

ПЕРВОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ВСПЛЕСКА СИРОТЫ НА СТАДИИ РОСТА

© 2022 г. В. М. Липунов^{1,2*}, В. Г. Корнилов¹, В. В. Тополев¹, Н. В. Тюрина²,
Е. С. Горбовской¹, С. Г. Симаков², К. К. Жирков¹, Д. С. Власенко^{1,2},
К. Франсиле^{3,4}, Р. Подеста^{3,4}, Ф. Подеста³, Д. С. Свинкин⁴, Н. М. Буднев⁵,
П. В. Балануца², Д. В. Черясов², А. Р. Часовников¹, Р. Реболо⁶,
М. Серра-Рикарт⁶, О. А. Гресь^{2,5}, О. А. Ершова⁵, В. В. Юрков⁷,
А. С. Габович^{2,7}, А. Г. Тлатов⁸, Е. М. Минкина^{1,2}, В. В. Владимиров²,
А. С. Кузнецов², Г. А. Антипов², С. И. Свертилов^{1,9}, Ю. Целик⁵, Я. Кечин⁵

¹Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Национальный университет Сан-Хуана, Сан-Хуан, Аргентина

⁴Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁵Институт прикладной физики Иркутского государственного университета, Иркутск, Россия

⁶Канарский институт астрофизики, Тенерифе, Испания

⁷Благовещенский государственный педагогический университет, Благовещенск, Россия

⁸Кисловодская солнечная станция Пулковской обсерватории, Кисловодск, Россия

⁹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 12.05.2022 г.

После доработки 08.10.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

Мы сообщаем о самой ранней регистрации оптического транзиента MASTER OT J123248.62-012924.5, совпадающего в пределах квадрата ошибок с оптическим и рентгеновским транзиентом AT2021ffa/ZTF21aauokrh. На наших изображениях яркость объекта монотонно возрастает с достоверностью 7σ . Мы интерпретируем этот транзиент как гамма-всплеск, характеризующийся гладким оптическим автомоделным (SOSS) излучением. Отсутствие же регистрации гамма-излучения на космических обсерваториях интерпретируется в рамках гипотезы о “неудавшемся” гамма-всплеске. Таким образом, речь идет о первой регистрации немонотонного всплеска-сироты.

Ключевые слова: гамма-всплески (gamma-ray bursts (GRBs)), сиротские всплески (orphan GRBs).

DOI: 10.31857/S0320010822110109

ВВЕДЕНИЕ

Гамма-всплески, самые мощные явления во Вселенной, связанные с образованием черных дыр, были открыты в середине XX в. (Клебесадел и др., 1973; Мазетц и др., 1974). Распределение по длительности всплесков бимодально с условной границей 2–4 с. После 17 августа 2017 г. (обнаружения электромагнитного источника гравитационных волн — Килоновой GW170817 — при

слиянии двух нейтронных звезд) можно считать доказанным, что короткие всплески являются результатом слияния компактных объектов — нейтронных звезд (Блинников и др., 1984; Липунов и др., 1995а; Б. Пачинский, 1997) или смешанных пар, состоящих из нейтронной звезды и черной дыры. Длинные гамма-всплески обычно связывают с коллапсом ядра быстровращающейся массивной звезды (МакФадиев, Вусли, 1999; Вусли, Хегер, 2006; Липунов, Горбовской, 2007, 2008). Быстрое вращение препятствует прямому коллапсу и дает

*Электронный адрес: lipunov2007@gmail.com

достаточно времени для превращения значительной части гравитационной и вращательной энергии в электромагнитное излучение. Из-за магнитного поля и вращения эта энергия испускается в виде двух узконаправленных релятивистских струй (Кац, Пиран, 1997). Различная степень углового раскрытия струй в разных диапазонах может быть причиной регистрации нового типа транзиентов — всплесков “сирот”, т.е. транзиентов видимых только в оптическом, радио или рентгеновском диапазоне без наблюдаемого гамма излучения (Роудс, 1997; Хуан и др., 2002; Накар, Пиран, 2003). За последние 20 лет были предприняты многочисленные попытки обнаружить такие сиротские вспышки, но безрезультатно (Левинсон, Эйчлер, 2022; Рыков и др., 2005; Рау и др., 2006; Гал-Ям и др., 2006; Малакрина и др., 2007; Ченко и др., 2013; Хо и др., 2018, 2020; Лоу и др., 2018; Хуанг и др., 2020).

В этой статье мы приводим результат наблюдений на телескопе МАСТЕР-ОАФА Глобальной сети МАСТЕР (Липунов и др., 2022) оптического (ОТ) и рентгеновского транзиента 2021lfa/ZTF21aayokph похожего на послесвечение гамма-всплеска (Яо и др., 2021; Липунов и др., 2021) и обосновываем его интерпретацию в рамках гипотезы о “неудавшемся” гамма-всплеске (Хуан и др., 2002), т.е. речь идет о первой регистрации немонотонного всплеска-сироты.

НАБЛЮДЕНИЯ

Глобальная сеть МАСТЕР: принципы проведения обзорных и алертных наблюдений и обнаружения оптических транзиентов

Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР (Липунов и др., 2010, 2019а, 2022) создана учеными МГУ в коллаборации с университетами и ведущими научными центрами (ИГУ, БГПУ, IAC, SAAO, OАFA, INAOE/OAGH) для обнаружения и исследования оптических источников гамма-всплесков (Липунов и др., 2016, 2017а–г, 2018), гравитационных волн (Абботт и др., 2016), нейтрино высоких и сверхвысоких энергий (Аартсен и др., 2017; Липунов и др., 2020), быстрых радиовспышек, всплесков-сирот и других транзиентных явлений (Горбовской и др., 2016; Троя и др., 2017; Садовничий и др., 2018; Зимнухов и др., 2019; Ласкар и др., 2019; Джордана-Митьянс и др., 2020; Ершова и др., 2020; Бакли и др., 2021). Все телескопы МАСТЕР объединены решением общих задач в единую сеть с центральной базой данных изображений и объектов, доступных по интернету для анализа в любой момент времени. Глобальная сеть МАСТЕР на данный момент является единственной развитой и работающей

(публикующей ежедневно циркуляры о проводимых наблюдениях) сетью из девяти идентичных телескопов, расположенных в Северном и Южном полушариях, способной 366 ночей в году проводить алертные (по целеуказанию непосредственно после триггера), инспекционные и собственные обзорные наблюдения в режиме реального времени, что реализовано посредством созданного центрального планировщика (часть программного обеспечения робота МАСТЕР, распределяющего площадки приходящих алертных полей ошибок между соседними обсерваториями с учетом метеоусловий, времени суток, высоты исследуемых координат в текущий момент и в ближайшее время, углового расстояния от Млечного Пути, эклиптики, Луны и Солнца, полученных пределов для контроля качества и возможной пересъемки и т.д.). Каждая площадка (4 кв.град.) снимается не менее 2 раз за ночь со сдвигом по координатам (для исключения артефактов). Для быстрого обнаружения нового оптического источника МАСТЕРом реализована полная роботизация процесса наблюдений на всех телескопах сети (с автоматическим контролем состояния оборудования) и обработки 24 ч в сутки 365/366 дней в году. На каждой обсерватории (МАСТЕР-Amur, -Tunka, -Kislovodsk, -Ural, -Tavrida, -SAAO, -IAC, -OАFA, -OAGH) ежедневно автоматически (программным обеспечением): снимаются калибровочные изображения (на закате и рассвете), проводится обзор (в алертном, инспекционном или обзорном режимах) и по результатам online обработки (как прямым отождествлением объектов с выделением некаталогизированных, так и выделением объектов после вычитания текущего и архивного изображений) обнаруженные транзиенты (ОТ) помещаются для дальнейшего анализа в таблицу кандидатов (движущиеся источники автоматически анализируются и публикуются в MPC), а после проверки (кривая блеска по всем базам МАСТЕРа, сведения об источнике в открытых online каталогах) — публикуются в ATel, GCN, TNS (зависит от классификации объекта). Среди 3500 оптических транзиентов (Липунов и др., 2022, в печати), открытых и опубликованных МАСТЕРом за 10 лет, есть несколько десятков объектов слабее 19^m . Среди них яркая красная Новая МАСТЕР ОТ J004207.99+405501.1/M31LRN 2015 (Липунов и др., 2017б), оптические источники гамма-всплесков, карликовые новые, вспышки красных карликов и другие объекты. Рассмотрим несколько примеров обнаруженных программным обеспечением МАСТЕР объектов.

МАСТЕР ОТ J074953.05-512921.4 (GCN 17978) был обнаружен внутри поля ошибок Fermi LAT GRB 150627.18 (GCN 17791) телескопом-роботом МАСТЕР-SAAO на южноафриканской

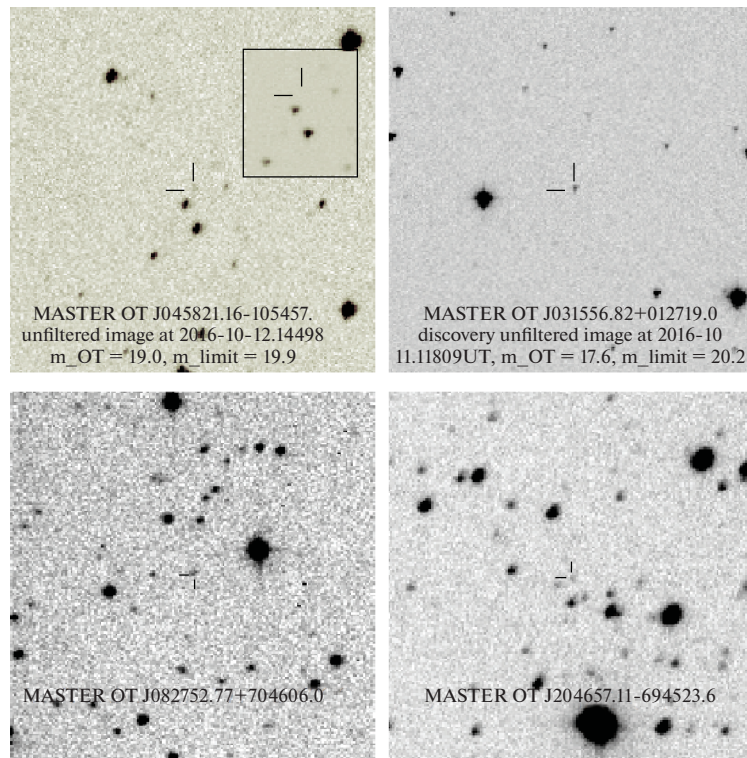


Рис. 1. Примеры обнаружения слабых объектов программным обеспечением системы МАСТЕР.

обсерватории SAAO. Новый источник яркостью 19^m в белом свете был найден на трех инспекционных изображениях по координатам R.A., Dec. (2000) = 07h 49m 53.05s, $-51^d 29^m 21.4s$ (первый снимок объекта получен в 2015-06-27 16:32:07). Объект соответствует источнику Swift-XRT,-UVOT (GCN 17976).

MASTER090525.27+405055.2 (ATel #9963) — это вспышка красного карлика (UVCet flare). Объект обнаружен в ходе обзора на телескопе МАСТЕР-Кисловодск по координатам (R.A., Dec.) = 09h 05m 25.27s +40d 50m 55.2s яркостью 19.9^m в 2017-01-07 00:10:42 и 19.0^m в 2017-01-07 00:33:23UT. С учетом того, что в VIZIER по данным координатам находится красная звезда (sloan) $r = 21.167$, одна из предыдущих вспышек была в 1978 г. (USNO-B1), и отсутствия объекта на архивных изображениях МАСТЕРА до 20.2^m , классификация источника — это вспышка красного карлика (<https://www.aavso.org/vsx/index.php/viewctail.top&oidG6406>).

MASTER OT J031556.82+012719.0 discovery (ATel #9616) (рис. 1) — вспышка красного карлика, объект яркостью 19.0^m обнаружен на телескопе МАСТЕР-ИАС (R.A., Dec.) = 03h 15m 56.82s +01d 27m 19.0s в 2016-10-11.12103 UT (первый снимок, $m_{lim} = 20.3^m$), опорное изображение использовано от 2016-08-13.21775 UT с пределом 20.2^m . В VIZIER в $0.496''$ расположена красная звезда

(Sloan r.049), что дает с учетом кривой блеска МАСТЕРА классификацию красного карлика (<https://www.aavso.org/vsx/index.php?viewctail.top&oidG4671>).

MASTER OT J004528.12+414117.6 — вспышка карликовой новой. Транзиент 19.0^m обнаружен на телескопе МАСТЕР-Кисловодск 2016-04-10.03461 UT по координатам (R.A., Dec.) = 00h 45m 28.12s +41d 41m 17.6s ($m_{lim} = 19.5^m$). Объект был виден на трех изображениях за ночь. Опорное изображение использовано 2016-02-08.68476 UT с пределом 21.1^m . Объект был пересянят МАСТЕР-ИАС 2016-04-13 05:11:28.249UT, яркость объекта увеличивалась до 18.6^m . Спектр, полученный на 2-м Ливерпульском телескопе LT, подтверждает классификацию объекта как карликовой новой, не исключая переходного состояния к Новой (ATel #8950).

MASTER OT J082752.77+704606.0 (рис. 1) — транзиент яркостью 19.1 был обнаружен на телескопе МАСТЕР-Тунка 2011-03-26 14:09:51UT в ходе регулярного обзора по координатам R.A., Dec.(2000) = 08h 27m 52.77s, $+70^d 46^m 06s.0$. На момент обнаружения объекта в базе данных VIZIER был только один источник — GSC с яркостью в синем фильтре $j = 21.7$ (калибровка МАСТЕРА по USNO-B1 как $0.2B+0.8R$). Для объекта был получен спектр на 6-м телескопе БТА САО РАН/SCORPIO (Моисеев и др., Atel

3255), где по эмиссии Mg II 2789 было определено красное смещение $z = 0.91$ и предположен тип объекта — QSO или Sy2 (ATel #3255).

MASTER OT J045821.16-105457.7 (рис. 1) — карликовая новая, объект, открытый на канарском телескопе MASTER-IAC 2016-10-12.14498 UT яркостью 19.0^m с амплитудой вспышки более 5 величин (21.0^m — предел на обзорных снимках МАСТЕРА данной области за 10 лет, а отсутствие объектов на изображениях PANSTARRs с пределом 24^m дает такое ограничение на амплитуду вспышки (<https://www.aavso.org/vsx/index.php/viewctail.top&oidG4672>). Опорное изображение МАСТЕРА взято за 2016-02-09 21:59:52UT с пределом $m_{\text{lim}} = 21.0^m$ (ATel #9616).

MASTER OT J204657.11-694523.6 (рис. 1) — карликовая новая, открытая на аргентинском телескопе MASTER-OAFA яркостью 19.0^m в момент обнаружения 2017-06-30.21138 UT по координатам (R.A., Dec.) = 20h 46m 57.11s, $-69^{\circ} 45' 23.6''$ ($m_{\text{lim}} = 19.8^m$). Объект виден на трех изображениях за ночь. Опорное изображение использовалось за 2016-09-30.24641 UT с пределом 20.0^m . В базе данных VizieR присутствовал только один источник из каталога GSC 2.3, не красный, с известной яркостью в синем фильтре $j_{\text{mag}} = 22.56$ (вспышка в 1978 г.), что дает амплитуду текущей вспышки более 3.5 звездных величин (калибровка МАСТЕРА по USNO-B как 0.2B+0.8R (в данном случае отсутствие значения в R фильтре дает предел в нем 22^m) <https://www.aavso.org/vsx/index.php/viewctail.top&oidQ2709>).

Богатый опыт обнаружения объектов как в алертном, так и в обзорном режимах, позволяет уверенно детектировать новые источники и оперативно сообщать о результатах их исследования в ATel, TNS, GCN и т.д.

AT2021lfa/MASTER OT J123248.62-012924.5/ZTF21aayokph

Оптический источник AT2021lfa/ZTF21aayokph был обнаружен Паломарским телескопом в ходе работы по проекту ZTF 2021-05-04 05:34:48 UT (GCN 29938) (Масци и др., 2019). Яркость объекта в момент обнаружения в красном фильтре $r = 18.6 \pm 0.08$, а через 2 ч в фильтре $g = 18.8 \pm 0.11$, для сравнения использовались изображения без объекта, полученные на 2 дня ранее (Яо и др., 2021). На 3 ч раньше (до обнаружения ZTF) во время проведения собственного обзора неба на аргентинском телескопе-роботе MASTER-OAFA Глобальной сети МАСТЕР (Липунов и др., 2010, 2019, 2022; Корнилов и др., 2012) автоматическим программным обеспечением (робот МАСТЕР) был обнаружен оптический транзиент MASTER OT

J123248.62-012924.5 (GCN 29959). В ходе обзора были получены 6 изображений с объектом, и его кривая блеска показала монотонное увеличение яркости объекта (см. табл. 1). Последующие наблюдения на других инструментах (Батлер и др., 2012, 2021; Росси и др., 2021; Уотсон и др., 2012, 2016, 2021; Фу и др., 2021; Яо и др., 2021а,б) (см. рис. 2, на который мы исключительно для наглядности нанесли все значения яркости в разных фильтрах в разное время, опубликованные на странице объекта <https://gcn.gsfc.nasa.gov/other/ZTF21aayokph.gcn3>) показали дальнейшее падение блеска, а на глубоком снимке на месте ОТ были найдены хозяйская галактика с красным смещением $z = 1.063$ и рентгеновский транзиент с типичным потоком для рентгеновских послесвечений гамма-всплесков (Хо и др., 2021).

Как показывает кривая блеска всплеска, построенная по изображениям (рис. 2), яркость ОТ неуклонно увеличивается с первых изображений, оставаясь ниже значения ZTF на их первом кадре. Достоверность того, что блеск AT2021lfa во время наблюдений MASTER был ниже, чем во время первого наблюдения ZTF, находится на уровне 7σ . Эта оценка получена путем сравнения суммы наблюдений 6 кадров ОТ с измерением ZTF в г фильтре, который неплохо совпадает с полосой МАСТЕРА (табл. 1). Следовательно, можно предположить, что время достижения максимальной яркости расположено между последним кадром МАСТЕР-OAFA и первым кадром ZTF.

Для проведения фотометрии мы использовали следующую процедуру. Поток оптического транзиента измерялся в $6''$ апертуре, откалиброванной по нескольким эталонным звездам с аналогичным цветом и величинами G от Gaia EDR372-74 (Gaia коллаборация, 2016, 2020; Риелло и др., 2021). Для

Таблица 1. Фотометрия AT2021lfa, полученная сетью МАСТЕР

Время, UTC	Экспозиция, s	Звездная величина	Ошибка звездной величины
2021-05-04 02 : 31 : 49	180	19.8	0.3
2021-05-04 02 : 58 : 31	180	19.2	0.2
2021-05-04 03 : 15 : 19	180	19.1	0.2
2021-05-04 03 : 21 : 59	180	19.1	0.2
2021-05-04 03 : 42 : 01	180	18.9	0.3
2021-05-04 04 : 05 : 38	180	18.9	0.3

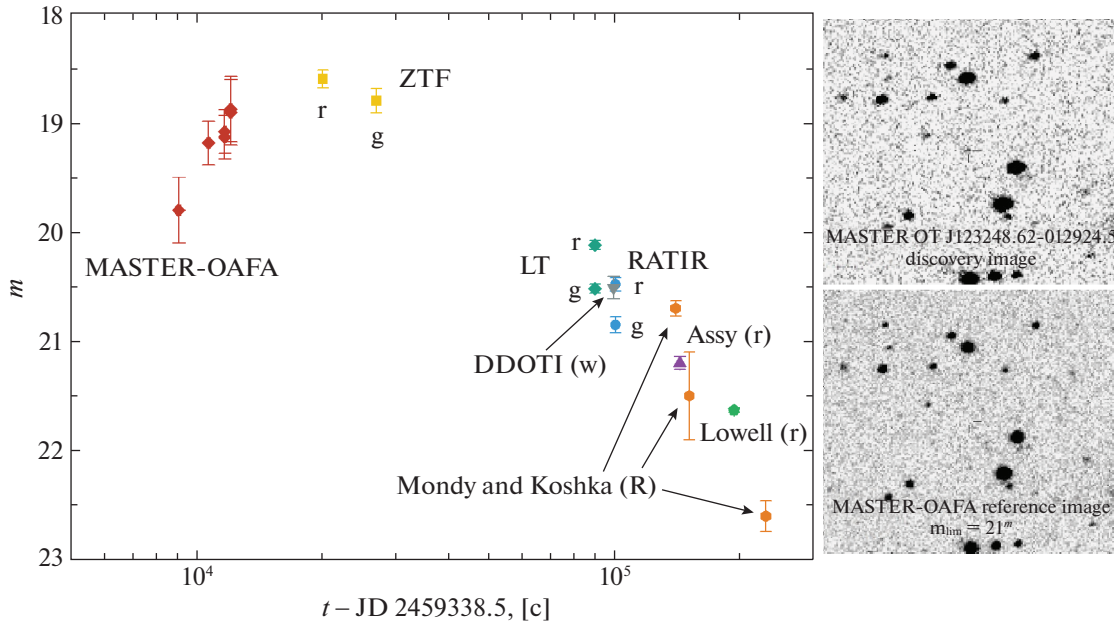


Рис. 2. MASTER OT J123248.62-012924.5 (AT2021lfa/ZTF21aayokph) оптическое изображение и кривая блеска (данные о фотометрии взяты из телеграмм Яо и др., GCN 29938; Ватсон и др., GCN 29940; Батлер и др., GCN 29941; Ким и др., GCN 29950; О’Коннор и др., GCN 29952; Панков и др., GCN 29954; Липунов и др., GCN 29959; Панков и др., GCN 29964; <https://gcn.gsfc.nasa.gov/other/ZTF21aayokph.gcn3>). Справа сверху показано первое изображение, полученное на МАСТЕР-OAFA, на котором был виден транзиент, справа внизу — опорный кадр, на котором нет объекта. Ошибки соответствуют уровню значимости 1σ , $t_{\text{midnight}} = 2021-05-04\ 00 : 00 : 00$ UTC.

оценки ошибок мы использовали следующую формулу: $\Delta m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{m}_i - m_{ij})^2}{N}}$, где \bar{m}_i — звездная величина опорной звезды i , усредненная за время наблюдений, m_{ij} — звездная величина опорной звезды i на кадре j , N — количество опорных звезд.

Аппроксимация кривой блеска

Такая немонотонная гладкая форма кривой блеска может указывать на то, что AT2021lfa является примером гамма-всплесков с плавным оптическим автоматическим излучением (здесь SOS-подобные гамма-всплески, Smooth Optical Self Similar), впервые идентифицированных в 2017 г. (Липунов и др., 2017а). В пользу того, что данный ОТ является послесвечением гамма-всплеска, выступают и другие его свойства: красный цвет ($g - r > 0^m$), тусклая родительская галактика ($r > 23^m$) и быстрое затухание ($dr/dt = 1^m/\text{день}$) (Хо и др., 2022). SOS-подобные послесвечения гамма-всплесков описываются универсальной моделью, которая позволяет по форме кривой блеска определить как время всплеска, так и время пика. Модель основана на предположении о том, что наблюдается синхротронное излучение, создаваемое ультррелятивистской ударной волной в

сжатом межзвездном газе или в звездном ветре звезды-прародителя (Грузинов, Ваксман, 1999). Затухающий участок кривой блеска определяется временем остывания релятивистских электронов и степенным падением плотности среды. Такое излучение SOSS практически не связано с собственным оптическим излучением, которое возникает, скорее всего, в обратной ударной волне внутри джета и, как правило, видно одновременно с гамма-излучением.

Чтобы аппроксимировать кривую блеска AT2021lfa, мы использовали гладкую оптическую самоподобную модель излучения (SOSS) для гамма-всплеска. Кривая блеска SOSS описывается следующей формулой:

$$F = F_{\text{max}} \left(\frac{\beta \tau^{\beta-1}}{1 + (\beta - 1)\tau^\beta} \right)^\alpha, \quad (1)$$

где $\tau = (t - t_{\text{trig}})/(t_{\text{max}} - t_{\text{trig}})$, t_{trig} — время триггера (время начала активной фазы), t_{max} — время максимума, F_{max} — пиковый оптический поток. Используя кривые блеска других гамма-всплесков такого типа, мы приходим к выводу, что можно предложить $\alpha = 1.2$, $\beta = 2.71$. Поскольку мы не знаем ни момента всплеска, ни момента его максимума, ни его пикового потока, все три значения являются неизвестными параметрами модели. Данные, полученные оптическими телескопами, и

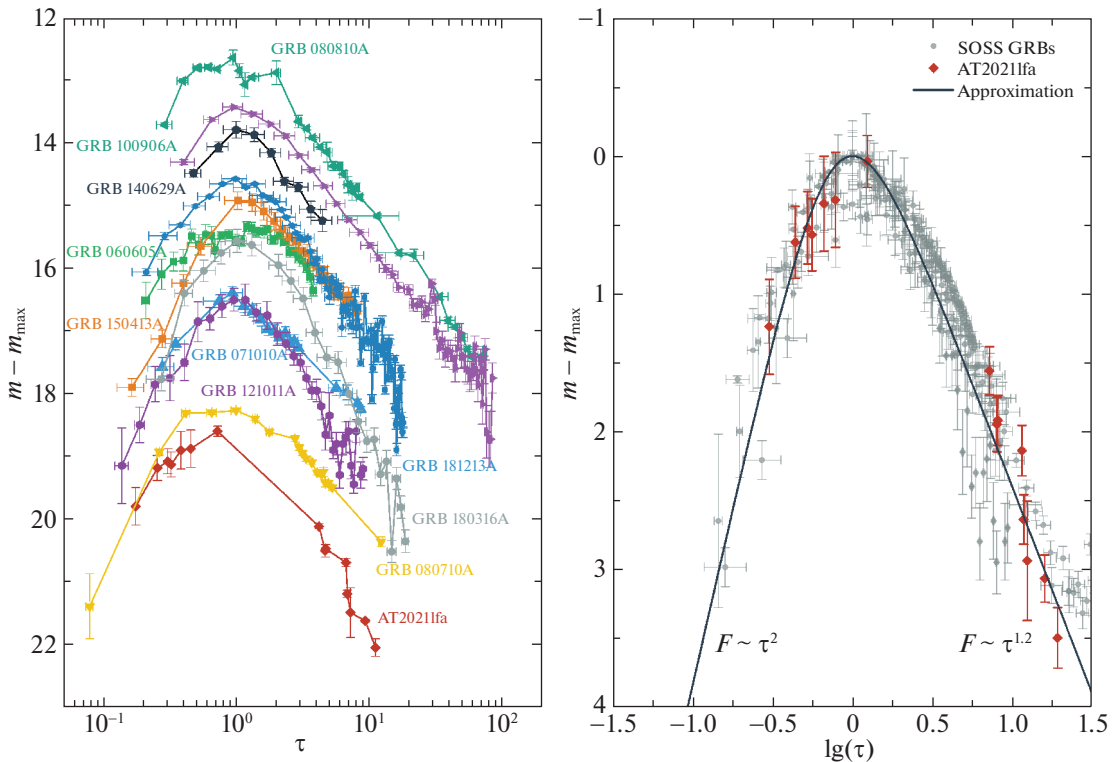


Рис. 3. Кривые блеска AT2021lfa. На левой панели представлено сравнение AT2021lfa с послесвечениями SOSS гамма-всплесков (Липунов и др., 2017а). На правой панели AT2021lfa рассматривается как SOSS послесвечение. Ошибки соответствуют уровню значимости 1σ .

опубликованные в GCN, и наши данные, были аппроксимированы методами наименьших квадратов (рис. 3, правая панель).

Аппроксимируя кривую блеска AT2021lfa моделью гладкого оптического автомодельного излучения, взяв в качестве свободных параметров (t_{trig} , t_{max} и m_{max}), мы получили с помощью МНК следующие значения параметров: момент вспышки $t_{\text{trig}} = 2021.05.04(01 : 33 \pm 00 : 14)$ UTC; момент пика $t_{\text{max}} = 2021.05.04(04 : 52 \pm 00 : 14)$ UTC; пиковая звездная величина $m_{\text{max}} = 18.6 \pm 0.2$. На левой панели рис. 3 можно увидеть кривую блеска AT2021lfa в сравнении с самыми яркими SOSS гамма-всплесками. С одной стороны, AT2021lfa действительно похож на них, но, с другой стороны, время достижения максимума у него самое большое, что, скорее всего, связано с эффектом селекции: ZTF в основном обследует небо в однодневном ритме, поэтому длительные события с большей вероятностью будут обнаружены. Следует также учитывать, что, несмотря на хорошее соответствие кривой блеска SOS, кривая блеска спадает, скорее, как $t^{-1.4}$, а не как $t^{-1.2}$. Это может быть вызвано распространением лобовой ударной волны в звездном ветре прародителя в модели медленного остывания (Чжан и др., 2006). Однако различие в наклоне правой части кривой блеска не исключает

возможности того, что в случае AT2021lfa мы имеем дело с послесвечением гамма-всплеска.

Рентгеновские данные обсерватории им. Нила Герелса “Свифт” (Хо и др., 2021) дают поток в полосе 0.3–10 кэВ, равный 2.9×10^{-13} эрг см^{-2} с^{-1} через один день после обнаружения ZTF, что соответствует светимости 1.9×10^{45} эрг с^{-1} при $z = 1.0632$. Используя эту оценку, мы можем рассчитать плотность потока мгновенного гамма-излучения транзиента, если бы это был гамма-всплеск.

Рентгеновские наблюдения

Для анализа наблюдений, сделанных Swift-XRT через 1 день после обнаружения AT2021lfa, мы использовали стандартный пакет HEASOFT 6.2875 (Эванс и др., 2009). Используя хранилище открытых данных Swift и автоматическое программное обеспечение, доступное по адресу UKSSDC71, учитывая значение красного смещения от Gemini South $z = 1.063$, мы выбрали наиболее подходящую модель (модель поглощения межзвездной среды Тюбингена–Боулдера). В этой модели есть несколько ключевых параметров: $cflux$, TB_{abs} , zTB_{abs} , $powerlaw$, где $cflux$ — это поток в отсчетах в секунду на квадратный см;

Таблица 2. Параметры рентгеновского спектра

НН (внутреннее)	$7 (+59, -7) \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$
НН (галактическое)	$1.95 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$
z поглощения	1.063
Фотонный индекс	2.01 (+1.79, -0.71)
Поток (0.3–10 кэВ) (наблюдаемый)	$1.5 (+1.0, -0.7) \times 10^{-13} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Поток (0.3–10 кэВ) (непоглощенный)	$2.05 (+11.31, -0.67) \times 10^{-13} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Отсчеты в поток (наблюдаемый)	$3.30 \times 10^{-11} \text{ эрг см}^{-2} \text{ отсч.}^{-1}$
Отсчеты в поток (непоглощенный)	$4.38 \times 10^{-11} \text{ эрг см}^{-2} \text{ отсч.}^{-1}$
W-статистика (d.o.f.)	39.17(36)
Время экспозиции спектра	9.7 кс

TB_{abs} и zTB_{abs} являются параметрами модели и представляют компоненты модели поглощения; степенной закон (powerlaw) равен $K \times E^{-\alpha}$, α — индекс фотона, K — нормировочная константа, E — энергия фотона. В результате мы получили параметры рентгеновского транзиента и его спектр (см. табл. 2).

Для оценки быстрой изотропной максимальной яркости гамма-излучения мы использовали набор корреляций между потоком рентгеновского излучения и яркостью гамма-излучения, полученных за долгую историю наблюдений (Дайнотти и др., 2017), в частности, корреляцию между потоком рентгеновского излучения через 11 ч после вспышки в собственной системе и быстрым потоком гамма-излучения (Д’Аванзо и др., 2012). Наблюдения Swift-XRT проводились через 28 ч после полученного t_{trig} . Предполагая, что $z = 1.063$, в собственной системе отсчета время наблюдений составляет 13.6 ч, так что $E_{\gamma, \text{iso}} \in (10^{51}, 10^{54})$ эрг. Это означает, что в таком приближении гамма-всплеск мог бы быть обнаружен. Сравнение рентгеновского спектра AT2021fa со спектрами длинных гамма-всплесков показывает небольшую разницу (рис. 4). Его фотонный индекс $\alpha = 2.01$ согласуется с ожидаемыми значениями, согласно стандартной теории послесвечения (Сари, 1997). Таким образом, можно предположить, что наблюдаемый рентгеновский транзиент напоминает гамма-всплеск на поздних стадиях послесвечения.

Поиск гамма-излучения

Чтобы исключить возможность того, что этот транзиент является типичным длинным гамма-всплеском, который по каким-то причинам не был

автоматически обнаружен гамма-телескопами, был проведен поиск в каталоге всплесков Fermi/GBM, списке подпороговых триггеров, архиве Swift GRB и архиве GCN. Мы искали связанный GRB в расчетном интервале $2\Delta t_{\text{trig}}$ (Δt_{trig} — разница между расчетным t_{trig} и временем первого кадра МАСТЕР) в данных третьей межпланетной сети (IPN), которая состоит из восьми космических аппаратов, обеспечивающих постоянный мониторинг высокоэнергетических вспышек по всему небу. Наиболее чувствительными детекторами в IPN являются телескоп Swift Burst Alert Telescope (также мы проверили архив Swift GRB) (Бартелми и др., 2005), монитор гамма-всплесков Fermi (мы проверили каталог GRB и список подпороговых триггеров Fermi-GBM с флагом надежности, не равным 2) (Миган и др., 2009), INTEGRAL со спектрометром SPI (SPI-ACS) на борту (фон Кинлин и др., 2003) и прибор Konus на космическом аппарате Wind (Аптекарь и др., 1995). Мы не нашли соответствующего транзиента в гамма-диапазоне по желаемым координатам, включая архив GCN. Положение AT2021fa было видно GBM в течение всего интервала, GBM показывал сильно изменяющуюся скорость счета. Swift проходил южноатлантическую аномалию и не собирал данные в течение $\approx 20\%$ исследуемого времени, а остальное время источник находился вне поля зрения Swift BAT. Напротив, Konus-Wind и INTEGRAL (SPI-ACS) имели полный охват в диапазонах 20–1500 и 80–8000 кэВ соответственно и стабильные скорости подсчета (см. табл. 3). Мы не обнаружили значительного ($>5\sigma$) превышения над фоном в данных режима ожидания Konus-Wind во временных масштабах от 2.944 с до 100 с. Мы также не обнаружили каких-либо существенных

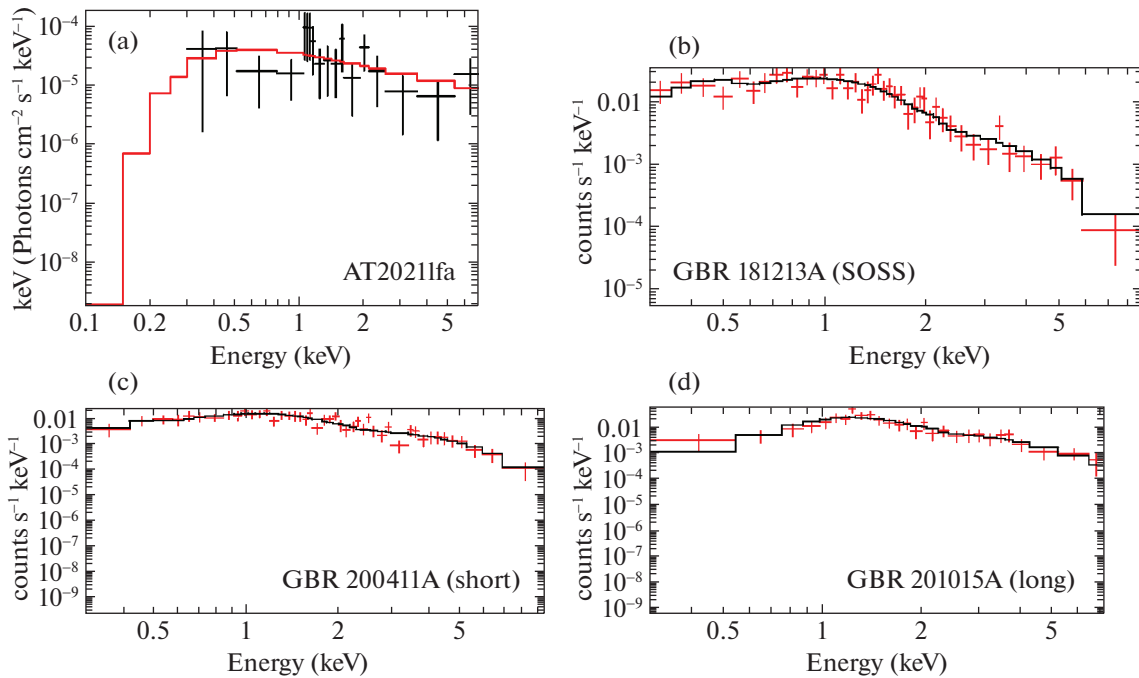


Рис. 4. (a) — Усредненный рентгеновский спектр AT2021lfa, (b)–(d) — спектры других гамма-всплесков для сравнения, ошибки соответствуют интервалу 1σ .

транзиентов (событий увеличения потока) в данных SPI-ACS. Используя данные режима ожидания Kopus-Wind, мы оцениваем верхний предел (90% достоверности) пикового потока для типичного длинного спектра GRB (функция Банда (Банд и др., 1993) $\alpha = -1$, $\beta = -2.5$ и $E_p = 300$ кэВ) до 3.4×10^{-7} эрг $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (10–1500 кэВ, шкала 2.944 с). Более мягкая полоса спектра с $E_p = 10$ кэВ, типичная для гамма-всплесков низкой яркости, приводит к несколько более низкому предельному пиковому потоку 3.0×10^{-7} эрг $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Для INTEGRAL SPI-ACS средняя скорость счета при бинировании 50 мс на исследуемом временном интервале составляла 135 600 отсч./с. Используя коэффициент пересчета (Вигано, Марегетти, 2010), мы приходим к следующему верхнему пределу (90% достоверности) для пикового потока -2.7×10^{-7} эрг $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Используя космологические константы, согласно данным микроволнового обзора “Планк” (Коллаборация Планк, 2020), эти верхние пределы соответствуют светимости 1.9×10^{51} эрг s^{-1} , если длительность вспышки 100 с, это соответствует 2×10^{53} эрг. Учитывая это, оценку потока гамма-излучения по рентгеновскому детектированию, а также полученные параметры для модели SOS, мы можем предположить, что это не типичный длинный гамма-всплеск, так как характерного в таких случаях гамма-излучения зафиксировано не было. В настоящее время существу-

ют три модели, которые предсказывают существование транзиентов, напоминающих послесвечения гамма-всплесков, но не сопровождаются существенной вспышкой гамма-излучения. Это осевой сиротский гамма-всплеск (Накар и др., 2003), внеосевой сиротский гамма-всплеск, или потерянное послесвечение (Роудс, 1997), и неудавшийся гамма-всплеск, или “грязный огненный шар” (Хуан и др., 2002). Первый основан на модели джета типичного гамма-всплеска, который наблюдается вблизи луча зрения, но не демонстрирует существенного гамма-излучения из-за его более высокой направленности в гамма-диапазоне. Вторая модель аналогична, но угол раскрытия увеличивается со временем. Третий основан на струе с высоким барийным загрязнением, из-за чего начальный лоренц-фактор намного меньше 100. Чтобы определить, к какому типу сиротских всплесков относится AT2021lfa, обратимся к расчетам кривых блеска анизотропных джетов, движущихся в однородной среде. Детальные исследования показывают, что на начальном этапе (до достижения максимума) внеосевые кривые блеска послесвечения растут значительно быстрее (при разумной модели профиля джета), чем в случае осевой струи (Хуан и др., 2002; Се, Макфадиев, 2019). Разница заметна даже при небольших углах зрения. Однако ряд других гидродинамических моделирований внеосевых кривых блеска в оптике дают противоположную картину с очень медленным нарастанием (Гранот и др., 2018), которое не наблюдается для данного

Таблица 3. Подробная информация об орбитальных инструментах, используемых для поиска гамма-всплесков

Инструмент	Энергия (КэВ)	Комментарии
Wind (Konus)	20–1500	ОТ был виден весь интервал, стабильный фон
Fermi (GBM; NaI)	8–1000	ОТ был виден весь интервал, переменный фон
INTEGRAL (SPI-ACS)	75–8000	ОТ был виден весь интервал, стабильный фон
Swift (BAT)	15–350	$t_{\text{trig}} = -840\text{s}, -440\text{s}$ Swift в SAA $t_{\text{trig}} = -440\text{s}, +840\text{s}$ ОТ вне поля зрения

ОТ. Сравнение начального поведения наблюдаемой, смоделированных кривых блеска внеосевого всплеска и SOSS кривой можно увидеть на графике (рис. 5). Начальный рост кривой блеска неплохо описывается SOSS кривой, которая дает рост потока со временем согласно формуле $F \sim t^2$. Формально возможно подобрать профиль джета таким, чтобы получить наблюдаемую относительно низкую скорость роста, но это требует дополнительного изучения и моделирования. Таким образом, мы не можем отбросить сценарий внеосевого сиротского всплеска. Стоит отметить, что в статье (Хо и др., 2022) данный всплеск интерпретирован как кандидат во внеосевой сиротский гамма-всплеск, но их анализ, проведенный без фотометрии МАСТЕР, которая застала рост блеска, сильно завывшал время начала всплеска, а следовательно, и вносил искажение в определение наклона кривой блеска на раннем этапе послесвечения.

В рамках нашего предположения осталось рассмотреть разделение на “неудавшийся” сценарий и осевой сиротский всплеск. Осевые гамма-всплески предположительно имеют такие же кривые блеска, как и неудавшиеся гамма-всплески, но имеют гораздо более высокий начальный фактор Лоренца.

Оценка Лоренц-фактора

Оценка гамма-фактора может быть получена разными путями. Можно использовать простую модель расширения огенного шара с внешней ударной волной. Кривая блеска в стандартной модели послесвечения достигает максимума, когда масса материала, набранного из окружающей среды ударной волной, сравнивается с массой эжектируемого материала:

$$\frac{E_{\text{iso}}}{\Gamma_0^2 c^2} \approx \frac{4}{3} \pi m_p n R_d^3. \quad (2)$$

Это происходит во время $t_{p,z} \approx R_d/2\Gamma_0^2 c$ на дистанции R_d от центра расширения, где $t_{p,z} = t_p/(1+z)$, а $t_p = t_{\text{max}} - t_{\text{trig}} = (12.0 \pm 0.8)10^3$ с. Исключая радиус замедления R_d из последних двух

выражений, легко оценить начальное значение коэффициента Лоренца:

$$\Gamma_0 \approx \left(\frac{3}{32\pi c^5 m_p} \right)^{1/8} \left(\frac{E_{\text{iso}}}{n} \right)^{1/8} (t_{p,z})^{-3/8} \propto \left(\frac{E_{\text{iso}}}{n} \right)^{1/8} (t_{p,z})^{-3/8}. \quad (3)$$

Теоретически аналогичная оптическая кривая блеска может быть получена как результат излучения внутренней ударной волны. Однако оценка гамма-фактора в ударной волне не меняется (Хаскоет и др., 2014). Обнаружение рентгеновского излучения в нашем случае позволяет отдать предпочтение сценарию с внешней ударной волной. Мы подчеркиваем, что крутизна оптической кривой блеска больше соответствует излучению ударной волны, распространяющейся в звездном ветре. Действительно, предполагая, что распределение плотности в звездном ветре описывается как $\rho = Ar^{-2}$, соотношение (3) переписывается как $E_{\text{iso}}/\Gamma_0^2 c^2 \approx 16\pi AR_d$. Опять исключая R_d , мы получаем

$$\Gamma_0 \approx 52 \left(\frac{E_{52}^{\text{iso}}}{A_*} \right)^{1/4} (t_{p,z})^{-1/4}. \quad (4)$$

Здесь $A_* = A/(5 \times 10^{11})$ г/см — параметр звездного ветра, а $E_{52} = E/10^{52}$. Используя верхний предел светимости и считая $A_* = 1$, мы получаем характерное значение $\Gamma_0 \approx 15$. Если рассмотреть расширение в межзвездную среду с постоянной плотностью для характерных параметров концентрации в 1–100 частиц в см³, то получаем значения для начального гамма-фактора в диапазоне $\Gamma_0 \in (29, 50)$.

Другой метод оценки заключается в использовании набора корреляций между параметрами оптической кривой блеска, гамма-фактором и потоком гамма-излучения для набора схожих гамма-всплесков (Эн-вей Лян, 2010). Чтобы проверить правильность этих корреляций в случае AT2021fla, мы использовали корреляцию между временными

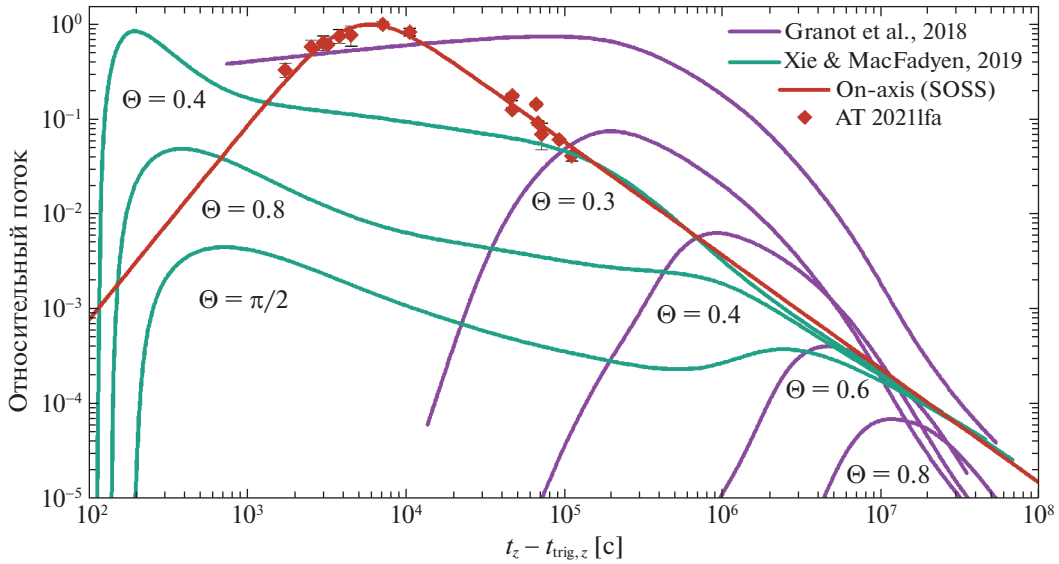


Рис. 5. Относительные кривые блеска осевого SOSS-гамма-всплеска и внеосевых всплесков, полученных в разных гидродинамических расчетах с разными углами раствора джета на момент начала наблюдения. Начальный угол полуоткрытия для всех сценариев соответствует $\Theta_{\text{view}} = 0.2$. Верхняя фиолетовая кривая соответствует $\Theta_{\text{view}} = 0.3$, но со смещенным временем триггера на сутки раньше предполагаемого.

параметрами в рамках модели SOS кривой блеска (см. табл. 4):

$$\log t_d = (0.48 \pm 0.13) + (1.06 \pm 0.06) \log t_r, \quad (5)$$

$$\log t_d = (-0.09 \pm 0.29) + (1.17 \pm 0.11) \log t_p, \quad (6)$$

$$\log t_r = (-0.54 \pm 0.22) + (1.11 \pm 0.08) \log t_p, \quad (7)$$

$$\log \omega = (0.05 \pm 0.27) + (1.16 \pm 0.10) \log t_p. \quad (8)$$

Видно, что параметры удовлетворяют им и не отклоняются более чем на 1σ . Таким образом, мы можем предположить, что корреляции показывают истинную картину, несмотря на то что некоторые из корреляций, описанных в работе (Эн-вей Лян,

2010), противоречивы, например, корреляции между максимальным оптическим блеском и изотропным гамма-излучением, а также между временем максимума $t_{p,z}$ и изотропным гамма-излучением:

$$\log t_{p,z} = (2.25 \pm 0.07) - (0.38 \pm 0.07) \log E_{52}^{\text{iso}}, \quad (9)$$

$$\log L_{p,O} = (47.10 \pm 0.12) + (1.17 \pm 0.13) \log E_{52}^{\text{iso}}. \quad (10)$$

Оценка изотропного гамма-излучения колеблется от 10^{51} эрг в первом случае до $10^{47} - 10^{48}$ эрг в последнем. Они, однако, оба указывают на отсутствие обнаружения AT2021lfa с помощью *Konus/Wind* и *INTEGRAL SPI-ACS*, поскольку они устанавливают верхний предел для изотропного гамма-потока при 10^{52} эрг. Мы можем предложить на их основе оценку начального гамма-фактора Γ_0 , используя данные корреляции и время максимума в собственной системе отсчета $t_{p,z} = 5800 \pm 400$ с:

$$\log \Gamma_0 = (3.69 \pm 0.09) - (0.63 \pm 0.04) \log t_{p,z} = 1.31 \pm 0.48 \quad (11)$$

или $\Gamma_0 = (13.5; 30.9)$. Это значение коэффициента Лоренца не противоречит необнаружению гамма-телескопом из-за другой корреляции: $\Gamma_0 = 195 \times E_{\gamma, \text{iso}, 52}^{0.27}$, что соответствует $E_{\gamma, \text{iso}} = 10^{49}$ эрг.

Поскольку оба метода поддерживают гипотезу о малом гамма-факторе (намного меньше 100), мы идентифицируем AT2021lfa как вероятный неудавшийся гамма-всплеск или грязный огненный шар.

Таблица 4. Временные параметры AT2021lfa

t_p, s	$11\,970 \pm 840$
ω, s	$27\,240 \pm 2530$
t_r, s	5260 ± 360
t_d, s	$32\,500 \pm 2500$
$\log t_p$	4.08 ± 0.02
$\log \omega$	4.43 ± 0.09
$\log t_r$	3.72 ± 0.07
$\log t_d$	4.51 ± 0.08

С наблюдательной точки зрения оптический транзистент AT2021lfa может несомненно представлять собой всплеск-сироту с рентгеновским послесвечением. Это явление мы попытались объяснить в рамках так называемой модели “грязного огненного шара” с низким гамма-фактором Лоренца и недоразвитой струей. Подчеркнем, что обнаруженный в данном исследовании плавный немонотонный характер оптического излучения демонстрирует автомодельный характер взрыва и перехода релятивистской ударной волны к затуханию. Более того, с помощью модели SOSS-излучения удалось локализовать момент начала катастрофы.

Мы посвящаем эту работу памяти нашего товарища и соавтора — Виктора Геральдовича Корнилова — одного из ключевых создателей глобальной сети МАСТЕР, который покинул нас в мае 2021 г. Мы благодарим за поддержку со стороны программы развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. В. Липунов, Е. Горбовской, Н. Тюрина поддерживаются грантом РФФИ 19-29-11011. Н.М. Буднев поддержан Министерством науки и высшего образования РФ (2020-0017). О.А. Гресь поддержан Минобрнауки РФ (ГЗ Оборудование FZZE-2020-0024), оборудование УНУ “Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ” поддержано Минобрнауки РФ (соглашение ЕВ-075-15-2021-675). В этой работе использовались данные, предоставленные британским центром научных данных Swift при Университете Лестера. В этой работе использовались данные миссии Европейского космического агентства (ЕКА) Gaia 3.0, обработанные Консорциумом по обработке и анализу данных Gaia (DPAC).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аартсен и др. (M.G. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, I. Al Samarai, D. Altmann, et al.), *Astron. Astrophys.* **607**, A115 (2017).
2. Аптекар и др. (R.L. Aptekar, D.D. Frederiks, S.V. Golenetskii, V.N. Il'yanskii, E.P. Mazets, V.N. Panov, Z.J. Sokolova, M.M. Terekhov, et al.), *Space Sci. Rev.* **71**, 265 (1995).
3. Бакли и др. (D.A.H. Buckley, S. Bagnulo, R.J. Britto, J. Mao, D.A. Kann, J. Cooper, V. Lipunov, D.M. Hewitt, et al.), *MNRAS* **506**, 2621 (2021).
4. Бартелми и др. (S.D. Barthelmy, L.M. Barbier, J.R. Cummings, Ed.E. Fenimore, N. Gehrels, D.K. Hullinger, H.A. Krimm, C.B. Markwardt, et al.), *Space Sci. Rev.* **120**, 143 (2005).
5. Бартелми и др. (S.D. Barthelmy, P. Butterworth, T.L. Cline, N. Gehrels, F. Marshall, T. Takeshima, V. Connaughton, R.M. Kippen, et al.), *AIP Conf. Proceed.* **428**, 99 (1998).
6. Батлер и др. (N. Butler, C. Klein, O. Fox, G. Lotkin, J. Bloom, J.X. Prochaska, E. Ramirez-Ruiz, J.A. de Diego, et al.), *Proc. SPIE* **8446**, 844610 (2012).
7. Батлер и др. (N. Butler, A.M. Watson, A. Kutyrev, W.H. Lee, M.G. Richer, O. Fox, J.X. Prochaska, J. Bloom, A. Cucchiara, et al.), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29941** (2021).
8. Банд и др. (D. Band, J. Matteson, L. Ford, B. Schaefer, D. Palmer, B. Teegarden, T. Cline, M. Briggs, et al.), *Astrophys. J.* **413**, 281 (1993).
9. Блинников и др. (S.I. Blinnikov, I.D. Novikov, T.V. Perevodchikova, and A.G. Polnarev), *Sov. Astron. Lett* **10**, 177 (1984).
10. Вигано, Мерегетти (D. Vigano and S. Mereghetti), *Proceedings of the Extreme sky: Sampling the Universe above 10 keV* **49** (2010).
11. Воеводин и др. (V.V. Voevodin, A.S. Antonov, D.A. Nikitenko, P.A. Shvets, S.I. Sobolev, I.Yu. Sidorov, K.S. Stefanov, V.V. Voevodin, S.A. Zhumatiy, et al.), *Supercomputing Frontiers and Innovations* **6** (2), 4 (2019).
12. Вусли, Хереп (S.E. Woosley and A. Heger), *Astrophys. J.* **637**, 914 (2006).
13. ГАЙЯ коллаборация (Gaia Collaboration), *Astron. Astrophys.* **595**, A1 (2016).
14. ГАЙЯ коллаборация (Gaia Collaboration), *Astron. Astrophys.* **649**, A1 (2020).
15. Гал-Ям, Авишай и др. (A. Gal-Yam, E.O. Ofek, D. Poznanski, A. Levinson, E. Waxman, D.A. Frail, A.M. Soderberg, E. Nakar, et al.), *Astrophys. J.* **639**, 331 (2006).
16. Горбовской и др. (E.S. Gorbovskey, V.M. Lipunov, D.A.H. Buckley, V.G. Kornilov, P.V. Balanutsa, N.V. Tyurina, A.S. Kuznetsov, D.A. Kuvshinov, et al.), *MNRAS* **455**, 3312 (2016).
17. Гранот и др. (J. Granot, F. De Colle, and E. Ramirez-Ruiz), *MNRAS* **481**, 2711 (2018).
18. Грузинов, Ваксман (Gruzinov and Waxman), *Astrophys. J.* **511**, 852 (1999).
19. Д’Аванзо и др. (P. D’Avanzo, R. Salvaterra, B. Sbarufatti, L. Nava, A. Melandri, M.G. Bernardini, S. Campana, S. Covino, et al.), *MNRAS* **425**, 506 (2012).
20. Дайноцци, Дель Веккио (Dainotti and Del Vecchio), *New Astron. Rev.* **77**, 23 (2017).
21. Джордана-Митьянс и др. (N. Jordana-Mitjans, C.G. Mundell, S. Kobayashi, R.J. Smith, C. Guidorzi, I.A. Steele, M. Shrestha, A. Gomboc, et al.), *Astrophys. J.* **892**, 97 (2020).
22. Ершова и др. (O.A. Ershova, V.M. Lipunov, E.S. Gorbovskey, N.V. Tyurina, V.G. Kornilov, D.S. Zimnukhov, A. Gabovich, O.A. Gress, et al.), *Astron. Rep.* **64**, 126 (2020).
23. Зимнухов и др. (D.S. Zimnukhov, V.M. Lipunov, E.S. Gorbovskey, V.G. Kornilov, N.V. Tyurina, V.V. Chazov, A.V. Gabovich, P.V. Balanutsa, et al.), *Astron. Rep.* **63**, 1056 (2019).
24. Кац, Пирани (Katz and Piran), *Astrophys. J.* **490**, 772 (1997).

25. Ким и др. (V. Kim, N. Pankov, M. Krugov, A. Pozanenko, and S. Belkin), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29950**, (2021).
26. фон Кинлин и др. (A. von Kienlin, V. Beckmann, A. Rau, N. Arend, K. Bennett, B. McBreen, P. Connell, S. Deluij, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L299 (2003).
27. Клебесадель и др. (R.W. Klebesadel, I.B. Strong, and R.A. Olson), *Astrophys. J.* **182**, L85 (1973).
28. Корнилов и др. (V.G. Kornilov, V.M. Lipunov, E.S. Gorbovskey, A.A. Belinski, D.A. Kuvshinov, N.V. Tyurina, N.I. Shatsky, A.V. Sankovich, et al.), *Experiment. Astron.* **33**, 173 (2012).
29. Ласкар и др. (T. Laskar, H. van Eerten, P. Schady, C.G. Mundell, K.D. Alexander, R. Barniol Duran, E. Berger, J. Bolmer, et al.), *Astrophys. J.* **884**, 121 (2019).
30. Левинсон, Эйчлер (A. Levinson and D. Eichler), *Astrophys. J.* **575**, 923 (2002).
31. Липунов (V.M. Lipunov, K.A. Postnov, M.E. Prokhorov, I.E. Panchenko, and H.E. Jorgensen), *Astrophys. J.* **454**, L593 (1995).
32. Липунов (V. Lipunov and E. Gorbovskey), *Astrophys. J.* **665L**, 97L (2007).
33. Липунов (V. Lipunov and E. Gorbovskey), *MNRAS* **383**, 1397L (2008).
34. Липунов (V. Lipunov), *Достижения в астрономии — 2010* **6**, (2010).
35. Липунов и др. (V.M. Lipunov, J. Gorosabel, M.V. Pruzhinskaya, A. de Ugarte Postigo, V. Pelassa, A.E. Tsvetkova, I.V. Sokolov, D.A. Kann, et al.), *MNRAS* **455**, 712 (2016).
36. Липунов и др. (V.M. Lipunov, S.G. Simakov, E.S. Gorbovskey, D.M. Vlasenko, et al.), *Astrophys. J.* **845**, 52 (2017a).
37. Липунов и др. (V.M. Lipunov, S.I. Blinnikov, E.S. Gorbovskey, A.V. Tutukov, P. Baklanov, V. Krushinski, N.V. Tyurina, P.V. Balanutsa et al.), *MNRAS* **470**, 2339 (2017b).
38. Липунов и др. (V.M. Lipunov, V.G. Kornilov, E.S. Gorbovskey, D.A.H. Buckley, N.V. Tyurina, P.V. Balanutsa, A.S. Kuznetsov, J. Greiner, et al.), *MNRAS* **465**, 3656 (2017b).
39. Липунов и др. (V.M. Lipunov, E.S. Gorbovskey, V.G. Kornilov, N.V. Tyurina, P.V. Balanutsa, A.S. Kuznetsov, D.M. Vlasenko, D.A. Kuvshinov, et al.), *Astrophys. J. Lett* **850**, L1 (2017r).
40. Липунов и др. (V.M. Lipunov, V.G. Kornilov, E.S. Gorbovskey, G.V. Lipunova, D.M. Vlasenko, I.E. Panchenko, N.V. Tyurina, V. G. Grinshpun, et al.), *New Astronomy* **63**, 48 (2018a).
41. Липунов и др. (V.M. Lipunov, V.V. Vladimirov, E.S. Gorbovskey, A.S. Kuznetsov, D.S. Zimnukhov, P.V. Balanutsa, V.G. Kornilov, N.V. Tyurina, et al.), *Astron. Rep.* **63**, 293 (2019).
42. Липунов и др. (V.M. Lipunov, V.G. Kornilov, K.K. Zhirkov, E.S. Gorbovskey, N.M. Budnev, D.A.H. Buckley, R. Rebolo, M. Serra-Ricart, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **896**, L19 (2020).
43. Липунов и др. (V.M. Lipunov, V.G. Kornilov, E.S. Gorbovskey, I.S. Gorbunov, P.V. Balanutsa, V.V. Vladimirov, A.S. Kuznetsov, D. Vlasenko, et al.), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29959** (2021).
44. Липунов и др. (L.M. Lipunov, V.G. Kornilov, K. Zhirkov, A. Kuznetsov, E. Gorbovskey, N.M. Budnev, D.A.H. Buckley, R.R. Lopez, et al.), *Universe* **8**, 271 (2022).
45. Лоу и др. (C.J. Law, B.M. Gaensler, B.D. Metzger, E.O. Ofek, L. Sironi, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **866**, L22 (2018).
46. Мазец и др. (E.P. Mazets, S.V. Golenetskii, V.N. Ilinskii, Iu.A. Gurian, T.V. Kharitonova, et al.), *ЖЭТФ Lett.* **19**, 77 (1974).
47. МакФадден, Вусли (A.I. MacFadyen and S.E. Woosley), *Astrophys. J.* **524**, 262 (1999).
48. Малакрино и др. (F. Malacrino, J.-L. Atteia, M. Boër, A. Klotz, C. Veillet, J.-C. Cuillandre, GRB RTAS Collaboration, et al.), *Astron. Astrophys.* **464**, L29 (2007).
49. Масци и др. (F.J. Masci, R.R. Laher, B. Rusholme, D.L. Shupe, S. Groom, J. Surace, E. Jackson, S. Monkevitz, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **131**, 018003 (2019).
50. 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).
51. Накар, Пирам (E. Nakar and T. Piran), *New Astron.* **8**, 141 (2003).
52. О'Коннор и др. (B. O'Connor, S. Dichiaro, E. Troja, P. Gatkine, J.M. Durbak, S.B. Cenko, A. Kutyrev, and S. Veilleux), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29952** (2021).
53. Панков и др. (N. Pankov, S. Belkin, E. Klunko, A. Novichonok, A. Pozanenko, and A. Zhornichenko), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29954** (2021a).
54. Панков и др. (N. Pankov, S. Belkin, E. Klunko, A. Novichonok, A. Pozanenko, A. Zhornichenko), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29964**, (2021b).
55. Пачинский (Paczynski B.), *Astrophys. J. Lett.* **494**, L45 (1997).
56. Планк коллаборация (Planck Collaboration; N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, M. Ballardini, and A.J. Banday), *Astron. Astrophys.* **641**, A6 (2020).
57. Рау и др. (A. Rau, J. Greiner, and R. Schwarz), *Astron. Astrophys.* **449**, 79 (2006).
58. Риелло и др. (M. Riello, F. De Angeli, D.W. Evans, P. Montegriffo, J.M. Carrasco, G. Busso, L. Palaversa, P.W. Burgess, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, A3 (2021).
59. Роберт Кехо и др. (R. Kehoe, C. Akerlof, R. Balsano, J. Bloch, D. Casperson, S. Fletcher, G. Gisler, B. Lee, et al.), *Astrophys. J.* **577**, 845 (2002).
60. Росси и др. (A. Rossi, E. Palazzi, and F. Cusano), *GRB Coord. Netw. Circ.* **30079** (2021).
61. Роудс (J.E. Rhoads), *Astrophys. J.* **487**, L1 (1997).
62. Рыков и др. (E.S. Rykoff, F. Aharonian, C.W. Akerlof, K. Alatalo, M.C.B. Ashley, T. Guver, D. Horns, R.L. Kehoe, et al.), *Astrophys. J.* **631**, 1032 (2005).

63. Садовничий и др. (V.A. Sadovnichy, M.I. Panasyuk, S.I. Svertilov, V.M. Lipunov, V.V. Bogomolov, E.S. Gorbovskey, A.V. Bogomolov, A.J. Castro-Tirado, et al.), *Astrophys. J.* **861**, 48 (2018).
64. Сари Р. (R. Sari), *Astrophys. J.* **489**, L37 (1997).
65. Се, Макфэдиен (X. Xie and A. MacFadyen), *Astrophys. J.* **880**, 135 (2019).
66. Стил и др. (I.A. Steele, R.J. Smith, P.C. Rees, I.P. Baker, S.D. Bates, M.F. Bode, M.K. Bowman, D. Carter, et al.), *Proc. SPIE* **5489**, 679 (2004).
67. Троя и др. (E. Troja, V.M. Lipunov, C.G. Mundell, N.R. Butler, A.M. Watson, S. Kobayashi, S.B. Cenko, F.E. Marshall, et al.), *Nature* **547**, 425 (2017).
68. Уотсон и др. (A.M. Watson, M.G. Richer, J.S. Bloom, N.R. Butler, U. Cesena, D. Clark, E. Colorado, A. Cordova, et al.), *Proc. SPIE* **8444**, 8445L (2012).
69. Уотсон и др. (F.T. Watson, S.J. Berukoff, T. Hays, K. Reardon, D.J. Speiss, and S. Wiant), *Proc. SPIE* **9910**, 99100G (2016).
70. Уотсон и др. (A.M. Watson, N. Butler, R.L. Becerra, S. Dichiara, A. Kutyrev, W.H. Lee, O. Lopez, et al.), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29940** (2021).
71. Фу и др. (S.Y. Fu, Z.P. Zhu, X. Liu, D. Xu, X. Gao, and J.Z. Liu), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29948**, (2021).
72. Хаскоет и др. (R. Hascoet, A.M. Beloborodov, F. Daigne, and R. Mochkovitch), *Astrophys. J.* **782**, 5 (2014).
73. Хо и др. (A.Y.Q. Ho, S.R. Kulkarni, P.E. Nugent, W. Zhao, F. Rusu, S.B. Cenko, V. Ravi, M.M. Kasliwal, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **854**, L13 (2018).
74. Хо и др. (A.Y.Q. Ho, D.A. Perley, P. Beniamini, S.B. Cenko, S.R. Kulkarni, I. Andreoni, L.P. Singer, K. De, et al.), *Astrophys. J.* **905**, 98 (2020).
75. Хо и др. (A. Ho, Y. Yao, and D. Perley), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29953** (2021).
76. Хо и др. (A. Ho, D.A. Perley, Y. Yao, D. Svinikin, A. de Ugarte Postigo, R.A. Perley, D.A. Kann, E. Burns, et al.), eprint arXiv:2201.12366 (2022).
77. Хуанг и др. (Y.F. Huang, Z.G. Dai, and T. Lu), *MNRAS* **332**, 735 (2002).
78. Хуанг и др. (Y. Huang, Y. Urata, K. Huang, K. Lee, M. Tsai, Y.I. Shirasaki, M. Sawicki, S. Arnouts, et al.), *Astrophys. J.* **897**, 69 (2020).
79. Ченко и др. (S.B. Cenko, S.R. Kulkarni, A. Horesh, A. Corsi, D.B. Fox, J. Carpenter, D.A. Frail, P.E. Nugent, et al.), *Astrophys. J.* **769**, 130 (2013).
80. Чжан и др. (B. Zhang, Y.Z. Fan, J. Dyks, S. Kobayashi, P. Meszaros, D.N. Burrows, J.A. Nousek, and N. Gehrels), *Astrophys. J.* **642**, 354 (2006).
81. Эбботт и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, M.R. Abernathy, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **826**, L13 (2016).
82. Эванс и др. (P.A. Evans, A.P. Beardmore, K.L. Page, J.P. Osborne, P.T. O'Brien, R. Willingale, R.L.C. Starling, D.N. Burrows, et al.), *MNRAS* **397**, 1177 (2009).
83. Эн-вей Лян и др. (En-Wei Liang, S. Yi, J. Zhang, H. Lu, and B. Zhang), *Astrophys. J.* **725**, 2209 (2010).
84. Яо и др. (Y. Yao, D. Perley, and A. Ho), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29938** (2021a).
85. Яо и др. (Y. Yao, D. Perley, and A. Ho), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29945** (2021b).