

Исследование динамики осцилляций кривой блеска γ -всплеска GRB 240825A

© П.Б. Дмитриев,¹ В.А. Драневич²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Независимый исследователь,
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: paul.dmitriev@mail.ru, dranovichva@mail.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2025 г.

В окончательной редакции 26 июля 2025 г.

Принято к публикации 29 июля 2025 г.

В результате исследования временной структуры кривой блеска GRB 240825A, зарегистрированного аппаратурой спутника Swift в диапазоне энергий 15–350 keV, на наличие квазипериодических компонентов были обнаружены колебания с периодами 0.384, 0.768, 1.224 и 1.536 s, причем колебание с периодом 1.536 s оказалось модулированным с таким же периодом. В предположении, что модуляция вызвана релятивистским эффектом Доплера при орбитальном движении излучающего объекта вокруг более массивного центрального тела, были вычислены в классическом приближении параметры орбиты излучающего объекта и масса центрального тела.

Ключевые слова: γ -всплески, квазипериодичность, амплитудно-частотная модуляция.

DOI: 10.61011/JTF.2025.12.61784.228-25

Одним из направлений исследований временной структуры γ -всплесков является поиск квазипериодических сигналов. Эта задача осложняется тем, что γ -всплески непродолжительны — длительностью от нескольких миллисекунд до нескольких сотен секунд. Так, систематический анализ кривых блеска 2203 всплесков, зарегистрированных в эксперименте BATSE (Burst and Transient Sources Experiment) с 1991 по 2000 гг. [1], не выявил событий с квазипериодическими колебаниями, характерными для нейтронных звезд, но для некоторых γ -всплесков квазипериодические осцилляции в регистрируемых потоках их излучения все же были обнаружены с той или иной степенью достоверности. Периоды таких осцилляций для длинных γ -всплесков (> 2 s) обычно составляют несколько секунд. Детальный обзор более поздних наблюдений γ -всплесков (с 2004 по 2015 гг.) можно найти в работе [2], где проанализированы 1160 кривых блеска длинных γ -всплесков, которые наблюдались космической обсерваторией Swift. В этой работе методом вейвлет анализа было выявлено 34 события с одним, двумя и даже тремя квазипериодическими осцилляциями. В работах [3,4] была исследована временная структура кривой блеска GRB 190114C, отнесенного к взрыву сверхновой [5], и были обнаружены два квазипериодических компонента с изменяющимися во времени периодами. Осцилляция с периодом ~ 0.05 s была обнаружена и в предвестнике длинного γ -всплеска GRB 211211A, причина которой в работе [6] была объяснена возможным существованием „черной дыры“ или „магнетара“. Следовательно, изучение γ -всплесков с точки зрения наличия в структуре их излучения квазипериодических компонентов в настоящий момент имеет актуальное

значение в теории эволюции звезд и, особенно, „тесных двойных систем“. Поэтому в настоящей работе и предпринято исследование кривой блеска GRB 240825A на наличие квазипериодических составляющих в ее временной структуре.

Всплеск GRB 240825A был обнаружен телескопом BAT (Burst Alert Telescope), установленным на космическом аппарате Swift, 25 августа 2024 г. в 15^h 52^m 59^s UTC [7], причем красное смещение источника было оценено как $Z = 0.659$ [8]. Длительность события составила 57.2 s, в то время как его взрывная фаза, состоящая из серии последовательных пиков, имела продолжительность всего около 10 s [9]. Для анализа временной структуры кривой блеска изучаемого γ -всплеска в электронном архиве [10] были взяты данные, полученные телескопом BAT в энергетическом диапазоне 15–350 keV с временным разрешением $\Delta_t = 0.064$ s, которые были обработаны на предмет наличия квазигармонических компонентов при помощи специально разработанной для подобных исследований методики. В основе метода лежит построение „комбинированной“ спектральной периодограммы CSP (Combined Spectral Periodogram), смысл которой заключается в следующем. Главным элементом CSP является нормированная спектральная плотность NSD (Normalized Spectral Density) [11], вычисленная для временного ряда в зависимости не от частоты, а от пробного периода. Помимо этого, исходный временной ряд подвергается предварительной высокочастотной фильтрации [12] с наперед заданной частотой „среза“ фильтра на половине мощности сигнала, которой во временной области соответствует величина „разделительного“ периода T_f . Фильтрация исходных данных осуществляется с целью

устранения из них тренда и более мощных низкочастотных компонентов. Затем для каждого отфильтрованного со своим конкретным значением параметра T_f высокочастотного компонента снова вычисляется NSD от периода и все эти оценки, вычисленные для различных значений параметра T_f , накладываются друг на друга на одном и том же поле графика, образуя CSP. Более полно содержание методики изложено в работе [13]. Общая длина обработанной выборки γ -всплеска из архивных данных составила 82.4 с ($1288\Delta_t$): 35 с ($547\Delta_t$) до всплеска, 14.08 с ($220\Delta_t$) во время интенсивной части всплеска и 33.34 с ($521\Delta_t$) после его активной фазы.

Здесь следует пояснить структуру временной оси, в которой описываются полученные результаты, и ее привязку к реальному времени. Данные прибора для конкретных γ -всплесков приводятся в архиве в дискретные моменты прошедшего времени миссии Swift в секундах с временным шагом $\Delta_t = 0.064$ с. Эти моменты времени при дальнейшей обработке данных задаются натуральным рядом чисел, отсчет которых ведется от момента начала записи телескопом BAT данного γ -всплеска. Внутри этого массива данных имеется метка начала регистрации интенсивной фазы вспышки, на которую приводится момент времени в стандарте UTC. Для GRB 240825A этот момент времени 14043 в натуральной шкале архива данных приходится на 2024.08.25 15:52:59.832 UTC.

На рис. 1, *a* приведены результаты обработки кривой блеска γ -всплеска на протяжении всей выборки 82.4 с (рис. 1, *b*), а на рис. 2, *a* — CSP, построенная на ее взрывной фазе длиной 14.08 с (рис. 2, *c*) для пробных периодов от 3 до $43\Delta_t$ (0.192–2.752 с) с шагом Δ_t . При вычислении CSP значения „разделительного“ периода T_f высокочастотного фильтра полагались следующими: $T_f = 5, 11, 17, 23, 31, 41, 47, 53\Delta_t$. Поэтому каждый пик на CSP „прописан“ девятью кривыми: восемь от высокочастотных компонентов и еще одна кривая от исходного временного ряда. На CSP (рис. 2, *a*) выделяются „пики“ квазипериодов 6, 12, 18, 23 и $24\Delta_t$. Два колебания с самыми короткими периодами, вероятно, являются вторым и четвертым обертонами колебания с периодом $24\Delta_t$. Чтобы определить, постоянны ли на протяжении всплеска выявленные периоды, была построена динамическая диаграмма изменения их значений (рис. 1, *a*) на протяжении всей выборки данных γ -всплеска длительностью $1288\Delta_t$ (рис. 1, *b*), которая является значениями NSD, вычисленными в „скользящем временном окне“ шириной $143\Delta_t$ (9.152 с) для пробных периодов от 3 до $43\Delta_t$, причем сдвиг временного окна осуществлялся с тем же шагом, что и шаг дискретных данных Δ_t .

На этой диаграмме (рис. 1, *a*) и более подробно на ее выделенной части для взрывной фазы события (рис. 2, *b*) была обнаружена следующая особенность колебания с периодом $24\Delta_t$: частота этого колебания на протяжении взрывной фазы всплеска периодически изменяется с таким же по величине периодом, как и период самого колебания, причем на рис. 2, *b* наблюдается, по крайней

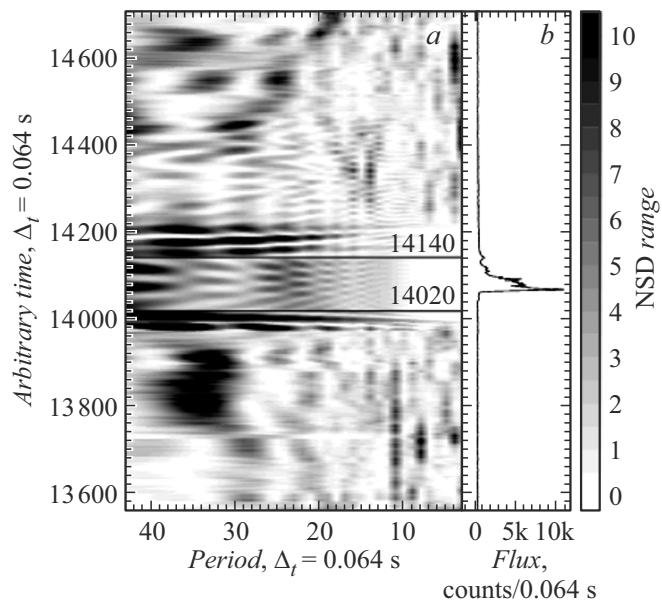


Рис. 1. *a* — NSD, построенная по значениям кривой блеска γ -всплеска GRB 240825A (*b*) на отрезке времени длиной $1288\Delta_t$, в скользящем временном окне шириной $143\Delta_t$ для пробных периодов от 3 до $43\Delta_t$. Дискретная шкала времени по оси ординат построена с шагом Δ_t , равным 0.064 с, от момента начала записи телескопом BAT данных γ -всплеска. Момент времени 14043 этой шкалы приходится на 2024.08.25 15:52:59.832 UTC.

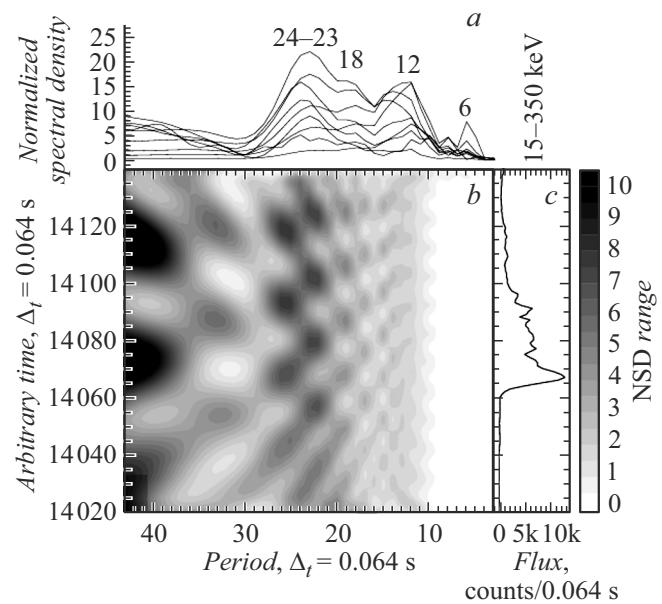


Рис. 2. *a* — CSP, построенная по данным γ -всплеска на интервале времени 14036 – $14256\Delta_t$ длиной $221\Delta_t$, для пробных периодов от 3 до $43\Delta_t$; *b* — выделенная часть NSD (рис. 1, *a*), более подробно иллюстрирующая взрывную fazу события (*c*).

мере, три цикла таких колебаний. Данный эффект не является артефактом, возникающим по причине определенной длины „скользящего окна“, так как при по-

вторных аналогичных вычислениях с другими размерами „скользящего окна“: 91, 121 и $221\Delta_t$ — был получен такой же результат. Таким образом, можно утверждать, что колебание с периодом $24\Delta_t$ является модулированным по частоте (или фазе). В данном случае причиной подобной структуры излучения γ -всплеска может быть орбитальное вращение излучающего объекта с таким же периодом, например, вращающееся вокруг центрального „тела“ яркое пятно релятивистского аккреционного диска. Тогда причиной такой особенности излучения скорее всего будет эффект Доплера. Чтобы подтвердить или опровергнуть это предположение, проведем расчет излучения от подобно движущегося объекта, для простоты изложения, в рамках классических представлений. Для минимизации числа свободных параметров будем пренебрегать эффектами общей теории относительности, возможным наклоном аккреционного диска к лучу зрения, размерами излучающего объекта и т. п. Тогда в результате такого упрощения остается только один подгоночный параметр — линейная скорость орбитального движения.

Рассмотрим следующую простую модель. Пусть некое тело вращается вокруг центрального объекта со скоростью V по окружности радиусом R , совершая полный оборот за известное время T . Наблюдатель и центральный объект неподвижны относительно друг друга, причем наблюдатель находится в плоскости орбиты, и в некоторый момент времени угол между вектором скорости и направлением на наблюдателя равен φ . Тогда радиус орбиты будет равен $R = VT/(2\pi)$, а масса центрального объекта — $M = (\beta^3 c^3 T)/(2\pi G)$ где $\beta = V/c$, c — скорость света, а G — постоянная всемирного тяготения.

Результаты вычисления радиусов орбит и масс центрального объекта по этим формулам для значения квазипериода $24\Delta_t$, выявленного во временной структуре кривой блеска GRB 240825A, в зависимости от значения параметра β представлены в таблице, где M_{sun} и R_g —

Значения параметров модели излучающего объекта, расположенного на космологическом расстоянии $Z = 0.659$, который вращается вокруг массивного центрального тела массы M по круговой орбите радиуса R с постоянной скоростью V и с фиксированным периодом $1.536/(1+Z)$ с

V/c	$M, 10^{32} \text{ kg}$	M/M_{sun}	$R, 10^5 \text{ m}$	$R_g, 10^5 \text{ m}$	R/R_g	τ, s
0.05	0.0746	3.75	22.1	0.11	201	0.70
0.1	0.597	30	44.2	0.985	44.9	0.62
0.2	4.77	240	88.4	7.06	12.5	0.48
0.3	16.1	809	133	23.9	5.57	0.37
0.4	38.1	1915	177	56.5	3.13	0.27
0.5	74.6	3749	221	110	2.01	0.19
0.6	129	6482	265	197	1.35	0.13
0.7	206	10352	309	304	1.02	0.076
0.8	305	15327	354	451	0.785	—
0.9	435	21859	398	645	0.617	—
0.95	511	25678	420	757	0.555	—

масса Солнца ($1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$) и радиус Шварцшильда объекта массой M соответственно. Учитывая, что центральный объект находится на космологическом расстоянии $Z = 0.659$ [8] получаем абсолютный верхний предел ($\beta = 1$) массы центрального объекта $5.97 \cdot 10^{34} \text{ kg}$, т. е. 30 000 масс Солнца. При $\beta > 0.7$ центральный объект может быть только черной дырой Керра. Чтобы получить более реальное значение параметра β , поступим следующим образом. Для различных значений β рассчитаем теоретические кривые блеска, как бы их видел наблюдатель, а затем сравним полученные результаты с данными наблюдений. При этом учтем влияние следующих дополнительных факторов на принимаемый сигнал.

Фактор Лоренца для тела в произвольной точке круговой орбиты можно записать как $\gamma = \sqrt{1 - \beta^2}/(1 - \beta \cos \varphi)$, а энергетический спектр γ -всплеска GRB 240825A в диапазоне энергий 15–350 keV, основываясь на работе [12], степенным с показателем $\alpha = 1.2$ ($dN/dE = KE^{-\alpha}$). Тогда число фотонов, зарегистрированных приемником в энергетическом диапазоне $[E_{\min}; E_{\max}] \text{ keV}$ будет определяться выражением: $N_{obs} = K(E_{\max}^{1-\alpha} - E_{\min}^{1-\alpha})/(1 - \alpha)$. Чтобы фотоны могли быть зарегистрированы в приемнике, источник с учетом фактора Лоренца должен излучать в диапазоне энергии $[15\gamma; 350\gamma] \text{ keV}$. Тогда число фотонов, испущенных источником в этом диапазоне энергии при условии сохранения вида спектра, будет равно: $N_{rad} = Ky^{1-\alpha}(E_{\max}^{1-\alpha} - E_{\min}^{1-\alpha})/(1 - \alpha)$. Поэтому коэффициент K в выражении для N_{obs} при движении тела по орбите должен изменяться пропорционально $\gamma^{\alpha-1}$, т. е. должна быть амплитудная модуляция кривой блеска. Далее при релятивистском движении по окружности диаграмма направленности излучения не является изотропной. Она вытянута вперед по направлению вектора скорости. В плоскости орбиты зависимость от угла φ для электронов выражается формулой: $P = q^2 \beta^2 / (4\pi c (1 - \beta \cos \varphi)^3)$, где q — заряд электрона. И, наконец, учтем поправку на задержку времени регистрации фотонов в приемнике в зависимости от положения излучающего тела на орбите: $\Delta t = \beta T \sin \varphi / (2\pi)$, которая привносит частотную (или фазовую) модуляцию с периодом обращения T во временную структуру регистрируемого излучения. Учет этой поправки приводит к тому, что вместо расчетных точек, равнотостоящих друг от друга по времени в системе координат центрального объекта, в системе координат приемника точки будут располагаться на разных расстояниях, а применяемый метод спектрального анализа требует равных промежутков времени между точками. Поэтому, чтобы получить значения расчетной функции в равномерно отстоящих точках, вычисленные значения функции были линейно проинтерполированы.

Форма и амплитуда модельных кривых блеска, построенных по приведенным соотношениям, сильно зависят от параметра β . При $\beta = 0.05$ кривая блеска похожа на

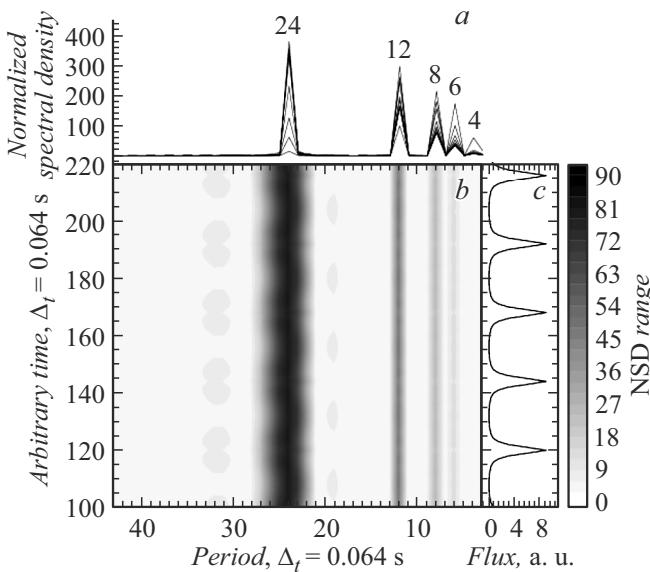


Рис. 3. *a* — CSP, *b* — NSD, построенные для стационарного импульсного сигнала (*c*), вычисленного по предлагаемой модели γ -всплеска с параметром $\beta = 0.5$, на временной области длиной и с временным шагом, аналогичными рис. 2.

синусоиду. При $\beta = 0.95$ ее импульсы с профилем δ -функции периодически повторяются. Поэтому для определения более реального значения β был использован такой критерий, как ширина импульса на половине его высоты (значение параметра τ , измеряемое в секундах). Для импульсов кривой блеска GRB 240825A значение τ составляет $(3 \pm 0.5)\Delta_t$. Отсюда по рассчитанной зависимости τ от β был определен диапазон значений β 0.46 – 0.55, и по значениям, приведенным в таблице, получены масса центрального объекта $M = (2.8 - 5) \cdot 10^3 M_{\text{sun}}$ и радиус орбиты $R = (2.37 - 1.66) R_g$. На рис. 3 представлены CSP (рис. 3, *a*) и динамическая диаграмма NSD (рис. 3, *b*) для смоделированной со значением параметра $\beta = 0.5$ импульсной последовательности (рис. 3, *c*). Из этого рисунка видно, что спектральные характеристики такой упрощенной модели удовлетворительно отражают динамику реальных колебаний с периодом $24\Delta_t$ на протяжении взрывной фазы γ -всплеска.

Итак, подводя итог настоящей работы, можно выделить следующие ее основные моменты. Методом модифицированного спектрального анализа на „взрывной“ фазе кривой блеска γ -всплеска GRB 240825A была выявлена квазипериодическая осцилляция с периодом 1.536 s. Для объяснения причины возникновения таких пульсаций была высказана гипотеза, что это может быть излучение от яркого пятна в аккреционном диске. Поэтому был рассмотрен простейший случай: что может видеть наблюдатель, когда его „взгляд“ лежит в плоскости аккреционного диска. При построении математической модели были учтены релятивистский эффект Доплера, амплитудная и частотная (или фазовая) модуляция сигнала из-за движения яркого пятна по орбите и

диаграмма направленности излучения. Путем сравнения параметров импульсов на кривой блеска и импульсов излучения модели, полученных в результате расчетов, были оценены возможные значения орбиты излучателя и масса центрального объекта. Этим объектом должна быть черная дыра с массой в диапазоне 2800–5000 солнечных масс и, следовательно, она должна принадлежать к классу „гипотетических“ черных дыр с промежуточной массой.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.T. Kruger, T.J. Loredo, I. Wasserman. *Ap. J.*, **576** (2), 932 (2002). DOI: 10.1086/341541
- [2] M. Tarnopolski, V. Marchenko. *Ap. J.*, **911** (1), 20 (2021). DOI: 10.3847/1538-4357/abe5b1
- [3] V.A. Dranovich, P.B. Dmitriev. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1697**, 012012 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012012
- [4] В.А. Драневич, П.Б. Дмитриев. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физмат. науки, **16** (1.2), 467 (2023). DOI: 10.18721/JPM.161.271
- [5] A. Melandri, L. Izzo, P. D'Avanzo, D. Malesani, M.D. Valle, E. Pian, N.R. Tanvir, F. Ragosta, F. Olivares, R. Carini, E. Palazzi, S. Piranomonte, P. Jonker, A. Rossi, D.A. Kann, D. Hartmann, C. Inserra, E. Kankare, K. Maguire, S.J. Smart, O. Yaron, D.R. Young, I. Manulis. *190114C: photometric detection of a SN component* (GCN Circular 23983, 2019), <https://gcn.nasa.gov/circulars/23983>
- [6] G.P. Lamb, T. Baxter, C.M.B. Omand, Dimple, Z. McGrath, C. Turnbull, E. Burns, H. Hamidani, I. Mandel, K.L. Page, S. Rosswog, N. Sarin, A. Blain, L. Datrier, S. Kobayashi, A. Levan, R. Starling, B. Gompertz, N. Habeeb, K. Nguyen, N. Tanvir. *Prompt Periodicity in the GRB 211211A Precursor: Black-hole or magnetar engine?* (arXiv:2503.15613v1 [astro-ph.HE] 19 Mar, 2025), DOI: 10.48550/arXiv.2503.15613
- [7] R. Gupta, R. Brivio, S. Dichiara, M. Ferro, J.A. Kennea, K.L. Page, D.M. Palmer, T. Sbarato. GRB 240825A: *Swift* detection of a burst with a bright optical counterpart (GCN Circular 37274, 2024), <https://gcn.nasa.gov/circulars/37274>
- [8] A. Martin-Carrillo, B. Schneider, G. Pugliese, L. Izzo, D.B. Malesani, A. Saccardi, T. Laskar, J.F.A. Fernandez, S.D. Vergani. *GRB 240825A: VLT/X-shooter redshift* (GCN Circular 37293, 2024), <https://gcn.nasa.gov/circulars/37293.gcn3>
- [9] Электронный ресурс. Режим доступа: https://swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb_table.html/240825A/, last accessed: Apr. 18, 2025.
- [10] Электронный ресурс. Режим доступа: https://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/swift/data/obs/2024_08/01250617000/bat/rate/sw01250617000brtms.lc.gz, last accessed: Apr. 18, 2025.
- [11] G.M. Jenkins, D.C. Watts. *Spectral analysis and its application* (Holden-Day, San Francisco, Cambridge, London, Amsterdam, 1969), p. 176.

- [12] A.S. Alavi, G.M. Jenkins. J. Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics), **14** (1), 70 (1965).
DOI: 10.2307/2985355
- [13] M.I. Tyasto, P.B. Dmitriev, V.A. Dergachev. Adv. Space Research, **66** (10), 2476 (2020).
DOI: 10.1016/j.asr.2020.08.011