

ПОИСК КОРРЕЛЯЦИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЛЕКТИВНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ВЫБОРКИ СВЕРХНОВЫХ, АССОЦИИРОВАННЫХ С ГАММА-ВСПЛЕСКАМИ

© 2024 г. С. Белкин^{1,2,*}, А. С. Позаненко^{1,3}

¹Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

²Школа физики и астрономии, Университет Монаш, Клейтон, Виктория, Австралия

³Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 12.12.2024 г.

После доработки 20.01.2025 г.; принята к публикации 21.01.2025 г.

Приведена наиболее полная на сегодняшний день выборка сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками (СН-ГРБ), для которых были найдены время максимума кривой блеска сверхновой и абсолютная звездная величина во время максимума. Выборка содержит 44 сверхновых. Проведен поиск корреляций между параметрами максимума блеска СН-ГРБ в полосе спектрального фильтра V (абсолютная звездная величина в фильтре V в системе отсчета источника M_V) и временем максимума T_{\max} в фильтре V в системе отсчета источника, а также между ними и параметрами собственного гамма-излучения гамма-всплеска ($T_{90,i}$, E_{iso} , $E_{p,i}$). Статистически достоверно подтвердить какие-либо корреляции между любыми парами параметров нельзя. В распределении $M_V - \log_{10}(E_{\text{iso}})$ наблюдается разделение на две группы. Возможно, эти две группы соответствуют существенно разным начальным параметрам сверхновой, являющейся прародителем длинных гамма-всплесков. Обсуждаются селективные эффекты, влияющие на возможность детектирования СН-ГРБ и на возможное наличие корреляций.

Ключевые слова: транзиенты, гамма-всплески, сверхновые, оптические наблюдения, селективные эффекты.

DOI: 10.31857/S0320010824120016, EDN: LGRUFD

1. ВВЕДЕНИЕ

Космические гамма-всплески (ГРБ), впервые обнаруженные в 1967 г., считаются самыми мощными катастрофическими событиями во Вселенной. В результате наблюдений было установлено, что они связаны, как минимум, с двумя явлениями. Короткие гамма-всплески были предсказаны как результат слияния двойных нейтронных звезд (Блинников и др., 1984; Пачиньский, 1986). Действительно, были зарегистрированы короткие гамма-всплески GRB 170817 (Аббott и др., 2017; Голдштейн и др., 2017) и GRB 190425 (Позаненко, и др., 2020) от гравитационно-волновых источников, связанных со слиянием двойных нейтронных звезд GW170817 (Аббот и др., 2017) и GW190425 (Аббот и др., 2020) соответственно. С другой стороны, длинные ГРБ, которые находились под подозрением в связи со сверхновыми (см., например, Вусли, 1993; Пачиньский, 1998), подтверждены наблюдениями сверхновых (СН) типа Ic, ассоциированных с длинными гамма-всплесками. Спектры таких сверхновых содержат широкие линии и не показывают никаких признаков водорода или гелия. В настоящей работе рассматриваются гамма-всплески, ассоциированные со сверхновыми (СН-ГРБ). Связь между гамма-всплесками и сверхновыми впервые бы-

ла установлена для GRB 980425 и SN 1998bw, которые совпали как во времени, так и в положении на небе, а также по красному смещению (Галама и др., 1998; Ивамото и др., 1998; Кулкарни и др., 1998). Очень интенсивное событие GRB 030329, связанное со SN 2003dh (Хьорт и др., 2003; Станек и др., 2003; Мэтисон и др., 2003), стало одним из следующих драматичных подтверждений связи между гамма-всплесками и сверхновыми. Эта сверхновая также была классифицирована как тип Ic.

С момента открытия гамма-всплесков было обнаружено более 13 000¹, из которых всего около 44 подтверждены как связанные со сверхновыми с помощью фотометрических наблюдений, и 29 из них также подтверждены спектроскопически (см., например, Белкин и др., 2021, 2024). Эти данные составляют лишь малую долю от общего числа гамма-всплесков, подчеркивая критическую важность детальных наблюдений каждого ГРБ с потенциальным наличием сверхновой. Процесс таких наблюдений охватывает множество этапов от планирования до моделирования кривой блеска, каждый из которых добавляет неопределенности в окончательные параметры сверхновой (Белкин и Позаненко, 2022). Существуют также селективные эффекты, затрудняющие обнаруже-

*Электронный адрес: sergey.belkin@monash.edu

¹<https://ipn3.ssl.berkeley.edu/masterli.txt>

ние сверхновых по фотометрическим кривым блеска гамма-всплесков.

В работе приводится методика выделения кривой блеска СН из наблюдательных данных. Затем приведена выборка СН, ассоциированных с гамма-всплесками и методика поиска параметров СН (абсолютная звездная величина M_V во время максимума в кривой блеска СН T_{\max}). Приведены значения этих, а также параметров излучения в активной фазе гамма-всплеска (собственного излучения). Проведен поиск взаимных корреляций между параметрами максимума СН-ГРБ (M_V, T_{\max}), а также между ними и параметрами собственного гамма-излучения ГРБ ($T_{90,i}, E_{\text{iso}}, E_{p,i}$). Приводится возможное объяснение вида распределения $M_V - T_{\max}$, а также анализ разделения распределения $M_V - \log_{10}(E_{\text{iso}})$ на две группы. Рассматриваются селективные эффекты, возникающие при организации оптических наблюдений послесвечений гамма-всплесков для поиска сверхновых, последующей обработке наблюдательных данных и описании СН-ГРБ как класса явлений.

2. ВЫДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ БЛЕСКА СН-ГРБ

Исследование сверхновой, ассоциированной с гамма-всплеском, начинается с регистрации гамма-всплеска, которая осуществляется с помощью инструментов, расположенных на космических обсерваториях (пр. Свифт, Ферми, ИНТЕГРАЛ), в рентгеновских и гамма-лучах. После обнаружения сигнала определяются начальные координаты локализации источника, которые могут быть уточнены далее. Затем они передаются на Землю, что позволяет организовать наблюдения на наземных обсерваториях. Наблюдения стараются организовать так, чтобы обеспечить квазинепрерывное покрытие кривой блеска, что критически важно для точности анализа данных. Длительные наблюдения позволяют построить полную оптическую кривую блеска длинного гамма-всплеска, схематическое изображение которой можно найти, например, в работе Позаненко и др. (2021а), что также показано на рис. 1. Можно выделить четыре последовательно чередующиеся фазы в кривой блеска длинного гамма-всплеска:

- активная фаза,
- послесвечение,
- сверхновая,
- родительская галактика.

Обычно между моментом регистрации гамма-всплеска и началом наблюдений возникает задержка, обусловленная необходимостью точной локализации источника ГРБ с помощью рентгеновских телескопов (до нескольких угловых секунд) и более медленной реакцией наземных оптических инструментов. Эта

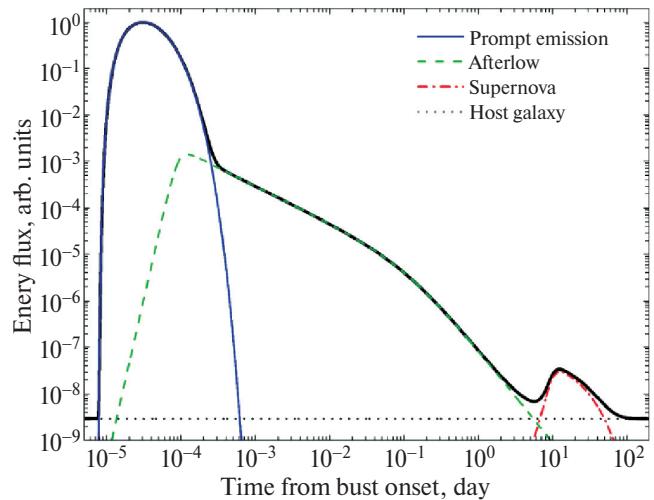


Рис. 1. Схематическая кривая блеска стадий эволюции оптической компоненты длинного гамма-всплеска. Плотность потока по вертикальной оси указана в произвольных единицах. Время появления сверхновой (или килоновой) может отличаться на порядок в зависимости от красного смещения источника.

задержка делает редким наблюдение активной фазы излучения в оптическом диапазоне, когда происходит основное выделение энергии.

После завершения работы центрального источника начинается фаза послесвечения, часто самая длительная, в которой затухание потока обычно описывается степенным законом, иногда с изломом. Диапазон звездных величин, в котором регистрируется и наблюдается послесвечение достаточной большой: например, через 0.1 сут после регистрации гамма-всплеска блеск послесвечения может варьироваться на 13 звездных величин (см., например, Канн и др., 2006; Кано и др., 2010, 2011; Дайнотти и др., 2024). Несмотря на различия в деталях, все послесвечения демонстрируют схожую степенную динамику затухания. Однако эта закономерность может нарушаться вспышками, изменениями структуры излучения или внезапными яркими событиями, такими как сверхновые или килоновые.

Примерно через 7–30 дней после регистрации гамма-всплеска, на фоне степенного затухания послесвечения может наблюдаться заметный избыток излучения, указывающий на начало фазы сверхновой. Эта фаза проявляется как продолжительная вспышка, превышающая уровень излучения от затухающего послесвечения и родительской галактики. Излучение сверхновой, возникающее значительно после окончания активности центральной машины и без дополнительных источников энергии, зависит от количества радиоактивного ^{56}Ni , синтезированного во время взрыва, и активности возможного звездного остатка (см., например, Кано и др., 2017а, б). Однако это излучение обычно слишком слабо для обнаружения на больших космологических расстояниях.

По мере затухания источника общий поток от сверхновой и послесвечения уменьшается до уровня светимости родительской галактики, что представляет собой последнюю наблюдаемую fazу на оптической кривой блеска гамма-всплеска. Наблюдения родительской галактики в нескольких фильтрах позволяют оценить поглощение, что необходимо для точного определения параметров СН-ГРБ (см., например, Канн и др., 2018).

Изложенное демонстрирует, что за пределами начальной фазы излучения общий поток источника является суперпозицией вкладов от послесвечения, сверхновой и родительской галактики. Тщательное вычитание этих вкладов и учет поглощения в Млечном Пути и родительской галактике (Шлафлай и Финкбайннер, 2011) позволяют точно выделить кривую блеска СН-ГРБ, что важно для оценки ее параметров.

Эта процедура необходима для построения кривой блеска СН-ГРБ. Качество наблюдений и другие факторы вносят неопределенность в результаты. Селективные эффекты могут препятствовать обнаружению сверхновой в кривой блеска гамма-всплеска или делать это обнаружение статистически незначимым, что ограничивает расширение выборки СН-ГРБ. Поэтому увеличение числа подтвержденных СН-ГРБ имеет критическое значение, так как позволяет углубить понимание свойств и закономерностей этой категории, проводить статистический анализ и проверять теории их происхождения и механизмов.

Оценка параметров максимума кривой блеска СН-ГРБ напрямую зависит от качества наблюдательной кампании. Звездная величина (или плотность потока) всегда подвержена неопределенностям, связанным с расчетом неоднородного фона и другими факторами. Эти неопределенности приводят к тому, что каждая точка на кривой блеска имеет погрешности. Более четкое изображение источника приводит к меньшим ошибкам и более точной аппроксимации кривой блеска. Следовательно, начальная стадия наблюдений и обработки изображений критически важна для точности оценок параметров сверхновой.

После первичной обработки можно строить кривую блеска, которая представляет собой суперпозицию вкладов от послесвечения, сверхновой и родительской галактики. Аналитическая функция, описывающая каждую из этих компонент отдельно, а также всю кривую блеска гамма-всплеска со сверхновой в оптическом диапазоне в конкретном фотометрическом фильтре вне активной фазы и без учета джет-брейка, имеет следующий вид:

$$F_v^{OT}(t) = F_v^{AG}(t) + F_v^{SN}(t) + F_v^{host}, \quad (1)$$

$$F_v^{OT}(t) = at^{-b} + A \frac{\exp(-(t-t_0)/\tau_{fall})}{1 + \exp(-(t-t_0)/\tau_{rise})} + F_v^{host}. \quad (2)$$

Здесь $F_v^{OT}(t)$ представляет собой общий поток, наблюдаемый от источника. Первый член справа учитывает степенное затухание послесвечения без изменения наклона. Последний член справа представляет постоянный вклад от родительской галактики. Центральный член справа направлен на аппроксимацию кривой блеска самой сверхновой и представлен функцией Базина (Базин и др., 2011) с экспоненциальным ростом и убыванием сверхновой, где A – нормировка, τ_{fall} и τ_{rise} определяют соответственно времена падения и роста сверхновой, а t_0 связано со временем максимума СН-ГРБ по формуле $t_{\max} = t_0 + \tau_{rise} \ln(\tau_{fall}/\tau_{rise} - 1)$. Эта формула является эмпирической. Однако использование экспоненциальных функций было продиктовано наблюдательными данными, указывающими на то, что СН-ГРБ, по крайней мере частично, подпитываются радиоактивным нагревом (Фрайер и др., 2007). Этот метод широко используется в литературе как для извлечения кривой блеска СН-ГРБ, так и для построения болометрической кривой блеска и определения параметров ее максимума (см., например, Зэх и др., 2004; Той и др., 2016; Кано и др., 2011, 2014; Белкин и др., 2024).

Качество аппроксимации зависит как минимум от трех факторов. Во-первых, от количества фотометрических точек, которое, в свою очередь, зависит от количества проведенных наблюдений. Чем их больше, тем больше точек на кривой блеска и тем более однозначно будет определена вышеупомянутая функция. Во-вторых, качество фотометрических точек зависит от качества наблюдений. Если источник едва выделяется на изображении, то его величина будет измерена с большими ошибками, что приведет к таким же большим ошибкам в параметрах функции, с помощью которой мы аппроксимируем кривую блеска. В результате аппроксимация будет определена неоднозначно. Третий, не менее важный фактор – это плотность фотометрических точек и их распределение по кривой блеска. Для успешной аппроксимации общей кривой блеска ГРБ-СН необходимо покрыть все ее стадии. Наблюдения послесвечения важны, так как они позволяют более корректно вычесть вклад данной стадии при построении кривой блеска сверхновой. Кроме того, необходимо учитывать возможный джет-брейк, который связан с геометрическим эффектом коллимации джета и приводит к изменению наклона в фазе послесвечения, когда поток начинает убывать более круто. Более того, в фазе послесвечения могут возникать неоднородности (см., например, Мазаева и др., 2018), которые представляют собой отклонения от степенного затухания послесвечения. Также необходимы наблюдения родительской галактики, чтобы вычесть ее вклад из общей кривой блеска. Кроме того, многоцветные наблюдения родительской галактики позволяют моделировать спектральное распределение энергии и оценить поглощение в родительской галактике, что также позволяет

скорректировать кривую блеска сверхновой. В итоге наблюдения за сверхновой должны проводиться во время фаз роста и убывания, а также максимума купола. Без этого описание кривой блеска сверхновой будет довольно сложным, и полученные параметры сверхновой могут иметь большие неопределенности. Таким образом, точность феноменологического моделирования кривой блеска гамма-всплеска со сверхновой, за которым следует определение ее параметров, напрямую зависит от точности и корректности проведенной наблюдательной кампании.

Качество аппроксимации кривой блеска СН-ГРБ зависит от нескольких факторов. Во-первых, от количества фотометрических точек, которое определяется числом проведенных наблюдений: больше точек обеспечивают более точное определение функции аппроксимации. Во-вторых, качество этих точек важно, так как плохо выделенные источники ведут к большим ошибкам в аппроксимации. Третьим фактором является плотность и распределение точек по кривой блеска. Для успешной аппроксимации общей кривой блеска ГРБ-СН необходимо покрыть все ее стадии. Наблюдения послесвечения важны, так как они позволяют более корректно вычесть вклад данной стадии при построении кривой блеска сверхновой. Кроме того, необходимо учитывать возможный джет-брейк, который связан с геометрическим эффектом коллимации джета и приводит к изменению наклона в фазе послесвечения, когда поток начинает убывать более круто, и возникают неоднородности в фазе послесвечения, которые могут нарушать степенное затухание (Мазаева и др., 2018). Также необходимы наблюдения родительской галактики, чтобы вычесть ее вклад из общей кривой блеска. Многоцветные наблюдения родительской галактики позволяют моделировать спектральное распределение энергии и оценить поглощение в родительской галактике, что также позволяет скорректировать кривую блеска сверхновой. Наблюдения сверхновой должны охватывать фазы роста, убывания и максимума купола сверхновой, чтобы минимизировать ошибки в оценках параметров. Точность моделирования кривой блеска гамма-всплеска и определение параметров сверхновой напрямую зависят от точности и корректности проведенной наблюдательной кампании.

Чтобы минимизировать ошибки в аппроксимации кривой блеска, необходимо проводить квазинепрерывные наблюдения за источником с адекватной подстройкой экспозиции. Это позволит улучшить качество астрономических изображений и точнее определить величину источника. Такой подход снижает вариации в аппроксимации и ошибки в оценке параметров сверхновой, что важно для расширения выборки СН-ГРБ.

3. $M_V - T_{\max}$ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СН-ГРБ

В данном разделе описывается выборка сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками: ее сбор, обработка и оценка параметров максимума СН-ГРБ. Анализируется распределение $M_V - T_{\max}$ и исследуются корреляции между параметрами максимума СН-ГРБ в оптическом диапазоне и параметрами собственного излучения, оцененными по ранним гамма-наблюдениям.

3.1. Выборка сверхновых с гамма-всплесками

В настоящей работе приводится выборка из 44 сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками. Отбор объектов проводился таким образом, чтобы создать максимально полную выборку СН-ГРБ. Из этих соображений фокусом были такие параметры СН-ГРБ, как абсолютная звездная величина в максимуме и время максимума относительно момента регистрации ГРБ в системе отсчета источника. В отличие от разного рода моделирования с целью извлечения физических параметров сверхновой, ассоциированной с гамма-всплеском (см., например, Вольнова и др., 2017), эти параметры являются наименее требовательными к наблюдательным данным и могут быть оценены по всего лишь нескольким фотометрическим точкам (~3–4) в области максимума СН-ГРБ (см., например, Белкин и др., 2021). Как следствие, данный подход может позволить объединить в одну выборку наибольшее число обнаруженных на сегодняшний день сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками, для их систематического анализа и поиска корреляций.

В настоящей работе представлена выборка из 44 сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками. Отбор проводился с целью создания максимально полной выборки СН-ГРБ, с фокусом на абсолютной звездной величине в максимуме и времени максимума относительно момента регистрации ГРБ в системе отсчета источника. Эти параметры наименее требовательные к количеству данных – всего несколько фотометрических точек (~3–4) в области максимума СН-ГРБ (см., например, Белкин и др., 2021). Этот подход, в отличие от более сложного моделирования для извлечения физических параметров (Вольнова и др., 2017), позволяет объединить значительное количество данных для систематического анализа сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками, и поиска корреляций.

Выборка СН-ГРБ строилась как на собственных наблюдениях с использованием телескопов, входящих в сеть IKI GRB-FuN (Вольнова и др., 2021), так и на результатах, опубликованных в литературе. Ссылки по каждому СН-ГРБ приведены в табл. 3. Из общих комментариев можно отметить, что одной из последних работ, где проводился систематический анализ совокупности СН-ГРБ и где были представлены параметры мак-

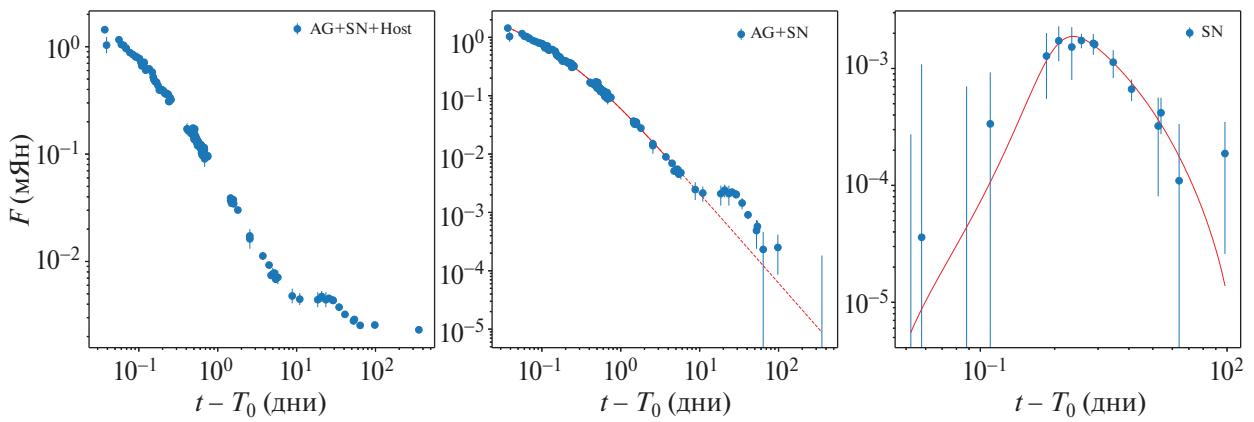


Рис. 2. Пример выделения кривой блеска сверхновой, ассоциированной с гамма-всплеском GRB 090618 в R -фильтре оптического диапазона (Кано и др., 2014). Левый рисунок: общий поток, регистрируемый от источника СН-ГРБ, является суперпозицией вкладов послесвечение (AG), сверхновой (SN) и родительской галактики (Host) после учета поглощения родительской галактики и Млечного Пути. Центральный рисунок: кривая блеска после вычитания вклада родительской галактики. Вычитание может быть как шаблонных изображений без транзента, так и математически. На этом этапе стадия послесвечения аппроксимируется степенной функцией либо степенной функцией с изломом для определения эволюции потока послесвечения во времени. Правый рисунок: после определения модели послесвечения она вычитается из наблюдений, оставляя только поток от сверхновой.

симума СН-ГРБ, была работа Кано и др., 2017б. Из нее было взято 9 гамма-всплесков: GRB 980425, GRB 030329, GRB 031203, GRB 050525A, GRB 060218, GRB 090618, GRB 100316D, GRB 120422A и GRB 130702A. Сверхновые, ассоциированные с данными гамма-всплесками, наблюдались наиболее активно, что позволило получить детальные многоцветные кривые блеска. Однако для наших целей поиска и исследования корреляций необходимо использование наибольшего количества СН-ГРБ, такие только были обнаружены и подтверждены.

Помимо статистически значимых и многоцветных кривых блеска СН-ГРБ, а также тех, которые наблюдались лишь в одном фильтре, существует группа СН-ГРБ, предложенных, но не подтвержденных. Примером таких случаев являются GRB 000911, GRB 991208, GRB 020405, GRB 050416, GRB 100418A, GRB 101225A, где отклонения от степенного затухания послесвечения были замечены лишь на одной фотометрической точке. Например, в случае с GRB 100418A гипотеза о присутствии сверхновой в кривой блеска была выдвинута в одной работе (де Угарте Постиго и др., 2018), в то время как другие исследования (Маршалл и др., 2011; Цзя и др., 2012; Нинно и др., 2012) этого не подтвердили. Доводы в пользу сверхновой строились на отклонении одной точки от послесвечения, что не является значимым доказательством присутствия СН. То есть сверхновая действительно могла быть в кривой блеска гамма-всплеска GRB 100418A, однако статистически подтвердить этого мы не можем. Факт необнаружения яркой сверхновой, ассоциированной с GRB 100418A, может быть связан с селективным эффектом яркой родительской галактики (см. п. 4.3). Эти СН-ГРБ,

несмотря на включение в общие выборки (см., например, Кано и др., 2017б; Аймуратов и др., 2023), не представлены в настоящей работе (табл. 3) из-за недостатка данных для подтверждения сверхновых в их кривых блеска.

Методика определения параметров максимума СН-ГРБ включает стандартные процедуры, примененные к каждому СН-ГРБ в выборке. Как описано в разделе 2, это включает аппроксимацию послесвечения степенным или степенным законом с изломом, определение постоянного вклада родительской галактики и выделение чистой кривой блеска для каждой сверхновой, ассоциированной с гамма-всплеском. Детали процедуры иллюстрируются на рис. 2.

Включение как можно большего числа СН-ГРБ в выборку потребовало работы с ограниченными данными. За все время наблюдения сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками, лишь единицы наблюдались в нескольких фотометрических фильтрах, что позволяло строить болометрические или квазиболометрические кривые блеска (см., например, Вольнова и др., 2017). Поэтому для увеличения выборки и унификации анализа всех СН-ГРБ, вошедших в выборку, было принято решение считать параметры максимума СН-ГРБ в том фильтре, центральная длина волны которого максимально приближена к фильтру V в системе отсчета источника, для вычисления абсолютной звездной величины в максимуме кривой блеска СН-ГРБ. На данном этапе происходит разделение СН-ГРБ на те, у которых такие фильтры есть, и те, у которых нет. Это является одним из двух признаков, которые учитываются при выделении так называемой золотой выборки СН-ГРБ. Схожее деление было использовано в ранних работах по систематиче-

скому анализу СН-ГРБ как класса явлений (см., например, Ван и Уилер, 1998; Зэх и др., 2004; Номото и др., 2006; Бошняк и др., 2006; Биссальди и др., 2007; Делла Валле и др., 2011; Моджаз и др., 2011; Хорт и Блум, 2012; Кано, 2013; Кано и др., 2017б; Ли и др., 2023). Другим требованием для включения СН-ГРБ в “золотую” выборку является подтверждение наличия сверхновой у данного гамма-всплеска в результате спектроскопических наблюдений. На сегодняшний день таких СН-ГРБ насчитывается порядка 29 штук (см. табл. 3). Как итог, с учетом этих двух факторов набирается 19 “золотых” СН-ГРБ.

После определения того, какая кривая блеска СН-ГРБ в каком фильтре нас интересует и после вычитания вклада послесвечение и родительской галактики из общей кривой блеска вместе с учетом поглощения в Млечном пути и родительской галактике, строится кривая блеска только для СН-ГРБ, из которой извлекаются параметры ее максимума. В зависимости от размера и качества наблюдательных данных можно использовать разные аналитические функции для аппроксимации кривой блеска. При наличии множества точек часто используется функция Базина (см. формулу (2), Базин и др., 2011), которая представляет из себя гладкую функцию с экспоненциальными ростом и спадом. Несмотря на то, что экспоненциальные рост и спад имеют под собой физическую природу, сама функция является эмпирической и каких-либо физических параметров сверхновой из нее извлечь нельзя. Также при ее использовании нужно быть внимательным к тому, как описываются “хвосты” сверхновой, так как чем дальше от максимума отходит аппроксимация, тем сильнее она может отличаться от реальной временной эволюции потока, регистрируемого от сверхновой. Для нашей задачи это не является ключевым моментом, так как нас интересует положение максимума СН-ГРБ. Если же наблюдательные данные весьма ограничены и не позволяют однозначно аппроксимировать их функцией Базина, тогда могут быть использованы другие аналитические функции, такие как полином четвертой степени, логнормальное распределение или парабола. В работе Белкин и др. (2021) было показано, что при определении положения максимума и совершенно игнорируя описание “хвостов” СН-ГРБ, все эти функции дают одинаково точный результат. Данный подход использовался в анализе кривых блеска, когда речь заходила о единицах фотометрических точек на кривой блеска СН-ГРБ. Другим подходом к определению положения максимума СН-ГРБ является вписывание “эталонной” кривой блеска сверхновой SN 1998bw, ассоциированной с GRB 980425, в кривую блеска исследуемого СН-ГРБ путем смещения и масштабирования кривой блеска SN 1998bw из-за ее детальной проработки (см., например, Зэх и др., 2004; Станек и др., 2005; Ферреро и др., 2006; Тёне и др., 2011; Кано

и др., 2011, 2013, 2014а, б, 2015; Сюй и др., 2013; Той и др., 2016; Канн и др., 2019; Шринивасарагаван и др., 2024). Однако в работе Белкин и Позаненко (2022) было показано, что ширина на уровне 68% от максимума практически всех СН-ГРБ, как и сами кривые блеска, являются уникальными. В настоящей работе параметры СН-ГРБ извлекались путем рассмотрения каждой из них индивидуально. Результаты данного подхода представлены в табл. 3.

Это позволило построить распределения параметров максимума сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками, и провести их феноменологический анализ с целью поиска корреляций между параметрами и объяснения наблюдаемых зависимостей.

3.2. Распределения СН-ГРБ

В результате обработки наблюдений, включая выделение кривой блеска сверхновой, ассоциированной с гамма-всплеском, была создана выборка из 44 гамма-всплесков. Для всех этих событий признаки сверхновой были подтверждены спектроскопическими и/или фотометрическими наблюдениями. Несмотря на разнообразие источников данных, статистический анализ, включая однофакторный анализ дисперсии (ANOVA) для M_V (0.318, вероятность 0.729) и тест Краскела-Уоллиса для T_{\max} (0.450, вероятность 0.799), не выявил значимых различий между группами. Эти результаты свидетельствуют о том, что различные методы сбора и обработки данных не влияют на ключевые параметры, обеспечивая объективность и надежность наших выводов.

На рис. 3 показана зависимость абсолютной звездной величины максимума СН-ГРБ в фильтре V M_V от времени максимума относительно момента обнаружения гамма-всплеска в системе отсчета источника T_{\max} . “Золотая” выборка включает те сверхновые с гамма-всплесками, для которых было получено спектроскопическое подтверждение и проведены наблюдения сверхновой в фильтре, соответствующем V -фильтру в системе отсчета источника. Эта классификация несколько отличается от “присвоения значимости”, описанной в литературе (см., например, Зэх и др., 2004; Хорт и Блум, 2012), и является проявлением селективных эффектов, связанных с наблюдениями, и никакой подлежащей физики под данным разделением нет. То есть выделение СН-ГРБ связано с рядом критерий, описанных выше, для оценки надежности результата, полученного на полной выборке СН-ГРБ или только на “золотой”. Это подтверждается результатами статистического теста Колмогорова–Смирнова, представленными в табл. 1. Для M_V , T_{\max} , $T_{90,i}$ не существует статистически значимых различий в распределении между “золотой” выборкой и “обычной”. Для E_{iso} кажется, что разделение существует и оно значимое (КС тест: 0.518, вероятность: 0.002), однако данное разделение скорее связано с селектив-

Таблица 1. Результаты теста Колмогорова–Смирнова для “золотой” и обычной подгруппы выборки СН-ГРБ (вероятность указана в скобках)

M_V	T_{\max} , дни	$T_{90,i}$, с	$E_{\text{iso}} 10^{51}$, эрг	$E_{p,i}$, кэВ	Красное смещение
0.167 (0.835)	0.167 (0.835)	0.167 (0.835)	0.518 (0.002)	0.465 (0.008)	0.551 (0.001)

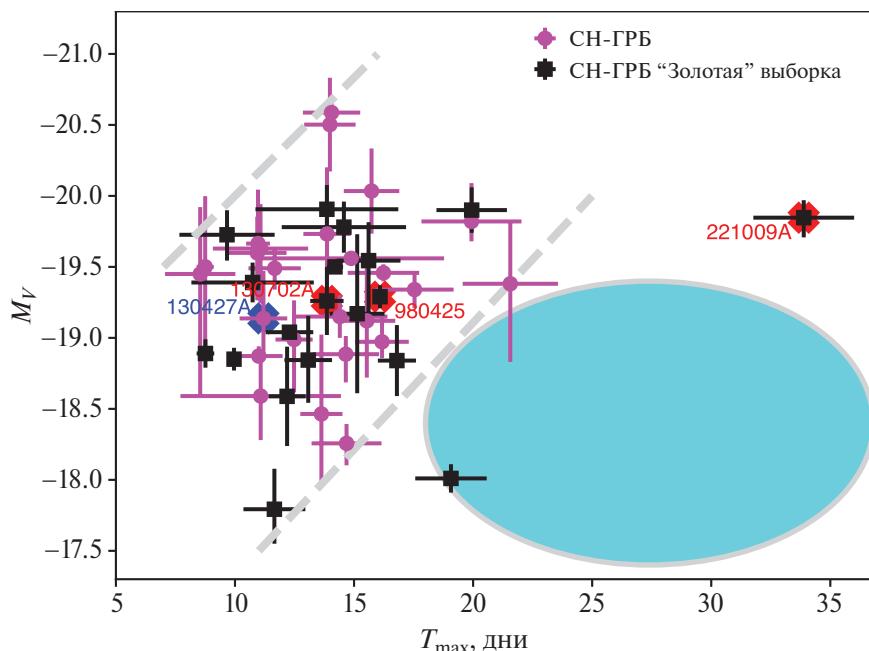


Рис. 3. Распределение сверхновых, связанных с гамма-всплесками, по времени максимума сверхновой (с момента обнаружения всплеска в системе отсчета источника) T_{\max} и абсолютной звездной величине максимума сверхновой в V -фильтре M_V . Две серые пунктирные линии указывают на тренд поведения большинства СН-ГРБ. “Золотые” СН-ГРБ наблюдались в фильтре, соответствующем V -фильтру в системе отсчета источника, и также были подтверждены спектроскопическими наблюдениями. Голубой овал выделяет “пустой” угол, который может быть связан с селективным эффектом, обусловленным непрозрачностью выбросов СН-ГРБ.

ными эффектами яркого послесвещения и/или того, с какого расстояния произошел гамма-всплеск, нежели с физическими причинами (см. пп. 4.2 и 4.1). Анализ распределения красного смещения показывает, что СН-ГРБ “золотой” выборки в среднем находятся ближе, чем те, что входят в обычную выборку, что подтверждает сложности в регистрации и подтверждении (фотометрического и спектроскопического сверхновых) на больших расстояниях (рис. 4). Аналогичная ситуация наблюдается с $E_{p,i}$, где статистические тесты указывают на различия, хотя они могут быть вызваны селективными эффектами, не имеющими физического обоснования. Эти и другие селективные эффекты подробно обсуждаются в разделе 4.

Отличие нашего подхода к анализу СН-ГРБ и выделению “золотой” выборки заключается в стремлении использовать как можно большее количество сверхновых с гамма-всплесками для выявления зависимостей. Одна из таких зависимостей визуально была обнаружена в распределении M_V-T_{\max} , показанном на рис. 3. Можно заметить, что большинство СН-ГРБ находятся между двумя серыми пунктирными линиями и, в среднем, показывают большую светимость с увеличением времени наступления максимума. Одна-

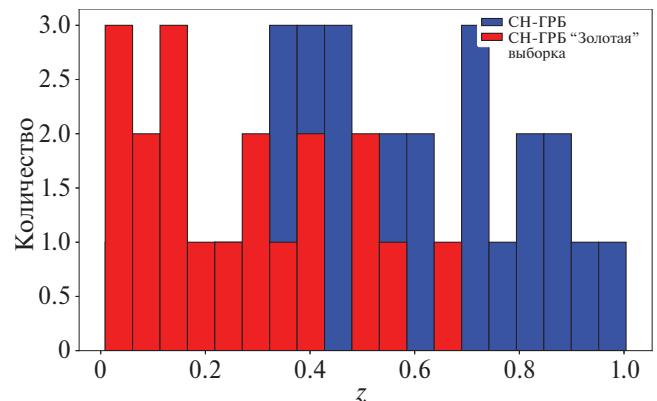


Рис. 4. Гистограмма сверхновых, связанных с гамма-всплесками, по красному смещению z . Наличие большего числа СН-ГРБ “золотой” выборки в области меньших значений z и наоборот продиктовано селективным эффектом, связанным с геометрией сверхновых и гамма-всплесков (см. текст).

ко стоит обратить внимание на голубой овал на графике, где практически нет СН-ГРБ, что также может быть проявлением селективного эффекта, так как мы

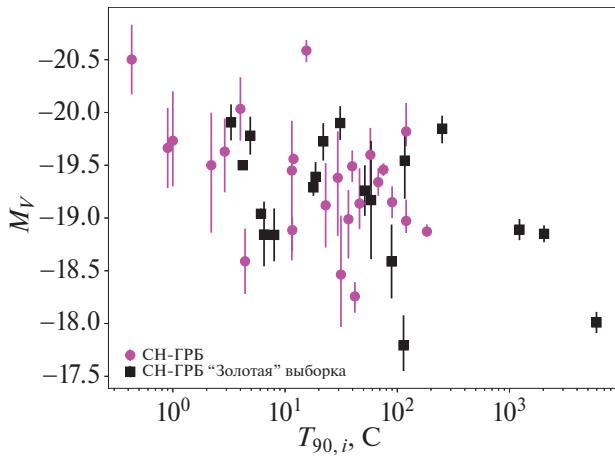


Рис. 5. Распределение сверхновых, связанных с гамма-всплесками, по абсолютной звездной величине максимума сверхновой в V -фильтре M_V и временному параметру регистрации излучения $T_{90,i}$.

просто не видим сверхновые от гамма-всплесков на больших расстояниях.

Данная выборка, включающая наибольшее количество СН-ГРБ с определенными временем и амплитудой максимума, позволяет также исследовать корреляции между параметрами максимума СН-ГРБ и характеристиками собственного излучения гамма-всплесков. К ним относятся время, за которое регистрируется 90% излучения $T_{90,i}$, общее количество энергии, излученное в гамма-диапазоне, если предположить, что излучение распространяется изотропно E_{iso} и энергия, соответствующая максимуму спектральной плотности энергии $E_{p,i}$. Информация по этим параметрам была взята преимущественно из работы Минаева и Позаненко (2020), представляющей наиболее полный каталог этих параметров для гамма-всплесков на начало 2019 г. Данные за период после 2019 г. были дополнены из источников, указанных в табл. 4. Распределения $M_V - T_{90,i}$, $M_V - E_{\text{iso}}$, $M_V - E_{p,i}$, $M_V - z$, $T_{\max} - T_{90,i}$, $T_{\max} - E_{\text{iso}}$, $T_{\max} - E_{p,i}$, $T_{\max} - z$ показаны на рис. 5–12 соответственно.

В рамках исследования был проведен корреляционный анализ между параметрами максимума сверхновых (M_V , T_{\max}) и параметрами собственного излучения гамма-всплесков ($T_{90,i}$, E_{iso} , $E_{p,i}$), а также красным смещением z . Результаты, включая значения коэффициентов ранговой корреляции Спирмена и соответствующие вероятности, собраны в табл. 2. Анализ показал, что между распределениями $M_V - \log_{10}(T_{90,i})$, $M_V - \log_{10}(E_{\text{iso}})$, $M_V - \log_{10}(E_{p,i})$, $M_V - z$, $T_{\max} - \log_{10}(T_{90,i})$, $T_{\max} - \log_{10}(E_{\text{iso}})$, $T_{\max} - \log_{10}(E_{p,i})$, $T_{\max} - z$ значимых корреляций обнаружено не было.

Визуальная инспекция диаграммы $M_V - \log_{10}(E_{\text{iso}})$ показала слабые намеки на возможное разделение гамма-всплесков на две группы. Для проверки этой гипотезы был использован метод кластеризации

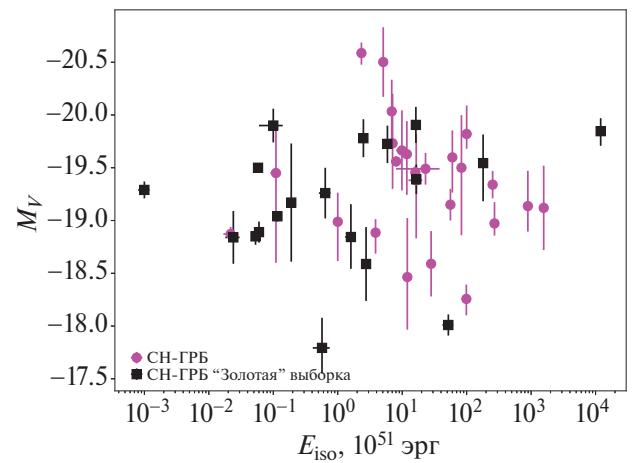


Рис. 6. Распределение сверхновых, связанных с гамма-всплесками, по абсолютной звездной величине максимума сверхновой в V -фильтре M_V и изотропному эквиваленту энергии E_{iso} .

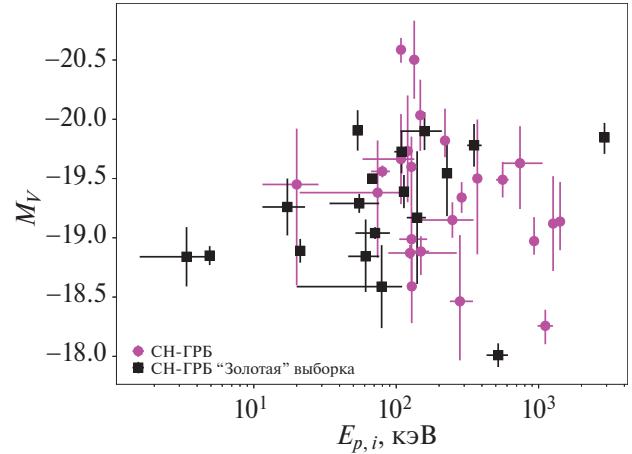


Рис. 7. Распределение сверхновых, связанных с гамма-всплесками, по абсолютной звездной величине максимума сверхновой в V -фильтре M_V и пиковой энергии $E_{p,i}$.

DBSCAN, который не ограничен круглыми или сферическими формами кластеров, что позволяет находить кластеры сложной формы, которые могут быть связаны по плотности, но имеют неправильные контуры. Также DBSCAN эффективно различает шум и выбросы, отделяя их от основных кластеров. Данные были предварительно очищены, логарифмированы и стандартизированы. Кластеризация с использованием косинусной метрики (с параметрами радиуса $\epsilon = 0.3$ и минимального количества точек для кластера, равного 11) выявила два основных кластера и отдельную группу шума, что подчеркивает потенциальные различия в физических свойствах групп. Результаты показали, что Кластер 0 включает 18 ГРБ, кластер 1 содержит 24 ГРБ, а два ГРБ (GRB 050525A, GRB 011121) были классифицированы как шум (рис. 13). Для оценки качества кластеризации ис-

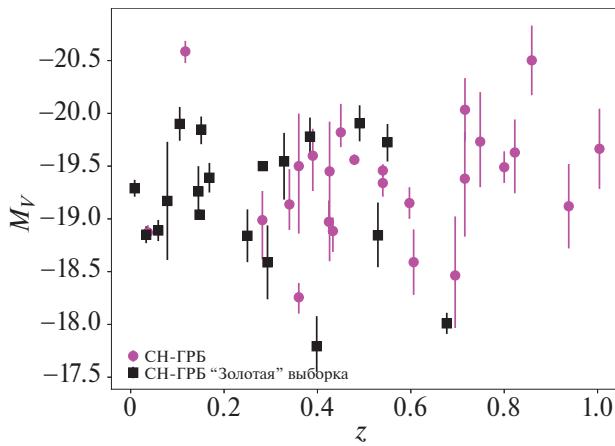


Рис. 8. Распределение сверхновых, связанных с гамма-всплесками, по абсолютной звездной величине максимума сверхновой в V -фильтре M_V и красному смещению z .

пользовалась метрика силуэта, показывающая как близко объекты расположены внутри кластеров и как четко кластеры разделены друг от друга. После исключения шума, значение силуэта составило 0.442. Это указывает на умеренно хорошее разделение и внутрикластерное сгущение, что делает результаты DBSCAN достаточно удовлетворительными для данного набора данных.

Несмотря на разделение распределения $M_V - E_{\text{iso}}$ на два возможных подкласса, текущая кластеризация требует дополнительной настройки параметров. Для проверки данного результата воспользуемся методом K-means, алгоритмом кластеризации, который пытается минимизировать вариацию внутри кластеров и максимизировать вариацию между кластерами, разделяя данные на заданное число кластеров с использованием итеративного подхода. Данные были логарифмированы по E_{iso} и нормализованы. Начальные центры кластеров были определены на основе медиан значений в нормализованном пространстве ((-0.72;

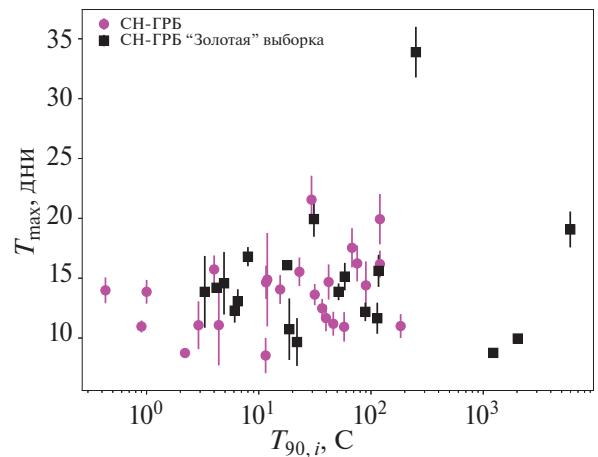


Рис. 9. Распределение сверхновых, связанных с гамма-всплесками, по времени наступления максимума сверхновой относительно времени регистрации гамма-всплеска в системе отсчетов источника T_{\max} и временному параметру регистрации излучения $T_{90,i}$.

0.71) и (0.60; -0.59)). Количество итераций с различными случайными начальными положениями центров и параметр для воспроизведимости результатов путем задания зерна генерации случайных чисел были заданы равными 1 и 0 соответственно. Метод K-means подтвердил начальную гипотезу о наличии двух групп. Итоговые центры кластеров в ненормированном пространстве находятся в координатах: для кластера 0 (4.68×10^{50} эрг; $-18.87''$) и для кластера 1 (3.79×10^{52} эрг; $-19.62''$). Результаты, визуализированные на рис. 13, показывают четкое разделение, согласующееся с предыдущими результатами DBSCAN. С метрикой силуэта 0.416, K-means показывает схожее качество кластеризации с DBSCAN, что указывает на адекватное, но не идеальное разделение данных. Это разделение предполагает наличие потенциально различных типов событий в наблюдаемых данных. Тем

Таблица 2. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и вероятности случайных корреляций (в скобках)

	M_V	T_{\max} , дни	$T_{90,i}$, с	E_{iso} , 10^{51} эрг	$E_{p,i}$, кэВ	Красное смещение
T_{\max} , дни				0.199 (0.205)	0.218 (0.165)	0.292 (0.061) 0.058 (0.710) 0.102 (0.517) ^a
M_V	-0.104 (0.511) -0.138 (0.382) ^a	0.408 (0.006) 0.270 (0.096) ^a		-0.132 (0.395)	-0.049 (0.760)	-0.049 (0.760)
				Кластер 0 ^b 0.564 (0.010) 0.521 (0.022) ^a	Кластер 1 ^b 0.620 (0.001) 0.766 (2×10^{-5}) ^a	

^a Коэффициент корреляции и вероятность были рассчитаны с отбрасыванием крайних точек выборки (см. текст);

^b Кластеры были определены, как показано на рис. 13.

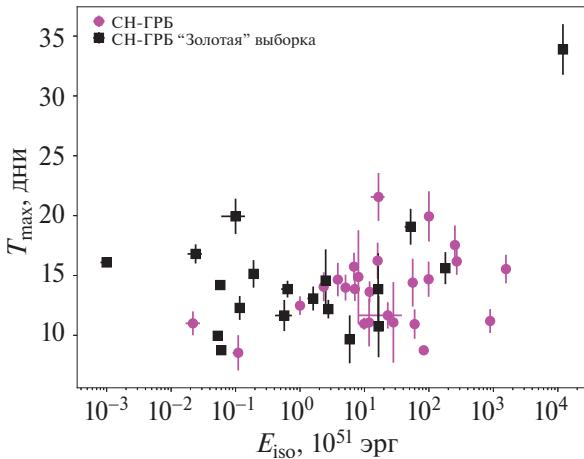


Рис. 10. Распределение сверхновых, связанных с гамма-всплесками, по времени наступления максимума сверхновой относительно времени регистрации гамма-всплеска в системе отсчета источника T_{\max} и изотропному эквиваленту энергии E_{iso} .

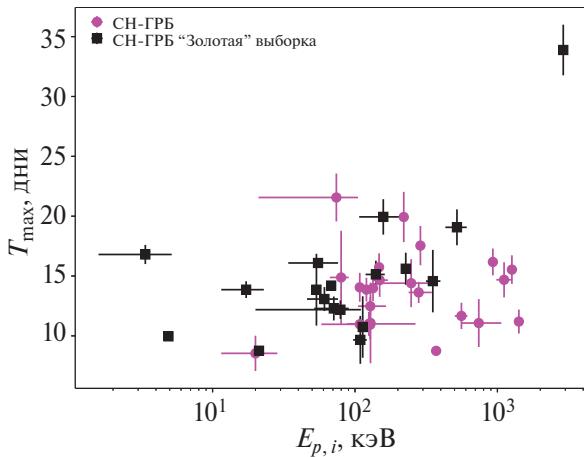


Рис. 11. Распределение сверхновых, связанных с гамма-всплесками, по времени наступления максимума сверхновой относительно времени регистрации гамма-всплеска в системе отсчетов источника T_{\max} и пиковой энергии $E_{p,i}$.

не менее для повышения статистической достоверности результатов требуется дополнительное увеличение выборки, что может помочь уточнить характеристики кластеров и подтвердить или опровергнуть начальные выводы.

Для дополнительной проверки результатов кластеризации был применен метод модели гауссовых смесей (Gaussian Mixture Model, GMM). Этот метод подходит для анализа распределения $M_V - E_{\text{iso}}$, состоящего из нескольких подгрупп, благодаря его способности моделировать разные статистические характеристики. Используя GMM, мы настроили модель на выделение двух подгрупп, предварительно зная желаемое количество кластеров. Однако GMM оказался чувствителен к выбросам, таким как GRB 980425 и GRB 221009A, с экстремальными значениями E_{iso}

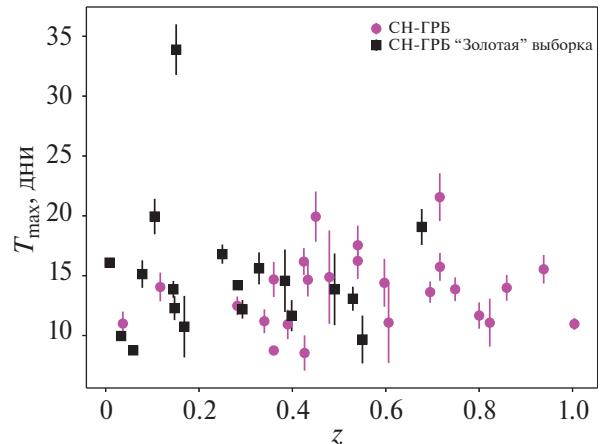


Рис. 12. Распределение сверхновых, связанных с гамма-всплесками, по времени наступления максимума сверхновой относительно времени регистрации гамма-всплеска в системе отсчета источника T_{\max} и красному смещению z .

(10^{51} эрг и 1.2×10^{55} эрг соответственно). После исключения этих выбросов метод с двумя компонентами и инициализацией случайным начальным состоянием (`random_state = 0`) четко разделил данные на два кластера, что подтвердило возможность разделения без учета аномальных значений. Результаты, представленные на правой панели рис. 13, совпадают с предыдущими методами DBSCAN и K-means, подтверждая визуальные ожидания по распределению. Метрика силуэта для оценки кластеризации GMM показала среднее значение 0.421, что указывает на четкое разграничение между кластерами и высокую однородность внутри каждого из них. Эти результаты, несмотря на необходимость исключения выбросов, подтверждают консистентность всех трех методов, поскольку значения силуэтов для DBSCAN и K-means составили 0.442 и 0.416 соответственно, демонстрируя сопоставимую надежность в разделении и качестве кластеров.

Однако само значение метрики силуэта может не совсем однозначно подтверждать полученный результат и отбросить вероятность того, что данная кластеризация была случайностью. Используем результаты кластерного анализа методом K-means для оценки статистической значимости результатов кластеризации путем моделирования Монте-Карло. Рассматривается K-means метод, поскольку он не требует отбрасывания выбросов и позволяет включить в анализ всех 44 СН-ГРБ из нашей выборки. Моделирование включало 1 000 000 перестановок меток кластеров, что позволило сравнить значение метрики силуэта оригинальной кластеризации (0.416) с результатами симуляций. Получаемая вероятность 0.0 указывает на высокую статистическую значимость исходного результата. Анализ показал, что оригинальное значение силуэта существенно выше любого значения,

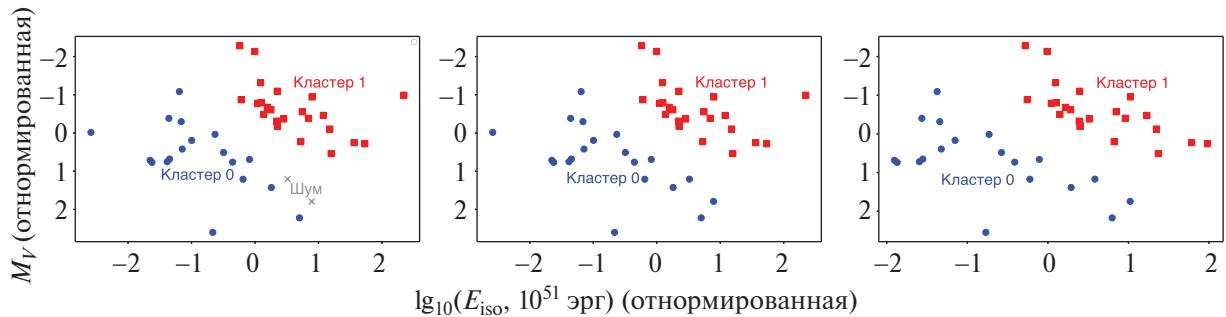


Рис. 13. Сравнение результатов трех методов кластеризации для анализа распределения СН-ГРБ по параметрам абсолютной звездной величины максимума сверхновой в V -фильтре M_V и логарифма изотропного эквивалента энергии $\log_{10}(E_{\text{iso}})$. Левая панель: кластеризация методом DBSCAN. Синими кругами показан кластер 0, состоящий из 18 СН-ГРБ. Красными квадратами показан кластер из 24 СН-ГРБ. Серыми крестами показаны СН-ГРБ, которые были идентифицированы как шум. Центральная панель: кластеризация методом K-means. Правая панель: кластеризация методом гауссовых смесей (Gaussian Mixture Model (GMM)). В данном методе были исключены два выброса (GRB 980425, GRB 221009A) по параметру $\log_{10}(E_{\text{iso}})$. Все методы показывают схожее разделение распределения $M_V - \log_{10}(E_{\text{iso}})$ на две подгруппы.

полученного в ходе симуляций, с вероятностью достижения такого результата, равной 0.0. Это указывает на высокую статистическую значимость исходных результатов. Распределение значений силуэта из симуляций показало, что наиболее вероятные значения приходятся на окрестности нуля, что подтверждает невозможность случайного достижения аналогичного уровня силуэта, как в исходной кластеризации. Такие же статистически значимые результаты получены при симуляциях для методов DBSCAN и GMM. В случае DBSCAN два СН-ГРБ были классифицированы как шум, а в случае GMM два СН-ГРБ были исключены как выбросы. Это дополнительно подтверждает предположение о наличии двух выраженных подклассов в распределении абсолютных звездных величин максимумов сверхновых (M_V) и изотропных эквивалентов энергии (E_{iso}) гамма-всплесков, соответствующим ожиданиям и результатам предыдущих методов кластеризации.

Как показано в корреляционном анализе всей выборки $M_V - \log_{10}(E_{\text{iso}})$, коэффициент Спирмена составил -0.132 с вероятностью 0.395 (см. табл. 2). Однако, учитывая предполагаемое наличие двух подгрупп в данных, был проведен отдельный корреляционный анализ для каждого кластера. Для кластера 0 (рис. 13) коэффициент Спирмена составил 0.564 с вероятностью 0.010 , указывая на умеренную положительную корреляцию. После исключения выбросов этот коэффициент изменился до 0.521 с вероятностью 0.022 , что подтверждает наличие умеренной корреляции. В кластере 1 (рис. 13) начальный коэффициент Спирмена достиг 0.620 с вероятностью 0.001 , что свидетельствует о более выраженной положительной корреляции. Без учета выбросов коэффициент увеличился до 0.766 , а вероятность уменьшилась до 2×10^{-5} , подчеркивая значительное укрепление корреляционной связи. Эти результаты демонстрируют, что характер корреляции значительно изменяется при анализе отдель-

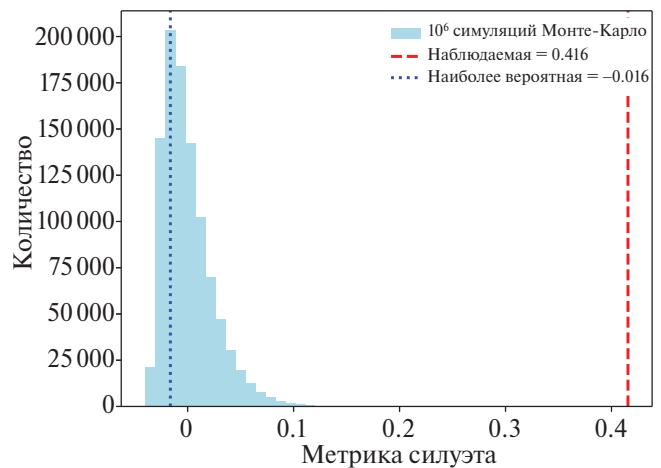


Рис. 14. Результаты моделирования Монте-Карло результатов кластеризации методом K-means выборки СН-ГРБ по параметрам абсолютной звездной величины максимума сверхновой в V -фильтре M_V и логарифма изотропного эквивалента энергии $\log_{10}(E_{\text{iso}})$. Число симуляций 1 000 000. Точечной вертикальной линией показано наиболее вероятное значение метрики силуэта, получаемое из данного распределения, равное -0.016 . Можно отметить, что среднее значение по всему распределению равняется 1.741×10^{-4} . Пунктирная вертикальная линия обозначает значение метрики силуэта для результатов кластерного анализа, показанного на центральной панели рис. 13.

ных кластеров, что подтверждает предположение о наличии двух гомогенных групп в распределении $M_V - \log_{10}(E_{\text{iso}})$. Для окончательного подтверждения наличия этих групп и уточнения их характеристик необходимо увеличение выборки СН-ГРБ.

Из диаграммы M_V относительно красного смещения (z ; рис. 8) видно, что более 64% сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками, были зарегистрированы на красном смещении меньше $z \lesssim 0.5$, и почти 90% всех наблюдений приходятся на красное смещение меньше $z \lesssim 0.8$. Это подчеркивает, что если гамма-

всплеск обнаружен в данном диапазоне красных смещений, целесообразно организовать наблюдения для поиска потенциальной ассоциированной сверхновой, что может значительно увеличить шансы на успешное наблюдение и обнаружение СН-ГРБ и увеличение их выборки для более точного статистического анализа.

Распределение $M_V - T_{\max}$ (рис. 3) также не позволяет подтвердить наличие корреляции между параметрами максимума СН-ГРБ (см. табл. 2). Визуальный анализ графика $M_V - T_{\max}$ может создавать впечатление наличия тренда из-за упорядоченности данных. Однако статистический анализ не подтверждает значимой взаимосвязи между этими параметрами. Это может быть вызвано большим разбросом данных, ошибками измерений или особенностями распределения, которые маскируют возможные тенденции. Исходя из предположения о селективном эффекте, мы ожидали, что более яркие сверхновые (с меньшими значениями M_V) будут чаще наблюдаться при более коротких значениях T_{\max} . Однако даже после исключения двух явных выбросов (GRB 111209A и GRB 221009A) корреляция не стала более значимой, что может указывать на недостаточную статистическую мощность выборки, шум в данных или сложные взаимодействия между параметрами, которые не объясняются только селективным эффектом. Можно предположить, что влияние селективного эффекта нивелируется другими факторами, такими как неоднородность выборки или недостаточность данных для формирования надежных выводов. Для уточнения этих результатов требуется дальнейшее увеличение выборки СН-ГРБ и учет различных селективных эффектов, начиная от организации наблюдений гамма-всплеска до оценки параметров связанных с ним сверхновых.

4. СЕЛЕКТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Из более чем 13 000 зарегистрированных на сегодняшний день гамма-всплесков в гамма-диапазоне считается, что всего около 44 имеют связь со сверхновыми. Отчасти это можно объяснить тем, что сверхновые обнаруживаются у близких гамма-всплесков. Максимально далекий гамма-всплеск, от которого была зарегистрирована СН, находится на расстоянии, эквивалентном красному смещению $z = 1.06$. Однако было обнаружено более 204² гамма-всплесков с красным смещением $z \lesssim 1$. Это означает, что не для всех близких длинных гамма-всплесков удается обнаружить СН. Причиной этого может быть ряд селективных эффектов, рассматриваемых далее.

4.1. Расстояние до источника

Из-за геометрии изучаемых явлений, гамма-всплески наблюдаются в оптическом диапазоне с больших расстояний по сравнению со сверхновыми.

²<https://www.mpe.mpg.de/jcg/grbgen.html>

Это различие возникает потому, что сверхновая излучает свет в полный телесный угол, в то время как гамма-всплеск излучает только в пределах определенного конуса. Это различие становится критичным на больших расстояниях: если ГРБ происходит с красным смещением $\gtrsim 1$, шансы обнаружить сверхновую резко снижаются по сравнению с ГРБ, происходящими ближе ($\lesssim 0.5$). На больших красных смещениях свет от сверхновой может быть едва заметен на фоне послесвечения гамма-всплеска и родительской галактики. Это делает выделение сверхновой на кривой блеска ГРБ сложным и мешает формированию статистически надежных выводов о ее обнаружении. В таких условиях вклад сверхновой в общую кривую блеска может стать неотличимым, что приводит к ее невозможности обнаружения. Примером такой ситуации является сверхновая, ассоциированная с GRB 071112C, имеющая красное смещение $z = 0.812$, изображение которой представлено на рис. 15 (Клозе и др., 2019).

Мы замечаем некоторый избыток излучения на 10–30 дней после гамма-всплеска. Однако после вычитания вкладов от послесвечения и родительской галактики результаты становятся неопределенными, что затрудняет точную оценку максимума кривой блеска сверхновой.

Этот случай является примером того, как сложно иногда обнаружить сверхновые на фоне гамма-всплесков из-за большого расстояния и других факторов, таких как яркое послесечение и влияние родительской галактики. Такие условия могут существенно исказить результаты и сделать их интерпретацию проблематичной.

4.2. Послесечение

Даже если гамма-всплеск происходит на относительно небольшом расстоянии от Земли, идентификация сверхновой в его кривой блеска может быть затруднена. Это обусловлено тем, что послесечение гамма-всплеска часто доминирует над светимостью сверхновой, особенно когда наблюдение ведется строго вдоль оси гамма-всплеска (on-axis), где излучение послесечения максимально интенсивно. В таких условиях даже после вычитания вклада послесечения кривая блеска сверхновой остается едва различимой. Тем не менее, из-за ограниченности выборки СН-ГРБ и отсутствия посчитанных углов раскрытия и наблюдения, сделать окончательные выводы пока преждевременно.

4.3. Родительская галактика

Как упоминалось в п. 4.2, яркость родительской галактики может существенно влиять на обнаружение сверхновой. Это может быть обусловлено особенностями морфологии галактики или ее ориентацией относительно наблюдателя. В результате, яркая родительская галактика может уменьшать вероятность

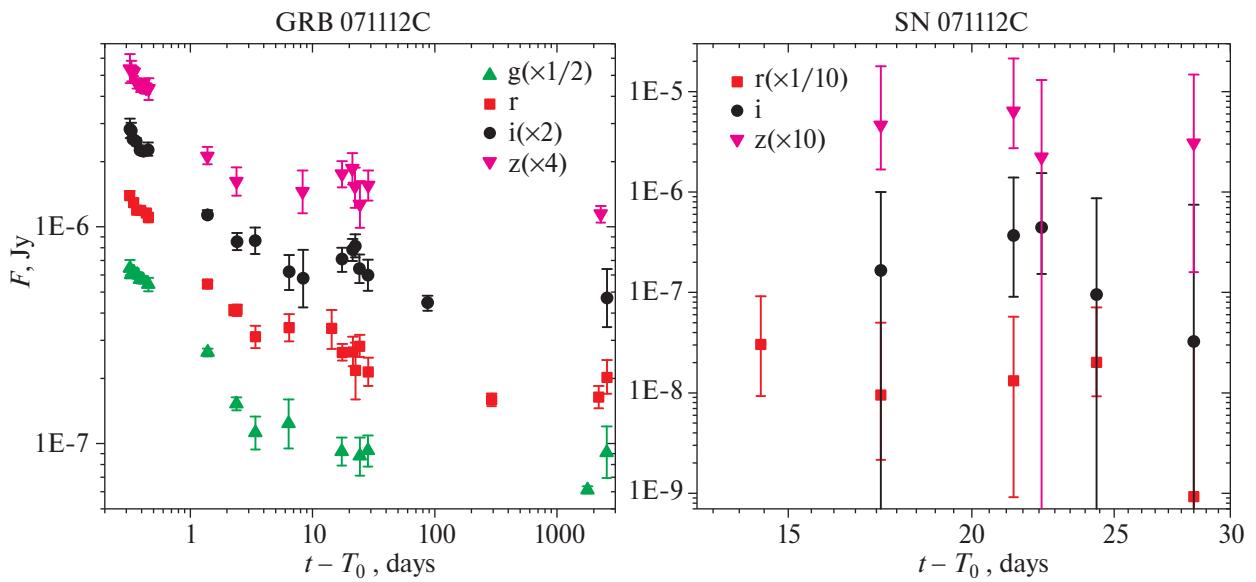


Рис. 15. Кривая блеска GRB 071112C. По вертикальной оси отложена плотность потока. По горизонтальной – время, прошедшее с момента обнаружения гамма-всплеска до середины экспозиции наблюдения. Различные фотометрические фильтры были смещены вдоль вертикальной оси для наглядности кривой блеска.

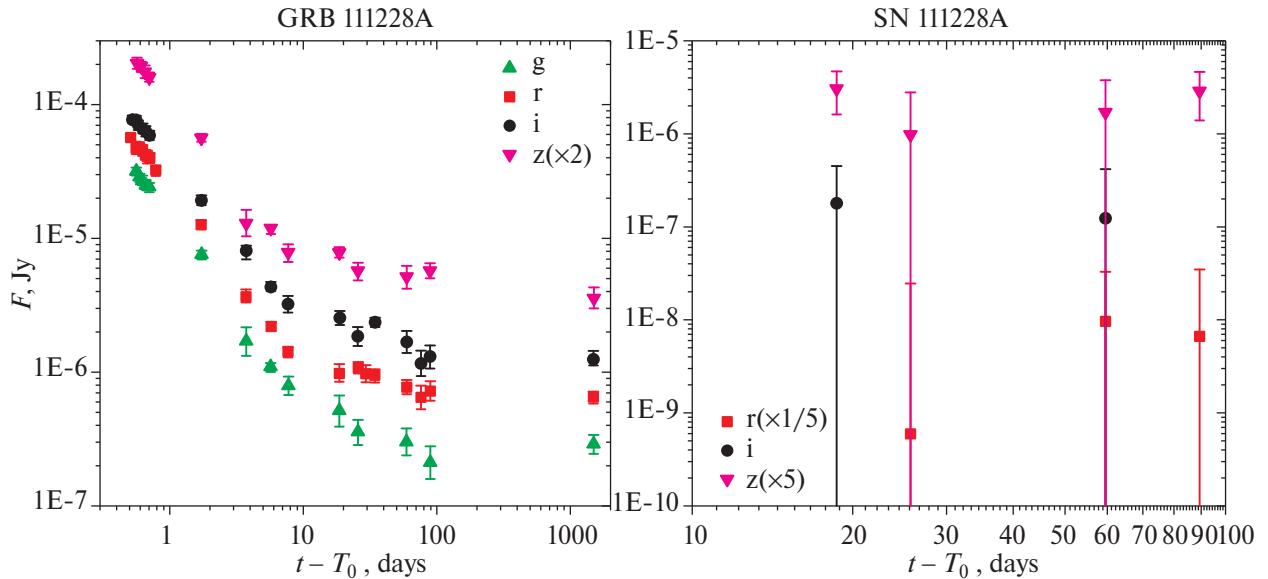


Рис. 16. Кривые блеска GRB 111228A (левая панель) и сверхновой, связанной с GRB 111228A (правая панель). Плотность потока отображена по вертикальной оси, а время с момента регистрации гамма-всплеска до середины экспозиции его наблюдения – по горизонтальной оси. Некоторые фильтры были смещены вдоль вертикальной оси для наглядности кривой блеска.

не только обнаружения, но и последующих наблюдений сверхновой. Это приводит к ситуации, когда после вычитания вклада потока галактики, остающаяся кривая блеска сверхновой может оказаться слишком слабой или даже неразличимой для дальнейшего анализа и определения ее параметров.

Примером такого селективного эффекта от яркого послесвечения и родительской галактики является сверхновая, ассоциированная с GRB 111228A (Клозе и др., 2019), где эти условия затруднили анализ.

На общей кривой блеска GRB 111228A (рис. 16) наблюдается значительное увеличение потока, которое происходит на фоне степенного уменьшения интенсивности послесвечения и стабильного вклада от родительской галактики. Поскольку на данном этапе кривой блеска нет других потенциальных источников энергии, это увеличение было интерпретировано как вклад сверхновой. Однако после вычитания вкладов от послесвечения и родительской галактики, оставшаяся кривая блеска сверхновой оказывает-

ся недостаточно выраженной для дальнейшего значимого анализа.

4.4. Поглощение в родительской галактике

Еще одним фактором, затрудняющим обнаружение сверхновой на кривой блеска гамма-всплеска, является сильное поглощение света в родительской галактике ГРБ. Разные фотометрические фильтры подвержены поглощению в различной степени, и в некоторых случаях поглощение в фильтре, используемом для наблюдений, может быть настолько значительным, что фактически блокирует обнаружение сверхновой, ассоциированной с данным ГРБ.

Сложность анализа кривой блеска гамма-всплеска часто усугубляется тем, что в момент наблюдений параметры родительской галактики обычно остаются неизвестными. Это делает предварительное предсказание степени поглощения света затруднительным, что вносит трудности в анализ. Для минимизации влияния значительного поглощения света рекомендуется проводить наблюдения одновременно в нескольких фотометрических фильтрах. Это позволяет сравнить данные и выбрать наиболее подходящие для анализа, учитывая различную чувствительность каждого фильтра. Зачастую используют фильтры системы Джонсона–Кузинса *R* и SDSS *r*.

4.5. Положение источника в родительской галактике

Локализация источника в родительской галактике может существенно влиять на возможность обнаружения сверхновой. Исследование Шо (1979) показало, что сверхновые, наблюдаемые на периферии галактик, обнаруживаются с большей вероятностью по сравнению с теми, что расположены ближе к галактическому ядру. Это объясняется снижением вероятности обнаружения сверхновых в плотно заселенных внутренних регионах далеких галактик, где наблюдения осложнены из-за плохой разрешающей способности. В случае родительских галактик ГРБ-СН, которые часто находятся на расстояниях сотен–тысяч мегапарсек, неразрешимость и наложение на изображения ГРБ-СН становятся значительной проблемой.

Примером может служить гамма-всплеск GRB 190829A и связанная с ним сверхновая. Оптическое изображение, сделанное с Майданакской астрофизической обсерватории (МАО; Егамбердиев и др., 2000), демонстрирует расположение источника на краю галактики (рис. 17). Если бы сверхновая находилась примерно на 4 угловые секунды ближе к центру галактики, ее обнаружение было бы значительно усложнено, что могло бы повлиять на точность определения параметров связанной с ней СН-ГРБ.

Частично этот селективный эффект можно уменьшить путем вычитания шаблонного изображения (см., например, Алард и Люптон, 1998; Алард, 2000; Бекер, 2015) того же поля без транзиента. Однако это вводит дополнительные трудности. Во-первых, по-

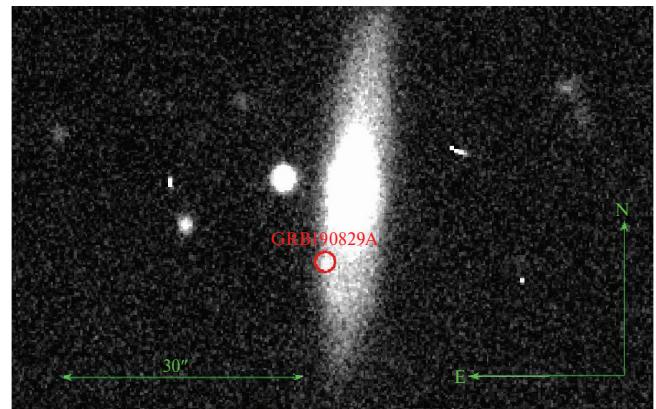


Рис. 17. Положение источника GRB 190829A и связанной с ним сверхновой в родительской галактике. Изображение было получено с помощью 1.5-метрового телескопа AZT-22 Майданакской астрофизической обсерватории примерно через 5 дней после обнаружения гамма-всплеска.

скольку само небо переменчиво, точное вычитание требует актуальных изображений области неба. Регулярный мониторинг всего неба осуществим только с помощью роботизированных телескопов (см. например, Липунов и др., 2004; Бэллм и др., 2019; Стигс и др., 2022), которые могут обеспечить свежие шаблоны за счет широких полей локализации и регулярного покрытия всего неба с частотой в несколько дней. Тем не менее их предельная звездная величина обычно ограничивается значениями около ~ 20.5 – 21.0 , что делает их менее эффективными для наблюдения тусклых сверхновых, связанных с гамма-всплесками, часто достигающих 22-й и более глубоких звездных величин в фильтре *R*. В то время как телескопы класса метра имеют возможность заглянуть глубже, они сталкиваются с нехваткой актуальных шаблонов и необходимостью значительного наблюдательного времени из-за их узкого поля зрения. Кроме того, использование сети телескопов, такой как IKI GRB-FuN (Вольнова и др., 2021), включающей аппараты с различными характеристиками и расположениями, усложняет процесс вычитания из-за разнообразия получаемых данных. Соответственно, любое вычитание становится на порядок сложнее из-за всех неоднородностей по сравнению с вычитанием из изображений, полученных на одном телескопе.

4.6. Нерегистрация гамма-всплеска

Другой селективный фактор, влияющий на возможность обнаружения сверхновой, ассоциированной с гамма-всплеском, – это наша способность обнаруживать сами гамма-всплески. Без знания о происшествии гамма-всплеска невозможно обнаружить связанную с ним сверхновую.

За последние десятилетия гамма-всплески преимущественно обнаруживались с помощью космических обсерваторий Свифт и Ферми. Свифт оснащен ин-

Таблица 3. Выборка СН-ГРБ. Характеристики СН

GRB	SN	z	Фильтр ^a	M_V^*	T_{\max}^{**} (дни)	Источник
970228		0.695	I_c	$-18.46^{+0.50}_{-0.56}$	$13.63^{+0.89}_{-0.86}$	[1], [2]
980425 ^c	1998bw	0.0085	V^Φ	-19.29 ± 0.08	16.09 ± 0.18	[3]
990712		0.433	R	$-18.89^{+0.20}_{-0.13}$	14.65 ± 1.40	[4]
011121 ^c	2001ke	0.362	R	$-18.26^{+0.16}_{-0.14}$	14.68 ± 1.47	[5], [6]
020903 ^c		0.25	R^Φ	-18.84 ± 0.25	16.80 ± 0.80	[7]
021211 ^c	2002lt	1.006	R	-19.66 ± 0.38	10.97 ± 0.50	[8]
030329 ^c	2003dh	0.1685	R^Φ	-19.39 ± 0.14	10.74 ± 2.57	[3]
031203 ^c	2003lw	0.1005	R^Φ	-19.90 ± 0.16	19.94 ± 1.48	[3]
040924		0.859	z	-20.50 ± 0.33	13.99 ± 1.08	[9]
041006		0.716	z	-20.03 ± 0.30	15.73 ± 1.17	[9]
050525A ^c	2005nc	0.606	R	-18.59 ± 0.31	11.08 ± 3.37	[3], [10]
060218 ^c	2006aj	0.033	R^Φ	-18.85 ± 0.08	9.96 ± 0.18	[3], [11], [12]
060729		0.54	I	-19.46 ± 0.06	16.23 ± 1.50	[13]
071112C		0.823	z	$-19.63^{+0.39}_{-0.31}$	11.07 ± 2.00	[14]
080319B		0.937	z	-19.12 ± 0.40	15.54 ± 1.20	[15]
081007 ^c	2008hw	0.530	I^Φ	-18.84 ± 0.30	13.08 ± 1.00	[16], [17]
090618		0.540	i	-19.34 ± 0.13	17.54 ± 1.64	[13]
091127 ^c	2009nz	0.490	I^Φ	-19.91 ± 0.17	13.86 ± 3.00	[17], [18]
100316D ^c	2010bh	0.059	R^Φ	-18.89 ± 0.10	8.76 ± 0.37	[3]
101219B ^c	2010ma	0.552	i^Φ	$-19.73^{+0.18}_{-0.17}$	11.82 ± 2.00	[17]
111209A ^c	2011kl	0.677	z^Φ	-18.01 ± 0.10	19.07 ± 1.50	[19]
111228A		0.716	z	$-19.38^{+0.55}_{-0.44}$	21.56 ± 2.00	[14]
120422A ^c	2012bz	0.283	i^Φ	-19.50 ± 0.03	14.20 ± 0.34	[3], [20]
120714B ^c	2012eb	0.398	i^Φ	$-17.79^{+0.24}_{-0.29}$	11.66 ± 1.30	[14]
120729A		0.800	i	-19.49 ± 0.15	11.67 ± 1.10	[21]
130215A ^c	2013ez	0.597	i	-19.15 ± 0.15	14.40 ± 2.00	[21]
130427A ^c	2013cq	0.340	r	$-19.14^{+0.24}_{-0.33}$	11.20 ± 1.00	[22]
130702A ^c	2013dx	0.145	r^Φ	-19.26 ± 0.24	13.86 ± 0.70	[3], [23], [24], [25]
130831A ^c	2013fu	0.479	i	-19.56 ± 0.05	14.88 ± 3.90	[21]
140606B ^c	iPTF14bfu	0.384	i^Φ	-19.78 ± 0.18	14.57 ± 2.61	[26]
150818A		0.282	R	$-19.34^{+0.37}_{-0.28}$	12.48 ± 0.78	[27], [28], Собственные данные
161219B ^c	2016jca	0.148	r^Φ	-19.04 ± 0.05	12.29 ± 1.00	[29]
171010A ^c	2017htp	0.330	i^Φ	$-19.54^{+0.36}_{-0.27}$	15.61 ± 1.33	[30]
171205A ^c	2017iu	0.037	R	-18.87 ± 0.10	11.00 ± 1.00	[31], Собственные данные
180728A	2018fip	0.117	r	$-20.59^{+0.11}_{-0.10}$	14.06 ± 1.20	[32], [33], [34], Собственные данные
181201A		0.450	i	$-19.82^{+0.14}_{-0.27}$	19.93 ± 2.10	[35]
190114C		0.425	r	$-18.97^{+0.11}_{-0.20}$	16.18 ± 1.12	[36], [37], [38], Собственные данные
190829A ^c	2019oyw	0.0785	R^Φ	-19.17 ± 0.56	15.13 ± 1.15	[39], [40], Собственные данные
200826A		0.749	i	$-19.73^{+0.43}_{-0.47}$	13.87 ± 0.99	[41]
201015A ^c		0.426	R	$-19.45^{+0.85}_{-0.47}$	8.54 ± 1.48	[42]
211023A ^c		0.390	R	$-19.60^{+0.33}_{-0.26}$	10.93 ± 1.23	[43], [44], Собственные данные
220219B ^c		0.293	R^Φ	-18.59 ± 0.35	12.19 ± 0.77	[45], [46], [47], Собственные данные
221009A ^c	2022xiw	0.151	R^Φ	$-19.85^{+0.14}_{-0.12}$	33.88 ± 2.12	[48], Собственные данные
230812B ^c	2023pel	0.360	R	$-19.50^{+0.70}_{-0.50}$	8.75 ± 0.36	[49], [50], Собственные данные

^a Фильтр в системе отсчета наблюдателя, кривая блеска в котором использовалась для оценки параметров максимума СН-ГРБ;

Таблица 3. Окончание

* Абсолютная звездная величина максимума СН-ГРБ в фильтре V ; ** Время наступления максимума СН-ГРБ относительно времени регистрации ГРБ в системе отсчета источника;

^c Связь СН-ГРБ была подтверждена также и спектроскопическими наблюдениями;

^ф СН-ГРБ наблюдалась в системе отсчета в фильтре, который в системе отсчета источника близок к фильтру V .

[1] – Райхарт, 1999; [2] – Галама и др., 2000; [3] – Кано и др., 2017б; [4] – Бьёрнссон и др., 2001; [5] – Блум и др., 2002; [6] – Гарнавич и др., 2003; [7] – Берсье и др., 2006; [8] – Делла Валле и др., 2003; [9] – Содерберг и др., 2006; [10] – Делла Валле и др., 2006; [11] – Мирабал и др., 2006; [12] – Ферреро и др., 2006; [13] – Кано и др., 2011; [14] – Клозе и др., 2019; [15] – Танвир и др., 2010; [16] – Джин и др., 2013; [17] – Оливарес и др., 2015; [18] – Кобб и др., 2010; [19] – Канн и др., 2019; [20] – Меландри и др., 2012; [21] – Кано и др., 2014; [22] – Сюй и др., 2013; [23] – Вольнова и др., 2017; [24] – Д’Элиа и др., 2015; [25] – Той и др., 2016; [26] – Кано и др., 2015; [27] – Санчес-Рамирес и др., 2015; [28] – де Угарте Постиго и др., 2015; [29] – Кано и др., 2017а; [30] – Меландри и др., 2019а; [31] – Иззо и др., 2017; [32] – Росси и др., 2018; [33] – Иззо и др., 2018; [34] – Селсинг и др., 2018; [35] – Белкин и др., 2021; [36] – Селсинг и др., 2019; [37] – Кастро-Тирадо и др., 2019; [38] – Меландри и др., 2019б; [39] – Валеев и др., 2019; [40] – де Угарте Постиго и др., 2019; [41] – Росси и др., 2022а; [42] – Белкин и др., 2024; [43] – Позаненко и др., 2021б; [44] – Росси и др., 2022б; [45] – Фремлинг и др., 2022; [46] – Белкин и др., 2022; [47] – Росси и др., 2022в; [48] – де Угарте Постиго и др., 2022; [49] – де Угарте Постиго и др., 2023; [50] – Агуи Фернандез и др., 2023.

Таблица 4. Выборка СН-ГРБ. Характеристики собственного излучения гамма-всплесков

GRB	z	$T_{90,i}$, с	E_{iso} , 10^{51} эрг	$E_{p,i}$, кэВ	Источник
970228	0.695	31.5	12.01 ± 0.93	280^{+66}_{-42}	[1]
980425	0.0085	17.9	0.001 ± 0.0002	55 ± 21	[1]
990712	0.433	11.6	3.86 ± 0.28	149^{+21}_{-16}	[1]
011121	0.362	41.9	98.9 ± 2.7	1114^{+147}_{-131}	[1]
020903	0.25	8	0.024 ± 0.006	3.37 ± 1.89	[1]
021211	1.006	0.9	9.9 ± 1.9	108^{+26}_{-50}	[1]
030329	0.1685	18.7	16.55 ± 0.30	113.3 ± 2.3	[1]
031203	0.1005	31.0	0.1 ± 0.04	158 ± 51	[1]
040924	0.859	0.43	5.08 ± 0.27	133.8 ± 11.2	[1]
041006	0.716	4	6.88 ± 0.37	147.6 ± 8.6	[1]
050525A	0.606	4.4	28.08 ± 0.61	128.5 ± 3.2	[1]
060218	0.033	2033	0.053 ± 0.003	4.9 ± 0.3	[1]
060729	0.54	75.3	16		[2], [3], [4]
071112C	0.823	2.9	11.8 ± 1.9	740^{+326}_{-182}	[1]
080319B	0.937	23	1567 ± 19	1264 ± 17	[1]
081007	0.530	6.5	1.6 ± 0.3	61 ± 15	[1]
090618	0.540	67.7	252.9 ± 4.9	288 ± 9.2	[1]
091127	0.490	3.3	16.3 ± 0.2	53.6 ± 3.0	[1]
100316D	0.059	1227.6	0.06	21.18	[5], [6]
101219B	0.552	21.9	5.9 ± 0.4	109 ± 12	[1]
111209A	0.677	5963	52 ± 10	520 ± 89	[1]
111228A	0.716	29.5	16.5 ± 4.0	74^{+31}_{-53}	[1]
120422A	0.283	4.2	0.058	68	[7], [8]
120714B	0.398	113.7	$0.57^{+0.18}_{-0.16}$		[9]
120729A	0.800	39.7	23 ± 15	559 ± 57	[1]
130215A	0.597	90	56.0 ± 1.4	248 ± 101	[1]
130427A	0.340	46.1	890.4 ± 4.6	1415 ± 13	[1]
130702A	0.145	51.4	0.64 ± 0.13	17.2 ± 5.7	[1]
130831A	0.479	11.9	8.05 ± 0.57	$79.9^{+10.4}_{-13.3}$	[1]
140606B	0.384	4.9	2.5 ± 0.2	352^{+46}_{-37}	[1]
150818A	0.282	36.7	$1.00^{+0.15}_{-0.13}$	128^{+37}_{-23}	[1]

Таблица 4. Окончание

GRB	z	$T_{90,i}$, с	E_{iso} , 10^{51} эрг	$E_{p,i}$, кэВ	Источник
161219B	0.148	6.1	0.116 ± 0.008	71 ± 19.3	[1]
171010A	0.330	116.7	180.0 ± 5.5	$227.2_{-8}^{+9.3}$	[1]
171205A	0.037	183.7	$0.0218_{-0.0050}^{+0.0063}$	125_{-37}^{+141}	[1]
180728A	0.117	15.5	2.33 ± 0.1	108_{-7}^{+8}	[1]
181201A	0.450	120	100 ± 5	220 ± 9	[1]
190114C	0.425	120	270.3 ± 2.4	929.3 ± 9.4	[1]
190829A	0.0785	58.4	0.19	14.02 ± 21.57	[10], [11], [12]
200826A	0.749	1	7.09 ± 0.28	$120.3_{-3.7}^{+3.9}$	[13]
201015A	0.426	11.5	0.11 ± 0.02	20 ± 8.5	[14]
211023A	0.390	57.6	60	$127.89_{-2.8}^{+2.8}$	[15], [16]
220219B	0.293	89	$2.75_{-0.34}^{+0.36}$	79_{-59}^{+31}	[17], [18]
221009A	0.151	251.1	12000 ± 1000	2900	[19], [20], [21], [22]
230812B	0.360	2.2	83	371.3 ± 4.1	[23], [24]

[1] – Минаев и Позаненко, 2020; [2] – Парсонс и др., 2006; [3] – Тёне и др., 2006; [4] – Групе и др., 2007; [5] – Маргути и др., 2013; [6] – Буфано и др., 2012; [7] – Левеск и др., 2012; [8] – Шульце и др., 2014; [9] – Клозе и др., 2019; [10] – Дадо и Дар, 2019; [11] – Лесаж и др., 2019; [12] – Валеев и др., 2019; [13] – Ван и др., 2022; [14] – Белкин и др., 2024; [15] – Аймуратов и др., 2021; [16] – Лесаж и др., 2021; [17] – Цветкова и др., 2022; [18] – Фремлинг и др., 2022; [19] – де Угарте Постиго и др., 2022; [20] – Ан и др., 2023; [21] – Фредерикс и др., 2023; [22] – Санчес-Рамирес и др., 2024; [23] – Робертс и др., 2023; [24] – де Угарте Постиго и др., 2023.

струментами для наблюдения в диапазонах жесткого рентгеновского (BAT; Бартелми и др., 2005), рентгеновского (XRT; Барроус и др., 2005) и ультрафиолетового/оптического (UVOT; Роминг и др., 2005) излучений. Ошибки локализации обнаруженных гамма-всплесков варьируются от трех угловых минут до долей угловой секунды в зависимости от используемого инструмента, что позволяет проводить направленные и сопровождающие наблюдения с помощью узкопольных телескопов. Частота обнаружения Свифтом составляет около одного гамма-всплеска в неделю.

С другой стороны, Ферми оснащен Большим телескопом для исследования космических лучей (LAT; Атвуд и др., 2009) – детектором высокоэнергетических фотонов, который покрывает диапазон от 20 МэВ до 300 ГэВ, и Монитором гамма-всплесков (GBM; Миган и др., 2009), охватывающим диапазон энергий от 8 кэВ до 30 МэВ. Ферми может регистрировать гамма-всплески по всему небу, за исключением областей, закрытых Землей. Хотя области локализации гамма-всплесков часто достигают десятков квадратных градусов, что усложняет точные наблюдения. Тем не менее Ферми регистрирует гамма-всплески в три раза чаще, чем Свифт, увеличивая шансы на обнаружение гамма-всплесков и сопутствующих сверхновых.

В 2024 г. были запущены Einstein Probe (EP; Юань и др., 2015) и Space Variable Objects Monitor (SVOM; Гётц и др., 2009), каждый из которых способен локализовать гамма-всплески с точностью от долей угловой секунды до десятков квадратных градусов. Между тем

каждый из них уже обнаружил хотя бы один гамма-всплеск (см., например, Команда СВОМ/ГРМ и др., 2024; Кирола-Васкес и др., 2024), демонстрируя свой потенциал для осуществления будущих обнаружений гамма-всплесков.

Таким образом, если мы стремимся обнаруживать больше сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками, мы должны обнаруживать больше самих гамма-всплесков. Для этого нужны инструменты, которые могут автоматически и оперативно реагировать на сообщения об обнаружении транзиентов и имеют большие поля зрения для эффективного покрытия обширных областей локализации, предоставляемых Ферми, ЭП и СВОМ.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Представленная выборка СН-ГРБ и ее анализ по различным распределениям показали, что однозначных выводов на данном этапе и на данной выборке сделать нельзя – наблюдаются некоторые тенденции и зависимости (пр. M_V-T_{\max} , $T_{\max}-T_{90,i}$), а также разделения на подвыборки (M_V-E_{iso}). Однако статистически подтвердить их на данный момент нельзя. Ключевым в данном вопросе является маленький размер выборки СН-ГРБ как класса явлений. Как вариант рассматриваются селективные эффекты, влияющие на обнаружение/необнаружение СН-ГРБ, и предлагаются методы по их минимизации.

Представленные селективные эффекты негативно влияют на статистическое изучение сверхновых, связанных с гамма-всплесками. Пропуская сверхновые,

мы теряем часть информации, которую можно было бы получить из проведенных наблюдений и их последующей обработки. В этой связи необходимо предпринять все возможные меры для минимизации этих эффектов на изучаемом явлении.

Мы не можем изменить или повлиять на расстояние, на котором происходит гамма-всплеск, но селективные эффекты, такие как яркая родительская галактика, могут быть минимизированы за счет проприационных наблюдений, особенно когда известно красное смещение. Если оно меньше ~ 0.5 , то наблюдательная кампания должна быть организована таким образом, чтобы проявление сверхновой было обнаружено даже в случае, когда СН-ГРБ относительно незаметен на фоне яркого послесвечения и/или родительской галактики. Важным фактором для этого является централизованная система обмена уведомлениями, такая как General Coordinates Network (GCN)³, чтобы иметь представление о текущем состоянии источника (например, какая звездная величина в ту или иную эпоху) с целью подстройки необходимой экспозиции и оценки погодных условий и местоположения наблюдений. В результате проведенные наблюдения будут иметь большую точность, что увеличит шансы на идентификацию сверхновой в кривой блеска гамма-всплеска. Наблюдения не должны прекращаться после обнаружения сверхновой, но в идеале должны продолжаться, ведя наблюдения за этим источником с целью полного описания всех стадий роста сверхновой, а также ее максимума и затухания. Без этого неопределенности в вычитании послесвечения и родительской галактики могут начать доминировать, что помешает сделать какие-либо надежные выводы о конкретных параметрах СН-ГРБ.

В большинстве случаев мы не можем определить поглощение родительской галактики во время наблюдательной кампании, направленной на обнаружение сверхновой. Это возможно только после того, как послесвечение и сверхновая полностью затухнут, оставив невозмущенную родительскую галактику доступной для наблюдений и последующего моделирования. На этом этапе единственное, что можно сделать, – это организовать многоцветные наблюдения, чтобы попытаться обнаружить сверхновую хотя бы в одном фотометрическом фильтре. Многоцветные наблюдения также могут быть полезны с точки зрения того, что сверхновая ведет себя хроматично по сравнению с послесвечением – наблюдается изменение цвета во время ее роста. Это также может сигнализировать, что мы начинаем наблюдать не только поток, доминируемый послесвечением, но и сверхновую на стадии роста, которая начинает вносить сопоставимый вклад. Рассматривая фильтры SDSS, рост сверхновой сначала начнется на более коротких длинах волн, например, в фильтре g . Рост будет заметен последним в фильтре z .

Поэтому многоцветные наблюдения важны как для прописывания общей кривой блеска гамма-всплеска и сверхновой, ассоциированной с ним, так и для конкретного поиска сверхновой.

Проблему идентификации сверхновой вблизи ядра ее родительской галактики можно решить с помощью вычитания изображений. Это включает в себя наблюдение родительской галактики до или после связанных с ней гамма-всплеска и активности сверхновой. Полученное изображение служит шаблоном, который затем вычитается из изображений, полученных в активной фазе сверхновой. Эффективное вычитание устраняет галактику из изображения, оставляя видимый источник около определенного положения гамма-всплеска, идентифицируемый как сверхновая. Этот метод позволяет фотометрически обнаруживать сверхновые в кривых блеска гамма-всплесков, даже когда они расположены рядом с ядром родительской галактики. Однако важно помнить о технических трудностях, возникающих при вычитании изображений. Например, проблемы могут возникнуть при вычитании шаблона из изображений, полученных с совершенно разных телескопов (см. п. 4.5). Существует также другой метод, включающий математическое вычитание потока от родительской галактики. Во время фотометрии измеряется поток как от нашего транзистора, так и от родительской галактики. Если родительская галактика относительно яркая и ее фотометрия указана в каталогах, ее величины можно использовать для вычитания соответствующего потока родительской галактики. Если родительская галактика тусклая или о ней нет данных в каталогах, поздние наблюдения помогут определить ее видимую звездную величину. В итоге, в обоих случаях после математического вычитания вклада родительской галактики остается только вклад транзистора, что и является целью. Использование этого метода особенно требует точных наблюдений, так как если объект виден при отношении сигнала к шуму 3–5, вычитание родительской галактики приведет к переносу ошибки, делающей ошибку звездной величины источника слишком большой, чтобы считаться статистически надежной. То есть этот метод чувствителен к качеству изображений.

Если наша цель – увеличить статистику гамма-всплесков со сверхновыми, нам необходимо обнаружить больше самих гамма-всплесков. Поскольку Ферми и недавно запущенные ЭП и СВОМ делают это гораздо чаще, чем Свифт, но значительно менее точно, нужно иметь возможность наблюдать и покрывать большие поля локализации в разумные сроки. Одним из инструментов, способных на это, является Gravitational-wave Optical Transient Observer (GOTO; Стигс и др., 2022). GOTO состоит из сети широкопольных оптических телескопов GOTO-North, расположенных в обсерватории Роке-де-лос-Мучачос (Ла-Пальма, Испания), и GOTO-South – в обсерва-

³<https://gcn.nasa.gov>

тории Сайдинг-Спринг (Австралия). Такое диаметрально противоположное размещение инструментов (рис. 18) позволяет осуществлять квазинепрерывный мониторинг переменного оптического неба с периодом ~ 2 –3 дня, что позволяет наблюдать за источниками в обоих полушариях. Эта система была разработана как система быстрого реагирования для покрытия полей локализации гравитационно-волновых событий и поиска их оптических компонент (Гомперц и др., 2020). Этот подход также был применен для поиска гамма-всплесков, зарегистрированных Ферми, которые не могут быть эффективно покрыты узкопольными телескопами.

Возможности инструментов, таких как ГОТО, обнаруживать оптические компоненты гамма-всплесков в полях локализации Ферми, позволяют в целом обнаруживать больше гамма-всплесков. Чем больше гамма-всплесков мы наблюдаем, тем выше шансы обнаружить связанную с ними сверхновую. Кроме того, раннее обнаружение гамма-всплеска позволяет начать ранние спектроскопические наблюдения для определения красного смещения. Поскольку известно, что примерно 70% длинных гамма-всплесков, обнаруженных с красным смещением 0.5 или ближе, сопровождаются сверхновой, известное красное смещение позволяет подогнать и скоординировать наблюдательную кампанию, а также оценить потенциальные временные рамки для обнаружения сверхновой вместе с ее звездной величиной в максимуме. Эти меры увеличивают шансы на обнаружение сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками, тем самым расширяя их выборку.

Учет всех упомянутых селективных эффектов поможет обнаружить больше сверхновых, связанных с гамма-всплесками, увеличивая их статистическую выборку. В настоящее время эта выборка включает только 44 подтвержденных сверхновых, связанных с гамма-всплесками, полученных из фотометрических наблюдений, 29 из которых подтверждены спектрскопически. Этой выборки недостаточно для всестороннего статистического анализа. Например, статистически (двухвыборочный критерий Колмогорова–Смирнова) мы не можем отвергнуть нулевую гипотезу о том, что выборки СН-ГРБ и СН Ic относятся к одной генеральной совокупности (Белкин и Позаненко, 2021). Тем не менее из распределения M_V-T_{\max} можно наблюдать тренд между абсолютной звездной величиной в максимуме СН-ГРБ в фильтре V и временем от обнаружения гамма-всплеска до пика сверхновой в системе отсчета источника, оставляя угол для поздних пиков тусклых сверхновых пустым. Это поведение также может указывать на то, что чем ярче сверхновая, тем больше выброс и, следовательно, больше непрозрачность. Это означает, что для того, чтобы излучение стало наблюдаемым, потребуется больше времени, и, следовательно, максимум сверхновой будет наблюдаться позже. Асимметрия взрыва сверхновой

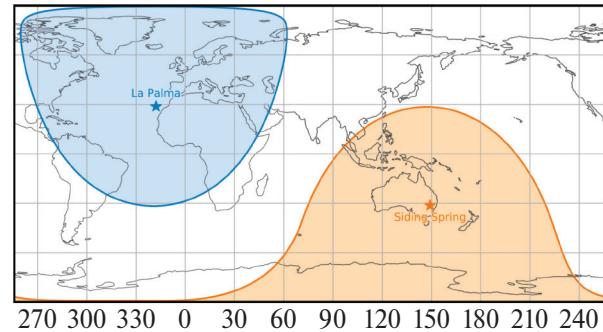


Рис. 18. Сеть телескопов ГОТО. Каждая сторона состоит из двух монтировок, с восемью 0.4-метровыми телескопами на каждой из них, совокупное поле зрения обеих из которых составляет около 88 квадратных градусов за одно наведение.

вой и ее ориентация относительно угла наблюдения, также могут влиять на наблюдательные свойства СН-ГРБ (Ашалл и др., 2019); однако, похоже, это влияет только на время нарастания и угасания, а не на время непосредственного максимума сверхновой.

Распределение M_V-T_{\max} СН-ГРБ является продолжением систематических исследований сверхновых с гамма-всплесками (см., например, Зэх и др., 2004; Хьорт и др., 2012; Кано и др., 2017б; Люй и др., 2018; Белкин и др., 2021). В текущем исследовании мы сосредоточены на определении конкретных параметров сверхновой таким образом, чтобы максимизировать выборку СН-ГРБ на основе имеющихся у нас данных, а также того, что представлено в литературе.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объективность полученных результатов на выборке СН-ГРБ, собранных из различных источников, подтвердили статистические тесты ANOVA для параметра M_V (0.318, вероятность 0.729) и Краскела–Уоллиса для параметра T_{\max} (0.450, вероятность 0.799), которые подтвердили, что разные источники и, возможно, методы обработки данных оптических наблюдений не вносят систематического смещения в значения M_V и T_{\max} . Это обеспечивает надежность полученных результатов.

Гистограмма зарегистрированных сверхновых, ассоциированных с гамма-всплеском, показана на рис. 19. Используя скользящее среднее с окном в 10 лет, можно получить сглаженное среднее, значение которого составляет 1.5 СН-ГРБ в год. Экстраполяция на основе этого тренда предполагает, что удвоение текущей выборки из 44 СН-ГРБ потребует приблизительно 28 лет. Этот прогноз подчеркивает важность длительного мониторинга всех гамма-всплесков с красным смещением $z \lesssim 0.5$.

Как можно было бы ожидать, золотая выборка СН-ГРБ состоит из статистически обеспеченных, близких к наблюдателю источников с красным смещением $z \lesssim 0.5$ (см. рис. 8 и 12). Отсутствие регистрации

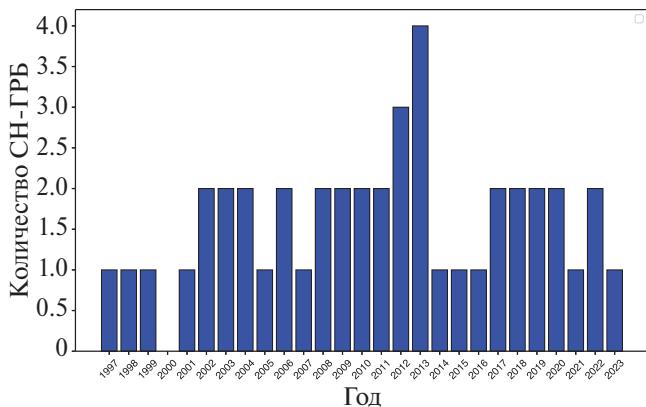


Рис. 19. Количество зарегистрированных СН-ГРБ по годам. Значение скользящего среднего с окном в 10 лет получается равным ~ 1.5 СН-ГРБ в год, что дает удвоение текущей выборки к 2052 г.

сверхновых от близких источников длинных гамма-всплесков можно отнести к селективным эффектам, которые не позволили зарегистрировать СН-ГРБ, например, из-за ее чрезвычайной тусклости. Действительно, среди СН-ГРБ отсутствуют СН, более тусклые в максимуме, чем $M_V = -17.8^m$. Отсутствие длительного мониторинга источника также может приводить к необнаружению СН. Основная масса СН-ГРБ имеет максимум до 20 дней (в системе отсчета источника) после обнаружения гамма-всплеска. Это означает, что в нашей системе отсчета наблюдателя мониторинг для обнаружения СН-ГРБ на красном смещении $z = 0.5$ должен продолжаться до 30 дней после регистрации ГРБ в гамма-диапазоне. Есть и другая интерпретация отсутствия регистрации СН, а именно, то, что прародителем таких гамма-всплесков могло быть слияние двойных нейтронных звезд (Аббott и др., 2017), а не сверхновая с коллапсирующим ядром. Известно, что килоновая от коротких гамма-всплесков, вызванных слиянием двойных нейтронных звезд, проявляется в начальный период (1–2 дня) после гамма-всплеска (Коултер и др., 2017). Такая интерпретация была предложена, например, для длинных гамма-всплесков GRB 211211A ($T_{90} = 51$ с, $z = 0.076$; см., например, Троя и др., 2018; Троя и др., 2022; Растинежад и др., 2022; Мей и др., 2022; Ян и др., 2022; Гомпертц и др., 2023), GRB 230307A ($T_{90} = 35$ с, $z = 0.0646$; см., например, Сан и др., 2023; Гилландерс и др., 2023; Готтлиб и др., 2023; Леван и др., 2024) и GRB 191019A ($T_{90} = 64$ с, $z = 0.248$; см., например, Леван и др., 2023; Стратта и др., 2024). Наконец, селективный эффект, связанный с определением параметра длительности гамма-всплеска в гамма-диапазоне T_{90} может приводить к неправильной классификации гамма-всплеска. С одной стороны, короткие гамма-всплески, произошедшие в результате слияния двойной системы нейтронных звезд (Аббott и др., 2017; Позаненко и др., 2020), могут иметь про-

дленное излучение (Норрис и Боннелл, 2006; Минаев и др., 2010, Мозгунов и др., 2021). С другой стороны, слияние нейтронных звезд действительно может приводить к более длительному излучению, чем 2 с (Барков и Позаненко, 2011; Мусолино и др., 2024), обычно определяемые как граница между короткими и длинными гамма-всплесками. Это продленное излучение может засчитываться в значение параметра T_{90} и тогда гамма-всплеск может быть классифицирован как длинный, но от источника которого нельзя ожидать сверхновую.

Никакой корреляции параметров СН-ГРБ (M_V , T_{\max}) от красного смещения не обнаружено, что косвенно указывает на однородность выборки СН-ГРБ и ее независимость от красного смещения. Никаких значимых корреляций между параметрами СН-ГРБ (M_V , T_{\max}) и параметрами собственного излучения ГРБ ($T_{90,i}$, E_{iso} , $E_{p,i}$), и от красного смещения z , также обнаружено не было.

Предложенные ранее корреляции (см., например, $z-T_{\max}$, $E_{iso}-T_{\max}$: Аймуратов и др., 2023) не нашли подтверждения в нашем исследовании выборки из 44 СН-ГРБ, несмотря на большее количество СН-ГРБ в выборке за счет использования только параметров максимума кривой блеска сверхновых, таких как абсолютная звездная величина (M_V) и время максимума (T_{\max}) в системе отсчета источника. Действительно, эти параметры, M_V и T_{\max} , можно надежно определить для большего количества событий СН-ГРБ.

В литературе были предложены похожие диаграммы, в которых использовались параметры сдвига (k) и растяжения (s) “эталонной” кривой блеска сверхновой SN 1998bw для аппроксимации кривых блеска СН-ГРБ (см., например, Зэх и др., 2004; Клозе и др., 2019). Однако подобные исследования также не подтвердили наличие значимой зависимости, либо она была настолько слаба, что не могла быть надежно обнаружена (см., например, Шульце и др., 2014; Кано, 2014). Наша диаграмма, построенная на основе более обширной выборки СН-ГРБ, подтверждает эти выводы. Предложенная ранее корреляция M_V-T_{\max} (Белкин и др., 2021) не может быть статистически подтверждена на данном этапе. Тем не менее ее возможное использование для выбора временного интервала поиска и наблюдений СН-ГРБ, а также для оценки красного смещения, связанного с поздним ростом кривой блеска гамма-всплеска, остается перспективным.

Распределение абсолютной звездной величины M_V в максимуме сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками, характеризуется средним значением -19.28^m и стандартным отклонением 0.57^m (рис. 20). Данные значения соответствуют ранее опубликованным результатам, например, -19.0^m со стандартным отклонением в 0.8^m (Ричардсон, 2009) и -19.2^m со стандартным отклонением 0.4^m (де Угарте Постиго и др., 2018). Асимметрия нашего распределения составляет 0.28, что свидетельствует о небольшой положи-

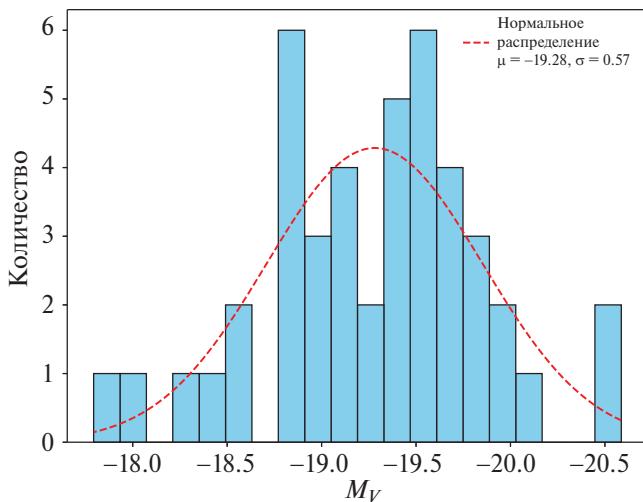


Рис. 20. Распределение абсолютной звездной величины M_V сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками. Гистограмма демонстрирует число сверхновых в каждом интервале M_V , а красная пунктирная линия показывает аппроксимацию нормальным распределением с параметрами среднего значения -19.28^m и стандартного отклонения 0.57^m . Можно предположить бимодальность распределения M_V , но на данном этапе статистически подтвердить это нельзя.

тельной асимметрии с небольшим вытягиванием хвоста распределения в сторону менее ярких объектов. Эксцесс, равный 0.36, подтверждает умеренную пиконость распределения, близкую к нормальному, что подкрепляется визуальным согласованием с нормальным распределением на гистограмме. Проверка нормальности распределения также была проведена с использованием теста Шапиро–Уилка, значение статистики которого для распределения M_V получилось равным 0.980 с вероятностью 0.647. Это указывает на отсутствие оснований для отклонения нулевой гипотезы о нормальности распределения данных M_V . Эти результаты подтверждают, что распределение M_V для данной выборки СН-ГРБ является однородным, с минимальными выбросами и близко к нормальному, что делает его подходящим для стандартных методов статистического анализа и дальнейших исследований по уточнению особенностей распределения, включая возможное выявление дополнительных модальных пиков при увеличении выборки. Однако какую-либо бимодальность распределения параметра M_V статистически подтвердить нельзя.

Распределение времени максимума кривой блеска СН-ГРБ в системе отсчета источника (T_{\max}) характеризуется средним значением 14.23 дня и большим стандартным отклонением 4.25, указывая на разнобразие во времени достижения максимума светимости среди наблюдаемых объектов (рис. 21). Наблюдаемое распределение имеет выраженную асимметрию со значением асимметрии 2.23, что свидетельствует о значительном вытягивании распределения в

сторону больших времен максимума. Эксцесс, равный 7.84, подчеркивает сильную пиконость распределения, значительно превосходящую нормальное распределение. Это указывает на наличие выбросов или специфической подгруппы сверхновых, достигающих максимума значительно позднее остальных. Модальное значение, равное 14.24 дня, совпадает со средним, подчеркивая концентрацию значительного числа событий вокруг этого интервала времени. Значение среднего также согласуется с аналогичным из работы Аймуратов и др. (2023), где оно было оценено равным 13.43 ± 2.78 . Тест Шапиро–Уилка дает статистику 0.818 с вероятностью 7.3×10^{-6} . Результаты теста указывают на статистически значимое отклонение от нормального распределения. Очень малая вероятность подтверждает эту тенденцию, что позволяет отвергнуть гипотезу о нормальности распределения T_{\max} . В распределении также виден резкий обрыв в сторону малых интервалов между временем регистрации гамма-всплеска и максимума в кривой блеска СН-ГРБ. Тенденцию можно было бы объяснить тем, что мы не регистрируем ранних СН-ГРБ в кривых блеска оптического послесвечения гамма-всплесков. Джет, отвечающий за электромагнитное излучение гамма-всплеска, распространяется с релятивистскими скоростями, в то время как выброс сверхновой движется значительно медленнее. Это приводит к тому, что максимум светимости СН-ГРБ наблюдается значительно позже гамма-всплеска. Время, необходимое сверхновой для достижения максимума своей светимости, зависит от начальных условий взрыва и характеристик окружающей среды, что влияет на формирование распределения T_{\max} в данных. Еще одной возможной причиной нерегистрации ранних максимумов СН-ГРБ является доминирование оптического послесвечения гамма-всплеска над светимостью сверхновой в этот период. Если оптическое послесечение гамма-всплеска остается ярким, оно может маскировать более тусклое излучение от сверхновой. Этот эффект может также объяснить наблюдаемую тенденцию на диаграмме M_V-T_{\max} , где более ранние СН-ГРБ демонстрируют более низкую светимость.

Возможное разделение СН-ГРБ на две подгруппы на диаграмме $M_V-\log_{10}(E_{\text{iso}})$ (рис. 13) было проверено с помощью кластерного анализа. Кластеризация была подтверждена несколькими методами (DBSCAN, K-means, GMM). Метрика силуэтов для каждого из методов показала, что кластеризация является адекватной (DBSCAN: 0.442, K-means: 0.416, GMM: 0.421) и не является результатом случайности (рис. 14). В то время как DBSCAN выделяет две СН-ГРБ (GRB 050525A, GRB 011121) как шум, метод K-means позволил добиться аналогичной кластеризации, используя все СН-ГРБ в выборке при заданных примерных начальных центрах кластеров. Метод GMM позволил получить такой же результат после

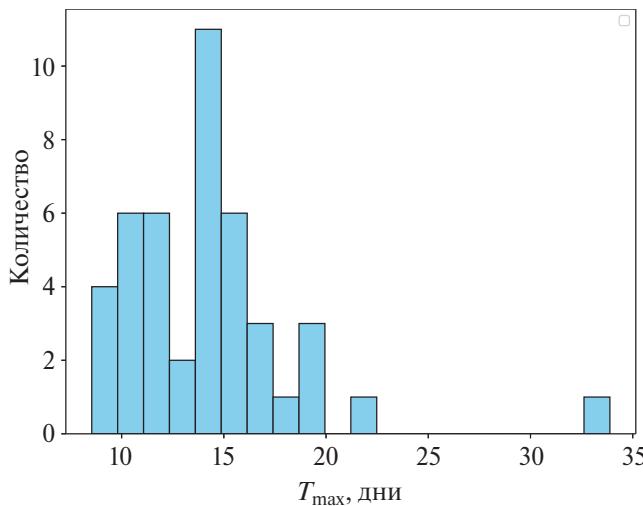


Рис. 21. Распределение времени максимума сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками, в системе отсчета источника T_{\max} . Гистограмма демонстрирует число сверхновых в каждом интервале T_{\max} .

исключения из рассмотрения крайних значений по параметру $\log_{10}(E_{\text{iso}})$ двух сверхновых, ассоциированных с GRB 980425 и GRB 221009A.

Разделение на два кластера в плоскости параметров $M_V - \log_{10}(E_{\text{iso}})$ является первым свидетельством связи параметра собственного излучения гамма-всплеска в гамма-диапазоне (E_{iso}) и параметра сверхновой (M_V). Возможно, две группы соответствуют существенно разным начальным или конечным параметрам сверхновой, являющейся прародителем гамма-всплесков. Действительно, для кластера 1 была найдена значимая корреляция между параметрами E_{iso} и M_V , а именно, с увеличением E_{iso} уменьшается светимость в максимуме СН, пропорциональная параметру M_V . Для кластера 0 значимой корреляции между этими параметрами не обнаружено. Исследование этих зависимостей выходит за рамки работы.

Ряд селективных эффектов затрудняет обнаружение СН-ГРБ. Они включают расстояние до источника, яркость послесвечения и светимость родительской галактики. Хотя эти факторы находятся вне нашего контроля, мы можем адаптировать наши наблюдательные стратегии для минимизации их воздействия путем проведения более точных наблюдений. Это особенно важно, когда известно, что красное смешение $\lesssim 0.5$, поскольку примерно 70% длинных гамма-всплесков сопровождаются сверхновыми. Что приводит к необходимости проведения длительных мониторинговых наблюдений таких гамма-всплесков, чтобы увеличивать шансы на их обнаружение и как следствие увеличение выборки СН-ГРБ.

Положение транзиента (ГРБ и СН-ГРБ) в родительской галактике также может затруднить их обнаружение или, по крайней мере, сделать его более сложным и неоднозначным. Техники, такие как вы-

читание шаблона или математическое вычитание родительской галактики, могут изолировать поток транзиента, что особенно полезно, когда сверхновая находится близко к галактическому ядру.

Для увеличения обнаружения СН-ГРБ первостепенно важно обнаружить больше гамма-всплесков. Сети, такие как ГОТО, имеют важное значение в этом усилии, используя их широкопольные оптические телескопы для эффективного мониторинга обширных полей локализации обсерваторий Ферми и СВОМ.

Улучшение технологий обнаружения, совершенствование методов наблюдения и расширение сетей телескопов, наряду с обменом результатами и совместными усилиями, имеют решающее значение для создания более надежной статистической основы для изучения СН-ГРБ. Эти меры не только увеличивают количество обнаруженных событий, но и улучшают качество данных, что позволяет проводить более точный и всесторонний анализ их кривых блеска.

БЛАГОДАРНОСТИ

А.С. Позаненко благодарит РНФ (грант 23-12-00220) за частичную поддержку проведения наблюдений сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аббott и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, et al.), *Astrophys. J.* **848**, L13 (2017).
2. Аббott и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, R.X. Adhikari, et al.), *Astrophys. J.* **992**, L3 (2020).
3. Агуи Фернандез и др. (J. F. Agui Fernandez, A. de Ugarte Postigo, C.C. Thoene, D.B. Malesani, L. Izzo, and A.L. Cabrera Lavers), *GCN Circular* **34597** (2023).
4. Аймуратов и др. (Y. Aimuratov, L. Becerra, C.L. Bianco, Y.-C. Chen, C. Cherubini, S. Eslamzadeh, S. Filippi, M. Karlica, et al.), *GCN Circular* **31056** (2021).
5. Аймуратов и др. (Y. Aimuratovet, L.M. Becerra, C.L. Bianco, C. Cherubini, M. Della Valle, S. Filippi, Liang Li, R. Moradi, et al.), *Astrophys. J.* **955**, 93 (2023).
6. Алард и Люpton (C. Alard and R.H. Lupton), *Astrophys. J.* **503**, 325 (1998).
7. Алард (C. Alard), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **144**, 363 (2000).
8. Ан и др. (Z. An et al.), *arXiv:2303.01203* (2023).
9. Атвуд и др. (W. B. Atwood et al.), *Astrophys. J.* **697**, 1071 (2009).
10. Ашалл и др. (C. Ashall, A.A. Abdo, M. Ackermann, W. Althouse, B. Anderson, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, et al.), *MNRAS* **487**, 5824 (2019).
11. Базин и др. (G. Bazin, V. Ruhlmann-Kleider, N. Palanque-Delabrouille, J. Rich, E. Aubourg, P. Astier, C. Balland, S. Basa, et al.), *Astron. Astrophys.* **534**, A43 (2011).
12. Барков и Позаненко (M.V. Barkov and A.S. Pozanenko), *MNRAS* **417**, 2161 (2011).

13. Барроус и др. (D.N. Burrows, J.E. Hill, J.A. Nousek, J.A. Kennea, A. Wells, J.P. Osborne, A.F. Abbey, A. Beardmore, et al.), *Space Sci. Rev.* **120**, 165 (2005).
14. Бартелми и др. (S.D. Barthelmy et al.), *Space Sci. Rev.* **120**, 143 (2005).
15. Бекер (A. Becker), *Astrophysics Source Code Library* (2015).
16. Белкин и др. (S.O. Belkin et al.), *Astron. Lett.* **46**, 783 (2021).
17. Белкин и Позаненко (S. Belkin and A. Pozanenko), *Communications in Computer and Information Science* **1620** (2022).
18. Белкин и др. (S. Belkin, et al.), *GCN Circular* **31736** (2022).
19. Белкин и Позаненко (S. Belkin and A. Pozanenko), *Pattern Recognition and Image Analysis* **33**, 86 (2023).
20. Белкин и др. (S. Belkin, et al.), *MNRAS* **527**, 11507 (2024).
21. Берсье и др. (D. Bersier, et al.), *Astrophys. J.* **643**, 284 (2006).
22. Биссальди и др. (E. Bissaldi, F. Calura, F. Matteucci, F. Longo, and G. Barbiellini), *Astron. Astrophys.* **471**, 585 (2007).
23. Блинников и др. (S.I. Blinnikov, et al.), *Sov. Astron. Lett.* **10**, 177 (1984).
24. Блум и др. (J.S. Bloom, S.R. Kulkarni, P.A. Price, D. Reichart, T.J. Galama, B.P. Schmidt, D.A. Frail, E. Berger, et al.), *Astrophys. J. (Lett.)* **572**, L45 (2002).
25. Бошняк и др. (Z. Bosnjak, A. Celotti, G. Ghirlanda, M. Della Valle, and E. Pian), *Astron. Astrophys.* **447**, 121 (2006).
26. Буфано и др. (F. Bufano, E. Pian, J. Sollerman, S. Benetti, G. Pignata, S. Valenti, S. Covino, P. D'Avanzo, et al.), *Astrophys. J.* **753**, 67 (2012).
27. Бьёрнссон и др. (G. Bjornsson, et al.), *Astrophys. J. (Lett.)* **552**, L121 (2001).
28. Бэллм и др. (E.C. Bellm, Sh.R. Kulkarni, T. Barlow, U. Feindt, M.J. Graham, A. Goobar, Th. Kupfer, C.-C. Ngeow, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **131**, 018003 (2019).
29. Валеев и др. (A.F. Valeev, et al.), *GCN Circular*, **25565** (2019).
30. Ван и др. (X.I. Wang, et al.), *Astrophys. J. (Lett.)* **931**, L2 (2022).
31. Ван и Уилер (L. Wang and J.C. Wheeler), *Astrophys. J. (Lett.)* **504**, L87 (1998).
32. Вольнова и др. (A.A. Volnova, M.V. Pruzhinskaya, A.S. Pozanenko, S.I. Blinnikov, P.Yu. Minaev, O.A. Burkhanov, A.M. Chernenko, Sh.A. Ehgamberdiev, et al.), *MNRAS* **467**, 3500 (2017).
33. Вольнова и др. (A. Volnova, et al.), *Anais da Academia Brasileira de Ciencias* **93** (2021).
34. Галама и др. (T.J. Galama, P.M. Vreeswijk, J. van Paradijs, C. Kouveliotou, T. Augusteijn, H. Bohnhardt, J.P. Brewer, V. Doublier, et al.), *Nature* **395**, 670 (1998).
35. Галама и др. (T.J. Galama, N. Tanvir, P.M. Vreeswijk, R.A.M.J. Wijers, P.J. Groot, E. Rol, J. van Paradijs, C. Kouveliotou, A. Fruchter, et al.), *Astrophys. J.* **536**, 185 (2000).
36. Гарнавич и др. (P.M. Garnavich, K.Z. Stanek, L. Wyrzykowski, L. Infante, E. Bendek, D. Bersier, S.T. Holland, S. Jha, et al.), *Astrophys. J.* **582**, 924 (2003).
37. Гётц и др. (C. G'otz, et al.), *Gamma-ray Burst: Sixth Huntsville Symposium* **1133**, 25 (2009).
38. Гилландерс и др. (J.H. Gillanders, et al.), *arXiv:2308.00633* (2023).
39. Гольштейн и др. (A. Goldstein, P. Veres, E. Burns, M.S. Briggs, R. Hamburg, D. Kocevski, C.A. Wilson-Hodge, R.D. Preece, et al.), *Astrophys. J.* **848**, L14 (2017).
40. Гомпертц и др. (B.P. Gompertz, R. Cutter, D. Steeghs, D.K. Galloway, J. Lyman, K. Ulaczyk, M.J. Dyer, K. Ackley, et al.), *MNRAS* **497**, 726 (2020).
41. Гомпертц и др. (B.P. Gompertz, M.E. Ravasio, M. Nicholl, A.J. Levan, B.D. Metzger, S.R. Oates, G.P. Lamb, W. Fong, et al.), *Nature Astron.* **7**, 67 (2023).
42. Готтилеб и др. (O. Gottlieb, B.D. Metzger, E. Quataert, D. Issa, T. Martineau, F. Foucart, M.D. Duez, L.E. Kidder, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **958**, L33 (2023).
43. Групе и др. (D. Grupe, C. Gronwall, X.-Y. Wang, P.W.A. Roming, J. Cummings, B. Zhang, P. Meszaros, M. Diaz Trigo, et al.), *Astrophys. J.* **662**, 443 (2007).
44. Дадо и Дар (S. Dado and A. Dar), *GCN Circular* **25581** (2019).
45. де Угарте Постиго и др. (A. de Ugarte Postigo, Z. Cano, D.A. Perley, S. Schulze, D. Xu, R. Sanchez-Ramirez, D. Malesani, G. Lombardi, et al.), *GCN Circular* **18213** (2015).
46. де Угарте Постиго и др. (A. de Ugarte Postigo, C.C. Thone, K. Bensch, A.J. van der Horst, D.A. Kann, Z. Cano, L. Izzo, P. Goldoni, et al.), *Astron. Astrophys.* **620**, A190 (2018).
47. де Угарте Постиго и др. (A. de Ugarte Postigo, L. Izzo, C.C. Thone, M. Blazek, K. Bensch, J.F. Agui, D.A. Kann, A.L. Cabrera Lavers, et al.), *GCN Circular* **25677** (2019).
48. де Угарте Постиго и др. (A. de Ugarte Postigo, L. Izzo, G. Pugliese, D. Xu, B. Schneider, J.P.U. Fynbo, N.R. Tanvir, D.B. Malesani, et al.), *GCN Circular* **32648** (2022).
49. де Угарте Постиго и др. (A. de Ugarte Postigo, J.F. Agui Fernandez, C.C. Thone, and L. Izzo), *GCN Circular* **34409** (2023).
50. Делла Валле и др. (M. Della Valle, D. Malesani, S. Benetti, V. Testa, M. Hamuy, L.A. Antonelli, G. Chincarini, G. Cocozza, et al.), *Astron. Astrophys.* **406**, L33 (2003).
51. Делла Валле и др. (M. Della Valle, D. Malesani, J.S. Bloom, S. Benetti, G. Chincarini, P. D'Avanzo, R.J. Foley, S. Covino, et al.), *Astrophys. J. (Lett.)* **642**, L103 (2006).
52. Делла Валле (M. Della Valle), *Inter. J. Modern Phys. D* **20**, 1745 (2011).
53. Джин и др. (Z.-P. Jin, et al.), *Astrophys. J.* **774**, 114 (2013).
54. Д'Элиа и др. (V. D'Elia, E. Pian, A. Melandri, P. D'Avanzo, M. Della Valle, P.A. Mazzali, S. Piranomonte, G. Tagliaferri, et al.), *Astron. Astrophys.* **577**, A116 (2015).
55. Егамбердиев и др. (S.A. Ehgamberdiev, A.K. Baijumanov, S.P. Ilyasov, M. Sarazin, Y.A. Tillayev, A.A. Tokovinin, and A. Ziad), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **145**, 293 (2000).
56. Зэх и др. (A. Zeh, S. Klose, and D.H. Hartmann), *Astrophys. J.* **609**, 952 (2004).

57. Ивамото и др. (K. Iwamoto, P.A. Mazzali, K. Nomoto, H. Umeda, T. Nakamura, F. Patat, I.J. Danziger, T.R. Young, et al.), *Nature* **395**, 672 (1998).
58. Иzzo и др. (L. Izzo, J. Selsing, J. Japelj, B. Milvang-Jensen, J.P.U. Fynbo, D. Xu, D.A. Kann, N.R. Tanvir, et al.), *GCN Circular 22180* (2017).
59. Иzzo и др. (L. Izzo, A. Rossi, D.B. Malesani, K.E. Heintz, J. Selsing, P. Schady, R.L.C. Starling, J. Sollerman, et al.), *GCN Circular 23142* (2018).
60. Канн и др. (D.A. Kann, S. Klose, and A. Zeh), *Astrophys. J.* **641**, 993 (2006).
61. Канн и др. (D.A. Kann, S. Klose, B. Zhang, D. Malesani, E. Nakar, A. Pozanenko, A.C. Wilson, N.R. Butler, et al.), *Astrophys. J.* **720**, 1513 (2010).
62. Канн и др. (D.A. Kann, S. Klose, B. Zhang, S. Covino, N.R. Butler, D. Malesani, E. Nakar, A.C. Wilson, et al.), *Astrophys. J.* **734**, 96 (2011).
63. Канн и др. (D.A. Kann, P. Schady, E.F. Olivares, S. Klose, A. Rossi, D.A. Perley, B. Zhang, T. Kruhler, et al.), *Astron. Astrophys.* **617**, A122 (2018).
64. Канн и др. (D.A. Kann, P. Schady, E.F. Olivares, S. Klose, A. Rossi, D.A. Perley, T. Kruhler, J. Greiner, et al.), *Astron. Astrophys.* **624**, A143 (2019).
65. Кано и др. (Z. Cano, D. Bersier, C. Guidorzi, R. Margutti, K.M. Svensson, S. Kobayashi, A. Melandri, K. Wiersema, et al.), *MNRAS* **413**, 669 (2011).
66. Кано (Z. Cano), *MNRAS* **434**, 1098 (2013).
67. Кано (Z. Cano), *Astrophys. J.* **794**, 121 (2014a).
68. Кано и др. (Z. Cano), *Astron. Astrophys.* **568**, A19 (2014b).
69. Кано и др. (Z. Cano, A. de Ugarte Postigo, D. Perley, T. Kruhler, R. Margutti, M. Friis, D. Malesani, P. Jakobsson, et al.), *MNRAS* **452**, 1535 (2015).
70. Кано и др. (Z. Cano, et al.), *Astron. Astrophys.* **605**, A107 (2017a).
71. Кано и др. (Z. Cano, et al.), *Adv. Astron.* **2017** (2017b).
72. Кастро-Тирадо и др. (A.J. Castro-Tirado, Y. Hu, E. Fernandez-Garcia, A. Valeev, V. Sokolov, S. Guziy, S. Oates, S. Jeong, et al.), *GCN Circular 23708* (2019).
73. Кирола-Васкес и др. (J. Quirola-Vasquez, D.B. Malesani, A.J. Levan, P.G. Jonker, F.E. Bauer, J. van Dalen, M.E. Ravasio, D. Mata Sanchez, et al.), *GCN 37458* (2024).
74. Клозе и др. (S. Klose, S. Schmidl, D.A. Kann, A. Nicuesa Guelbenzu, S. Schulze, J. Greiner, E.F. Olivares, T. Kruhler, et al.), *Astron. Astrophys.* **622**, 28 (2019).
75. Кобб и др. (B.E. Cobb, J.S. Bloom, D.A. Perley, A.N. Morgan, S.B. Cenko, and A.V. Filippenko), *Astrophys. J. (Lett.)* **718**, L150 (2010).
76. Коултер и др. (D.A. Coulter, R.J. Foley, D. Kasen, A. Murguia-Berthier, E. Ramirez-Ruiz, D.A. Coulter, M.R. Drout, A.L. Piro, et al.), *Science* **358**, 1556 (2017).
77. Кошут и др. (T.M. Koshut, W.S. Paciesas, Ch. Kouveliotou, J. van Paradijs, G.N. Pendleton, G.J. Fishman, and Ch.A. Meegan), *Astrophys. J.* **463**, 570 (1996).
78. Кувелиоту и др. (C. Kouveliotou, Ch.A. Meegan, G.J. Fishman, N.P. Bhat, M.S. Briggs, Th.M. Koshut, W.S. Paciesas, and G.N. Pendleton), *Astrophys. J. (Lett.)* **413**, L101 (1993).
79. Кулкарни и др. (S.R. Kulkarni, D.A. Frail, M.H. Wieringa, R.D. Ekers, E.M. Sadler, R.M. Wark, J.L. Higdon, E.S. Phinney, and J.S. Bloom), *Nature* **395**, 663 (1998).
80. Леван и др. (A.J. Levan, D.B. Malesani, B.P. Gompertz, A.E. Nugent, M. Nicholl, S.R. Oates, D.A. Perley, J. Rastinejad, et al.), *Nature Astron.* **7**, 976 (2023).
81. Леван и др. (A.J. Levan, B.P. Gompertz, O.Sh. Salafia, M. Bulla, E. Burns, K. Hotokezaka, L. Izzo, G.P. Lamb, et al.), *Nature* **626**, 737 (2024).
82. Левеск и др. (E.M. Levesque, R. Chornock, A.M. Soderberg, E. Berger, and R. Lunnan), *Astrophys. J.* **758**, 92 (2012).
83. Лесаж и др. (S. Lesage, S. Poolakkil, C. Fletcher, C. Meegan, A. Goldstein, Fermi GBM Team), *GCN Circular 25575* (2019).
84. Лесаж и др. (S. Lesage, S. Poolakkil, C. Meegan, Fermi Gamma-ray Burst Monitor Team), *GCN Circular 30965* (2021).
85. Ли и др. (Q.M. Li, Z.B. Zhang, X.L. Han, K.J. Zhang, X.L. Xia, and C.T. Hao), *MNRAS* **524**, 1096 (2023).
86. Липунов и др. (V.M. Lipunov, A.V. Krylov, V.G. Kornilov, G.V. Borisov, D.A. Kuvshinov, A.A. Belinsky, M.V. Kuznetsov, S. Potanin, S. A.; et al.), *Astronomische Nachrichten* **325**, 580 (2004).
87. Люй и др. (H.-J. L'u, et al.), *Astrophys. J.* **862**, 13 (2018).
88. Мазаева и др. (E. Mazaeva, et al.), *Inter. J. Modern Phys. D* **27** (2018).
89. Маргутти и др. (R. Margutti, A.M. Soderberg, M.H. Wieringa, P.G. Edwards, R.A. Chevalier, B.J. Morsony, R. Barniol Duran, L. Sironi, et al.), *Astrophys. J.* **778**, 18 (2013).
90. Маршалл и др. (F.E. Marshall), *Astrophys. J.* **727**, 132 (2011).
91. Мей и др. (A. Mei, B. Banerjee, G. Oganesyan, Om Sharan Salafia, St. Giarratana, M. Branchesi, P. D'Avanzo, S. Campana, et al.), *Nature* **612**, 236 (2022).
92. Меландри и др. (A. Melandri, E. Pian, P. Ferrero, V. D'Elia, E.S. Walker, G. Ghirlanda, S. Covino, L. Amati, et al.), *Astron. Astrophys.* **547**, A82 (2012).
93. Меландри и др. (A. Melandri, D.B. Malesani, L. Izzo, J. Japelj, S.D. Vergani, P. Schady, A. Sagues Carracedo, A. de Ugarte Postigo, et al.), *MNRAS* **490**, 5366 (2019a).
94. Меландри и др. (A. Melandri, L. Izzo, P. D'Avanzo, D. Malesani, M. Della Valle, E. Pian, N.R. Tanvir, F. Ragosta, F. Olivares, et al.), *GCN Circular 23983* (2019b).
95. Миган и др. (C. Meegan, G. Lichti, P.N. Bhat, E. Bissaldi, M.S. Briggs, V. Connaughton, R. Diehl, G. Fishman, et al.), *Astrophys. J.* **702**, 791 (2009).
96. Минаев и др. (P.Yu. Minaev, A.S. Pozanenko, and V.M. Loznikov), *Astron. Lett.* **36**, 707 (2010).
97. Минаев и Позаненко (P.Y. Minaev and A.S. Pozanenko), *MNRAS* **492**, 1919 (2020).
98. Мирабал и др. (N. Mirabal, J.P. Halpern, D. An, J.R. Thorstensen, and D.M. Terndrup), *Astrophys. J. (Lett.)* **643**, L99 (2006).
99. Моджаз (M. Modjaz), *Astronomische Nachrichten* **332**, 434 (2011).

100. Мозгунов и др. (G.Yu. Mozgunov, P.Yu. Minaev, and A.S. Pozanenko), *Astron. Lett.* **47**, 150 (2021).
101. Мусолино и др. (C. Musolino, R. Duque, and L. Rezzolla), *Astrophys. J. (Lett.)* **966**, L31 (2024).
102. Мэтисон и др. (T. Matheson, P.M. Garnavich, K.Z. Stanek, D. Bersier, S.T. Holland, K. Krisciunas, N. Caldwell, P. Berlind, et al.), *Astrophys. J.* **599**, 394 (2003).
103. Нинно и др. (Y. Niino, T. Hashimoto, K. Aoki, T. Hattori, K. Yabe, and K. Nomoto), *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, 115 (2012).
104. Номото и др. (K. Nomoto, N. Tominaga, M. Tanaka, K. Maeda, T. Suzuki, J.S. Deng, and P.A. Mazzali), *Nuovo Cimento B Ser.* **121**, 1207 (2006).
105. Норрис и Боннелл (J.P. Norris and J.T. Bonnell), *Astrophys. J.* **643**, 266 (2006).
106. Оливарес и др. (E.F. Olivares, et al.), *Astron. Astrophys.* **577**, A44 (2015).
107. Парсонс и др. (A. Parsons, L. Barbier, S.D. Barthelmy, J. Cummings, E. Fenimore, N. Gehrels, D. Grupe, D. Hullinger, et al.), *GCN Circular* **5370** (2006).
108. Пачиньский (B. Paczynski), *Astrophys. J. (Lett.)* **308**, L43 (1986).
109. Пачиньский (B. Paczynski), *Astrophys. J. (Lett.)* **494**, L45 (1998).
110. Позаненко и др. (A.S. Pozanenko, P.Yu. Minaev, S.A. Grebenev, and I.V. Chelovekov), *Astron. Lett.* **45**, 710 (2020).
111. Позаненко и др. (A.S. Pozanenko, et al.), *Письма в Астрон. журн.* **47**, 791 (2021a).
112. Позаненко и др. (A. Pozanenko, A. Moiseev, A. Moskvitin, E. Malygin, S. Belkin, N. Pankov, V. Kim, IKI FuN, GRB; A. Rossi, D.A. Kann), *GCN Circular* **31053** (2021b).
113. Райхарт (D.E. Reichart), *Astrophys. J. (Lett.)* **521**, L111 (1999).
114. Растинежад и др. (J.C. Rastinejad, B.P. Gompertz, A.J. Levan, Wen-fai Fong, M. Nicholl, G.P. Lamb, D.B. Malesani, A.E. Nugent, et al.), *Nature* **612**, 223 (2022).
115. Ричардсон (D. Richardson), *Astron. J.* **137**, 347 (2009).
116. Робертс и др. (O.J. Roberts, C. Meegan, S. Lesage, E. Burns, S. Dalessi, Fermi GBM Team), *GCN Circular* **34391** (2023).
117. Роминг и др. (P.W.A. Roming, Th.E. Kennedy, K.O. Mason, J.A. Nousek, L. Ahr, R.E. Bingham, P.S. Broos, M.J. Carter, et al.), *Space Sci. Rev.* **120**, 95 (2005).
118. Rossi и др. (A. Rossi, et al.), *GCN Circular* **23055** (2018).
119. Rossi и др. (A. Rossi, B. Rothberg, E. Palazzi, D.A. Kann, P. D'Avanzo, L. Amati, S. Klose, A. Perego, et al.), *Astrophys. J.*, **932**, 1 (2022a).
120. Rossi и др. (A. Rossi, E. Pian, E. Palazzi, A. Melandri, CIBO Collaboration; B. Rothberg, A. Pozanenko, S. Belkin, D.A. Kann), *GCN Circular* **31596** (2022b).
121. Rossi и др. (A. Rossi, E. Pian, F. Cusano, E. Maiorano, E. Palazzi, CIBO Collaboration; S. Belkin), *GCN Circular* **31739** (2022b).
122. Сан и др. (H. Sun, et al.), *arXiv:2307.05689* (2023).
123. Санчес-Рамирес и др. (R. Sanchez-Ramrez, J. Gorosabel, D. Perez-Ramirez, S. Jeong, A.J. Castro-Tirado, F.J. Aceituno, R. Cunniffe, P. Ferrero, et al.), *GCN Circular* **18177** (2015).
124. Санчес-Рамирес и др. (R. Sanchez-Ramrez, R.G. Lang, A. Pozanenko, H. Martnez-Huerta, Y.-D. Hu, S.B. Pandey, R. Gupta, A.K. Ror, et al.), *Astron. Astrophys.* **692**, A3 (2024).
125. CBOM/ГРМ команда и др. (SVOM/GRM Team, et al.), *GCN* **36805** (2024).
126. Селсинг и др. (J. Selsing, L. Izzo, A. Rossi, D.B. Malesani, K.E. Heintz, P. Schady, R.L.C. Starling, J. Sollerman, et al.), *GCN Circular* **23181** (2018).
127. Селсинг и др. (J. Selsing, J.P.U. Fynbo, K.E. Heintz, and D. Watson), *GCN Circular* **23695** (2019).
128. Содерберг и др. (A.M. Soderberg, S.R. Kulkarni, P.A. Price, D.B. Fox, E. Berger, D.-S. Moon, S.B. Cenko, A. Gal-Yam, et al.), *Astrophys. J.* **636**, 391 (2006).
129. Станек и др. (K.Z. Stanek, T. Matheson, P.M. Garnavich, P. Martini, P. Berlind, N. Caldwell, P. Challis, W.R. Brown, et al.), *Astrophys. J.* **591**, L17 (2003).
130. Станек и др. (K.Z. Stanek, P.M. Garnavich, P.A. Nutzman, J.D. Hartman, A. Garg, K. Adelberger, P. Berlind, A.Z. Bonanos, M.L. Calkins, et al.), *Astrophys. J.* **626**, L5 (2005).
131. Стигс и др. (D. Steeghs, D.K. Galloway, K. Ackley, M.J. Dyer, J. Lyman, K. Ulaczyk, R. Cutter, Y.-L. Mong, et al.), *MNRAS* **511**, 2405 (2022).
132. Стратта и др. (G. Stratta, et al.), *arXiv:2412.04059* (2024).
133. Сюй и др. (D. Xu, et al.), *Astrophys. J.* **776**, 98 (2013).
134. Танвир и др. (N.R. Tanvir, E. Rol, A.J. Levan, K. Svensson, A.S. Fruchter, J. Granot, P.T. O'Brien, K. Wiersema, et al.), *Astrophys. J.* **725**, 625 (2010).
135. Тёне и др. (C.C. Th'one, et al.), *GCN Circular*, **5373** (2006).
136. Тёне и др. (C.C. Th'one, et al.), *Nature* **480**, 72 (2011).
137. Той и др. (V.L. Toy, S.B. Cenko, J.M. Silverman, N.R. Butler, A. Cucchiara, A.M. Watson, D. Bersier, D.A. Perley, et al.), *Astrophys. J.* **818**, 79 (2016).
138. Троя и др. (E. Troja, G. Ryan, L. Piro, H. van Eerten, S.B. Cenko, Y. Yoon, S.-K. Lee, M. Im, T. Sakamoto, et al.), *Nature Communicat.* **9**, 4089 (2018).
139. Троя и др. (E. Troja, C.L. Fryer, B. O'Connor, G. Ryan, S. Dichiara, A. Kumar, N. Ito, R. Gupta, et al.), *Nature* **612**, 228 (2022).
140. Ферреро и др. (P. Ferrero, D.A. Kann, A. Zeh, S. Klose, E. Pian, E. Palazzi, N. Masetti, D.H. Hartmann, et al.), *Astron. Astrophys.* **457**, 857 (2006).
141. Фрайер и др. (C.L. Fryer, P.A. Mazzali, J. Prochaska, E. Cappellaro, A. Panaiteescu, E. Berger, M. van Putten, Ed P.J. van den Heuvel, et al.), *PASP* **119**, 1211 (2007).
142. Фредерикс и др. (D. Frederiks, D. Svinkin, A.L. Lysenko, S. Molkov, A. Tsvetkova, M. Ulanov, A. Ridnaia, A.A. Lutovinov, et al.), *Astrophys. J. (Lett.)* **949**, L7 (2023).
143. Фремлинг и др. (C. Fremling, et al.), *GCN Circular* **31629** (2022).

144. Хьорт и др. (J. Hjorth, J. Sollerman, P. Møller, J.P.U. Fynbo, S.E. Woosley, Ch. Kouveliotou, N.R. Tanvir, J. Greiner, et al.), *Nature* **423**, 847 (2003).
145. Хьорт и Блум (J. Hjorth and S.S. Bloom), Chapter 9 in “Gamma-Ray Bursts”, 169 (2012).
146. Цветкова и др. (A. Tsvetkova, D. Frederiks, A. Lysenko, A. Ridnaia, D. Svinkin, M. Ulanov, T. Cline, Konus-Wind Team), *GCN Circular* **31646** (2022).
147. Цзя и др. (L.-W. Jia, Xue-Feng Wu, Hou-Jun Lu, Shu-Jin Hou, and En-Wei Liang), *Res. Astron. Astrophys.* **12**, 411 (2012).
148. Шлафлай и Финкбайнер (E.F. Schlafly and D.P. Finkbeiner), *Astrophys. J.* **737**, 13 (2011).
149. Шо (R.L. Shaw), *Astron. Astrophys.* **76**, 188 (1979).
150. Шринивасарагаван и др. (G.P. Srinivasaragavan, V. Swain, B. O’Connor, Sh. Anand, T. Ahumada, D. Perley, R. Stein, J. Sollerman, et al.), *Astrophys. J. (Lett.)* **960**, L18 (2024).
151. Шульце и др. (S. Schulze, D. Malesani, A. Cucchiara, N.R. Tanvir, T. Kruhler, A. de Ugarte Postigo, G. Leloudas, J. Lyman, et al.), *Astron. Astrophys.* **566**, A102 (2014).
152. Юань и др. (W. Yuan, et al.), *arXiv e-prints* **1506.07735** (2015).
153. Ян и др. (J. Yang, Sh. Ai, Bin-Bin Zhang, Bing Zhang, Zi-Ke Liu, X.I. Wang, Yu-Han Yang, Yi-Han Yin, Ye Li, and Hou-Jun Lu), *Nature* **612**, 232 (2022).