t_{b,z}$ (Пор и др., 2025). На представлена область возможных параметров магнитара для GRB 210610B в сравнении с данными других объектов. Следует отметить, что в работе [297] были получены оценки параметров магнитара, способного обеспечить плато на кривой блеска GRB 210610B. Оценки составили $B \sim 3.2 \times 10^{15}$ Гс и $P \sim 2.6$ мс на основе рентгеновской светимости (0.3–10 кэВ) по данным Swift/XRT. Однако подсчет рентгеновской светимости плато GRB 210610B подвержен значительной систематической ошибке из-за пропусков в данных в интервале времени, соответствующем фазе плато в оптическом диапазоне. Вследствие этого однозначно установить присутствие данной фазы в рентгеновском диапазоне затруднительно.

Столкновение ударных волн

Альтернативным сценарием формирования фазы плато могло быть столкновение ударных волн с гамма-факторами Γ_1 (ранняя волна) и Γ_2 (поздняя волна). Поскольку первая волна замедляется при взаимодействии с окружающей средой, условие $\Gamma_2 \gg \Gamma_1$ приводит к тому, что вторая волна догоняет первую, формируя обратную ударную волну (RS), которая нагревает вещество оболочки позади области контактного разрыва. В случае «толстой» оболочки ($\xi > 1$) кинетической энергии налетающих слоев достаточно для поддержания светимости плато. Светимость плато связана с относительным гамма-фактором $\Gamma_{rel} = 0.5(\Gamma_1/\Gamma_2 + \Gamma_2/\Gamma_1)$ и темпом переноса массы $\dot{M}_{shell}$ соотношением 6.2 ([21]).

$$L_{plateau} \approx 5.7 \times 10^{45} \left(\frac{\varepsilon_e}{0.1} \right) \left(\frac{\dot{M}_{shell}}{M_\odot \text{год}^{-1}} \right) \left(\frac{\Gamma_{rel} - 1}{0.1} \right) \quad (6.2)$$

При $\varepsilon_e = 0.1, \Gamma_1 = 10, \Gamma_2 = 300$ получаем $\dot{M}_{shell} \sim 0.26 M_\odot \text{год}^{-1}$ или $8.2 \times 10^{-9} M_\odot \text{с}^{-1}$ ³. Расстояние до момента столкновения волн определяется выражением 6.3:

$$R_{coll} = \frac{2ct_{start}}{1+z} \left(\frac{\Gamma_1^2 \Gamma_2^2}{\Gamma_2^2 - \Gamma_1^2} \right) \quad (6.3)$$

При $t_{start} \approx 0.05$ сут получаем $R_{coll} \approx 1.5 \times 10^{16}$ см. Данная оценка на порядок меньше типичных литературных значений ($R \sim 10^{17}$ см). Однако использование альтернативной формулы (34) из работы [21] дает результат $R_{coll} \sim 9.9 \times 10^{17}$ см (при $n = 1 \text{ см}^{-3}$), что уже сопоставимо с данными из литературы.

³Примечательно, что в случае на ЧД необходим гораздо более высокий темп аккреции, больше $\sim 0.05 M_\odot \text{с}^{-1}$ для формирования джета гамма-всплеска.

6.6 Выводы

Кривая блеска в активной фазе гамма-всплеска GRB 210610B в гамма-диапазоне характеризуется сложной многоимпульсной структурой с общей длительностью около 200 с в диапазоне (8–70 кэВ) [7]. С помощью кросс-корреляционного анализа выявлена статистически значимая спектральная задержка, зависящую от энергии по логарифмическому закону $\text{lag} \propto A \log(E)$. Измеренное значение индекса задержки $A = 0.16 \pm 0.05$ существенно ниже ожидаемого, что может быть следствием суперпозиции сильно перекрывающихся импульсов [7].

Интегральный спектр в гамма-диапазоне описывается моделью Бэнда [62] с пиковой энергией $E_p = 290 \pm 9$ кэВ. Изотропная эквивалентная энергия в диапазоне 1–10000 кэВ составляет $E_{iso} = (5.68 \pm 0.31) \times 10^{53}$ эрг. GRB 210610B однозначно классифицируется как длинный гамма-всплеск (тип II) на диаграммах $E_{p,i} - E_{iso}$ и $T_{90,i} - E_H$ [7].

Спектральный анализ индивидуальных импульсов по данным Fermi/GBM выявил пекулярность одного из импульсов на начальной стадии: он характеризуется положительным спектральным индексом (растущий фотонный спектр), что нетипично для активной фазы гамма-всплесков. Возможно, данный импульс связан с началом пассивной фазы (послесвечения), сигнал которой изначально подавляется более интенсивным излучением других более интенсивных импульсов активной фазы [7].

Совместный анализ данных рентгеновского телескопа Swift/XRT и гамма-телескопа Swift/BAT показал плавный переход от затухающего потока активной фазы к более плавно затухающему потоку с показателем наклона ~ -0.8 , характерному для послесвечения в гамма-диапазоне. Данное наблюдение усиливает интерпретацию «хвоста» в данных BAT, как компоненты послесвечения [7].

Многоцветная оптическая кривая блеска демонстрирует наличие фазы плато, найденной и для других гамма-всплесков. По результатам анализа оптической кривой блеска установлено отсутствие цветовой эволюции послесвечения, включая период, захватывающий фазу плато. При этом аналитическая двухкомпонентная модель из степенной и степенной с изломом компонент (PL+BPL) успешно описывает наблюдаемые данные. Ахроматичный излом при завершении плато ($t_{b,2} \sim 0.2$ сут.) сопровождается увеличением показателя наклона с $\alpha_1 \approx 1.4$ до $\alpha_2 \approx 2$, характерным для перехода от фазы

раннего послесвечения к фазе позднего послесвечения. Рассмотрены две модели формирования плато на кривой блеска оптического послесвечения: модель сильнозамагниченной нейтронной звезды (протомагнитара) и столкновения ударных волн.

Получены ограничения на дипольное магнитное поле и период вращения сильнозамагниченной нейтронной звезды (возможного протомагнитара), который мог обеспечить плато на кривой блеска GRB 210610B, при радиусе НЗ $R_{NS} = 10$ км. Проверена модель столкновения ударных волн при $\Gamma_1 = 10\Gamma_2 = 100$. В данном случае получены оценка темпа переноса массы на фронт обратной ударной волны $\dot{M}_{shell} \sim 0.26M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ и расстояния столкновения волн составили и $R_{coll} \approx (0.15 - 9.9) \times 10^{17}$ см.

Получен верхний предел на абсолютный блеск возможной сверхновой, ассоциированной с GRB 210610B: $M_R > -20^m.78$, который не противоречит распределению абсолютных звездных величин сверхновых, ассоциированных с длинными гамма-всплесками в максимуме светимости.

На основе наблюдений телескопом БТА/САО РАН спустя ~ 3 года после всплеска определены звездные величины родительской галактики всплеска в фильтрах B, R . Оценка её абсолютной величины $M_r \sim -21.5$ (без коррекции за поглощение) соответствует массе $M_{host} \approx 7.5 \times 10^9 M_{\odot}$, что согласуется с данными литературы.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем. Исследование оптических компонентов гамма-всплесков, особенно событий с совместной регистрацией гравитационно-волнового сигнала (коротких всплесков ассоциируемых со слияниями двух нейтронных звезд), остается одной из ключевых задач в современной многоволновой астрофизике. Открытие гамма-всплесков произошло уже более 50 лет назад, а единственный оптический компонент гравитационно-волнового события AT2017gfo/GW170817 (слияние двух нейтронных звезд) – 9 лет. На настоящий момент не открыто ни одного нового события, подобного AT2017gfo/GW170817. Одним из основных препятствий в обнаружении таких событий выступает задержка между регистрацией электромагнитного транзиента космическими гамма- и рентгеновскими экспериментами (или гравитационного сигнала наземными интерферометрами) и началом оптических наблюдений наземными телескопами. При этом области локализации могут быть достигать ~ 1000 $\square$. Отсюда, возникают проблемы организации наблюдений таких обширных областей локализации с помощью сети наземных оптических телескопов, а также потоковой обработки астрономических данных в режиме времени, близкому к реальному, чтобы успеть обнаружить стремительно затухающий оптический транзиент. В данной диссертационной работе решались вышеперечисленные проблемы.

В первой главе проведен обзор теоретических основ и наблюдательных свойств космических гамма-всплесков и сопутствующих оптических транзиентов для формирования целостной физической картины данных объектов. В частности рассмотрена модель центральной машины гамма-всплеска, геометрия релятивистских джетов, каноническая кривая блеска, ассоциация всплесков со сверхновыми и килоновыми, а также родительские галактики.

Во второй главе представлена система AWARE, созданная для потокового планирования обширных областей локализации космических гамма-всплесков и гравитационно-волновых событий. Подробно рассмотрена реализация данной системы. Показано, что в отличие от других подобных систем, AWARE представляет гораздо более широкий функционал. Во-первых, реализовано автоматическое реагирование в режиме времени, близкому к реальному, на алертные сообщения о регистрации гамма-всплесков от космических экспериментов

и регистрации гравитационно-волновых слияний от наземных интерферометров LVK. Во-вторых, реализовано планирование областей локализации для сети наземных оптических телескопов. В третьих, реализована рассылка планов наблюдений напрямую на телескоп с помощью сокетов или наблюдателю через мессенджер.

В третьей главе рассмотрен прототип системы STARFALL, созданный для потоковой обработки астрономических изображений с целью поиска оптических транзиентов. С помощью реализации алгоритмов обработки в пакете APEX обеспечен весь цикл обработки от калибровки сырых изображений до поиска кандидатов в транзиенты для чего реализованы программные конвейеры `apex_transient` и `apex_subtract`. Эффективность конвейеров подтверждена серией независимых открытий оптических послесвечений гамма-всплесков GRB 230414B, 230506C, 230512A и 231017A.

В четвертой главе представлены результаты применения программных конвейеров, реализованных в третьей главе, к наблюдательным данным послесвечений гамма-всплесков GRB 240225B и EP240801a/XRF 240801B. Результаты обработки (оптические измерения послесвечения) были использованы в работах по моделированию перечисленных гамма-всплесков. Проведен поиск оптического компонента гигантской вспышки магнитара GRB 231115A, которая была зарегистрирована как короткий гамма-всплеск. В результате получены верхние пределы на возможный оптический источник, связанный с GRB 231115A. Проведен спектральный анализ многоволнового послесвечения гамма-всплеска GRB 230328B. Получены оценки параметров поглощения на луче зрения (колонковая плотность и оптическое поглощение), которые не противоречат выборке других гамма-всплесков. Вероятно, источник гамма-всплеска находился в области активного звездообразования или за ней.

Пятая глава посвящена многоволновому моделированию послесвечения длинного космического гамма-всплеска GRB 200829A и его родительской галактики. Обработка массива оптических изображений, полученных в основном в собственных наблюдениях телескопами сети IKI-GRB-FuN, произведена с помощью конвейеров, рассмотренных в третьей главе. Построена многоволновая кривая блеска и проведено её аналитическое моделирование. На ранней стадии кривой блеска обнаружена неоднородность с выраженным хроматическим поведением (отношение оптического потока к рентгеновскому изменяется), которая может трактоваться как плато или вспышка. С целью объяснения хроматизма

неоднородности проверена модель структурированного джета путем сравнения Лоренц-факторов джета, оцененных по оптической и рентгеновской кривой блеска в отдельности. В рамках ошибок измерения не удалось однозначно подтвердить применимость модели структурированного джета для объяснения наблюдаемого хроматизма. Представлены результаты поиска родительской галактики GRB 200829A на телескопе БТА/САО РАН и оценки основных параметров: абсолютной звездной величины, темпа звездообразования и массы. Полученные значения не противоречат выборке известных родительских галактик длинных гамма-всплесков.

В заключительной главе представлено многоволновое моделирование послесвечения длинного космического гамма-всплеска GRB 210610B и его родительской галактики. Аналогично пятой главе, обработка массива оптических изображений, полученных в основном в собственных наблюдениях телескопами сети IKI-GRB-FuN, произведена потоковым методом, реализованным в третьей главе. Построена многоволновая кривая блеска и проведено её аналитическое моделирование. На ранней стадии оптической кривой блеска обнаружена ахроматическая неоднородность (плато). Рассмотрены две модели, позволяющие сформировать плато на кривой блеска: модель сильнозамагниченной нейтронной звезды (протомагнитара) и столкновения ударных волн. Получены ограничения на параметры дипольного магнитного поля и периода вращения возможного протомагнитара, а также проверена модель столкновения ударных волн. Модели не противоречат наблюдениям при характерных значениях микрофизических параметров. Представлены результаты наблюдения родительской галактики GRB 210610B на телескопе БТА/САО РАН в фильтрах B, R и оценки основных параметров: абсолютной звездной величины, темпа звездообразования и массы. Полученные значения не противоречат выборке известных родительских галактик длинных гамма-всплесков, в том числе GRB 200829A, рассмотренной в пятой главе.

Перспективы дальнейшего развития темы заключаются в обеспечении полной автономности наблюдений, обработки наблюдательных данных, поиска и классификации транзиентных источников в режиме времени, близкому к реальному. Такой подход позволит создать на основе сети телескопов интеллектуальную систему, способную к самостоятельному определению приоритетности целей, что особенно актуально в контексте запуска обсерватории им. Веры Рубин (ранее LSST). Внедрение современных инструментов искус-

ственного интеллекта, в частности автономных агентов, позволит существенно сократить время отклика системы на новые события, минимизировать влияние человеческого фактора при анализе больших массивов данных и увеличить полноту выборки быстропеременных транзиентов.

Благодарности

Автор настоящей работы выражает глубокую благодарность своему научному руководителю – к.ф.-м.н. Алексею Степановичу Позаненко за предложенную тему исследований, поддержку в работе, терпение и чуткое руководство. Автор благодарит всех сотрудников 64 отдела ИКИ РАН, особенно, П.Ю. Минаева, А.А. Вольнову, С.А. Гребенева за помощь в работе, научные обсуждения, советы и поддержку. Особая признательность автора рецензентам статей, опубликованных по теме диссертационной работы и соавторам, выполненных работ. Отдельная благодарность родителям Панкову С.Н. и Панковой Е.Н. за всестороннюю поддержку.

Список сокращений и условных обозначений

- ИКИ** - Институт космических исследований
- КЛ/CR** - Космические лучи
- РАН** - Российская академия наук
- СКО** - Среднеквадратическое отклонение
- АТ/ОТ** - астрономический транзиент (оптический транзиент)
- BBH** - Binary Black Hole (слияние двух черных дыр)
- BNS** - Binary neutron star merger (событие слияния двух нейтронных звезд)
- BZ** - Blandford-Znajek mechanism (механизм Блендфорда-Знаека)
- CNN** - Сверточная нейронная сеть
- GRB/ГВ** - Gamma-ray burst (космический гамма-всплеск)
- GW** - гравитационно-волновое событие
- JWST** - James Webb Space Telescope (космический телескоп им. Джеймса Вебба)
- KN/KH** - Kilonova (килоновая)
- LGRB** - Long gamma-ray burst (длинный гамма-всплеск)
- NSBH** - Neutron star – Black Hole merger (событие слияния нейтронной звезды и черной дыры)
- PDF** - Portable Document Format
- SGRB** - Short gamma-ray burst (короткий гамма-всплеск)
- SN/CH** - Supernova (сверхновая)

Словарь терминов

Конвейер (Программный конвейер) - Компьютерная программа, предназначенная для потоковой обработки данных.

Оркестратор - Компьютерная программа, предназначенная для запуска и управления другими программами, например, для потоковой обработки данных.

Список литературы

1. Chromatic Afterglow of GRB 200829A / N. S. Pankov [et al.] // *Astronomy Letters*. — 2023. — Mar. — Vol. 49, no. 3. — P. 81—109. — arXiv: 2308.02090 [astro-ph.HE].
2. GRB 231115A – a Magnetar Giant Flare in the M82 Galaxy / P. Y. Minaev [и др.] // *Astronomy Letters*. — 2024. — Янв. — Т. 50, № 1. — С. 1—24. — arXiv: 2402.08623 [astro-ph.HE].
3. EP240801a/XRF 240801B: An X-Ray Flash Detected by the Einstein Probe and the Implications of Its Multiband Afterglow / S.-Q. Jiang [и др.] // *ApJL*. — 2025. — Июль. — Т. 988, № 1. — С. L34. — arXiv: 2503.04306 [astro-ph.HE].
4. Discovery and analysis of afterglows from poorly localized GRBs with the Gravitational-wave Optical Transient Observer (GOTO) All-sky Survey / A. Kumar [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2025. — Дек. — Т. 544, № 2. — С. 1541—1587. — eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/544/2/1541/64486897/staf1689.pdf>. — URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/staf1689>.
5. Система автоматической обработки изображений для поиска оптических транзиентов / Н. С. Панков [и др.] // *Научные труды ИНАСАН*. — 2026. — Т. 5, № 1.
6. Earliest simultaneous multicolour optical observations of GRB 230328B: from 41 s to the host-galaxy identification / T. Komesh [и др.] // *MNRAS*. — 2026. — Окт. — Т. 552, № 1. — *stag1595*. — arXiv: 2606.04585 [astro-ph.HE].
7. Ахроматическое плато гамма-всплеска GRB 210610B – следствие работы магнетара или результат столкновения ударных волн? / Н. С. Панков [и др.] // *Письма в Астрономический журнал*. — 2026. — Т. 52, № 6. — С. 287—325.
8. Pipeline for Detection of Transient Objects in Optical Surveys / N. Pankov [и др.] // *Data Analytics and Management in Data Intensive Domains* /

- под ред. А. Pozanenko [и др.]. — Cham : Springer International Publishing, 2022. — С. 104—134.
9. AWARE: Alert Watcher and Astronomical Rapid Explorer / N. Pankov [и др.] // Data Analytics and Management in Data Intensive Domains / под ред. J. Baixeries [и др.]. — Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. — С. 225—245.
 15. GRB 201015A: from seconds to months of optical monitoring and supernova discovery / S. Belkin [и др.] // *MNRAS*. — 2024. — Февр. — Т. 527, № 4. — С. 11507—11520. — arXiv: 2401.03579 [astro-ph.HE].
 16. Application of Neural Networks to Searching for Optical Transients in Astronomical Images Using the Subtraction Method / E. Shekotihiin [и др.] // Pattern Recognition and Image Analysis. — 2024. — Окт. — Т. 34. — С. 870—876.
 17. Early photometric and spectroscopic observations of the extraordinarily bright INTEGRAL-detected GRB 221009A / R. Sanchez-Ramirez [и др.] // *A&A*. — 2024. — Дек. — Т. 692. — A3.
 18. GOTO identification and broad-band modelling of the counterpart to the SVOM GRB 250818B / S. Belkin [и др.] // *MNRAS*. — 2026. — Авг. — Т. 550, № 2. — stag1193. — arXiv: 2602.16559 [astro-ph.HE].
 19. A fast X-ray transient with chromatic flares: signatures of violent collisions induced by late-time central engine reactivation / S.-Y. Fu [и др.] // arXiv e-prints. — 2026. — Апр. — arXiv:2604.14341. — arXiv: 2604.14341 [astro-ph.HE].
 20. X-rays breaking out of pre-explosion ejecta mark a supernova’s first light / W. Yuan [и др.] // arXiv e-prints. — 2026. — Июнь. — arXiv:2606.10014. — arXiv: 2606.10014 [astro-ph.HE].
 10. GRB 200829A: optical observations, a light curve in R-filter / A. Pozanenko [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2020. — Сент. — Т. 28359. — С. 1.
 11. GRB 210610B: CrAO/ZTSH optical observations (correction to the GCN circ. 30212) / N. Pankov [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — Июнь. — Т. 30213. — С. 1.
 12. GRB 210610B: AbAO optical observations / N. Pankov [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — Июнь. — Т. 30243. — С. 1.

13. GRB 210610B: CrAO/ZTSH continued optical observations and light curve / N. Pankov [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — Июнь. — Т. 30245. — С. 1.
14. GRB 210610B: Sintesz-Newton/CrAO optical observations / N. Pankov [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — Окт. — Т. 30988. — С. 1.
21. *Kumar, P.* The physics of gamma-ray bursts & relativistic jets / P. Kumar, B. Zhang // *Phys. Rep.* — 2015. — Февр. — Т. 561. — С. 1–109. — arXiv: 1410.0679 [astro-ph.HE].
22. *Klebesadel, R. W.* Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin / R. W. Klebesadel, I. B. Strong, R. A. Olson // *ApJL*. — 1973. — Июнь. — Т. 182. — С. L85.
23. *Mazets, E. P.* Flare of cosmic gamma radiation as observed with “Cosmos-461” satellite / E. P. Mazets, S. V. Golenetskii, V. N. Il’inskii // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. — 1974. — Янв. — Т. 19. — С. 77.
24. *Gehrels, N.* The Compton Gamma Ray Observatory. / N. Gehrels, E. Chipman, D. A. Kniffen // *A&A Suppl. Ser.* — 1993. — Янв. — Т. 97. — С. 5–12.
25. The BATSE 5B Gamma-Ray Burst Spectral Catalog / A. Goldstein [и др.] // *ApJS*. — 2013. — Окт. — Т. 208, № 2. — С. 21. — arXiv: 1311.7135 [astro-ph.HE].
26. Identification of Two Classes of Gamma-Ray Bursts / C. Kouveliotou [и др.] // *ApJL*. — 1993. — Авг. — Т. 413. — С. L101.
27. Catalog of cosmic gamma-ray bursts from the KONUS experiment data: Parts I and II / E. P. Mazets [и др.] // *Astrophys. Space Sci.* — 1981. — Нояб. — Т. 80, № 1. — С. 3–83.
28. *Minaev, P. Y.* Precursors of short gamma-ray bursts in the SPI-ACS/INTEGRAL experiment. / P. Y. Minaev, A. S. Pozanenko // Astronomy Letters. — 2017. — Янв. — Т. 43, № 1. — С. 1–20. — arXiv: 1612.02418 [astro-ph.HE].
29. BATSE Observations of the Large-Scale Isotropy of Gamma-Ray Bursts / M. S. Briggs [и др.] // *ApJ*. — 1996. — Март. — Т. 459. — С. 40. — arXiv: astro-ph/9509078 [astro-ph].

30. The Fourth BATSE Gamma-Ray Burst Catalog (Revised) / W. S. Paciesas [и др.] // *ApJS*. — 1999. — ИЮНЬ. — Т. 122, № 2. — С. 465—495. — arXiv: astro-ph/9903205 [astro-ph].
31. BeppoSAX, the wide band mission for X-ray astronomy / G. Boella [и др.] // *A&A Suppl. Ser.* — 1997. — АПР. — Т. 122. — С. 299—307.
32. Discovery of an X-ray afterglow associated with the γ -ray burst of 28 February 1997 / E. Costa [и др.] // *Nature*. — 1997. — ИЮНЬ. — Т. 387, № 6635. — С. 783—785. — arXiv: astro-ph/9706065 [astro-ph].
33. Transient optical emission from the error box of the γ -ray burst of 28 February 1997 / J. van Paradijs [и др.] // *Nature*. — 1997. — АПР. — Т. 386, № 6626. — С. 686—689.
34. BeppoSAX detection and follow-up of GRB 980425 / E. Pian [и др.] // *A&A Suppl. Ser.* — 1999. — СЕНТ. — Т. 138. — С. 463—464. — arXiv: astro-ph/9903113 [astro-ph].
35. Woosley, S. E. Gamma-Ray Bursts and Type IC Supernova SN 1998BW / S. E. Woosley, R. G. Eastman, B. P. Schmidt // *ApJ*. — 1999. — МАЙ. — Т. 516, № 2. — С. 788—796. — arXiv: astro-ph/9806299 [astro-ph].
36. The Swift Gamma-Ray Burst Mission / N. Gehrels [и др.] // *ApJ*. — 2004. — АВГ. — Т. 611, № 2. — С. 1005—1020. — arXiv: astro-ph/0405233 [astro-ph].
37. The Burst Alert Telescope (BAT) on the SWIFT Midex Mission / S. D. Barthelmy [и др.] // *Space Sci. Rev.* — 2005. — ОКТ. — Т. 120, № 3/4. — С. 143—164. — arXiv: astro-ph/0507410 [astro-ph].
38. The Swift X-Ray Telescope / D. N. Burrows [и др.] // *Space Sci. Rev.* — 2005. — ОКТ. — Т. 120, № 3/4. — С. 165—195. — arXiv: astro-ph/0508071 [astro-ph].
39. Physical Processes Shaping Gamma-Ray Burst X-Ray Afterglow Light Curves: Theoretical Implications from the Swift X-Ray Telescope Observations / B. Zhang [и др.] // *ApJ*. — 2006. — МАЙ. — Т. 642, № 1. — С. 354—370. — arXiv: astro-ph/0508321 [astro-ph].
40. A γ -ray burst at a redshift of $z \sim 8.2$ / N. R. Tanvir [и др.] // *Nature*. — 2009. — ОКТ. — Т. 461, № 7268. — С. 1254—1257. — arXiv: 0906.1577 [astro-ph.CO].

41. A Photometric Redshift of $z \sim 9.4$ for GRB 090429B / A. Cucchiara [и др.] // *ApJ*. — 2011. — Июль. — Т. 736, № 1. — С. 7. — arXiv: 1105.4915 [astro-ph.CO].
42. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral / B. P. Abbott [и др.] // *PRL*. — 2017. — Окт. — Т. 119, № 16. — С. 161101. — arXiv: 1710.05832 [gr-qc].
43. An Ordinary Short Gamma-Ray Burst with Extraordinary Implications: Fermi-GBM Detection of GRB 170817A / A. Goldstein [и др.] // *ApJL*. — 2017. — Окт. — Т. 848, № 2. — С. L14. — arXiv: 1710.05446 [astro-ph.HE].
44. INTEGRAL Detection of the First Prompt Gamma-Ray Signal Coincident with the Gravitational-wave Event GW170817 / V. Savchenko [и др.] // *ApJL*. — 2017. — Окт. — Т. 848, № 2. — С. L15. — arXiv: 1710.05449 [astro-ph.HE].
45. Gravitational Waves and Gamma-Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A / B. P. Abbott [и др.] // *ApJL*. — 2017. — Окт. — Т. 848, № 2. — С. L13. — arXiv: 1710.05834 [astro-ph.HE].
46. GRB 170817A Associated with GW170817: Multi-frequency Observations and Modeling of Prompt Gamma-Ray Emission / A. S. Pozanenko [и др.] // *ApJL*. — 2018. — Янв. — Т. 852, № 2. — С. L30. — arXiv: 1710.05448 [astro-ph.HE].
47. Swope Supernova Survey 2017a (SSS17a), the optical counterpart to a gravitational wave source / D. A. Coulter [и др.] // *Science*. — 2017. — Дек. — Т. 358, № 6370. — С. 1556—1558. — arXiv: 1710.05452 [astro-ph.HE].
48. GW190425: Observation of a Compact Binary Coalescence with Total Mass $\sim 3.4 M_{\odot}$ / B. P. Abbott [и др.] // *ApJL*. — 2020. — Март. — Т. 892, № 1. — С. L3. — arXiv: 2001.01761 [astro-ph.HE].
49. Observation of the Second LIGO/Virgo Event Connected with a Binary Neutron Star Merger S190425z in the Gamma-Ray Range / A. S. Pozanenko [и др.] // *Astronomy Letters*. — 2020. — Февр. — Т. 45, № 11. — С. 710—727. — arXiv: 1912.13112 [astro-ph.HE].
50. Science objectives of the Einstein Probe mission / W. Yuan [и др.] // *Science China Physics, Mechanics, and Astronomy*. — 2025. — Март. — Т. 68, № 3. — С. 239501. — arXiv: 2501.07362 [astro-ph.HE].

51. *Atteia, J.-L.* The SVOM mission / J.-L. Atteia, B. Cordier, J. Wei // International Journal of Modern Physics D. — 2022. — Апр. — Т. 31, № 5. — С. 2230008. — arXiv: 2203.10962 [astro-ph.IM].
52. *Kennea, J. A.* The Constant Evolution of the Neil Gehrels Swift Observatory: Two Decades of Operational Innovation for Time-Domain and Multi-Messenger Astrophysics / J. A. Kennea // arXiv e-prints. — 2026. — Авг. — arXiv:2608.04220. — arXiv: 2608.04220 [astro-ph.IM].
53. The Redshift Distribution of Einstein Probe Transients Supports Their Relation to Gamma-Ray Bursts / B. O'Connor [и др.] // *ApJL*. — 2025. — Нояб. — Т. 993, № 1. — С. L37. — arXiv: 2509.07141 [astro-ph.HE].
54. SVOM/VT: Overview of data processing and GRB identifications with X-band data / H.-L. Li [и др.] // arXiv e-prints. — 2026. — Апр. — arXiv:2604.24266. — arXiv: 2604.24266 [astro-ph.HE].
55. The Zwicky Transient Facility: System Overview, Performance, and First Results / E. C. Bellm [и др.] // *PASP*. — 2019. — Янв. — Т. 131, № 995. — С. 018002. — arXiv: 1902.01932 [astro-ph.IM].
56. LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products / Ž. Ivezić [и др.] // *ApJ*. — 2019. — Март. — Т. 873, № 2. — С. 111. — arXiv: 0805.2366 [astro-ph].
57. The Gravitational-wave Optical Transient Observer (GOTO) data pipeline and workflow for transient discovery / J. D. Lyman [и др.] // arXiv e-prints. — 2026. — Март. — arXiv:2603.02330. — arXiv: 2603.02330 [astro-ph.IM].
58. Performance of the NUTTelA-TAO instrument system after two years of operation / B. Grossan [и др.] // Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX. Т. 12184 / под ред. С. J. Evans, J. J. Bryant, K. Motohara. — 08.2022. — 121848A. — (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series).
59. Early Optical Follow-up of Gamma-Ray Bursts: The Critical Role of Robotic Telescopes / R. Gupta [и др.] // arXiv e-prints. — 2026. — Июнь. — arXiv:2606.28267. — arXiv: 2606.28267 [astro-ph.HE].
60. *Piran, T.* The physics of gamma-ray bursts / T. Piran // Reviews of Modern Physics. — 2004. — Окт. — Т. 76, № 4. — С. 1143–1210. — arXiv: astro-ph/0405503 [astro-ph].

61. *Mészáros, P.* Gamma-ray bursts / P. Mészáros // Reports on Progress in Physics. — 2006. — Август. — Т. 69, № 8. — С. 2259—2321. — arXiv: astro-ph/0605208 [astro-ph].
62. BATSE Observations of Gamma-Ray Burst Spectra. I. Spectral Diversity / D. Band [и др.] // *ApJ*. — 1993. — Август. — Т. 413. — С. 281.
63. *Blandford, R. D.* Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. / R. D. Blandford, R. L. Znajek // *MNRAS*. — 1977. — Май. — Т. 179. — С. 433—456.
64. *Nathanail, A.* Black Hole Magnetospheres / A. Nathanail, I. Contopoulos // *ApJ*. — 2014. — Июнь. — Т. 788, № 2. — С. 186. — arXiv: 1404.0549 [astro-ph.HE].
65. *McKinney, J. C.* Total and Jet Blandford-Znajek Power in the Presence of an Accretion Disk / J. C. McKinney // *ApJL*. — 2005. — Сентябрь. — Т. 630, № 1. — С. L5—L8. — arXiv: astro-ph/0506367 [astro-ph].
66. *Usov, V. V.* Millisecond pulsars with extremely strong magnetic fields as a cosmological source of γ -ray bursts / V. V. Usov // *Nature*. — 1992. — Июнь. — Т. 357, № 6378. — С. 472—474.
67. *Zhang, B.* Gamma-Ray Burst Afterglow with Continuous Energy Injection: Signature of a Highly Magnetized Millisecond Pulsar / B. Zhang, P. Mészáros // *ApJL*. — 2001. — Май. — Т. 552, № 1. — С. L35—L38. — arXiv: astro-ph/0011133 [astro-ph].
68. The protomagnetar model for gamma-ray bursts / B. D. Metzger [и др.] // *MNRAS*. — 2011. — Май. — Т. 413, № 3. — С. 2031—2056. — arXiv: 1012.0001 [astro-ph.HE].
69. An enigmatic long-lasting γ -ray burst not accompanied by a bright supernova / M. Della Valle [и др.] // *Nature*. — 2006. — Декабрь. — Т. 444, № 7122. — С. 1050—1052. — arXiv: astro-ph/0608322 [astro-ph].
70. The environment of the SN-less GRB 111005A at $z = 0.0133$ / M. Tanga [и др.] // *A&A*. — 2018. — Июль. — Т. 615. — A136. — arXiv: 1708.06270 [astro-ph.GA].
71. GRB 060505: A Possible Short-Duration Gamma-Ray Burst in a Star-forming Region at a Redshift of 0.09 / E. O. Ofek [и др.] // *ApJ*. — 2007. — Июнь. — Т. 662, № 2. — С. 1129—1135. — arXiv: astro-ph/0703192 [astro-ph].

72. Statistical Study of the Swift X-Ray Flash and X-Ray Rich Gamma-Ray Bursts / X. Bi [и др.] // *ApJ*. — 2018. — Окт. — Т. 866, № 2. — С. 97. — arXiv: 1810.03079 [astro-ph.HE].
73. *Virgili, F. J.* Low-luminosity gamma-ray bursts as a distinct GRB population: a firmer case from multiple criteria constraints / F. J. Virgili, E.-W. Liang, B. Zhang // *MNRAS*. — 2009. — Янв. — Т. 392, № 1. — С. 91–103. — arXiv: 0801.4751 [astro-ph].
74. An extremely luminous X-ray outburst at the birth of a supernova / A. M. Soderberg [и др.] // *Nature*. — 2008. — Май. — Т. 453, № 7194. — С. 469–474. — arXiv: 0802.1712 [astro-ph].
75. Intrinsic spectra and energetics of BeppoSAX Gamma-Ray Bursts with known redshifts / L. Amati [и др.] // *A&A*. — 2002. — Июль. — Т. 390. — С. 81–89. — arXiv: astro-ph/0205230 [astro-ph].
76. Gamma-Ray Burst Formation Rate Inferred from the Spectral Peak Energy-Peak Luminosity Relation / D. Yonetoku [и др.] // *ApJ*. — 2004. — Июль. — Т. 609, № 2. — С. 935–951. — arXiv: astro-ph/0309217 [astro-ph].
77. *Minaev, P. Y.* The $E_{p,I}$ - E_{iso} correlation: type I gamma-ray bursts and the new classification method / P. Y. Minaev, A. S. Pozanenko // *MNRAS*. — 2020. — Февр. — Т. 492, № 2. — С. 1919–1936. — arXiv: 1912.09810 [astro-ph.HE].
78. *Rhoads, J. E.* The Dynamics and Light Curves of Beamed Gamma-Ray Burst Afterglows / J. E. Rhoads // *ApJ*. — 1999. — Ноябрь. — Т. 525, № 2. — С. 737–749. — arXiv: astro-ph/9903399 [astro-ph].
79. *Sari, R.* Jets in Gamma-Ray Bursts / R. Sari, T. Piran, J. P. Halpern // *ApJL*. — 1999. — Июль. — Т. 519, № 1. — С. L17–L20. — arXiv: astro-ph/9903339 [astro-ph].
80. Making a Short Gamma-Ray Burst from a Long One: Implications for the Nature of GRB 060614 / B. Zhang [и др.] // *ApJL*. — 2007. — Янв. — Т. 655, № 1. — С. L25–L28. — arXiv: astro-ph/0612238 [astro-ph].
81. Gamma-Ray Burst Jet Breaks Revisited / X.-G. Wang [и др.] // *ApJ*. — 2018. — Июнь. — Т. 859, № 2. — С. 160. — arXiv: 1804.02113 [astro-ph.HE].
82. Gamma-Ray Burst Afterglows in the Multimessenger Era: Numerical Models and Closure Relations / G. Ryan [и др.] // *ApJ*. — 2020. — Июнь. — Т. 896, № 2. — С. 166. — arXiv: 1909.11691 [astro-ph.HE].

83. Modeling of Long-term Afterglow Counterparts to Gravitational Wave Events: The Full View of GRB 170817A / G. Ryan [и др.] // *ApJ*. — 2024. — Ноябрь. — Т. 975, № 1. — С. 131. — arXiv: 2310.02328 [astro-ph.HE].
84. Evidence for X-Ray Emission in Excess to the Jet-afterglow Decay 3.5 yr after the Binary Neutron Star Merger GW 170817: A New Emission Component / A. Hajela [и др.] // *ApJL*. — 2022. — Март. — Т. 927, № 1. — С. L17. — arXiv: 2104.02070 [astro-ph.HE].
85. Magnetic acceleration of ultrarelativistic jets in gamma-ray burst sources / S. S. Komissarov [и др.] // *MNRAS*. — 2009. — Апрель. — Т. 394, № 3. — С. 1182—1212. — arXiv: 0811.1467 [astro-ph].
86. *Barkov, M. V.* Dynamics and Emission of Wind-powered Afterglows of Gamma-Ray Bursts: Flares, Plateaus, and Steep Decays / M. V. Barkov, Y. Luo, M. Lyutikov // *ApJ*. — 2021. — Февр. — Т. 907, № 2. — С. 109. — arXiv: 2004.13600 [astro-ph.HE].
87. *Sari, R.* Spectra and Light Curves of Gamma-Ray Burst Afterglows / R. Sari, T. Piran, R. Narayan // *ApJL*. — 1998. — Апрель. — Т. 497, № 1. — С. L17—L20. — arXiv: astro-ph/9712005 [astro-ph].
88. A Comprehensive Study of Gamma-Ray Burst Optical Emission. I. Flares and Early Shallow-decay Component / L. Li [и др.] // *ApJ*. — 2012. — Октябрь. — Т. 758, № 1. — С. 27. — arXiv: 1203.2332 [astro-ph.HE].
89. Gamma-Ray Bursts: Multiwavelength Investigations and Models / A. S. Pozanenko [и др.] // *Astronomy Letters*. — 2021. — Дек. — Т. 47, № 12. — С. 791—830.
90. Prompt Optical Observations of Gamma-Ray Bursts / C. Akerlof [и др.] // *ApJL*. — 2000. — Март. — Т. 532, № 1. — С. L25—L28. — arXiv: astro-ph/0001438 [astro-ph].
91. Master Robotic Net / V. Lipunov [и др.] // *Advances in Astronomy*. — 2010. — Янв. — Т. 2010. — С. 349171. — arXiv: 0907.0827 [astro-ph.HE].
92. The Burst Observer and Optical Transient Exploring System (BOOTES) / A. J. Castro-Tirado [и др.] // *A&A Suppl. Ser.* — 1999. — Сент. — Т. 138. — С. 583—585.

93. TORTOREM: Two-telescope complex for detection and investigation of optical transients / E. Molinari [и др.] // *Nuovo Cimento B Serie.* — 2006. — Дек. — Т. 121, № 12. — С. 1525—1526.
94. Search for GRB related prompt optical emission and other fast varying objects with “Pi of the Sky” detector / M. Ćwiok [и др.] // *Astrophys. Space Sci.* — 2007. — ИЮНЬ. — Т. 309, № 1—4. — С. 531—535.
95. Broadband observations of the naked-eye γ -ray burst GRB080319B / J. L. Racusin [и др.] // *Nature.* — 2008. — СЕНТ. — Т. 455, № 7210. — С. 183—188. — arXiv: 0805.1557 [astro-ph].
96. A statistical study of gamma-ray burst afterglows measured by the Swift Ultraviolet Optical Telescope / S. R. Oates [и др.] // *MNRAS.* — 2009. — Май. — Т. 395, № 1. — С. 490—503. — arXiv: 0901.3597 [astro-ph.HE].
97. Flares in gamma-ray burst X-ray afterglows as prompt emission from slightly misaligned structured jets / R. Duque [и др.] // *MNRAS.* — 2022. — ИЮНЬ. — Т. 513, № 1. — С. 951—963. — arXiv: 2112.02917 [astro-ph.HE].
98. Determination of the Intrinsic Luminosity Time Correlation in the X-Ray Afterglows of Gamma-Ray Bursts / M. G. Dainotti [и др.] // *ApJ.* — 2013. — СЕНТ. — Т. 774, № 2. — С. 157. — arXiv: 1307.7297 [astro-ph.HE].
99. The Optical Luminosity-Time Correlation for More than 100 Gamma-Ray Burst Afterglows / M. G. Dainotti [и др.] // *ApJL.* — 2020. — Дек. — Т. 905, № 2. — С. L26. — arXiv: 2011.14493 [astro-ph.HE].
100. Photometric selection of Type Ia supernovae in the Supernova Legacy Survey / G. Bazin [и др.] // *A&A.* — 2011. — ОКТ. — Т. 534, id.A43. — С. 21. — arXiv: 1109.0948 [astro-ph.HE].
101. *Arnett, W. D.* Type I supernovae. I - Analytic solutions for the early part of the light curve / W. D. Arnett // *ApJ.* — 1982. — ФЕВР. — Т. 253. — С. 785—797.
102. A hypernova model for the supernova associated with the γ -ray burst of 25 April 1998 / K. Iwamoto [и др.] // *Nature.* — 1998. — ОКТ. — Т. 395, № 6703. — С. 672—674. — arXiv: astro-ph/9806382 [astro-ph].
103. Spectroscopic Discovery of the Supernova 2003dh Associated with GRB 030329 / K. Z. Stanek [и др.] // *ApJL.* — 2003. — ИЮЛЬ. — Т. 591, № 1. — С. L17—L20. — arXiv: astro-ph/0304173 [astro-ph].

104. *Paczynski, B.* Gamma-ray bursts as hypernovae / B. Paczyński // Gamma-Ray Bursts, 4th Hunstville Symposium. T. 428 / под ред. C. A. Meegan, R. D. Preece, T. M. Koshut. — AIP, 05.1998. — С. 783—787. — (American Institute of Physics Conference Series). — arXiv: astro-ph/9706232 [astro-ph].
105. *Paczynski, B.* Are Gamma-Ray Bursts in Star-Forming Regions? / B. Paczyński // *ApJL*. — 1998. — Февр. — Т. 494, № 1. — С. L45—L48. — arXiv: astro-ph/9710086 [astro-ph].
106. Gamma-Ray Burst Progenitors / A. Levan [и др.] // *Space Sci. Rev.* — 2016. — Дек. — Т. 202, № 1—4. — С. 33—78. — arXiv: 1611.03091 [astro-ph.HE].
107. A trio of gamma-ray burst supernovae: GRB 120729A, GRB 130215A/SN 2013ez, and GRB 130831A/SN 2013fu / Z. Cano [и др.] // *A&A*. — 2014. — Август. — Т. 568. — A19. — arXiv: 1405.3114 [astro-ph.HE].
108. Supernova 2006aj and the associated X-Ray Flash 060218 / J. Sollerman [и др.] // *A&A*. — 2006. — Август. — Т. 454, № 2. — С. 503—509. — arXiv: astro-ph/0603495 [astro-ph].
109. Radiation Hydrodynamics of SN 1987A. I. Global Analysis of the Light Curve for the First 4 Months / S. Blinnikov [и др.] // *ApJ*. — 2000. — Апрель. — Т. 532, № 2. — С. 1132—1149. — arXiv: astro-ph/9911205 [astro-ph].
110. *Blinnikov, S. I.* STELLA: Multi-group Radiation Hydrodynamics Code / S. I. Blinnikov, O. S. Bartunov. — 08.2011. — ascl: 1108.013. — Astrophysics Source Code Library, record ascl:1108.013.
111. *Belkin, S. O.* Search for Correlations and Study of Selection Effects When Analyzing a Sample of Supernovae Associated with Gamma-Ray Bursts / S. O. Belkin, A. S. Pozanenko // *Astronomy Letters*. — 2024. — Дек. — Т. 50, № 12. — С. 701—731.
112. SN 2002lt and GRB 021211: a SN/GRB Connection at $z = 1$ / M. Della Valle [и др.] // Gamma-Ray Bursts: 30 Years of Discovery. T. 727 / под ред. E. Fenimore, M. Galassi. — AIP, 09.2004. — С. 403—407. — (American Institute of Physics Conference Series). — arXiv: astro-ph/0312264 [astro-ph].

113. JWST Spectroscopy of GRB 250702B: An Extremely Rare and Exceptionally Energetic Burst in a Dusty, Massive Galaxy at $z = 1.036$ / B. P. Gompertz [и др.] // *ApJL*. — 2026. — ЯНВ. — Т. 997, № 1. — С. L4. — arXiv: 2509.22778 [astro-ph.HE].
114. The James Webb Space Telescope / J. P. Gardner [и др.] // *Space Sci. Rev.* — 2006. — Апр. — Т. 123, № 4. — С. 485—606. — arXiv: astro-ph/0606175 [astro-ph].
115. JWST and HST Observations of the Host Galaxy and Supernova SN 2024aihh in EP240801a at $z = 1.67$ / A. P. C. van Hoof [и др.] // *ApJL*. — 2026. — ЯНВ. — Т. 996, № 2. — С. L29. — arXiv: 2512.11572 [astro-ph.HE].
116. JWST reveals a supernova following a gamma-ray burst at $z \approx 7.3$ / A. J. Levan [и др.] // *A&A*. — 2025. — Дек. — Т. 704. — С. L8. — arXiv: 2507.18784 [astro-ph.HE].
117. GRB 260310A/SN 2026fgk: Photometric and Spectroscopic Evolution of a Nearby Gamma-Ray Burst Supernova and an Exceptionally Bright Afterglow at $z = 0.153$ / B. O'Connor [и др.] // *ApJ*. — 2026. — АВГ. — Т. 1006, № 2. — С. 210. — arXiv: 2605.18973 [astro-ph.HE].
118. Exploding Neutron Stars in Close Binaries / S. I. Blinnikov [и др.] // *Soviet Astronomy Letters*. — 1984. — Апр. — Т. 10. — С. 177—179. — arXiv: 1808.05287 [astro-ph.HE].
119. Nucleosynthesis, neutrino bursts and γ -rays from coalescing neutron stars / D. Eichler [и др.] // *Nature*. — 1989. — ИЮЛЬ. — Т. 340, № 6229. — С. 126—128.
120. *Paczynski, B.* Super-Eddington Winds from Neutron Stars / B. Paczynski // *ApJ*. — 1990. — НОЯБ. — Т. 363. — С. 218.
121. *Li, L.-X.* Transient Events from Neutron Star Mergers / L.-X. Li, B. Paczyński // *ApJL*. — 1998. — НОЯБ. — Т. 507, № 1. — С. L59—L62. — arXiv: astro-ph/9807272 [astro-ph].
122. Where Has All the R-process Gone? Timescales for Gamma-Ray Burst Kilonovae to Enrich Their Host Galaxies / A. E. Nugent [и др.] // *ApJ*. — 2025. — Апр. — Т. 982, № 2. — С. 144. — arXiv: 2410.00095 [astro-ph.HE].

123. A ‘kilonova’ associated with the short-duration γ -ray burst GRB 130603B / N. R. Tanvir [и др.] // *Nature*. — 2013. — Август. — Т. 500, № 7464. — С. 547–549. — arXiv: 1306.4971 [astro-ph.HE].
124. The Diversity of Kilonova Emission in Short Gamma-Ray Bursts / B. P. Gompertz [и др.] // *ApJ*. — 2018. — Июнь. — Т. 860, № 1. — С. 62. — arXiv: 1710.05442 [astro-ph.HE].
125. The afterglow and kilonova of the short GRB 160821B / E. Troja [и др.] // *MNRAS*. — 2019. — Октябрь. — Т. 489, № 2. — С. 2104–2116. — arXiv: 1905.01290 [astro-ph.HE].
126. The Broadband Counterpart of the Short GRB 200522A at $z = 0.5536$: A Luminous Kilonova or a Collimated Outflow with a Reverse Shock? / W. Fong [и др.] // *ApJ*. — 2021. — Январь. — Т. 906, № 2. — С. 127. — arXiv: 2008.08593 [astro-ph.HE].
127. The Emergence of a Lanthanide-rich Kilonova Following the Merger of Two Neutron Stars / N. R. Tanvir [и др.] // *ApJL*. — 2017. — Октябрь. — Т. 848, № 2. — С. L27. — arXiv: 1710.05455 [astro-ph.HE].
128. Origin of the heavy elements in binary neutron-star mergers from a gravitational-wave event / D. Kasen [и др.] // *Nature*. — 2017. — Ноябрь. — Т. 551, № 7678. — С. 80–84. — arXiv: 1710.05463 [astro-ph.HE].
129. GWTC-4.0: Updating the Gravitational-wave Transient Catalog with Observations from the First Part of the Fourth LIGO-Virgo-KAGRA Observing Run / A. G. Abac [и др.] // *ApJL*. — 2026. — Июнь. — Т. 1004, № 2. — С. L22.
130. GWTC-4.0: Population Properties of Merging Compact Binaries / A. G. Abac [и др.] // *ApJL*. — 2026. — Июль. — Т. 1005, № 2. — С. L51. — arXiv: 2508.18083 [astro-ph.HE].
131. *Bloom, J. S.* The Redshift and the Ordinary Host Galaxy of GRB 970228 / J. S. Bloom, S. G. Djorgovski, S. R. Kulkarni // *ApJ*. — 2001. — Июнь. — Т. 554, № 2. — С. 678–683. — arXiv: astro-ph/0007244 [astro-ph].
132. Short GRB Host Galaxies. I. Photometric and Spectroscopic Catalogs, Host Associations, and Galactocentric Offsets / W.-f. Fong [и др.] // *ApJ*. — 2022. — Ноябрь. — Т. 940, № 1. — С. 56. — arXiv: 2206.01763 [astro-ph.GA].

133. The Optically Unbiased Gamma-Ray Burst Host (TOUGH) Survey. I. Survey Design and Catalogs / J. Hjorth [и др.] // *ApJ*. — 2012. — Сент. — Т. 756, № 2. — С. 187. — arXiv: 1205.3162 [astro-ph.CO].
134. GRB 980425 / C. Tinney [и др.] // *GCN Circ.* — 1998. — Май. — Т. 6896. — С. 3.
135. A large, chemically enriched, neutral gas reservoir in a galaxy at $z = 6.782$ / A. Saccardi [и др.] // *A&A*. — 2026. — Июнь. — Т. 710. — A363. — arXiv: 2506.04340 [astro-ph.GA].
136. Accurate photometric redshifts for the CFHT legacy survey calibrated using the VIMOS VLT deep survey / O. Ilbert [и др.] // *A&A*. — 2006. — Окт. — Т. 457, № 3. — С. 841—856. — arXiv: astro-ph/0603217 [astro-ph].
137. Dust and metal column densities in gamma-ray burst host galaxies / P. Schady [и др.] // *MNRAS*. — 2010. — Февр. — Т. 401, № 4. — С. 2773—2792. — arXiv: 0910.2590 [astro-ph.CO].
138. Host galaxies of SNe Ic-BL with and without long gamma-ray bursts / J. Japelj [и др.] // *A&A*. — 2018. — Сент. — Т. 617. — A105. — arXiv: 1806.10613 [astro-ph.HE].
139. Are the host galaxies of long gamma-ray bursts more compact than star-forming galaxies of the field? / B. Schneider [и др.] // *A&A*. — 2022. — Окт. — Т. 666. — A14. — arXiv: 2206.14873 [astro-ph.GA].
140. *Fong, W.* Hubble Space Telescope Observations of Short Gamma-Ray Burst Host Galaxies: Morphologies, Offsets, and Local Environments / W. Fong, E. Berger, D. B. Fox // *ApJ*. — 2010. — Янв. — Т. 708, № 1. — С. 9—25. — arXiv: 0909.1804 [astro-ph.HE].
141. *Vlasyuk, V. V.* Multi-messenger astronomy: the alert observations of gamma-ray bursts afterglows, supernovae and search for optical counterparts to neutrino events and gravitational waves / V. V. Vlasyuk, V. V. Sokolov // *The Multi-Messenger Astronomy: Gamma-Ray Bursts, Search for Electromagnetic Counterparts to Neutrino Events and Gravitational Waves*. — 01.2019. — С. 243—254.

142. The observations of GRB afterglows and the plan to search for optical counterparts of gravitational wave events / L. Xin [и др.] // *The Multi-Messenger Astronomy: Gamma-Ray Bursts, Search for Electromagnetic Counterparts to Neutrino Events and Gravitational Waves*. — 01.2019. — С. 260—267.
143. IKI GRB-FuN: observations of GRBs with small-aperture telescopes / A. Volnova [и др.] // *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. — 2021. — Май. — Т. 93, № 1.
144. GLADE+ : an extended galaxy catalogue for multimessenger searches with advanced gravitational-wave detectors / G. Dálya [и др.] // *MNRAS*. — 2022. — Июль. — Т. 514, № 1. — С. 1403—1411. — arXiv: 2110.06184 [astro-ph.CO].
145. Galaxy Strategy for LIGO-Virgo Gravitational Wave Counterpart Searches / N. Gehrels [и др.] // *ApJ*. — 2016. — Апр. — Т. 820, № 2. — С. 136. — arXiv: 1508.03608 [astro-ph.HE].
146. Galaxy-Targeted Robotic Telescope Follow-up of Gravitational Wave Events / L. Salmon [и др.] // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*. Т. 53. — 09.2021. — С. 67—74. — (Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series).
147. *Ligo Scientific Collaboration*. LIGO/Virgo/KAGRA S230518h: Identification of a GW compact binary merger candidate / Ligo Scientific Collaboration, VIRGO Collaboration, Kagra Collaboration // *GRB Coordinates Network*. — 2023. — Май. — Т. 33813. — С. 1.
148. Searches after Gravitational Waves Using ARizona Observatories (SAGUARO): System Overview and First Results from Advanced LIGO/Virgo's Third Observing Run / M. J. Lundquist [и др.] // *ApJL*. — 2019. — Август. — Т. 881, № 2. — С. L26. — arXiv: 1906.06345 [astro-ph.HE].
149. GROWTH on S190425z: Searching Thousands of Square Degrees to Identify an Optical or Infrared Counterpart to a Binary Neutron Star Merger with the Zwicky Transient Facility and Palomar Gattini-IR / M. W. Coughlin [и др.] // *ApJL*. — 2019. — Ноябрь. — Т. 885, № 1. — С. L19. — arXiv: 1907.12645 [astro-ph.HE].

150. A Light in the Dark: Searching for Electromagnetic Counterparts to Black Hole-Black Hole Mergers in LIGO/Virgo O3 with the Zwicky Transient Facility / M. J. Graham [и др.] // *ApJ*. — 2023. — ЯНВ. — Т. 942, № 2. — С. 99. — arXiv: 2209.13004 [astro-ph.HE].
151. The burst observer and optical transient exploring system in the multi-messenger astronomy era / Y. .- Hu [и др.] // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. — 2023. — Май. — Т. 10. — С. 952887. — arXiv: 2302.06565 [astro-ph.HE].
152. Pan-STARRS and PESSTO search for an optical counterpart to the LIGO gravitational-wave source GW150914 / S. J. Smartt [и др.] // *MNRAS*. — 2016. — Нояб. — Т. 462, № 4. — С. 4094—4116. — arXiv: 1602.04156 [astro-ph.HE].
153. Searching for electromagnetic counterparts to gravitational-wave merger events with the prototype Gravitational-Wave Optical Transient Observer (GOTO-4) / B. P. Gompertz [и др.] // *MNRAS*. — 2020. — Сент. — Т. 497, № 1. — С. 726—738. — arXiv: 2004.00025 [astro-ph.HE].
154. Strategy and Results of MASTER Network Follow-Up Observations of LIGO and Virgo Gravitational Wave Events within the Observational Sets O1, O2, and O3 / V. Lipunov [и др.] // *Astronomy Reports*. — 2022. — Дек. — Т. 66, № 12. — С. 1118—1253.
155. The SALT observation control system / J. Brink [и др.] // *Advanced Software and Control for Astronomy II*. Т. 7019 / под ред. A. Bridger, N. M. Radziwill. — 08.2008. — 70190N. — (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series).
156. Handling observation proposals for SALT / C. Hettlage [и др.] // *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems III*. Т. 7737 / под ред. D. R. Silva, A. B. Peck, B. T. Soifer. — 07.2010. — 77371B. — (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series).
157. SPHERE TDB: Catalogue Management, Observation Planning and Detection Visualization / A. Gross [и др.] // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXV*. Т. 512 / под ред. N. P. F. Lorente, K. Shortridge, R. Wayth. — 12.2017. — С. 527. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).

158. astroplan: An Open Source Observation Planning Package in Python / B. M. Morris [и др.] // *AJ*. — 2018. — Март. — Т. 155, № 3. — С. 128. — arXiv: 1712.09631 [*astro-ph.IM*].
159. Scheduling observations on the LCOGT network / E. Hawkins [и др.] // *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems III*. Т. 7737 / под ред. D. R. Silva, A. B. Peck, B. T. Soifer. — 07.2010. — 77370P. — (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series).
160. *Saunders, E.* Multi-Telescope Observing: the LCOGT Network Scheduler / E. Saunders, S. Lampoudi // *The Third Hot-wiring the Transient Universe Workshop* / под ред. P. R. Wozniak [и др.]. — 01.2014. — С. 117—123.
161. An Enhanced Method for Scheduling Observations of Large Sky Error Regions for Finding Optical Counterparts to Transients / J. Rana [и др.] // *ApJ*. — 2017. — Апр. — Т. 838, № 2. — С. 108. — arXiv: 1603.01689 [*astro-ph.IM*].
162. SCiMMA Hopskotch: performant, robust, and secure messaging cyberinfrastructure for Multi-Messenger Astrophysics / A. Brazier [и др.] // *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. Т. 54. — 06.2022. — С. 348.10. — (American Astronomical Society Meeting Abstracts).
163. SCiMMA HopSkotch: Coordinating Multi-messenger Astrophysical Observatories during LVK Run O4 / A. Brazier [и др.] // *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. Т. 55. — 01.2023. — С. 268.05. — (American Astronomical Society Meeting Abstracts).
164. *Williams, R. D.* VOEvent: Information Infrastructure for Real-Time Astronomy / R. D. Williams, R. Seaman // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*. Т. 351 / под ред. C. Gabriel [и др.]. — 07.2006. — С. 637. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
165. Sky Event Reporting Metadata Version 2.0 / R. Seaman [и др.]. — 07.2011. — arXiv: 1110.0523 [*astro-ph.IM*]. — IVOA Recommendation 11 July 2011.
166. *Boch, T.* MOCPy, a Python Library to Manipulate Spatial Coverage Maps / T. Boch // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXVI*. Т. 521 / под ред. M. Molinaro, K. Shortridge, F. Pasian. — 10.2019. — С. 487. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
167. Cosmic-CoNN LCO CR Dataset / C. Xu [и др.]. — Вер. 0.1.0. — 06.2021. — URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5034763>.

168. Cosmic-CoNN: A Cosmic-Ray Detection Deep-learning Framework, Data Set, and Toolkit / С. Ху [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2023. — ЯНВ. — Т. 942, № 2. — С. 73. — URL: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac9d91>.
169. *Becker, A.* HOTPANTS: High Order Transform of PSF ANd Template Subtraction / A. Becker. — 04.2015. — Astrophysics Source Code Library, record ascl:1504.004.
170. *Barbary, K.* SEP: Source Extractor as a library / K. Barbary // *The Journal of Open Source Software*. — 2016. — ОКТ. — Т. 1, № 6. — С. 58.
171. Astrometry.net: Blind Astrometric Calibration of Arbitrary Astronomical Images / D. Lang [и др.] // *AJ*. — 2010. — Май. — Т. 139, № 5. — С. 1782—1800. — arXiv: 0910.2233 [[astro-ph.IM](#)].
172. *Bertin, E.* SExtractor: Software for source extraction. / E. Bertin, S. Arnouts // *A&A Suppl. Ser.* — 1996. — ИЮНЬ. — Т. 117. — С. 393—404.
173. *Bertin, E.* SWarp: Resampling and Co-adding FITS Images Together / E. Bertin. — 10.2010. — Astrophysics Source Code Library, record ascl:1010.068.
174. *Bertin, E.* Automated Morphometry with SExtractor and PSFEx / E. Bertin // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XX*. Т. 442 / под ред. I. N. Evans [и др.]. — 07.2011. — С. 435. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
175. *Karpov, S.* STDWeb: Simple Transient Detection pipeline for the Web / S. Karpov // arXiv e-prints. — 2024. — НОЯБ. — arXiv:2411.16470. — arXiv: 2411.16470 [[astro-ph.IM](#)].
176. *van Dokkum, P. G.* Cosmic-Ray Rejection by Laplacian Edge Detection / P. G. van Dokkum // *PASP*. — 2001. — НОЯБ. — Т. 113, № 789. — С. 1420—1427. — arXiv: [astro-ph/0108003](#) [[astro-ph](#)].
177. *Kouprianov, V.* Apex II + FORTE: data acquisition software for space surveillance / V. Kouprianov // 39th COSPAR Scientific Assembly. Т. 39. — 07.2012. — С. 974.
178. Apex I and Apex II software packages for the reduction of astronomical CCD observations / A. V. Devyatkin [и др.] // *Solar System Research*. — 2010. — ФЕВР. — Т. 44, № 1. — С. 68—80.

179. *Kron, R. G.* Photometry of a complete sample of faint galaxies. / R. G. Kron // *ApJS*. — 1980. — ИЮНЬ. — Т. 43. — С. 305—325.
180. The USNO-B Catalog / D. G. Monet [и др.] // The Astronomical Journal. — 2003. — ФЕВР. — Т. 125, № 2. — С. 984. — URL: <https://doi.org/10.1086/345888>.
181. The Fifth Catalogue of Nearby Stars (CNS5) / A. Golovin [и др.] // *A&A*. — 2023. — ФЕВР. — Т. 670. — A19. — arXiv: 2211.01449 [astro-ph.SR].
182. VizieR Online Data Catalog: Northern Sky Variability Survey (NSVS) (Wozniak+, 2004) / P. R. Wozniak [и др.]. — 11.2004. — VizieR On-line Data Catalog: II/287. Originally published in: 2004AJ....127.2436W.
183. Minor Planet Center - Asteroid Orbital Data / G. Williams [и др.]. — 2009. — URL: <http://dc.g-vo.org/mpc/q/pla/info>. VO resource provided by the GAVO Data Center.
184. The Pan-STARRS1 Surveys / K. C. Chambers [и др.] // arXiv e-prints. — 2016. — ДЕК. — arXiv:1612.05560. — arXiv: 1612.05560 [astro-ph.IM].
185. *Alard, C.* Analysis of the OGLE microlensing candidates using the image subtraction method / C. Alard // *A&A*. — 1999. — МАРТ. — Т. 343. — С. 10—18. — arXiv: astro-ph/9808092 [astro-ph].
186. scikit-image: Image processing in Python / S. van der Walt [и др.] // PeerJ. — 2014. — ЯНВ. — Т. 2. — e453. — arXiv: 1407.6245 [cs.MS].
187. The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III / S. Alam [и др.] // *ApJS*. — 2015. — ИЮЛЬ. — Т. 219, № 1. — С. 12. — arXiv: 1501.00963 [astro-ph.IM].
188. Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys / A. Dey [и др.] // *AJ*. — 2019. — МАЙ. — Т. 157, № 5. — С. 168. — arXiv: 1804.08657 [astro-ph.IM].
189. The UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS) / A. Lawrence [и др.] // *MNRAS*. — 2007. — АВГ. — Т. 379, № 4. — С. 1599—1617. — arXiv: astro-ph/0604426 [astro-ph].
190. The Zwicky Transient Facility: Data Processing, Products, and Archive / F. J. Masci [и др.] // *PASP*. — 2019. — ЯНВ. — Т. 131, № 995. — С. 018003. — arXiv: 1902.01872 [astro-ph.IM].

191. GRB 230328B: Swift detection of a burst with an optical afterglow / J. D. Gropp [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Март. — Т. 33527. — С. 1.
192. *Grossan, B.* The emission mechanism of gamma-ray bursts: Identification via optical-IR slope measurements / B. Grossan, P. Kumar, G. F. Smoot // Journal of High Energy Astrophysics. — 2019. — Август. — Т. 23. — С. 14–22. — arXiv: 1909.02152 [astro-ph.HE].
193. *Maksut, Z.* Automating the Alert Response of the NU Transient Telescope at AssyTurgen Astrophysical Observatory (NUTTelA-TAO) / Z. Maksut, B. Grossan // Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series. Т. 53. — 09.2021. — С. 169–173. — (Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series).
194. GRB 230328B NUTTelA-TAO / BSTI Early Measurements / T. Komesh [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Март. — Т. 33539. — С. 1.
195. *Blackburn, J. K.* FTOOLS: A FITS Data Processing and Analysis Software Package / J. K. Blackburn // Astronomical Data Analysis Software and Systems IV. Т. 77 / под ред. R. A. Shaw, H. E. Payne, J. J. E. Hayes. — 01.1995. — С. 367. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
196. *Nasa High Energy Astrophysics Science Archive Research Center (Heasarc).* HEAsoft: Unified Release of FTOOLS and XANADU / Nasa High Energy Astrophysics Science Archive Research Center (Heasarc). — 08.2014. — Astrophysics Source Code Library, record ascl:1408.004.
197. *Pei, Y. C.* Interstellar Dust from the Milky Way to the Magellanic Clouds / Y. C. Pei // *ApJ*. — 1992. — Август. — Т. 395. — С. 130.
198. *Schlafly, E. F.* Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD / E. F. Schlafly, D. P. Finkbeiner // *ApJ*. — 2011. — Август. — Т. 737, № 2. — С. 103. — arXiv: 1012.4804 [astro-ph.GA].
199. *Wilms, J.* On the Absorption of X-Rays in the Interstellar Medium / J. Wilms, A. Allen, R. McCray // *ApJ*. — 2000. — Октябрь. — Т. 542, № 2. — С. 914–924. — arXiv: astro-ph/0008425 [astro-ph].
200. Dust extinctions for an unbiased sample of gamma-ray burst afterglows / S. Covino [и др.] // *MNRAS*. — 2013. — Июнь. — Т. 432, № 2. — С. 1231–1244. — arXiv: 1303.4743 [astro-ph.HE].

201. *Fermi GBM Team*. GRB 231115A: Fermi GBM Final Real-time Localization / Fermi GBM Team // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35035. — С. 1.
202. GRB 231115A: a short hard GRB detected by IBAS, poistionally coincident with M82 / S. Mereghetti [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35037. — С. 1.
203. Konus-Wind detection of GRB 231115A (a probable Magnetar Giant Flare from M82) / D. Frederiks [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35062. — С. 1.
204. GRB 231115A (short): Glowbug gamma-ray detection / C. C. Cheung [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35045. — С. 1.
205. GRB 231115A: Insight-HXMT/HE detection / W. C. Xue [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35060. — С. 1.
206. GRB 231115A: Swift/BAT-GUANO detection of a short burst / S. Ronchini [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35065. — С. 1.
207. GRB 231115A position consistent with M 82 galaxy / P. D’Avanzo [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35036. — С. 1.
208. *Burns, E.* GRB 231115A: significance of INTEGRAL localization alignment with M82 / E. Burns // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35038. — С. 1.
209. GRB 231115A: GROWTH-India discovery of a potential optical counterpart / H. Kumar [и др.] // GCN Circular. — 2023. — Т. 35041. — URL: <https://gcn.nasa.gov/circulars/35041>.
210. GRB 231115A / AT2023xvj: Updated GIT analysis / R. Kumar [и др.] // GCN Circular. — 2023. — Т. 35055. — URL: <https://gcn.nasa.gov/circulars/35055>.
211. GRB 231115A: MASTER optical observations / V. Lipunov [и др.] // GCN Circular. — 2023. — Т. 35046. — URL: <https://gcn.nasa.gov/circulars/35046>.
212. Fermi GRB 231115A: Global MASTER-Net observations report / V. Lipunov [и др.] // GCN Circular. — 2023. — Т. 35049. — URL: <https://gcn.nasa.gov/circulars/35049>.

213. GRB 231115A: MASTER optical observations / P. Balanutsa [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35046. — С. 1.
214. GRB231115A: GRANDMA Observations / A. Iskandar [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35051. — С. 1.
215. GRB 231115A: Kinder observations with Lulin observatory / T.-W. Chen [и др.] // GCN Circular. — 2023. — Т. 35052. — URL: <https://gcn.nasa.gov/circulars/35052>.
216. GRB 231115A: Gaoyazi/GOT follow-up and archival observations / S. Q. Jiang [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35056. — С. 1.
217. GRB 231115A : MITSuME Akeno and Okayama optical upper limits / S. Hayatsu [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35057. — С. 1.
218. GRB231115A: Liverpool Telescope imaging / D. A. Perley, C. M. Copperwheat, J. E. Jencson [и др.] // GCN Circular. — 2023. — Т. 35064. — URL: <https://gcn.nasa.gov/circulars/35064>.
219. GRB 231115A: optical observations from INAF observatories / P. D’Avanzo [и др.] // GCN Circular. — 2023. — Т. 35058. — URL: <https://gcn.nasa.gov/circulars/35058>.
220. GRB 231115A : OHP/T120 optical upper limit / D. Turpin [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35078. — С. 1.
221. GRB 231115A: JinShan optical upper limits / J. An [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35091. — С. 1.
222. GRB 231115A: Wendelstein Optical/Infrared Observations / L. Hu [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35092. — С. 1.
223. GRB 231115A: Fermi Observations of a probable Magnetar Giant Flare from M82 / S. D’Alessi [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2023. — Ноябрь. — Т. 35044. — С. 1.
224. A Decade of Short-duration Gamma-Ray Burst Broadband Afterglows: Energetics, Circumburst Densities, and Jet Opening Angles / W. Fong [и др.] // *ApJ*. — 2015. — Дек. — Т. 815, № 2. — С. 102. — arXiv: 1509.02922 [astro-ph.HE].

225. The Combined Ultraviolet, Optical, and Near-infrared Light Curves of the Kilonova Associated with the Binary Neutron Star Merger GW170817: Unified Data Set, Analytic Models, and Physical Implications / V. A. Villar [и др.] // *ApJL*. — 2017. — Дек. — Т. 851, № 1. — С. L21. — arXiv: 1710.11576 [astro-ph.HE].
226. GRB 240225B: MAXI/GSC detection / M. Nakajima [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2024. — Февр. — Т. 35796. — С. 1.
227. GRB 240225B: AstroSat CZTI detection / J. Joshi [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2024. — Февр. — Т. 35798. — С. 1.
228. GRB 240225B: CALET Gamma-Ray Burst Monitor detection / Y. Kawakubo [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2024. — Февр. — Т. 35811. — С. 1.
229. Konus-Wind detection of GRB 240225B (long) / D. Frederiks [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2024. — Февр. — Т. 35835. — С. 1.
230. GRB 240225B: Glowbug gamma-ray detection / C. C. Cheung [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2024. — Март. — Т. 35848. — С. 1.
231. GRB 240225B: GOTO detection of a candidate optical afterglow / B. P. Gompertz [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2024. — Февр. — Т. 35805. — С. 1.
232. HiPS2FITS: Fast Generation of FITS Cutouts From HiPS Image Datasets / T. Boch [и др.] // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXIX*. Т. 527 / под ред. R. Pizzo [и др.]. — 01.2020. — С. 121. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
233. *Kuin, N. P. M.* GRB 200829A: Swift/UVOT Detection / N. P. M. Kuin, M. H. Siegel, Swift/UVOT Team // GRB Coordinates Network. — 2020. — Авг. — Т. 28311. — С. 1.
234. GRB200829A: optical afterglow detection / J. Vinko [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2020. — Авг. — Т. 28316. — С. 1.
235. GRB 200829A: Nanshan/NEXT optical observations / Z. P. Zhu [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2020. — Авг. — Т. 28324. — С. 1.
236. GRB 200829A: Continued Nanshan/NEXT optical observations / Z. P. Zhu [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2020. — Авг. — Т. 28330. — С. 1.

237. *Izzo, L.* GRB 200829A: Liverpool Telescope observations / L. Izzo // GRB Coordinates Network. — 2020. — Август. — Т. 28331. — С. 1.
238. LMFIT: Non-Linear Least-Squares Minimization and Curve-Fitting for Python / M. Newville [и др.]. — Вер. 1.3.3. — 03.2025.
239. *Science Software Branch at STScI.* PyRAF: Python alternative for IRAF / Science Software Branch at STScI. — 07.2012. — ascl: 1207 . 011. — Astrophysics Source Code Library, record ascl:1207.011.
240. VLT observations of GRB 990510 and its environment / K. Beuermann [и др.] // *A&A*. — 1999. — Декабрь. — Т. 352. — С. L26—L30. — arXiv: astro-ph/9909043 [astro-ph].
241. *Schlegel, D. J.* Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds / D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, M. Davis // *ApJ*. — 1998. — Июнь. — Т. 500, № 2. — С. 525—553. — arXiv: astro-ph/9710327 [astro-ph].
242. HI4PI: A full-sky H I survey based on EBHIS and GASS / HI4PI Collaboration [и др.] // *A&A*. — 2016. — Октябрь. — Т. 594. — A116. — arXiv: 1610.06175 [astro-ph.GA].
243. GRB 200829A: Swift/UVOT-XRT photometric redshift / S. R. Oates [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2020. — Сентябрь. — Т. 28338. — С. 1.
244. *Afanasiev, V. L.* The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope / V. L. Afanasiev, A. V. Moiseev // *Astronomy Letters*. — 2005. — Март. — Т. 31, № 3. — С. 194—204. — arXiv: astro-ph/0502095 [astro-ph].
245. Searching for the host galaxy of GRB 920925C / A. S. Pozanenko [и др.] // *Astronomy Letters*. — 2008. — Март. — Т. 34, № 3. — С. 141—144.
246. Galaxy And Mass Assembly (GAMA): blue spheroids within 87 Mpc / S. Mahajan [и др.] // *MNRAS*. — 2018. — Март. — Т. 475, № 1. — С. 788—799. — arXiv: 1712.03644 [astro-ph.GA].
247. Multiwavelength Observations of GRB 181201A and Detection of Its Associated Supernova / S. O. Belkin [и др.] // *Astronomy Letters*. — 2020. — Декабрь. — Т. 46, № 12. — С. 783—811.

248. GRB 181110A: Constraining the Jet Structure, Circumburst Medium and the Initial Lorentz Factor / S. Han [и др.] // *Universe*. — 2022. — Т. 8, № 4. — URL: <https://www.mdpi.com/2218-1997/8/4/248>.
249. Probing the Environment in Gamma-Ray Bursts: The Case of an X-Ray Precursor, Afterglow Late Onset, and Wind Versus Constant Density Profile in GRB 011121 and GRB 011211 / L. Piro [и др.] // *ApJ*. — 2005. — Апр. — Т. 623, № 1. — С. 314—324. — arXiv: astro-ph/0412589 [astro-ph].
250. *Perna, R.* Flares in Long and Short Gamma-Ray Bursts: A Common Origin in a Hyperaccreting Accretion Disk / R. Perna, P. J. Armitage, B. Zhang // *ApJL*. — 2006. — ЯНВ. — Т. 636, № 1. — С. L29—L32. — arXiv: astro-ph/0511506 [astro-ph].
251. Gamma-Ray Burst Flares: Ultraviolet/Optical Flaring. I. / C. A. Swenson [и др.] // *ApJ*. — 2013. — СЕНТ. — Т. 774, № 1. — С. 2. — arXiv: 1303.0286 [astro-ph.HE].
252. Statistical Distributions of Optical Flares from Gamma-Ray Bursts / S.-X. Yi [и др.] // *ApJ*. — 2017. — ИЮЛЬ. — Т. 844, № 1. — С. 79. — arXiv: 1706.08716 [astro-ph.HE].
253. *Mazaeva, E.* Inhomogeneities in the light curves of gamma-ray bursts afterglow / E. Mazaeva, A. Pozanenko, P. Minaev // *International Journal of Modern Physics D*. — 2018. — ЯНВ. — Т. 27, № 10. — С. 1844012. — arXiv: 1804.10441 [astro-ph.HE].
254. Early afterglow detection in the Swift observations of GRB 050801 / M. de Pasquale [и др.] // *MNRAS*. — 2007. — ИЮНЬ. — Т. 377, № 4. — С. 1638—1646. — arXiv: astro-ph/0703447 [astro-ph].
255. *Dainotti, M. G.* A time-luminosity correlation for γ -ray bursts in the X-rays / M. G. Dainotti, V. F. Cardone, S. Capozziello // *MNRAS*. — 2008. — НОЯБ. — Т. 391, № 1. — С. L79—L83. — arXiv: 0809.1389 [astro-ph].
256. GRB 210610B: Swift detection of a burst with bright optical afterglow / K. L. Page [и др.] // *GRB Coordinates Network*. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30170. — С. 1.
257. GRB 210610B: BALROG localization (Fermi Trigger 645047470 / GRB 210610827) / B. Biltzinger [и др.] // *GRB Coordinates Network*. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30171. — С. 1.

258. *Malacaria, C.* GRB 210610B: Fermi GBM detection / C. Malacaria, B. Hristov, Fermi GBM Team // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30199. — С. 1.
259. GRB 210610B: AGILE detection / A. Ursi [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30195. — С. 1.
260. Konus-Wind detection of GRB 210610B / D. Frederiks [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30196. — С. 1.
261. GRB 210610B: GIT optical detection / H. Kumar [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30174. — С. 1.
262. Swift GRB 210610B: Global MASTER-Net observations report / V. Lipunov [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30176. — С. 1.
263. GRB 210610B: BOOTES-2/TELMA optical observation / Y. .-. Hu [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30177. — С. 1.
264. *Romanov, F. D.* GRB 210610B: iTelescope optical afterglow observations / F. D. Romanov // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30181. — С. 1.
265. GRB 210610B: NOT optical observations and tentative redshift / J. P. U. Fynbo [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30182. — С. 1.
266. GRB 210610B: ALMA detection / T. Laskar [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30217. — С. 1.
267. GRB 210610B: VLA detection / K. D. Alexander [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30218. — С. 1.
268. GRB 210610B: Enhanced Swift-XRT position / J. P. Osborne [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30189. — С. 1.
269. GRB 210610B: RATIR Optical and NIR Observations / R. L. Becerra [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30190. — С. 1.
270. GRB 210610B: GOTO confirmation of afterglow detection / Y. .-. Mong [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30193. — С. 1.
271. GRB 210610B: Redshift confirmation from GTC / A. de Ugarte Postigo [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30194. — С. 1.

272. GRB 210610B: University of Siena Observatory optical photometry of the afterglow / A. Marchini [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30198. — С. 1.
273. GRB 210610B: Spectroscopy and redshift confirmation with the Himalayan Chandra Telescope / A. Dutta [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30201. — С. 1.
274. *Zheng, W.* GRB 210610B: KAIT Optical Detection / W. Zheng, A. V. Filippenko, KAIT GRB Team // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30204. — С. 1.
275. *Vreeswijk, P. M.* GRB 210610B: optical afterglow observations / P. M. Vreeswijk, E. Broens // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30205. — С. 1.
276. GRB 210610B: Zwicky Transient Facility afterglow detection / D. A. Perley [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30206. — С. 1.
277. GRB 210610A: CAHA 2.2m observations and light-curve behavior / D. A. Kann [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30211. — С. 1.
278. *Perley, D. A.* GRB 210610B: Liverpool Telescope optical photometry / D. A. Perley // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30216. — С. 1.
279. GRB 210610B: MITSuME Akeno optical observation / R. Noto [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30220. — С. 1.
280. *Anandagoda, S.* GRB210610B: SARA-KP 0.9m Optical Afterglow Detection / S. Anandagoda, K. Pellegrin, D. Hartmann // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30221. — С. 1.
281. GRB 210610B: optical photometry of afterglow at INASAN/Simeiz / M. Ibrahimov [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30226. — С. 1.
282. *Zheng, W.* GRB 210610B: Continued KAIT Optical Detection / W. Zheng, A. V. Filippenko, KAIT GRB Team // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30227. — С. 1.

283. *Romanov, F. D.* GRB 210610B: optical observations from Burke-Gaffney Observatory and Abbey Ridge Observatory / F. D. Romanov, D. J. Lane // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30228. — С. 1.
284. *Nissinen, M.* GRB 210610B: iTelescope optical afterglow observations / M. Nissinen, A. Oksanen // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30231. — С. 1.
285. GRB 210610B: REM optical/NIR observations of the afterglow / P. D’Avanzo [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30238. — С. 1.
286. GRB 210610B: Swift/UVOT Detection / M. H. Siegel [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30247. — С. 1.
287. *Marchais, D.* GRB 210610B: T-CAT optical observations / D. Marchais // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30316. — С. 1.
288. *Smith, I. A.* GRB 210610B: JCMT SCUBA-2 sub-mm observations / I. A. Smith, D. A. Perley, N. R. Tanvir // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮЛЬ. — Т. 30360. — С. 1.
289. GRB 210610B: Assy optical observations / V. Kim [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — АВГ. — Т. 30614. — С. 1.
290. GRB 210610B: CrAO/ZTSh optical observations / V. Romyantsev [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30175. — С. 1.
291. GRB 210610B: CrAO/ZTSh optical afterglow photometry / V. Romyantsev [и др.] // GRB Coordinates Network. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 30178. — С. 1.
292. Varying linear polarisation in the dust-free gamma-ray burst 210610B / J. F. Agüi Fernández [и др.] // *A&A*. — 2024. — ОКТ. — Т. 690. — A216. — arXiv: 2403.02312 [astro-ph.HE].
293. *Cardelli, J. A.* The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction / J. A. Cardelli, G. C. Clayton, J. S. Mathis // *ApJ*. — 1989. — ОКТ. — Т. 345. — С. 245.
294. *Barbary, K.* extinction: Dust extinction laws / K. Barbary. — 02.2021. — ascl: 2102.026. — Astrophysics Source Code Library, record ascl:2102.026.
295. Gamma-ray bursts afterglows with energy injection from a spinning down neutron star / S. Dall’Osso [и др.] // *A&A*. — 2011. — ФЕВР. — Т. 526. — A121. — arXiv: 1004.2788 [astro-ph.HE].

296. *Lü, H.-J.* A Test of the Millisecond Magnetar Central Engine Model of Gamma-Ray Bursts with Swift Data / H.-J. Lü, B. Zhang // *ApJ*. — 2014. — Апр. — Т. 785, № 1. — С. 74. — arXiv: 1401.1562 [astro-ph.HE].
297. GRB 210610B: The Internal and External Plateau as Evidence for the Delayed Outflow of Magnetar / Y.-N. Wei [и др.] // *Research in Astronomy and Astrophysics*. — 2024. — Июль. — Т. 24, № 7. — С. 075013.
298. GRB 200829A: TSHAO optical observations / A. Pozanenko [и др.] // *GRB Coordinates Network*. — 2020. — Авг. — Т. 28308. — С. 1.
299. *Moskvitin, A. S.* GRB 200829A: SAO RAS optical observations / A. S. Moskvitin, V. N. Aitov, GRB follow-up Team // *GRB Coordinates Network*. — 2020. — Авг. — Т. 28322. — С. 1.
300. *Moskvitin, A. S.* GRB 200829A: further SAO RAS optical observations / A. S. Moskvitin, V. N. Aitov, GRB follow-up Team // *GRB Coordinates Network*. — 2020. — Авг. — Т. 28328. — С. 1.
301. Databases of Gamma-Ray Bursts' Optical Observations / A. Volnova [и др.] // *Data Analytics and Management in Data Intensive Domains* / под ред. А. Sychev, S. Makhortov, B. Thalheim. — Cham : Springer International Publishing, 2021. — С. 148—159.

Список рисунков

1	Сравнение полной энергии гамма-всплесков с другими астрофизическими объектами.	7
2	Бимодальное распределение гамма-всплесков по длительности. Рисунок взят из работы [28].	8
3	Изотропное распределение гамма-всплесков по небу. Рисунок взят из работы [29].	9
1.1	Формирование джета в сценарии аккреции на ЧД. Джет формируется с помощью механизма BZ. Рисунок взят из работы [64].	21
1.2	Геометрия звездного ветра от протомангнетара. Здесь, радиус нейтронной звезды $R_{NS} \approx 12$ км. μ – ось магнитного дипольного момента, χ – угол между осью вращения и магнитной осью, а Ω – угловая скорость вращения. Рисунок взят из работы [68].	22
1.3	Диаграммы классификации гамма-всплесков.	25
1.4	Профили энергии моделей структурированных джетов. По вертикали – изотропная энергия в условных единицах, а по горизонтальной – угол, отложенный от оси джета. Сплошной серой линией показана Гауссова модель, а серой штрих-пунктирной линией – степенная модель. Рисунок взят из работы [82].	28
1.5	Модельные кривые блеска послесвечения гамма-всплеска для частоты излучения $\nu_o = 10^{14}$ Гц при разных углах раствора джета θ_c для разных отношений угла наблюдения к углу θ_{obs}/θ_c , указанных в легенде в правом верхнем углу. В качестве модели использована модель Гауссовского структурированного джета со следующими параметрами: $\theta_{obs} = 19^\circ.4$, $E_o = 4.8 \times 10^{53}$ эрг, $\theta_w = 4.9\theta_c$, $n_0 = 2.4 \times 10^{-3}$ см $^{-3}$, $p = 2.13$, $\epsilon_e = 0.019$, $\epsilon_B = 0.00575$, $\xi = 1.0$, $d_L = 40$ Мпк, $z = 0.0973$. Рисунок взят из работы [82].	30
1.6	Многоволновая кривая блеска GRB 170817A, аппроксимированная моделью Гауссовского структурированного джета и дополнительной рентгеновской компонентой на поздних временах (> 300 сут после триггера). Точками показаны измерения для соответствующих частот излучения. Рисунок взят из работы [83].	31

1.7	Три возможных морфологических типа кривых блеска по результатам моделирования в зависимости от соотношения между углом наблюдения θ_{obs} и углами раствора джета θ_c , θ_w , указанным на легенде в правом верхнем углу на каждой из панелей. Рисунок взят из работы [82].	31
1.8	Спектры синхротронного излучения. На верхней панели режим быстрого охлаждения, а на нижней панели режим нижнего охлаждения. Рисунок взят из работы [87].	33
1.9	Каноническая кривая блеска гамма-всплеска.	35
1.10	Кривые блеска нескольких гамма-всплесков в гамма-диапазоне по данным SPI-ACS/INTEGRAL [28]. Рисунок взят из работы [89]. . . .	36
1.11	Кривая блеска GRB 080319B по данным KONUS-WIND (черная кривая) в диапазоне 18 – 1160 кэВ и оптическим наблюдениям TORTORA (красные точки) и PI OF THE SKY (синие точки). Рисунок взят из работы [95].	37
1.12	Сверху вниз – спектры сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками: SN 2010bh, SN 2013ez, SN 199bw, SN 2006aj и SN 1997ef, полученные на примерное одинаковую эпоху. Рисунок взят из работы [107].	41
1.13	Трехцветная кривая блеска SN 2006aj/XRF 060218. Видно, что максимум в самом синем фильтре наступает быстрее, чем в более красных. Рисунок взят из работы [108].	42
1.14	Оптические/ИК кривые блеска AT2017gfo.	44
2.1	Схематиченое представление наблюдательных тактик: а) мозаичный обзор, б) целевые наблюдения, с) комбинированные наблюдения. Во горизонтальной оси отложено прямое восхождение α в часасх, а по вертикальной оси – склонение (δ) в град. Квазиэллиптическим контуром указана область локализации. Цветом обозначена плотность вероятности: чем краснее цвет, тем выше плотность. Фиолетовыми квадратами на панелях а) и с) указаны площадки неба на которые наводится широкоугольный телескоп. Синими эллипсами на панелях б) и с) указаны галактики GLADE+.	50
2.2	Монолитная архитектура приложения AWARE.	55

- 2.3 График видимости для события Swift BAT 1167288 (GRB 230506C), рассчитанный для телескопа AS-32 Абастуманской астрофизической обсерватории (АбАО). Синяя сплошная линия показывает воздушную массу цели, чёрная штриховая — положение Луны, а синие штрих-пунктирные линии обозначают границы наблюдательного окна. Левая и правая вертикальные оси соответствуют воздушной массе и соответствующей высоте на горизонтом (в градусах), соответственно. Горизонтальная ось — всемирное координированное время (UTC). 59
- 2.4 Схема работы машины состояний при вызове команды /sub. Состояния обозначены прямоугольниками с клавишами. Синие стрелки, указывающие направо, обозначают прямой переход (от начального состояния к конечному). Серые стрелки, указывающие налево, обозначают обратный переход (например, пользователь хочет перевыбрать список типов алертных сообщений). Данная диаграмма отрисована с помощью пакета `aiogram_dialog`. 66
- 2.5 График видимости источника EP240801a для телескопа ЗТШ/КрАО на эпоху 2024-08-01. 68
- 2.6 Поисковое изображение источника EP240801a. По горизонтальной оси отложено прямое восхождение в часах, а по вертикальной — склонение в градусах. Координаты источника показаны красным крестиком. Примеры графиков рассылаемых Telegram-ботом. 69
- 2.7 Структура директорий, создаваемая приложением AWARE. Данные по планированию размещаются в отдельных подкаталогах внутри каталога `products`. Подкаталог содержит отдельную папку с наблюдательными данными для каждого использованного телескопа. Загруженные HEALPix карты областей локализации хранятся в каталоге `cache`. 70
- 2.8 Структура таблиц реляционной базы данных для приложения AWARE. В левой части рисунка представлена схема таблицы `alert`, предназначенная для хранения информации из алертных сообщений. В правой части рисунка представлена схема таблицы `settings` в которой хранятся настройки подписки для пользователей Telegram бота. 71

3.1	Архитектура системы автоматической обработки астрономических изображений STARFALL.	76
3.2	Диаграмма обработки серии изображений <code>process_image</code> DAG. Описание представлено в тексте главы.	78
3.3	Темновое изображение. Время экспозиции $t = 90$ с, $T = -20^{\circ}\text{C}$. Взято из работы Панков, 2021.	80
3.4	Калибровка на темновое изображение. а) Фрагмент исходного изображения. Маленькие яркие точки – следы темнового шума. б) Изображение после калибровки. Взято из работы Панков, 2021. . . .	80
3.5	Изображение плоского поля. Неоднородность чувствительности по полю изображения и виньетирование по углам хорошо видны. Темные кольца – несфокусированные пылинки на зеркале телескопа. Взято из работы Панков, 2021.	81
3.6	Калибровка на плоское поле. а) Исходное изображение, б) после калибровки. Неравномерности в освещенности изображения, в том числе и виньетирование в углах, скорректированы. Взято из работы Панков, 2021.	82
3.7	Фон неба на изображении. (а) Сильная облачность; (б) полная Луна; (с) Ясная ночь без Луны. Объекты видны только на изображении (с). Взято из работы Панков, 2021.	83
3.8	Следы от КЛ. а) Искусственное астрономическое изображение, содержащее источники и следы от КЛ; б) изображение, очищенное от следов КЛ с помощью алгоритма L.A.COSMIC [176].	84
3.9	Блок-схема апертурной фотометрии.	87

- 3.10 Обнаружение оптического послесвечения GRB 231117A с помощью конвейера оптимального вычитания изображений `apex_subtract`. Слева представлено шаблонное изображение, снятое 03.12.2023 в 20:13 UT. Центральное изображение — это свертка научного изображения, полученного 19.11.2023 в 20:42 UT. Общая экспозиция составила 24×300 с для шаблона и 18×300 с для научного изображения. Оба изображения получены в фильтре R на 1.5 м телескопе АЗТ-22 Майданакской обсерватории (МАО). Оптическое послесвечение (отмечено красным перекрестием) отчетливо выделяется на разностном изображении после вычитания фона родительской галактики SDSS J220933.34 + 133119.5. Блеск оптического послесвечения составил $m_R = 21^{\text{m}}.50 \pm 0.17$ 94
- 4.1 Отношение газа к пыли в родительской галактике GRB 230328B (красная звезда; для закона поглощения Млечного Пути) в сравнении с выборкой [200]. Синие точки обозначают измеренные значения, а красные треугольники — верхние или нижние пределы. Зеленая линия соответствует отношению газа к пыли для Местной группы галактик ($N_H/A_V \sim 1.6 \times 10^{21} \text{ см}^{-2} \text{ з.в.}^{-1}$). 101
- 4.2 Разностное изображение области локализации всплеска GRB 231115A, полученное после вычитания изображения-шаблона галактики М 82 в спокойном состоянии (данные телескопа АС-32 от 8 декабря 2023 г., когда предполагаемый оптический компонент уже затух). Зелеными ромбами обозначена область локализации всплеска в рентгеновском диапазоне, белыми кружками — позиции двух ранее заявленных оптических кандидатов (см. текст). Белые тонкие изофоты показывают контуры галактики М 82 на исходном снимке, голубые контуры — остаточный сигнал после процедуры вычитания. 105

- 4.3 Сравнение оптических наблюдений GRB 231115A с кривыми блеска других коротких гамма-всплесков, перенесенных на расстояние $D_L = 3.5$ Мпк. Красными незаполненными треугольниками обозначены верхние пределы на оптический поток по данным из табл. ???. Черные квадраты – фотометрия коротких гамма-всплесков с измеренным красным смещением из работы [224]. Синие кружки – кривая блеска килоновой GRB 170817A в фильтрах r и i , соответственно [225]. 106
- 4.4 Локализация рентгеновского компонента EP240801a по данным FXT/EP (синий кружок) и его оптического компаньона (белый кружок), нанесенные на изображение, снятое телескопом NOT. Рисунок взят из работы [3]. 110
- 4.5 Кривые блеска EP240801a. 111
- 5.1 Изображение поля GRB 200829A (объект выделен красным кружком), полученное Zeiss-1000/ТШАО/через ~ 1 ч после триггера BAT. Объекты из каталога USNO-B1.0 отмечены желтыми кружками с соответствующими идентификаторами. На рисунке север – вверх, восток – влево. 114
- 5.2 Многоцветная оптическая кривая блеска GRB 200829A. По горизонтальной оси отложено время после триггера GBM (сут), по вертикальной – видимая звездная величина. Символы соответствуют фотометрическим измерениям в различных фильтрах. Штриховая линия обозначает уровень яркости родительской галактики. Незакрашенные символы представляют верхние пределы (3σ). 117
- 5.3 Верхняя панель: рентгеновская кривая блеска GRB 200829A. По горизонтальной оси – время после триггера GBM (сут), по вертикальной – наблюдаемая плотность потока (Ян). Экспериментальные значения обозначены кружками, аппроксимирующая зависимость – жирной сплошной линией. Нижняя панель: отклонение экспериментальных данных от модели в единицах σ 118

- 5.4 Верхняя панель: совместная кривая блеска GRB 200829A. Горизонтальная ось – время после триггера GBM $t - T_0$ (сут), вертикальная – спектральная плотность потока (Ян). Оптические данные (красные кружки) объединены в монохроматическую кривую. Рентгеновская кривая (фиолетовые треугольники) совмещена с данными в гамма-диапазоне (синие квадраты) в предположении ахроматизма. Незакрашенные символы – верхние пределы. Сплошные линии – модельные кривые. Нижняя панель: эволюция отношения оптического и рентгеновского потоков. 119
- 5.5 Спектр GRB 200829A в интервале 1554–1638 с относительно T_0 . По горизонтальной оси – частота излучения (Гц), по вертикальной – плотность энергетического потока (Ян). Модель представлена черными кружками. 122
- 5.6 Фрагмент изображения поля GRB 200829A в фильтре R , полученное телескопом БТА САО РАН. На месте транзиента виден диффузный объект – родительская галактика (кружок в центре). . 125
- 5.7 Зависимость N_H от A_V . Синие квадраты – данные по родительским галактикам гамма-всплесков [200]. Зеленая линия – линейный закон $\log(y) = 1.6 \log(x)$, характерный для Местной группы галактик. Красная звезда – значение N_H/A_V для родительской галактики GRB 200829A. 127
- 5.8 Профиль вспышки на рентгеновской кривой блеска GRB 200829A (за вычетом модели послесвечения). По вертикальной оси – спектральная плотность потока (мЯн), по горизонтальной – время относительно T_0 (с). Синяя сплошная линия – модель, фиолетовые квадраты – данные. Данные по мощному импульсу активной фазы исключены. 130
- 6.1 Цветной фрагмент изображения поля GRB 210610B, полученный путем сложения трех изображений, снятых телескопом ЗТШ в фильтрах BVR (время съемки примерно соответствует началу фазы плато). 135

- 6.2 Верхняя панель: многоцветная оптическая кривая блеска GRB 210610B. По горизонтальной оси время после триггера Swift/BAT $t - T_0$ (сут). По вертикальной оси слева наблюдаемая плотность потока, а справа соответствующая ей звездная величина. Фотометрические измерения обозначены разной комбинацией из цвета и тип символа в зависимости от фильтра в котором получены измерения (см. легенду в правом верхнем углу). Цветными горизонтальными штриховыми линиями показаны уровни блеска родительской галактики в соответствующих фильтрах. Для удобного визуального анализа кривые блеска разнесены относительно их номинального значения путем соответствующего сдвига, указанного в легенде. 139
- 6.3 Верхняя панель: многоволновая кривая блеска GRB 210610B. По горизонтальной оси время после триггера Swift/BAT $t - T_0$ (сут). По вертикальной оси плотность потока, скорректированная за поглощение в Галактике и родительской галактике всплеска, а также на уровень яркости родительской галактики (кроме рентгеновских измерений *Swift/XRT*). Фотометрические измерения обозначены разной комбинацией из цвета и тип символа в зависимости от фильтра в котором получены измерения (см. легенду в правом верхнем углу). Цветными сплошными линиями показаны модельные кривые для соответствующих фильтров. Широкими цветными линиями обозначены области определения модельной функции на уровне статистической значимости 3σ . На нижней панели отложены показатели цвета (см. легенду в левом верхнем углу). Для удобного визуального анализа кривые блеска и кривые показателей цвета разнесены относительно их номинального значения путем соответствующего множителя, указанного в легенде. 141
- 6.4 Зависимость логарифма темпа звездообразования от логарифма массы родительской галактики длинного гамма-всплеска. Синими кружками отмечены значения из работы Шнайдера и др., 2022. При этом выколотые кружки обозначают нижний предел, а закрашенные – сами значения. Красной звездой отмечено значение для родительской галактики GRB 210610B (масса и темп звездообразования взяты из работы [292]). 146

- 6.5 Зависимость параметров дипольное магнитное поле (B) – период вращения (P) для магнитаров, которые могли бы обеспечивать плато в послесвечении различных гамма-всплесков. Обозначения символов приведены в легенде над рисунком. Возможные параметры магнитного поля и периода для GRB 210610B находятся ниже заштрихованной области. 149

Список таблиц

1	Структура JSON-файла реестра планов наблюдений сети телескопов	64
2	Полный список команд Telegram-бота.	67
3	Кандидаты в оптическое послесвечение гамма-всплесков, независимо найденные в наблюдениях телескопами сети <i>IKI-GRB-FuN</i>	73
4	Результаты аппроксимации многоволнового спектра послесвечения в интервале $10^3 - 10^4$ с после триггера. Значения поглощения в Млечном Пути $E_{B-V} = 0.069$ mag, $R_V = 3.08$ и $N_H = 0.0507 \times 10^{22}$ cm^{-2} , а также красное смещение родительской галактики $z = 1.54$ были зафиксированы.	100
5	Телескопы GRB-IKI-FuN, использованные в наблюдениях GRB 231115A.	103
6	Основные параметры телескопов сети IKI-GRB-FuN, задействованных в наблюдениях поля grb200829a.	115
7	Результаты аппроксимации послесвечения GRB 200829A суммой двух степенных законов с изломом. Параметр гладкости излома был фиксирован во время аппроксимации $n = 1$	121
8	Результаты аппроксимации многоволнового спектра раннего послесвечения. Параметры $E(B - V)$, $R(V)$, $A(V)$ и N_H приведены для родительской галактики. Параметры Галактических компонент поглощения были фиксированы: $E(B - V) = 0.0364$, $R(V) = 3.08$, $A(V) = 0.20$, $N_H = 0.039 \times 10^{-22} \text{ cm}^{-2}$. Символом «*» обозначены фиксированные значения.	123
9	Основные параметры телескопов сети, задействованных в собственных наблюдениях поля GRB 210610B.	136
10	Характеристики оптических фильтров.	136

- 11 Опорные звезды, использованные для фотометрической калибровки. Первые два столбца – координаты (на эпоху J2000), а остальные – звездные величины. Блеск в фильтрах *BVRI* представлен в фотометрической системе Вега, в то время как блеск в фильтрах *griz* выражен в системе AB. Значения звездных величин в фильтрах *BRI* взяты из каталога USNO-B1.0, а для фильтра *V* выбран каталог NOMAD. Блеск в фильтрах *griz* получен из каталога PanSTARRS-DR1. 138
- 12 Результаты аппроксимации многоволновой кривой блеска GRB 210610B аналитической двухкомпонентной моделью. Символом «*» отмечены зафиксированные параметры. 142
- 13 Результаты моделирования кривых показателей цвета оптического послесвечения линейным законом. Здесь α – коэффициент наклона, а A – нормировка. 144
- 14 Результаты аппроксимации оптического спектра плато. 148
- 15 Журнал результатов оптических наблюдений GRB 231115A, проведенных на телескопах IKI-GRB-FuN. Звездные величины приведены в фотометрической системе AB для фильтров *r, L* и в системе Vega для остальных. Значения приведены без учета межгалактического поглощения. 202
- 16 Журнал результатов оптических наблюдений, проведенных на телескопах IKI-GRB-FuN. Звездные величины приведены в фотометрической системе AB без учета поглощения за Галактику и родительскую галактику гамма-всплеска. 203
- 17 Журнал результатов оптических наблюдений оптического послесвечения GRB 240225B, проведенных на телескопе АЗТ-33ИК наблюдательной сети IKI-GRB-FuN. Звездные величины приведены в фотометрической системе AB без учета поглощения за Галактику и родительскую галактику гамма-всплеска. 205

- 18 Журнал результатов оптических наблюдений GRB 200829A. Звездные величины в фильтрах UVOT Swift u , b , v , $uvw1$, $uvw2$, $white$, $Clear$, R и I приведены в фотометрической системе Vega, в фильтрах g , r , i и z в фотометрической системе AB. Значения приведены без учёта поглощения за Галактику и родительскую галактику GRB 200829A. 206
- 19 Журнал результатов оптических наблюдений. Звездные величины в фильтрах $ugriz$ приведены в фотометрической системе AB, а в остальных фильтрах – в системе Вега. Значения приведены без учета поглощения за Галактику и родительскую галактику всплеска. 211

Приложение А

Алгоритм поиска кандидатов в транзиенты

```

1:  $R \leftarrow 3.0 \text{ arcsec}$ 
2: Catalogs  $\leftarrow$  CNS5, NSVS, MPC, USNO-B1.0, PS1, GLADE+
3:                                      $\triangleright$  Reject sources by following criteria
4: if (is a cosmic ray) or  $(P_{star} + P_{gal} > 0.8)$  or  $(a/b > 1.8)$  then
5:   Reject
6: end if
7:
8: Catalog cross-match with radius  $R$ 
9: if source  $\in$  {CNS5, NSVS, MPC} then
10:   Reject
11: end if
12: Transform catalog magnitudes according to the image filter
13: Classify catalog sources
14: if (is point-like) and  $(g - r \geq 0$  or  $B2 - R2 \geq 0.5)$  and  $(\Sigma \geq 2.5)$  then
15:   class = RSF  $\triangleright$  Red stellar flare
16: else if (is point-like) and  $(g - r \geq 0$  or  $B2 - R2 \geq 0.5)$  and  $(\Sigma < 2.5)$  then
17:   class = RS  $\triangleright$  Red star
18: else if (is point-like) and  $(g - r < 0$  or  $B2 - R2 < 0.5)$  and  $(\Sigma \geq 2.5)$  then
19:   class = BSF  $\triangleright$  Blue stellar flare
20: else if (is point-like) and  $(g - r < 0$  or  $B2 - R2 < 0.5)$  and  $(\Sigma < 2.5)$  then
21:   class = BS  $\triangleright$  Blue star
22: else if (is diffuse) and  $(g - r > 0$  or  $B2 - R2 > 0.5)$  and  $(\Sigma > 2.5)$  then
23:   class = RGB  $\triangleright$  red galactic burst
24: else if (is diffuse) and  $(g - r > 0$  or  $B2 - R2 > 0.5)$  and  $(\Sigma < 2.5)$  then
25:   class = RG  $\triangleright$  red galaxy
26: else if (is diffuse) and  $(g - r < 0$  or  $B2 - R2 < 0.5)$  and  $(\Sigma > 2.5)$  then
27:   class = BGB  $\triangleright$  blue galactic burst
28: else if (is diffuse) and  $(g - r < 0$  or  $B2 - R2 < 0.5)$  and  $(\Sigma < 2.5)$  then
29:   class = BG  $\triangleright$  blue galaxy
30: else
31:   class = ?  $\triangleright$  unknown class
32: end if
33:
34: Select candidates
35: candidates  $\leftarrow$  []
36: if source  $\notin$  {USNO-B1.0, PS1, GLADE+}. then
37:   candidates.append(source)  $\triangleright$  Unidentified source
38: end if
39:
40: if source  $\in$  {USNO-B1.0, PS1, GLADE+} and  $(g - r \geq 0$  or  $B2 - R2 \geq 0.5)$  and  $(\Sigma \geq 2.5)$  then
41:   candidates.append(source)  $\triangleright$  Source that has brightness excess in comparison with catalog
42: end if
43:
44: Remove candidates outside localization region (e.g. 90% contour)
45: if source  $\notin$  localization contour then
46:   candidates.remove(source)
47: end if
48:
49: Apply scoring
50: scores  $\leftarrow$  [0, 0, ..., 0]
51: for  $i = 1, \dots, \text{candidates.length}$  do
52:   if source  $\notin$  {USNO-B1.0, PS1, GLADE+} then
53:     scores[i] += 1
54:   end if
55:   if source  $\in$  {USNO-B1.0, PS1, GLADE+} then
56:     scores[i] +=  $\Sigma$ 
57:   end if
58:   if source  $\in$  GLADE+ then
59:     scores[i] +=  $\sigma_{GW}/(|D - D_{GW}|)$ 
60:   end if
61:   scores[i] +=  $p(r_{a_{source}}, d_{c_{source}})$ 
62: end for
63:
64: Sort sources by score in descending order

```

Приложение Б

Журнал оптических наблюдений GRB 231115A

Таблица 15 — Журнал результатов оптических наблюдений GRB 231115A, проведенных на телескопах IKI-GRB-FuN. Звездные величины приведены в фотометрической системе AB для фильтров r, L и в системе Vega для остальных. Значения приведены без учета межгалактического поглощения.

$t - T_0^1$ сут	ΔT^2 с	Предел зв. вел. ³	f_ν мкЯн ⁴	Фильтр	Обсерватория	Телескоп	GCN №
-1.155810	-	20.47	23.6	r	ZTF	Palomar 1.2m	35048
-0.452917	12x60	20.1	27.9	L ⁵	GOTO	-	35050
0.054688	180	18.8	92.5	clear ⁶	МАСТЕР	Tunka	35046
0.075023	600	19.5	48.6	Rc	MITSuME	Akeno 0.5m	35057
0.087118	1200	19.8	36.8	Rc	MITSuME	Akeno 0.5m	35057
0.111250	2400	20.2	25.5	Rc	MITSuME	Akeno 0.5m	35057
0.144980	7380	19.9	33.6	Rc	MITSuME	Okayama 0.5m	35057
0.149271	19x30+123x60	18.6	111	clear	ISON-Kitab	RC-36	-
0.418507	7200	22.0	5.75	r	WO	Fraunhofer 2m	35092
0.500000	-	22.0	5.75	r	ORM	TNG	35077
0.447095	89x60	19.3	58.4	R	A6AO	AC-32	-
0.500000	2x195	21.6	8.32	r	Liverpool	2m	35067

¹ – время начала экспозиции относительно триггера GBM/Fermi

² – длительность экспозиции

³ – верхний предел на уровне 3 стандартных отклонения

⁴ – верхний предел на спектральную плотность потока на уровне 3 стандартных отклонений

⁵ – нейтральный фильтр (4000 - 7000 Å)

⁶ – чистый свет (без фильтра)

Приложение В

Журнал оптических наблюдений EP240801a

Таблица 16 — Журнал результатов оптических наблюдений, проведенных на телескопах IKI-GRB-FuN. Звездные величины приведены в фотометрической системе АВ без учета поглощения за Галактику и родительскую галактику гамма-всплеска.

$t - T_0$, сут	Фильтр	Зв. величина	Телескоп/обсерватория	Источник
0.4649	R	21.33 ± 0.04	АЗТ-22/МАО	This work
0.4928	R	> 21.00	АС-32/А6АО	This work
0.5058	R	21.25 ± 0.02	ЗТШ/КрАО РАН	This work
0.5276	R	21.39 ± 0.02	ЗТШ/КрАО РАН	This work
0.5852	R	21.45 ± 0.02	ЗТШ/КрАО РАН	This work
0.6071	R	21.46 ± 0.02	ЗТШ/КрАО РАН	This work
0.6289	R	21.46 ± 0.02	ЗТШ/КрАО РАН	This work
0.6383	R	21.50 ± 0.10	Zeiss-1000/САО РАН	This work
0.6563	R	21.56 ± 0.02	ЗТШ/КрАО РАН	This work
1.4935	R	22.26 ± 0.08	ЗТШ/КрАО РАН	This work
1.5038	R	22.20 ± 0.15	Zeiss-1000/САО РАН	This work
1.5155	R	22.12 ± 0.07	ЗТШ/КрАО РАН	This work
1.5374	R	22.09 ± 0.07	ЗТШ/КрАО РАН	This work
1.5620	R	22.18 ± 0.08	ЗТШ/КрАО РАН	This work
2.4565	R	22.51 ± 0.12	ЗТШ/КрАО РАН	This work
2.4937	R	22.72 ± 0.1	АЗТ-22/МАО	This work
2.6284	B	23.90 ± 0.08	БТА/САО РАН	This work
2.6287	I	22.15 ± 0.07	БТА/САО РАН	This work
2.6287	R	22.80 ± 0.05	БТА/САО РАН	This work
2.6290	V	23.08 ± 0.06	БТА/САО РАН	This work
3.3733	r	23.17 ± 0.11	АЗТ-20/АТО	This work
3.4843	V	23.36 ± 0.07	БТА/САО РАН	This work
3.4852	R	22.99 ± 0.04	БТА/САО РАН	This work
4.5923	R	23.11 ± 0.05	БТА/САО РАН	This work
4.5924	I	23.09 ± 0.15	БТА/САО РАН	This work
4.5925	B	24.21 ± 0.10	БТА/САО РАН	This work
4.5925	V	23.59 ± 0.10	БТА/САО РАН	This work
6.4371	r	23.62 ± 0.21	АЗТ-20/АТО	This work
6.4555	R	23.35 ± 0.22	АЗТ-22/МАО	This work

Продолжение на след. стр.

Таблица 16 — Продолжение таблицы 16.

$t - T_0$, сут	Фильтр	Зв. величина	Телескоп/обсерватория	Источник
7.4579	r	23.69 ± 0.17	A3T-20/АТО	This work
7.6233	J	> 21.80	SAI-25	This work
7.7625	R	> 24.03	A3T-22/МАО	This work

Приложение Г

Журнал наблюдений оптического послесвечения GRB 240225B

Таблица 17 — Журнал результатов оптических наблюдений оптического послесвечения GRB 240225B, проведенных на телескопе АЗТ-ЗЗИК наблюдательной сети IKI-GRB-FuN. Звездные величины приведены в фотометрической системе АВ без учета поглощения за Галактику и родительскую галактику гамма-всплеска.

$t - T_0$ сут.	Экспозиция с	Фильтр	Блеск з.в.	Телескоп/обсерватория
1.71921	60×60	<i>R</i>	19.93 ± 0.07	АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН
2.84142	60×60	<i>R</i>	20.64 ± 0.11	АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН
4.70942	60×60	<i>R</i>	21.73 ± 0.19	АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН
5.71367	60×60	<i>R</i>	21.92 ± 0.24	АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН
9.82292	90×60	<i>R</i>	>23.02	АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН
10.79525	114×60	<i>R</i>	>23.92	АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН
11.83058	116×60	<i>R</i>	>23.82	АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН
12.83896	120×60	<i>R</i>	>23.82	АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН
15.81058	150×60	<i>R</i>	>23.72	АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН
18.75446	142×60	<i>R</i>	>23.31	АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН
19.84883	150×60	<i>R</i>	>23.39	АЗТ-ЗЗИК/ССО СО РАН

Приложение Д

Журнал результатов оптических наблюдений GRB 200829A

Таблица 18 — Журнал результатов оптических наблюдений GRB 200829A. Звездные величины в фильтрах UVOT Swift u , b , v , $uvw1$, $uvw2$, $white$, $Clear$, R и I приведены в фотометрической системе Vega, в фильтрах g , r , i и z в фотометрической системе AB. Значения приведены без учёта поглощения за Галактику и родительскую галактику GRB 200829A.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в	Поток мЯн	Обсерватория/Телескоп	Фильтр	GCN №
0.002361	13.88 ± 0.08	$10.213^{+0.777}_{-0.777}$	Swift/UVOT	v	-
0.003391	14.33 ± 0.07	$3.566^{+0.689}_{-0.689}$	Swift/UVOT	white	-
0.005810	14.55 ± 0.05	$2.189^{+0.104}_{-0.104}$	Swift/UVOT	u	-
0.007431	15.82 ± 0.08	$1.906^{+0.134}_{-0.134}$	Swift/UVOT	b	-
0.007720	15.46 ± 0.08	$1.263^{+0.248}_{-0.248}$	Swift/UVOT	white	-
0.008009	17.04 ± 0.28	$0.113^{+0.029}_{-0.029}$	Swift/UVOT	uvw2	-
0.008299	15.43 ± 0.10	$2.454^{+0.230}_{-0.230}$	Swift/UVOT	v	-
0.008866	15.46 ± 0.14	$0.582^{+0.074}_{-0.074}$	Swift/UVOT	uvw1	-
0.009155	15.08 ± 0.09	$1.339^{+0.103}_{-0.103}$	Swift/UVOT	u	-
0.009444	16.13 ± 0.09	$1.430^{+0.112}_{-0.112}$	Swift/UVOT	b	-
0.009734	15.66 ± 0.08	$1.049^{+0.206}_{-0.206}$	Swift/UVOT	white	-
0.010023	18.37 ± 0.52	$0.033^{+0.016}_{-0.016}$	Swift/UVOT	uvw2	-
0.010301	15.89 ± 0.12	$1.599^{+0.182}_{-0.182}$	Swift/UVOT	v	-
0.010880	15.63 ± 0.14	$0.497^{+0.067}_{-0.067}$	Swift/UVOT	uvw1	-
0.011944	16.00 ± 0.07	$0.768^{+0.148}_{-0.148}$	Swift/UVOT	white	-
0.013275	16.20 ± 0.14	$1.205^{+0.157}_{-0.157}$	Swift/UVOT	v	-
0.013843	16.08 ± 0.17	$0.330^{+0.053}_{-0.053}$	Swift/UVOT	uvw1	-
0.014120	15.55 ± 0.10	$0.869^{+0.077}_{-0.077}$	Swift/UVOT	u	-
0.014410	16.39 ± 0.10	$1.131^{+0.097}_{-0.097}$	Swift/UVOT	b	-
0.014688	16.29 ± 0.09	$0.590^{+0.117}_{-0.117}$	Swift/UVOT	white	-
0.015324	16.32 ± 0.20	$1.081^{+0.198}_{-0.198}$	Swift/UVOT	v	-
0.015845	16.13 ± 0.18	$0.316^{+0.051}_{-0.051}$	Swift/UVOT	uvw1	-
0.016123	15.80 ± 0.11	$0.693^{+0.066}_{-0.066}$	Swift/UVOT	u	-
0.016458	16.47 ± 0.12	$1.049^{+0.117}_{-0.117}$	Swift/UVOT	b	-
0.016701	16.26 ± 0.09	$0.602^{+0.119}_{-0.119}$	Swift/UVOT	white	-
0.016991	18.24 ± 0.48	$0.037^{+0.017}_{-0.017}$	Swift/UVOT	uvw2	-
0.017280	16.41 ± 0.16	$0.991^{+0.141}_{-0.141}$	Swift/UVOT	v	-
0.017847	16.84 ± 0.24	$0.163^{+0.036}_{-0.036}$	Swift/UVOT	uvw1	-
0.018148	16.03 ± 0.11	$0.559^{+0.058}_{-0.058}$	Swift/UVOT	u	-
0.018438	16.82 ± 0.11	$0.759^{+0.077}_{-0.077}$	Swift/UVOT	b	-
0.018727	16.42 ± 0.09	$0.519^{+0.103}_{-0.103}$	Swift/UVOT	white	-
0.019306	16.63 ± 0.17	$0.809^{+0.128}_{-0.128}$	Swift/UVOT	v	-
0.019873	16.36 ± 0.19	$0.255^{+0.046}_{-0.046}$	Swift/UVOT	uvw1	-
0.020150	15.99 ± 0.11	$0.582^{+0.060}_{-0.060}$	Swift/UVOT	u	-
0.020440	16.81 ± 0.11	$0.768^{+0.077}_{-0.077}$	Swift/UVOT	b	-
0.035551	16.29 ± 0.13	$0.864^{+0.100}_{-0.113}$	TIIIAO/Zeiss-1000	R	-
0.036296	16.34 ± 0.08	$0.828^{+0.061}_{-0.066}$	TIIIAO/Zeiss-1000	R	-
0.037041	16.25 ± 0.12	$0.898^{+0.092}_{-0.103}$	TIIIAO/Zeiss-1000	R	-

Продолжение на след. стр.

Таблица 18 — Продолжение таблицы 18.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в	Поток мЯн	Обсерватория/Телескоп	Фильтр	GCN №
0.037785	16.37 ± 0.11	$0.805^{+0.076}_{-0.084}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.038524	16.41 ± 0.10	$0.773^{+0.066}_{-0.072}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.039271	16.36 ± 0.08	$0.810^{+0.059}_{-0.064}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.040015	16.37 ± 0.07	$0.802^{+0.053}_{-0.057}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.040756	16.43 ± 0.07	$0.763^{+0.046}_{-0.049}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.041500	16.42 ± 0.05	$0.771^{+0.037}_{-0.039}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.042240	16.45 ± 0.05	$0.747^{+0.034}_{-0.035}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.042984	16.45 ± 0.06	$0.750^{+0.041}_{-0.043}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.043734	16.49 ± 0.08	$0.718^{+0.053}_{-0.057}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.044479	16.48 ± 0.07	$0.724^{+0.046}_{-0.050}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.045224	16.42 ± 0.07	$0.765^{+0.050}_{-0.054}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.045982	16.51 ± 0.06	$0.704^{+0.035}_{-0.037}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.046728	16.52 ± 0.07	$0.699^{+0.045}_{-0.049}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.047472	16.55 ± 0.06	$0.682^{+0.038}_{-0.041}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.048218	16.54 ± 0.08	$0.691^{+0.050}_{-0.054}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.048963	16.58 ± 0.06	$0.662^{+0.038}_{-0.040}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.049708	16.54 ± 0.07	$0.689^{+0.041}_{-0.044}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.050451	16.52 ± 0.05	$0.697^{+0.032}_{-0.034}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.051197	16.51 ± 0.07	$0.706^{+0.043}_{-0.046}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.051941	16.55 ± 0.08	$0.679^{+0.048}_{-0.052}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.052685	16.64 ± 0.08	$0.628^{+0.046}_{-0.050}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.053429	16.66 ± 0.07	$0.618^{+0.037}_{-0.040}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.054173	16.64 ± 0.08	$0.630^{+0.043}_{-0.046}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.054916	16.66 ± 0.08	$0.618^{+0.043}_{-0.047}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.055662	16.64 ± 0.08	$0.624^{+0.046}_{-0.050}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.056408	16.69 ± 0.07	$0.599^{+0.035}_{-0.037}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.057151	16.68 ± 0.06	$0.602^{+0.034}_{-0.036}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.057897	16.67 ± 0.07	$0.610^{+0.040}_{-0.042}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.058641	16.72 ± 0.06	$0.583^{+0.029}_{-0.030}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.059387	16.66 ± 0.08	$0.616^{+0.044}_{-0.048}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.060131	16.71 ± 0.07	$0.588^{+0.034}_{-0.036}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.060873	16.74 ± 0.08	$0.571^{+0.039}_{-0.042}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.061146	17.50 ± 0.08	$0.192^{+0.038}_{-0.038}$	Swift/UVOT	white	-
0.061617	16.75 ± 0.08	$0.566^{+0.039}_{-0.042}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.062361	16.73 ± 0.07	$0.575^{+0.035}_{-0.038}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.063109	16.75 ± 0.08	$0.569^{+0.040}_{-0.043}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.065139	16.76 ± 0.09	$0.560^{+0.046}_{-0.051}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.065887	16.77 ± 0.07	$0.555^{+0.035}_{-0.037}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.066630	16.77 ± 0.07	$0.554^{+0.036}_{-0.038}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.067374	16.82 ± 0.06	$0.531^{+0.027}_{-0.028}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.068041	16.88 ± 0.19	$0.502^{+0.079}_{-0.093}$	Китаб-ИСОН/RC-36	Clear	-
0.068117	16.92 ± 0.08	$0.483^{+0.033}_{-0.035}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.068863	16.78 ± 0.07	$0.551^{+0.034}_{-0.036}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.069605	16.77 ± 0.09	$0.555^{+0.043}_{-0.046}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.070350	16.86 ± 0.07	$0.515^{+0.030}_{-0.032}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.071093	16.86 ± 0.08	$0.512^{+0.035}_{-0.037}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.071839	16.81 ± 0.05	$0.536^{+0.024}_{-0.025}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.072582	16.89 ± 0.09	$0.499^{+0.041}_{-0.045}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.073053	16.79 ± 0.21	$0.548^{+0.098}_{-0.120}$	Китаб-ИСОН/RC-36	Clear	-
0.073328	16.89 ± 0.09	$0.498^{+0.039}_{-0.043}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.074074	16.92 ± 0.08	$0.485^{+0.036}_{-0.039}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.074818	16.87 ± 0.08	$0.508^{+0.036}_{-0.039}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.075561	16.88 ± 0.09	$0.503^{+0.038}_{-0.041}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.076305	16.95 ± 0.09	$0.473^{+0.038}_{-0.041}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-

Продолжение на след. стр.

Таблица 18 — Продолжение таблицы 18.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в	Поток мЯн	Обсерватория/Телескоп	Фильтр	GCN №
0.077049	16.90 ± 0.09	$0.493^{+0.041}_{-0.044}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.077791	16.96 ± 0.09	$0.465^{+0.039}_{-0.042}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.078076	17.11 ± 0.18	$0.407^{+0.061}_{-0.072}$	Китаб-ИСОН/RC-36	Clear	-
0.078532	16.97 ± 0.07	$0.463^{+0.031}_{-0.033}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.079277	16.94 ± 0.07	$0.478^{+0.030}_{-0.032}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.080020	16.93 ± 0.07	$0.481^{+0.032}_{-0.034}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.080766	17.03 ± 0.09	$0.438^{+0.033}_{-0.036}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.081412	17.65 ± 0.08	$0.168^{+0.033}_{-0.033}$	Swift/UVOT	white	-
0.081512	16.95 ± 0.07	$0.470^{+0.031}_{-0.034}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.082256	17.05 ± 0.08	$0.428^{+0.032}_{-0.034}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.083000	17.01 ± 0.08	$0.446^{+0.033}_{-0.035}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.083099	17.27 ± 0.28	$0.350^{+0.079}_{-0.103}$	Китаб-ИСОН/RC-36	Clear	-
0.083745	17.02 ± 0.09	$0.441^{+0.035}_{-0.038}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.084490	17.00 ± 0.10	$0.452^{+0.040}_{-0.044}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.085234	17.06 ± 0.09	$0.425^{+0.033}_{-0.036}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.085977	17.03 ± 0.09	$0.438^{+0.034}_{-0.037}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.086720	16.99 ± 0.09	$0.456^{+0.038}_{-0.041}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.087465	17.00 ± 0.06	$0.449^{+0.024}_{-0.026}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.088110	17.31 ± 0.29	$0.340^{+0.079}_{-0.102}$	Китаб-ИСОН/RC-36	Clear	-
0.088206	17.04 ± 0.07	$0.433^{+0.025}_{-0.027}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.088952	16.97 ± 0.06	$0.463^{+0.025}_{-0.026}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.089692	17.08 ± 0.09	$0.418^{+0.034}_{-0.037}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.090437	17.09 ± 0.08	$0.413^{+0.028}_{-0.030}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.091182	17.05 ± 0.09	$0.431^{+0.033}_{-0.036}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.091927	17.09 ± 0.07	$0.413^{+0.027}_{-0.029}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.092672	17.04 ± 0.09	$0.435^{+0.036}_{-0.039}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.093134	16.81 ± 0.17	$0.535^{+0.076}_{-0.088}$	Китаб-ИСОН/RC-36	Clear	-
0.093926	17.14 ± 0.08	$0.397^{+0.029}_{-0.031}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.094673	17.19 ± 0.10	$0.379^{+0.032}_{-0.036}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.095420	17.19 ± 0.08	$0.377^{+0.028}_{-0.030}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.096163	17.00 ± 0.06	$0.452^{+0.025}_{-0.027}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.098157	16.86 ± 0.17	$0.510^{+0.074}_{-0.087}$	Китаб-ИСОН/RC-36	Clear	-
0.103180	16.82 ± 0.22	$0.532^{+0.098}_{-0.121}$	Китаб-ИСОН/RC-36	Clear	-
0.108203	17.15 ± 0.22	$0.391^{+0.072}_{-0.088}$	Китаб-ИСОН/RC-36	Clear	-
0.113215	17.11 ± 0.23	$0.407^{+0.079}_{-0.097}$	Китаб-ИСОН/RC-36	Clear	-
0.118238	17.39 ± 0.27	$0.314^{+0.068}_{-0.087}$	Китаб-ИСОН/RC-36	Clear	-
0.119339	17.29 ± 0.08	$0.344^{+0.024}_{-0.026}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.120315	17.33 ± 0.07	$0.333^{+0.022}_{-0.023}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.121292	17.26 ± 0.08	$0.356^{+0.025}_{-0.026}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.122265	17.39 ± 0.06	$0.314^{+0.018}_{-0.019}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.123244	17.33 ± 0.07	$0.334^{+0.020}_{-0.022}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.123261	17.17 ± 0.24	$0.385^{+0.077}_{-0.097}$	Китаб-ИСОН/RC-36	Clear	-
0.124219	17.43 ± 0.08	$0.302^{+0.021}_{-0.022}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.125192	17.30 ± 0.08	$0.341^{+0.026}_{-0.028}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.126167	17.44 ± 0.10	$0.301^{+0.026}_{-0.029}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.127143	17.39 ± 0.08	$0.314^{+0.021}_{-0.023}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.128123	17.45 ± 0.08	$0.299^{+0.022}_{-0.024}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.128284	17.16 ± 0.22	$0.389^{+0.071}_{-0.087}$	Китаб-ИСОН/RC-36	Clear	-
0.129104	17.37 ± 0.07	$0.321^{+0.019}_{-0.021}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.130078	17.38 ± 0.09	$0.318^{+0.025}_{-0.027}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.131051	17.46 ± 0.10	$0.294^{+0.026}_{-0.028}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.132032	17.45 ± 0.10	$0.298^{+0.026}_{-0.029}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.133003	17.49 ± 0.09	$0.287^{+0.023}_{-0.025}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.133978	17.34 ± 0.08	$0.328^{+0.025}_{-0.027}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-

Продолжение на след. стр.

Таблица 18 — Продолжение таблицы 18.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в	Поток мЯн	Обсерватория/Телескоп	Фильтр	GCN №
0.134954	17.36 ± 0.10	$0.322^{+0.027}_{-0.030}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.135935	17.40 ± 0.07	$0.312^{+0.019}_{-0.020}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.136912	17.23 ± 0.09	$0.364^{+0.029}_{-0.031}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.137886	17.36 ± 0.09	$0.323^{+0.025}_{-0.028}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.138562	17.31 ± 0.26	$0.340^{+0.073}_{-0.093}$	Китаб-ИСОИ/RC-36	Clear	-
0.141863	17.58 ± 0.09	$0.224^{+0.018}_{-0.019}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	I	-
0.143123	17.72 ± 0.09	$0.250^{+0.035}_{-0.036}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	R	-
0.147173	17.30 ± 0.19	$0.342^{+0.054}_{-0.064}$	Китаб-ИСОИ/RC-36	Clear	-
0.148628	17.45 ± 0.10	$0.296^{+0.027}_{-0.029}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.149606	17.44 ± 0.14	$0.301^{+0.036}_{-0.040}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.150584	17.57 ± 0.12	$0.266^{+0.028}_{-0.031}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.151559	17.36 ± 0.11	$0.324^{+0.030}_{-0.033}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.152531	17.53 ± 0.10	$0.276^{+0.024}_{-0.026}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.153510	17.52 ± 0.11	$0.279^{+0.027}_{-0.029}$	ТШАО/Zeiss-1000	R	-
0.154643	17.72 ± 0.10	$0.249^{+0.036}_{-0.037}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	R	-
0.154643	17.71 ± 0.13	$0.199^{+0.022}_{-0.025}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	I	-
0.158932	17.48 ± 0.22	$0.289^{+0.053}_{-0.066}$	Китаб-ИСОИ/RC-36	Clear	-
0.169696	17.11 ± 0.17	$0.408^{+0.060}_{-0.071}$	Китаб-ИСОИ/RC-36	Clear	-
0.176090	17.65 ± 0.09	$0.210^{+0.017}_{-0.018}$	САО РАН/Zeiss-1000	I	28322
0.177833	18.03 ± 0.11	$0.211^{+0.047}_{-0.048}$	КраО РАН/АЗТ-11	R	-
0.180448	17.57 ± 0.24	$0.266^{+0.053}_{-0.066}$	Китаб-ИСОИ/RC-36	Clear	-
0.182092	17.71 ± 0.10	$0.233^{+0.021}_{-0.023}$	КраО РАН/АЗТ-11	R	-
0.182093	17.91 ± 0.09	$0.231^{+0.047}_{-0.048}$	КраО РАН/АЗТ-11	R	-
0.185933	17.90 ± 0.09	$0.167^{+0.013}_{-0.014}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	I	-
0.186352	17.81 ± 0.10	$0.213^{+0.018}_{-0.020}$	КраО РАН/АЗТ-11	R	-
0.186353	18.01 ± 0.12	$0.214^{+0.048}_{-0.049}$	КраО РАН/АЗТ-11	R	-
0.190413	18.00 ± 0.08	$0.197^{+0.032}_{-0.033}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	R	-
0.190611	17.73 ± 0.10	$0.229^{+0.020}_{-0.022}$	КраО РАН/АЗТ-11	R	-
0.190613	17.99 ± 0.11	$0.218^{+0.048}_{-0.049}$	КраО РАН/АЗТ-11	R	-
0.194870	17.80 ± 0.10	$0.215^{+0.019}_{-0.021}$	КраО РАН/АЗТ-11	R	-
0.194873	18.11 ± 0.13	$0.199^{+0.048}_{-0.049}$	КраО РАН/АЗТ-11	R	-
0.196467	17.68 ± 0.21	$0.241^{+0.042}_{-0.051}$	Китаб-ИСОИ/RC-36	Clear	-
0.215673	18.04 ± 0.10	$0.147^{+0.013}_{-0.014}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	I	-
0.220163	18.16 ± 0.07	$0.171^{+0.031}_{-0.031}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	R	-
0.230043	18.24 ± 0.09	$0.184^{+0.015}_{-0.016}$	Konkoly/RC80	r	-
0.230043	18.49 ± 0.11	$0.146^{+0.014}_{-0.016}$	Konkoly/RC80	i	-
0.245413	18.27 ± 0.09	$0.133^{+0.012}_{-0.013}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	I	-
0.249893	18.24 ± 0.07	$0.162^{+0.031}_{-0.031}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	R	-
0.250093	18.56 ± 0.04	$0.137^{+0.005}_{-0.005}$	Nanshan/NEXT	r	28324
0.267623	18.50 ± 0.05	$0.145^{+0.007}_{-0.007}$	Nanshan/NEXT	i	28324
0.272891	18.91 ± 0.05	$0.099^{+0.004}_{-0.005}$	Liverpool	g	28331
0.275143	18.31 ± 0.08	$0.115^{+0.008}_{-0.009}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	I	-
0.277891	18.55 ± 0.04	$0.138^{+0.005}_{-0.005}$	Liverpool	r	28331
0.279623	18.64 ± 0.06	$0.150^{+0.031}_{-0.031}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	R	-
0.280923	18.89 ± 0.04	$0.101^{+0.004}_{-0.004}$	Nanshan/NEXT	g	28324
0.282891	18.65 ± 0.04	$0.126^{+0.005}_{-0.005}$	Liverpool	i	28331
0.287891	18.57 ± 0.04	$0.136^{+0.005}_{-0.005}$	Liverpool	z	28331
0.304883	18.51 ± 0.11	$0.095^{+0.009}_{-0.010}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	I	-
0.309373	18.44 ± 0.09	$0.137^{+0.031}_{-0.031}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	R	-
0.334613	18.53 ± 0.09	$0.094^{+0.007}_{-0.008}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	I	-
0.339103	18.46 ± 0.09	$0.135^{+0.031}_{-0.031}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	R	-
0.375793	18.85 ± 0.12	$0.099^{+0.031}_{-0.031}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	R	-
0.400093	18.73 ± 0.08	$0.078^{+0.006}_{-0.006}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	I	-
0.452193	18.90 ± 0.08	$0.096^{+0.030}_{-0.030}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	R	-

Продолжение на след. стр.

Таблица 18 — Продолжение таблицы 18.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в	Поток мЯн	Обсерватория/Телескоп	Фильтр	GCN №
0.602836	20.06 ± 0.12	$0.018^{+0.004}_{-0.004}$	Swift/UVOT	white	-
1.062923	> 20.4	> 0.02535	Nanshan/NEXT	r	28330
1.150123	20.37 ± 0.13	$0.020^{+0.002}_{-0.003}$	CAO РАН/Zeiss-1000	R	28322
1.167123	20.14 ± 0.10	$0.021^{+0.002}_{-0.002}$	CAO РАН/Zeiss-1000	I	28322
1.291593	20.14 ± 0.20	$0.021^{+0.004}_{-0.004}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	I	28333
1.293093	20.99 ± 0.25	$0.029^{+0.028}_{-0.028}$	Кошка (ИНАСАН)/Zeiss-1000	R	28333
1.307923	20.99 ± 0.16	$0.015^{+0.002}_{-0.002}$	Nanshan/NEXT	r	28330
1.346603	21.01 ± 0.05	$0.014^{+0.001}_{-0.001}$	NOT	r	-
1.361891	21.17 ± 0.09	$0.012^{+0.001}_{-0.001}$	Liverpool	g	28331
1.365891	21.13 ± 0.10	$0.013^{+0.001}_{-0.001}$	Liverpool	r	28331
1.370891	21.25 ± 0.09	$0.011^{+0.001}_{-0.001}$	Liverpool	i	28331
1.375891	20.50 ± 0.08	$0.023^{+0.002}_{-0.002}$	Liverpool	z	28331
2.194383	21.54 ± 0.40	$0.007^{+0.002}_{-0.003}$	А6АО/АС-32	R	-
2.728877	22.40 ± 0.34	$0.002^{+0.001}_{-0.001}$	Swift/UVOT	white	-
2.802903	22.40 ± 0.08	$0.004^{+0.0005}_{-0.0005}$	NOT	r	-
3.15717	> 20.4	> 0.021	ССО СО РАН/А3Т-33ИК	R	-
5.20315	> 21.5	> 0.008	ССО СО РАН/А3Т-33ИК	R	-
13.070211	> 23.6	> 0.00103	MAO/А3Т-22	R	-
17.077277	> 23.7	> 0.00094	MAO/А3Т-22	R	-
44.561496	> 23.9	> 0.00078	MAO/А3Т-22	R	-
349.653193	> 24.5	> 0.00057	MAO/А3Т-22	R	-
701.205657	25.46 ± 0.35	$0.00020^{+0.00015}_{-0.00028}$	CAO РАН/БТА	R	-
GCN 28308 – [298], GCN 28316 – [234], GCN 28324 – [299],					
GCN 28324 – [235], GCN 28328 – [300], GCN 28330 – [236], GCN 28331 – [237],					
GCN 28333 – [301]					

Приложение Е

Журнал результатов оптических наблюдений GRB 210610B

Таблица 19 — Журнал результатов оптических наблюдений. Звездные величины в фильтрах *ugriz* приведены в фотометрической системе AB, а в остальных фильтрах – в системе Вега. Значения приведены без учета поглощения за Галактику и родительскую галактику всплеска.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в.	Поток мЯн	Телескоп/обсерватория	Фильтр	Источник данных
1.125210	20.43 ± 0.11	0.024 ± 0.003	Liverpool/ORM	<i>u</i>	[278]
0.004965	13.86 ± 0.03	4.164 ± 0.125	UVOT/Swift	U_{Swift}	[286]
0.011649	14.93 ± 0.04	1.554 ± 0.062	UVOT/Swift	U_{Swift}	[286]
0.057234	16.68 ± 0.05	0.310 ± 0.016	UVOT/Swift	U_{Swift}	[286]
0.534450	18.06 ± 0.05	0.087 ± 0.004	UVOT/Swift	U_{Swift}	[286]
1.530052	20.00 ± 0.18	0.015 ± 0.003	UVOT/Swift	U_{Swift}	[286]
4.538449	21.42 ± 0.29	0.004 ± 0.001	UVOT/Swift	U_{Swift}	[286]
0.047734	17.91 ± 0.03	0.277 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.049160	17.97 ± 0.03	0.263 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.051993	18.06 ± 0.03	0.242 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.053408	18.08 ± 0.03	0.237 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.054828	18.06 ± 0.03	0.242 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.056246	18.08 ± 0.03	0.239 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.059082	18.12 ± 0.03	0.229 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.060501	18.16 ± 0.03	0.221 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.061922	18.17 ± 0.03	0.219 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.063469	18.14 ± 0.03	0.225 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.066304	18.21 ± 0.03	0.211 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.067720	18.21 ± 0.03	0.212 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.069136	18.21 ± 0.03	0.212 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.070555	18.20 ± 0.03	0.214 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.073388	18.23 ± 0.03	0.207 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.074806	18.27 ± 0.03	0.200 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.076221	18.25 ± 0.03	0.204 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.077635	18.28 ± 0.03	0.198 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.080463	18.26 ± 0.03	0.202 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.081876	18.30 ± 0.03	0.195 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.083289	18.32 ± 0.03	0.191 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.084703	18.27 ± 0.03	0.199 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.087533	18.27 ± 0.03	0.200 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.088950	18.27 ± 0.03	0.199 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.090478	18.28 ± 0.03	0.198 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.091895	18.26 ± 0.03	0.201 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.094717	18.23 ± 0.03	0.208 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.096137	18.31 ± 0.03	0.193 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.097553	18.25 ± 0.03	0.204 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.098971	18.26 ± 0.03	0.202 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.101807	18.30 ± 0.03	0.194 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.103223	18.26 ± 0.03	0.202 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа
0.104638	18.30 ± 0.03	0.194 ± 0.005	ЗТШ/КрАО РАН	<i>B</i>	Данная работа

Продолжение на след. стр.

Таблица 19 — Продолжение таблицы 19.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в.	Поток мЯн	Телескоп/обсерватория	Фильтр	Источник данных
0.106057	18.31 ± 0.03	0.193 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.108876	18.26 ± 0.03	0.201 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.110287	18.27 ± 0.03	0.199 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.111872	18.26 ± 0.03	0.202 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.113287	18.24 ± 0.03	0.205 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.116116	18.22 ± 0.03	0.209 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.117531	18.24 ± 0.03	0.205 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.118945	18.20 ± 0.03	0.213 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.120363	18.25 ± 0.03	0.204 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.123386	18.25 ± 0.03	0.203 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.124795	18.24 ± 0.03	0.205 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.126205	18.23 ± 0.03	0.208 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.127615	18.25 ± 0.03	0.203 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.130430	18.29 ± 0.03	0.196 ± 0.005	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.131839	18.31 ± 0.03	0.193 ± 0.005	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.133247	18.28 ± 0.03	0.198 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.134656	18.25 ± 0.03	0.204 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.137476	18.29 ± 0.03	0.196 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.138888	18.31 ± 0.03	0.193 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.140299	18.24 ± 0.03	0.205 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.141708	18.26 ± 0.03	0.201 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.144528	18.25 ± 0.03	0.204 ± 0.006	ЗТШ/КрАО РАН	B	Данная работа
0.898680	20.25 ± 0.01	0.032 ± 0.000	A3T-22/MAO	B	Данная работа
1.957360	21.53 ± 0.03	0.010 ± 0.000	A3T-22/MAO	B	Данная работа
4.890780	22.99 ± 0.06	0.003 ± 0.000	A3T-22/MAO	B	Данная работа
5.903160	22.99 ± 0.05	0.003 ± 0.000	A3T-22/MAO	B	Данная работа
0.010943	15.78 ± 0.04	1.993 ± 0.080	UVOT/Swift	B_{Swift}	[286]
1.239450	20.08 ± 0.14	0.038 ± 0.005	UVOT/Swift	B_{Swift}	[286]
0.029644	17.48 ± 0.03	0.415 ± 0.010	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
0.035136	17.68 ± 0.03	0.344 ± 0.011	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
0.040894	17.81 ± 0.02	0.306 ± 0.007	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
0.054577	18.05 ± 0.02	0.244 ± 0.006	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
0.062501	18.16 ± 0.02	0.222 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
0.069024	18.22 ± 0.02	0.208 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
0.074701	18.26 ± 0.03	0.201 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
0.080193	18.26 ± 0.03	0.202 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
0.084920	18.26 ± 0.03	0.202 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
0.089647	18.26 ± 0.03	0.203 ± 0.006	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
0.094351	18.27 ± 0.03	0.201 ± 0.006	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
0.099054	18.25 ± 0.03	0.203 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
0.105392	18.25 ± 0.01	0.204 ± 0.003	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
0.168647	18.28 ± 0.02	0.198 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
0.965789	20.51 ± 0.02	0.025 ± 0.000	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
1.167480	20.53 ± 0.05	0.025 ± 0.001	Zeiss-1000/CAO РАН	B	Данная работа
1150.102766	23.54 ± 0.06	0.002 ± 0.000	БТА/CAO РАН	B_J	Данная работа
0.405000	18.49 ± 0.10	0.146 ± 0.015	ZTF/Palomar	g	[276]
0.532600	18.81 ± 0.07	0.109 ± 0.008	ZTF/Palomar	g	[276]
1.121030	20.04 ± 0.05	0.035 ± 0.002	Liverpool/ORM	g	[278]
0.011800	15.63 ± 0.05	2.047 ± 0.102	UVOT/Swift	V_{Swift}	[286]
0.338738	18.26 ± 0.09	0.182 ± 0.016	UVOT/Swift	V_{Swift}	[286]
0.048171	17.56 ± 0.02	0.343 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.049597	17.54 ± 0.02	0.349 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.051014	17.61 ± 0.02	0.329 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.052430	17.63 ± 0.02	0.323 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа

Продолжение на след. стр.

Таблица 19 — Продолжение таблицы 19.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в.	Поток мЯн	Телескоп/обсерватория	Фильтр	Источник данных
0.053845	17.63 ± 0.02	0.322 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.055266	17.71 ± 0.02	0.301 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.056684	17.69 ± 0.02	0.306 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.058103	17.70 ± 0.02	0.301 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.059520	17.71 ± 0.02	0.299 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.060938	17.74 ± 0.02	0.291 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.062360	17.78 ± 0.02	0.282 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.063906	17.75 ± 0.02	0.289 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.065324	17.77 ± 0.02	0.283 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.066742	17.74 ± 0.02	0.290 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.068157	17.82 ± 0.03	0.271 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.069574	17.82 ± 0.03	0.271 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.070993	17.85 ± 0.03	0.264 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.072410	17.84 ± 0.03	0.266 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.073825	17.82 ± 0.03	0.270 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.075242	17.86 ± 0.03	0.260 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.076658	17.90 ± 0.03	0.251 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.078072	17.82 ± 0.03	0.271 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.079486	17.83 ± 0.03	0.268 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.080899	17.86 ± 0.03	0.260 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.082313	17.85 ± 0.03	0.263 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.083726	17.86 ± 0.03	0.260 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.085140	17.86 ± 0.03	0.261 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.086554	17.84 ± 0.03	0.267 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.087971	17.89 ± 0.03	0.254 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.089387	17.86 ± 0.03	0.261 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.090915	17.84 ± 0.03	0.265 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.092334	17.83 ± 0.03	0.269 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.093742	17.86 ± 0.03	0.260 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.095153	17.86 ± 0.03	0.260 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.096575	17.85 ± 0.03	0.263 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.097992	17.81 ± 0.03	0.275 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.099411	17.79 ± 0.03	0.277 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.100829	17.84 ± 0.03	0.265 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.102244	17.86 ± 0.03	0.261 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.103660	17.83 ± 0.03	0.269 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.105075	17.87 ± 0.03	0.259 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.106492	17.89 ± 0.03	0.255 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.107901	17.81 ± 0.03	0.274 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.109313	17.85 ± 0.03	0.264 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.110723	17.85 ± 0.03	0.263 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.112309	17.84 ± 0.02	0.267 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.113724	17.81 ± 0.02	0.272 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.115139	17.83 ± 0.02	0.268 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.116553	17.79 ± 0.02	0.278 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.117968	17.77 ± 0.02	0.282 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.119382	17.84 ± 0.02	0.267 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.120801	17.80 ± 0.02	0.276 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.122413	17.86 ± 0.02	0.262 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.123821	17.81 ± 0.02	0.273 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.125231	17.78 ± 0.03	0.282 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.126641	17.80 ± 0.03	0.275 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.128050	17.82 ± 0.03	0.271 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.129458	17.80 ± 0.03	0.275 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа

Продолжение на след. стр.

Таблица 19 — Продолжение таблицы 19.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в.	Поток мЯн	Телескоп/обсерватория	Фильтр	Источник данных
0.130866	17.84 ± 0.03	0.265 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.132274	17.83 ± 0.03	0.267 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.133683	17.86 ± 0.03	0.262 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.135091	17.84 ± 0.03	0.267 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.136501	17.84 ± 0.03	0.267 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.137912	17.83 ± 0.03	0.269 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.139324	17.85 ± 0.03	0.264 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.140734	17.81 ± 0.03	0.274 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.142144	17.84 ± 0.03	0.265 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.143555	17.84 ± 0.03	0.266 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.144964	17.86 ± 0.03	0.260 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.146375	17.85 ± 0.03	0.263 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.147785	17.81 ± 0.03	0.274 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.149194	17.85 ± 0.03	0.262 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.150605	17.85 ± 0.03	0.263 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.152016	17.84 ± 0.03	0.265 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.153428	17.81 ± 0.03	0.272 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.154840	17.87 ± 0.03	0.258 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.156252	17.82 ± 0.03	0.271 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.157661	17.84 ± 0.03	0.267 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.159069	17.83 ± 0.03	0.268 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.160482	17.89 ± 0.03	0.253 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.161913	17.87 ± 0.03	0.259 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.163327	17.84 ± 0.03	0.265 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.164744	17.85 ± 0.03	0.263 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.166157	17.87 ± 0.03	0.260 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.167572	17.91 ± 0.03	0.249 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.169211	17.86 ± 0.03	0.261 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.170624	17.85 ± 0.03	0.263 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.172039	17.89 ± 0.03	0.253 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	V	Данная работа
0.031637	17.19 ± 0.02	0.485 ± 0.008	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.037198	17.33 ± 0.02	0.425 ± 0.009	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.056546	17.69 ± 0.02	0.304 ± 0.006	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.064610	17.78 ± 0.02	0.281 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.070970	17.84 ± 0.02	0.267 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.076914	17.86 ± 0.02	0.260 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.082058	17.85 ± 0.02	0.264 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.086797	17.85 ± 0.02	0.262 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.091512	17.84 ± 0.02	0.266 ± 0.006	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.096216	17.86 ± 0.02	0.262 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.100931	17.85 ± 0.02	0.263 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.109389	17.82 ± 0.01	0.270 ± 0.003	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.128621	17.84 ± 0.01	0.265 ± 0.003	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.172864	17.91 ± 0.02	0.250 ± 0.005	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.967677	20.05 ± 0.02	0.035 ± 0.001	Zeiss-1000/CAO РАН	V	Данная работа
0.015417	15.98 ± 0.10	1.472 ± 0.147	GIT/IAO	r	[261]
0.070417	17.30 ± 0.10	0.437 ± 0.044	NOT/ORM	r	[265]
0.447700	18.29 ± 0.07	0.175 ± 0.012	ZTF/Palomar	r	[276]
0.493200	18.44 ± 0.07	0.153 ± 0.011	ZTF/Palomar	r	[276]
1.122440	19.81 ± 0.02	0.043 ± 0.001	Liverpool/ORM	r	[278]
37.927245	23.10 ± 0.20	0.002 ± 0.000	A3T-20/ATO	r	Данная работа
87.850833	23.48 ± 0.15	0.001 ± 0.000	A3T-20/ATO	r	Данная работа
106.777895	23.73 ± 0.28	0.001 ± 0.000	A3T-20/ATO	r	Данная работа
0.019362	16.16 ± 0.02	1.053 ± 0.017	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа

Продолжение на след. стр.

Таблица 19 — Продолжение таблицы 19.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в.	Поток мЯн	Телескоп/обсерватория	Фильтр	Источник данных
0.019673	16.22 ± 0.02	0.993 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.019983	16.22 ± 0.02	0.997 ± 0.017	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.020294	16.24 ± 0.02	0.974 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.020605	16.23 ± 0.02	0.990 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.020916	16.23 ± 0.02	0.983 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.021226	16.25 ± 0.02	0.972 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.021538	16.30 ± 0.02	0.926 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.021850	16.29 ± 0.02	0.933 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.022266	16.28 ± 0.02	0.941 ± 0.021	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.022460	16.32 ± 0.02	0.908 ± 0.020	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.022655	16.35 ± 0.02	0.884 ± 0.020	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.022850	16.35 ± 0.02	0.879 ± 0.020	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.023045	16.36 ± 0.02	0.872 ± 0.020	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.023240	16.38 ± 0.02	0.859 ± 0.020	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.023434	16.34 ± 0.02	0.892 ± 0.020	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.023632	16.35 ± 0.02	0.884 ± 0.020	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.023827	16.37 ± 0.02	0.865 ± 0.020	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.024022	16.41 ± 0.02	0.833 ± 0.019	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.024219	16.40 ± 0.02	0.844 ± 0.019	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.024416	16.42 ± 0.02	0.826 ± 0.019	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.024610	16.42 ± 0.02	0.831 ± 0.019	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.024805	16.39 ± 0.02	0.848 ± 0.019	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.024999	16.42 ± 0.02	0.830 ± 0.019	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.025196	16.42 ± 0.02	0.825 ± 0.019	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.025392	16.44 ± 0.02	0.810 ± 0.018	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.025587	16.44 ± 0.02	0.810 ± 0.019	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.025786	16.47 ± 0.02	0.787 ± 0.018	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.025983	16.48 ± 0.02	0.786 ± 0.018	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.026177	16.48 ± 0.02	0.786 ± 0.018	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.026372	16.50 ± 0.02	0.770 ± 0.018	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.026569	16.48 ± 0.02	0.781 ± 0.018	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.026763	16.51 ± 0.02	0.765 ± 0.018	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.026958	16.51 ± 0.02	0.760 ± 0.018	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.027153	16.52 ± 0.02	0.758 ± 0.018	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.027543	16.58 ± 0.02	0.717 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.027738	16.59 ± 0.02	0.705 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.027934	16.60 ± 0.02	0.702 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.028129	16.57 ± 0.02	0.718 ± 0.017	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.028323	16.60 ± 0.02	0.704 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.028518	16.59 ± 0.02	0.705 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.028716	16.62 ± 0.02	0.691 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.028911	16.62 ± 0.02	0.686 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.029106	16.65 ± 0.02	0.670 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.029301	16.64 ± 0.02	0.679 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.029497	16.63 ± 0.02	0.680 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.029692	16.63 ± 0.02	0.683 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.029889	16.65 ± 0.02	0.669 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.030084	16.66 ± 0.02	0.663 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.030280	16.64 ± 0.02	0.678 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.030474	16.65 ± 0.02	0.669 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.030760	16.68 ± 0.02	0.649 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.030955	16.69 ± 0.02	0.643 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.031150	16.68 ± 0.02	0.653 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.031345	16.65 ± 0.02	0.667 ± 0.016	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа

Продолжение на след. стр.

Таблица 19 — Продолжение таблицы 19.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в.	Поток мЯн	Телескоп/обсерватория	Фильтр	Источник данных
0.031542	16.68 ± 0.02	0.651 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.031740	16.69 ± 0.02	0.648 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.031938	16.68 ± 0.02	0.649 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.032134	16.71 ± 0.02	0.634 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.032329	16.70 ± 0.02	0.639 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.032524	16.69 ± 0.02	0.646 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.032719	16.69 ± 0.02	0.644 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.032914	16.69 ± 0.02	0.642 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.033109	16.78 ± 0.02	0.592 ± 0.014	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.033306	16.77 ± 0.02	0.599 ± 0.014	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.033503	16.74 ± 0.02	0.618 ± 0.014	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.033698	16.75 ± 0.02	0.609 ± 0.014	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.033893	16.73 ± 0.02	0.620 ± 0.015	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.034089	16.78 ± 0.02	0.595 ± 0.014	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.034483	16.79 ± 0.02	0.589 ± 0.014	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.034678	16.80 ± 0.02	0.585 ± 0.014	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.034873	16.81 ± 0.02	0.577 ± 0.014	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.035068	16.78 ± 0.02	0.594 ± 0.014	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.035265	16.81 ± 0.02	0.579 ± 0.014	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.035460	16.82 ± 0.02	0.575 ± 0.014	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.035655	16.87 ± 0.02	0.549 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.035851	16.80 ± 0.02	0.581 ± 0.014	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.036047	16.85 ± 0.02	0.556 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.036244	16.90 ± 0.02	0.532 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.036439	16.83 ± 0.02	0.565 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.036637	16.84 ± 0.02	0.560 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.036834	16.89 ± 0.02	0.535 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.037029	16.86 ± 0.02	0.550 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.037224	16.90 ± 0.02	0.532 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.037420	16.89 ± 0.02	0.539 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.037615	16.88 ± 0.02	0.540 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.037810	16.90 ± 0.02	0.532 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.038007	16.89 ± 0.02	0.535 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.038203	16.87 ± 0.02	0.549 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.038397	16.89 ± 0.03	0.536 ± 0.014	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.038592	16.89 ± 0.02	0.535 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.038788	16.88 ± 0.02	0.540 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.038987	16.90 ± 0.03	0.532 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.039185	16.95 ± 0.02	0.510 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.039382	16.92 ± 0.02	0.523 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.039580	16.91 ± 0.02	0.528 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.039776	16.95 ± 0.02	0.506 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.039971	16.94 ± 0.02	0.510 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.040166	16.96 ± 0.02	0.504 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.040363	16.95 ± 0.02	0.507 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.040559	16.92 ± 0.02	0.521 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.040754	16.94 ± 0.02	0.511 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.040950	16.96 ± 0.02	0.504 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.041146	16.99 ± 0.02	0.489 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.041340	16.98 ± 0.02	0.494 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.041537	16.96 ± 0.02	0.504 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.041732	16.97 ± 0.02	0.499 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.041929	16.99 ± 0.02	0.489 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.042127	16.93 ± 0.02	0.516 ± 0.013	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа

Продолжение на след. стр.

Таблица 19 — Продолжение таблицы 19.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в.	Поток мЯн	Телескоп/обсерватория	Фильтр	Источник данных
0.042325	16.98 ± 0.02	0.492 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.042522	17.01 ± 0.02	0.483 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.042719	17.01 ± 0.03	0.482 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.042914	17.01 ± 0.03	0.480 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.043109	16.96 ± 0.02	0.502 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.043303	17.02 ± 0.03	0.477 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.043498	16.99 ± 0.02	0.489 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.043693	17.05 ± 0.03	0.464 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.043887	17.02 ± 0.03	0.475 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.044083	17.01 ± 0.03	0.483 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.044279	17.05 ± 0.03	0.464 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.044473	17.03 ± 0.02	0.472 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.044669	17.01 ± 0.02	0.479 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.044865	17.02 ± 0.03	0.476 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.045062	17.06 ± 0.03	0.458 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.045258	17.05 ± 0.02	0.462 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.045453	17.03 ± 0.03	0.471 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.045650	17.07 ± 0.03	0.454 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.045845	17.07 ± 0.02	0.453 ± 0.011	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.046040	17.09 ± 0.02	0.445 ± 0.011	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.046237	17.07 ± 0.02	0.456 ± 0.011	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.046433	17.06 ± 0.03	0.461 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.046627	17.07 ± 0.03	0.456 ± 0.012	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.046822	17.08 ± 0.03	0.450 ± 0.011	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.047017	17.09 ± 0.03	0.448 ± 0.011	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.047212	17.09 ± 0.02	0.448 ± 0.011	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.047443	17.09 ± 0.03	0.446 ± 0.011	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.048492	17.13 ± 0.02	0.432 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.049920	17.10 ± 0.02	0.443 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.051335	17.16 ± 0.02	0.418 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.052752	17.20 ± 0.02	0.403 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.054169	17.19 ± 0.02	0.405 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.055588	17.26 ± 0.02	0.382 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.057005	17.24 ± 0.02	0.389 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.058425	17.26 ± 0.02	0.382 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.059842	17.23 ± 0.02	0.392 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.061261	17.30 ± 0.02	0.368 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.062682	17.29 ± 0.02	0.372 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.064228	17.27 ± 0.02	0.378 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.065645	17.29 ± 0.02	0.370 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.067063	17.34 ± 0.02	0.356 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.068479	17.35 ± 0.02	0.350 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.069896	17.31 ± 0.02	0.365 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.071315	17.36 ± 0.02	0.347 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.072732	17.36 ± 0.02	0.349 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.074147	17.36 ± 0.02	0.348 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.075563	17.37 ± 0.02	0.346 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.076979	17.35 ± 0.02	0.350 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.078393	17.37 ± 0.02	0.345 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.079807	17.35 ± 0.02	0.350 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.081220	17.36 ± 0.02	0.348 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.082634	17.38 ± 0.02	0.343 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.084047	17.40 ± 0.02	0.336 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.085461	17.37 ± 0.02	0.345 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа

Продолжение на след. стр.

Таблица 19 — Продолжение таблицы 19.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в.	Поток мЯн	Телескоп/обсерватория	Фильтр	Источник данных
0.086876	17.35 ± 0.02	0.352 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.088292	17.35 ± 0.02	0.350 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.089709	17.36 ± 0.02	0.349 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.091237	17.37 ± 0.02	0.346 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.092653	17.35 ± 0.02	0.351 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.094062	17.31 ± 0.02	0.363 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.095476	17.35 ± 0.02	0.352 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.096896	17.40 ± 0.02	0.335 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.098313	17.37 ± 0.02	0.344 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.099732	17.38 ± 0.02	0.340 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.101151	17.33 ± 0.02	0.357 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.102565	17.38 ± 0.02	0.341 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.103982	17.38 ± 0.02	0.341 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.105397	17.36 ± 0.02	0.347 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.106812	17.40 ± 0.02	0.335 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.108221	17.38 ± 0.02	0.342 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.109633	17.35 ± 0.02	0.352 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.111043	17.33 ± 0.02	0.359 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.112631	17.34 ± 0.02	0.356 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.114045	17.36 ± 0.02	0.348 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.115460	17.34 ± 0.02	0.355 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.116874	17.33 ± 0.02	0.358 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.118289	17.32 ± 0.02	0.361 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.119704	17.32 ± 0.02	0.360 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.121323	17.30 ± 0.02	0.368 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.122732	17.30 ± 0.02	0.367 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.124141	17.31 ± 0.02	0.363 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.125551	17.32 ± 0.02	0.360 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.126961	17.30 ± 0.02	0.368 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.128370	17.37 ± 0.02	0.345 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.129777	17.36 ± 0.02	0.349 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.131185	17.38 ± 0.02	0.342 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.132594	17.32 ± 0.02	0.361 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.134002	17.38 ± 0.02	0.343 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.135411	17.32 ± 0.02	0.361 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.136822	17.39 ± 0.02	0.339 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.138234	17.34 ± 0.02	0.355 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.139645	17.36 ± 0.02	0.348 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.141053	17.36 ± 0.02	0.349 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.142464	17.33 ± 0.02	0.357 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.143874	17.35 ± 0.02	0.352 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.145284	17.37 ± 0.02	0.344 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.146696	17.33 ± 0.02	0.357 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.148104	17.35 ± 0.02	0.351 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.149515	17.35 ± 0.02	0.351 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.150926	17.33 ± 0.02	0.358 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.152337	17.36 ± 0.02	0.348 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.153749	17.35 ± 0.02	0.352 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.155161	17.35 ± 0.02	0.351 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.156571	17.34 ± 0.02	0.354 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.157981	17.38 ± 0.02	0.342 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.159389	17.35 ± 0.02	0.352 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.160804	17.32 ± 0.02	0.360 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа
0.162234	17.38 ± 0.02	0.343 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	<i>R</i>	Данная работа

Продолжение на след. стр.

Таблица 19 — Продолжение таблицы 19.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в.	Поток мЯн	Телескоп/обсерватория	Фильтр	Источник данных
0.163649	17.38 ± 0.02	0.342 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
0.165064	17.35 ± 0.02	0.350 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
0.166479	17.38 ± 0.02	0.342 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
0.167894	17.35 ± 0.02	0.351 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
0.169532	17.39 ± 0.02	0.340 ± 0.007	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
0.170945	17.37 ± 0.02	0.344 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
0.172360	17.37 ± 0.02	0.346 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
0.708079	18.90 ± 0.10	0.084 ± 0.008	Akeno/MITSUME	R	Данная работа
0.925170	19.43 ± 0.06	0.052 ± 0.003	АЗТ-22/МАО	R	Данная работа
1.984900	20.73 ± 0.07	0.016 ± 0.001	АЗТ-22/МАО	R	Данная работа
2.054501	20.80 ± 0.10	0.015 ± 0.001	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
2.128171	20.89 ± 0.10	0.014 ± 0.001	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
2.209261	20.77 ± 0.12	0.015 ± 0.002	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
2.885640	21.25 ± 0.14	0.010 ± 0.001	АС-32/А6АО	R	Данная работа
3.149240	21.49 ± 0.23	0.008 ± 0.002	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
4.044363	21.91 ± 0.11	0.005 ± 0.001	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
4.917290	22.32 ± 0.08	0.004 ± 0.000	АЗТ-22/МАО	R	Данная работа
5.887010	22.40 ± 0.06	0.003 ± 0.000	АЗТ-22/МАО	R	Данная работа
7.081296	22.53 ± 0.32	0.003 ± 0.001	АС-32/А6АО	R	Данная работа
23.021019	22.89 ± 0.16	0.002 ± 0.000	АЗТ-22/МАО	R	Данная работа
23.880420	22.80 ± 0.19	0.002 ± 0.000	АЗТ-33ИК/ССО СО РАН	R	Данная работа
29.071210	22.83 ± 0.11	0.002 ± 0.000	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
32.920093	22.97 ± 0.14	0.002 ± 0.000	АЗТ-22/МАО	R	Данная работа
35.868430	22.82 ± 0.21	0.002 ± 0.000	АЗТ-33ИК/ССО СО РАН	R	Данная работа
49.940255	22.85 ± 0.19	0.002 ± 0.000	АЗТ-22/МАО	R	Данная работа
49.946157	23.07 ± 0.31	0.002 ± 0.001	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
53.816030	23.09 ± 0.23	0.002 ± 0.000	АЗТ-33ИК/ССО СО РАН	R	Данная работа
61.048645	22.95 ± 0.23	0.002 ± 0.000	ЗТШ/КрАО РАН	R	Данная работа
0.018835	16.12 ± 0.09	1.092 ± 0.098	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.019785	16.18 ± 0.05	1.036 ± 0.055	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.021129	16.29 ± 0.07	0.928 ± 0.062	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.022090	16.32 ± 0.08	0.905 ± 0.070	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.022797	16.37 ± 0.11	0.867 ± 0.098	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.023365	16.40 ± 0.07	0.843 ± 0.055	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.023921	16.45 ± 0.07	0.806 ± 0.052	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.025033	16.35 ± 0.06	0.880 ± 0.051	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.025763	16.47 ± 0.02	0.789 ± 0.015	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.028277	16.58 ± 0.02	0.711 ± 0.014	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.033583	16.76 ± 0.02	0.604 ± 0.014	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.039063	16.87 ± 0.02	0.545 ± 0.012	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.060682	17.28 ± 0.02	0.373 ± 0.008	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.066823	17.32 ± 0.02	0.362 ± 0.007	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.073392	17.38 ± 0.02	0.343 ± 0.008	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.078930	17.35 ± 0.02	0.350 ± 0.007	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.083842	17.36 ± 0.02	0.347 ± 0.008	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.088569	17.35 ± 0.02	0.351 ± 0.008	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.093273	17.37 ± 0.02	0.345 ± 0.008	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.097988	17.34 ± 0.02	0.354 ± 0.008	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.113258	17.32 ± 0.01	0.363 ± 0.004	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.133256	17.33 ± 0.02	0.357 ± 0.006	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.166793	17.37 ± 0.02	0.346 ± 0.007	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
0.960518	19.52 ± 0.01	0.048 ± 0.001	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
1.141080	19.77 ± 0.01	0.038 ± 0.001	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа
2.067479	20.85 ± 0.04	0.014 ± 0.001	Zeiss-1000/CAO РАН	R_C	Данная работа

Продолжение на след. стр.

Таблица 19 — Продолжение таблицы 19.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в.	Поток мЯн	Телескоп/обсерватория	Фильтр	Источник данных
1150.084711	22.88 ± 0.07	0.002 ± 0.000	БТА/САО РАН	R_C	Данная работа [278]
1.123830	19.61 ± 0.03	0.052 ± 0.002	Liverpool/ORM	i	
0.048825	16.68 ± 0.02	0.514 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.050240	16.72 ± 0.02	0.495 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.051656	16.78 ± 0.02	0.471 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.053073	16.80 ± 0.02	0.458 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.057329	16.80 ± 0.02	0.460 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.058746	16.84 ± 0.02	0.445 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.060165	16.80 ± 0.02	0.462 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.061584	16.83 ± 0.02	0.446 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.063004	16.89 ± 0.02	0.425 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.064552	16.83 ± 0.02	0.447 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.065969	16.87 ± 0.02	0.433 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.067385	16.91 ± 0.02	0.417 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.068800	16.89 ± 0.02	0.425 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.070219	16.89 ± 0.02	0.423 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.071636	16.92 ± 0.02	0.411 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.073053	16.92 ± 0.02	0.411 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.074469	16.90 ± 0.02	0.420 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.075885	16.90 ± 0.02	0.421 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.077300	16.95 ± 0.02	0.401 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.078714	16.97 ± 0.02	0.395 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.080127	16.97 ± 0.02	0.392 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.081541	16.91 ± 0.02	0.418 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.082954	16.97 ± 0.02	0.395 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.084368	16.93 ± 0.02	0.407 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.085782	16.95 ± 0.02	0.400 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.087198	16.93 ± 0.02	0.407 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.088614	16.91 ± 0.02	0.416 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.090031	16.99 ± 0.02	0.385 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.091558	16.96 ± 0.02	0.398 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.092972	16.97 ± 0.02	0.394 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.094382	16.95 ± 0.02	0.401 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.095801	16.94 ± 0.02	0.404 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.097218	16.95 ± 0.02	0.402 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.098635	16.92 ± 0.02	0.414 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.100056	16.98 ± 0.02	0.391 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.101472	16.92 ± 0.02	0.414 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.102887	16.95 ± 0.02	0.403 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.104303	16.93 ± 0.02	0.408 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.105722	16.96 ± 0.02	0.397 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.107131	16.92 ± 0.02	0.412 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.108542	16.94 ± 0.02	0.405 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.109953	16.92 ± 0.02	0.412 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.111363	16.91 ± 0.02	0.415 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.112952	16.93 ± 0.02	0.410 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.114367	16.90 ± 0.02	0.419 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.115781	16.88 ± 0.02	0.426 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.117195	16.89 ± 0.02	0.423 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.118610	16.87 ± 0.02	0.430 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.120025	16.90 ± 0.02	0.419 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.121643	16.88 ± 0.02	0.428 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.123052	16.92 ± 0.02	0.414 ± 0.008	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа
0.124461	16.86 ± 0.02	0.436 ± 0.009	ЗТШ/КраО РАН	I	Данная работа

Продолжение на след. стр.

Таблица 19 — Продолжение таблицы 19.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в.	Поток мЯн	Телескоп/обсерватория	Фильтр	Источник данных
0.125872	16.93 ± 0.02	0.409 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.127281	16.89 ± 0.02	0.426 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.128689	16.90 ± 0.02	0.419 ± 0.009	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.130097	16.85 ± 0.02	0.438 ± 0.009	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.131505	16.85 ± 0.02	0.441 ± 0.009	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.132914	16.92 ± 0.02	0.412 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.134322	16.89 ± 0.02	0.422 ± 0.009	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.135731	16.92 ± 0.02	0.410 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.137142	16.92 ± 0.02	0.414 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.138554	16.85 ± 0.02	0.438 ± 0.009	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.139965	16.94 ± 0.02	0.404 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.141373	16.91 ± 0.02	0.416 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.142785	16.88 ± 0.02	0.426 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.144193	16.89 ± 0.02	0.424 ± 0.009	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.145605	16.96 ± 0.02	0.396 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.147016	16.99 ± 0.02	0.388 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.148424	16.92 ± 0.02	0.412 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.149835	16.96 ± 0.02	0.397 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.151245	16.90 ± 0.02	0.420 ± 0.009	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.152657	16.90 ± 0.02	0.420 ± 0.009	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.154070	16.90 ± 0.02	0.419 ± 0.009	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.155482	16.89 ± 0.02	0.423 ± 0.009	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.156891	16.88 ± 0.02	0.428 ± 0.009	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.158300	16.91 ± 0.02	0.414 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.159709	16.90 ± 0.02	0.419 ± 0.009	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.161124	16.92 ± 0.02	0.411 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.162555	16.92 ± 0.02	0.413 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.163970	16.90 ± 0.02	0.419 ± 0.009	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.165385	16.93 ± 0.02	0.410 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.166800	16.99 ± 0.02	0.387 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.168215	16.96 ± 0.02	0.398 ± 0.009	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.169853	16.94 ± 0.02	0.404 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.171267	16.93 ± 0.02	0.408 ± 0.008	ЗТШ/КрАО РАН	<i>I</i>	Данная работа
0.708079	18.80 ± 0.10	0.073 ± 0.007	Akeno/MITSUME	<i>I</i>	Данная работа
1.126940	19.49 ± 0.06	0.058 ± 0.003	Liverpool/ORM	<i>z</i>	Данная работа
0.064480	17.40 ± 0.03	0.397 ± 0.012	BOOTES-2/UMA-CSIC	<i>Clear</i>	Данная работа
0.070212	17.33 ± 0.03	0.425 ± 0.013	BOOTES-2/UMA-CSIC	<i>Clear</i>	Данная работа
0.076862	17.28 ± 0.03	0.445 ± 0.014	BOOTES-2/UMA-CSIC	<i>Clear</i>	Данная работа
0.083319	17.37 ± 0.03	0.411 ± 0.011	BOOTES-2/UMA-CSIC	<i>Clear</i>	Данная работа
0.102930	17.20 ± 0.03	0.479 ± 0.014	Sintez-Newton/KpAO	<i>Clear</i>	Данная работа
0.126580	17.28 ± 0.08	0.445 ± 0.036	Sintez-Newton/KpAO	<i>Clear</i>	Данная работа
0.129662	17.31 ± 0.03	0.431 ± 0.011	BOOTES-2/UMA-CSIC	<i>Clear</i>	Данная работа
0.144090	17.28 ± 0.06	0.445 ± 0.027	Sintez-Newton/KpAO	<i>Clear</i>	Данная работа
0.161590	17.29 ± 0.06	0.441 ± 0.026	Sintez-Newton/KpAO	<i>Clear</i>	Данная работа
0.178721	17.38 ± 0.09	0.407 ± 0.035	BOOTES-2/UMA-CSIC	<i>Clear</i>	Данная работа
0.233321	17.50 ± 0.03	0.365 ± 0.011	BOOTES-2/UMA-CSIC	<i>Clear</i>	Данная работа
0.295965	> 17.9	> 0.254	BOOTES-2/UMA-CSIC	<i>Clear</i>	Данная работа
0.435833	18.07 ± 0.05	0.215 ± 0.011	KAIT/Lick	<i>Clear</i>	[282]
0.508333	18.27 ± 0.06	0.179 ± 0.011	KAIT/Lick	<i>Clear</i>	[282]
1.021650	19.58 ± 0.10	0.053 ± 0.005	Sintez-Newton/KpAO	<i>Clear</i>	Данная работа
1.041030	19.50 ± 0.09	0.058 ± 0.005	Sintez-Newton/KpAO	<i>Clear</i>	Данная работа
1.070770	19.69 ± 0.09	0.048 ± 0.004	Sintez-Newton/KpAO	<i>Clear</i>	Данная работа
1.210812	> 19.0	> 0.094	BOOTES-2/UMA-CSIC	<i>Clear</i>	Данная работа
1.440000	20.00 ± 0.20	0.036 ± 0.007	KAIT/Lick	<i>Clear</i>	Данная работа

Продолжение на след. стр.

Таблица 19 — Продолжение таблицы 19.

$t - T_0$ сут.	Блеск з.в.	Поток мЯн	Телескоп/обсерватория	Фильтр	Источник данных
2.034790	20.57 ± 0.19	0.021 ± 0.004	Sintez-Newton/КрАО	<i>Clear</i>	Данная работа
3.025710	21.26 ± 0.17	0.011 ± 0.002	Sintez-Newton/КрАО	<i>Clear</i>	Данная работа
0.011221	15.24 ± 0.02	1.345 ± 0.027	UVOT/Swift	<i>WHITE_{Swift}</i>	[286]
1.993385	20.22 ± 0.14	0.014 ± 0.002	UVOT/Swift	<i>WHITE_{Swift}</i>	[286]
3.352488	20.71 ± 0.23	0.009 ± 0.002	UVOT/Swift	<i>WHITE_{Swift}</i>	[286]
5.597448	21.69 ± 0.16	0.004 ± 0.001	UVOT/Swift	<i>WHITE_{Swift}</i>	[286]