

НАБЛЮДЕНИЕ В ГАММА-ДИАПАЗОНЕ ВТОРОГО СВЯЗАННОГО СО СЛИЯНИЕМ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД СОБЫТИЯ LIGO/VIRGO S190425Z

© 2019 г. А. С. Позаненко^{1,2*}, П. Ю. Минаев¹, С. А. Гребенев¹, И. В. Человеков¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

Поступила в редакцию 16.09.2019 г.; после доработки 10.10.2019 г.; принята к публикации 22.10.2019 г.

Представлены результаты наблюдения антисовпадатальной защитой (ACS) гамма-спектрометра SPI обсерватории INTEGRAL гравитационно-волнового (GW) события S190425z, зарегистрированного детекторами LIGO/Virgo. С большой вероятностью (>99%) оно было связано со слиянием нейтронных звезд в тесной двойной системе. В истории гравитационно-волновых наблюдений это всего лишь второе событие такого типа (после GW 170817). Детектором SPI-ACS был зарегистрирован слабый гамма-всплеск GRB 190425, состоящий из двух импульсов, через ~0.5 и ~5.9 с после момента слияния звезд в событии S190425z, имеющих априорную достоверность 3.5 и 4.4σ (вместе — 5.5σ). Анализ записи скорости счета детектором SPI-ACS в эти дни (всего ~125 кс наблюдений) показал, что темп случайного появления двух близких выбросов с характеристиками всплеска GRB 190425 не превышает $6.4 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (т.е. случайно такие события происходят в среднем каждые ~4.3 ч). Нельзя не отметить, что профиль гамма-всплеска GRB 190425 имеет много общего с профилем гамма-всплеска GRB 170817A, сопровождавшего событие GW 170817, что оба слияния нейтронных звезд были наиболее близкими ($\lesssim 150$ Мпк) из событий, зарегистрированных детекторами LIGO/Virgo, и что ни в одном из ~30 событий слияния черных дыр, зарегистрированных к настоящему моменту этими детекторами, значимых превышений потока гамма-излучения над фоном обнаружено не было. В поле зрения гамма-телескопов SPI и IBIS-ISGRI на борту обсерватории INTEGRAL вспышки жесткого излучения зарегистрированы не были. Это, а также отсутствие регистрации гамма-излучения от GRB 190425 монитором гамма-всплесков GBM обсерватории *Fermi*, предполагающее его затенение Землей, позволяет существенно уменьшить область локализации источника гравитационно-волнового события. Сделаны оценки параметров E_{iso} и E_p гамма-всплеска GRB 190425 и выполнено их сравнение с аналогичными параметрами всплеска GRB 170817A.

Ключевые слова: гравитационно-волновые события, слияние двойных нейтронных звезд, короткие гамма-всплески, килоновые.

DOI: 10.1134/S032001081911007X

ВВЕДЕНИЕ

Регистрация гравитационно-волнового сигнала GW 150914 от слияния двух черных дыр (Аббот и др., 2016) положила начало эре гравитационно-волновой астрономии. За прошедшие четыре года гравитационно-волновыми детекторами Advanced LIGO и включившимся в работу в августе 2017 г. детектором Advanced Virgo (далее просто LIGO и Virgo) зарегистрировано уже ~40 подобных событий. Быстро растет чувствительность детекторов: в цикле O1 работы LIGO (в период с 12 сентября 2015 г. по 19 января 2016 г.) было зарегистрировано всего 3 события, в цикле O2 (с 23 ноября

2016 г. по 25 августа 2017 г.) — 8 событий, а в O3 (начавшемся 1 апреля 2019 г.) к концу сентября 2019 г. было уже 31 событие. Каталог событий циклов O1–O2 можно найти в работе Аббота и др. (2019), текущий список O3 событий — на сайте gracedb.ligo.org/superevents/public/O3.

Детекторы LIGO/Virgo оптимизированы для наблюдения сигналов от компактных двойных систем, поэтому могут успешно регистрировать не только слияния двойных черных дыр (BBH), но и систем черная дыра–нейтронная звезда (NSBH) или двойных нейтронных звезд (BNS). Частота регистрации разного вида событий зависит от просматриваемого объема локальной Вселенной и от количества систем данного вида в этом объеме. Сам объем пропорционален кубу расстоя-

*Электронный адрес: apozanen@iki.rssi.ru

ния, с которого можно зарегистрировать сигнал с минимальной амплитудой, а расстояние — массе наиболее легкого компонента двойной системы. Неудивительно, что количество зарегистрированных слияний BBH намного превышает количество слияний NSBH и BNS — на момент сдачи статьи в печать зарегистрировано 2 надежных (имеющих вероятность $\gtrsim 85\%$) сигнала от NSBH (S190814bv и S190910d) и 3 — от BNS (GW 170817, S190425z, S190901ap), все эти системы находились на заметно меньших расстояниях, чем зарегистрированные слияния BBH.

Интенсивный поиск вспышек электромагнитного излучения во время и после каждого события LIGO/Virgo привел лишь к одной надежной регистрации — гамма-всплеска GRB 170817A (Голдстейн и др., 2017; Савченко и др., 2017в; Позаненко и др., 2018), сопровождавшего первое событие GW 170817, обнаруженное от слияния BNS (Аббот и др., 2017а, 2017б). Это полностью согласуется с теоретическими ожиданиями — эффективного механизма формирования электромагнитного импульса при слиянии BBH до настоящего времени предложено не было, да и вероятность обнаружить излучение от событий NSBH оценивается очень низко (например, Постнов и др., 2019). Гамма-всплеск GRB 170817A наблюдался с задержкой ~ 1.7 с относительно времени T_0 регистрации гравитационно-волнового события, т.е. гамма-излучение образовалось уже после слияния системы нейтронных звезд. Это также совпадает с ожиданиями. В направлении прихода всплеска, в галактике NGC 4993 была зарегистрирована килоновая AT2017gfo (Коултер и др., 2017; Эванс и др., 2017; Троя и др., 2017), наблюдения которой позволили впервые детально исследовать этот необычный тип сверхновых.

Поиск электромагнитного излучения от гравитационно-волновых событий ведется, прежде всего, в жестком рентгеновском или мягком гамма-диапазоне, а также в оптике. Появление жесткого излучения в виде короткого гамма-всплеска из-за слияния BNS (и NSBH) систем было предсказано Блиниковым и др. (1984) и Пачинским (1991). Современные мониторы всего неба в жестких рентгеновских лучах способны успешно регистрировать такие всплески даже на расстояниях в десятки Гпк. Регистрация всплеска крайне важна, т.к. позволяет заметно уменьшить область локализации гравитационно-волнового события, определяемую методом триангуляции сигналов, измеренных детекторами L1 и L2 LIGO, расположенными в США, и детектором V1 Virgo, расположенным в Италии. В цикле ОЗ работы гравитационных антенн минимальная область локализации события составила 23 кв. град., а максимальная — более 24 тыс. кв. град.

В оптике ищется оптический транзист, связанный с появлением килоновой или с послесвечением гамма-всплеска. Непосредственный поиск оптических транзистов в таких больших областях локализации является крайне сложной задачей. Тем не менее к ее решению подключаются многие обсерватории и сетевые проекты. Используются две тактики: (1) широкоугольными телескопами проводится мозаичное сканирование всей области локализации, (2) узкоугольными — последовательно наблюдаются галактики, расположенные в трехмерном объеме локализации, определяемом телесным углом и диапазоном возможных расстояний до источника. Число галактик в таком объеме может достигать десятков тысяч, тем не менее их последовательный просмотр оказывается более эффективным, чем сканирование всей области. К сожалению, существующие каталоги галактик не являются полными, и ограничиться только тактикой 2 при поиске оптического компонента гравитационно-волнового события можно не всегда.

Учитывая важность своевременной регистрации гамма-всплеска, сопутствующего акту слияния BNS или NSBH, мы в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) инициировали работы по программе поиска транзистного жесткого рентгеновского излучения от всех подобных событий, зарегистрированных детекторами LIGO и Virgo. Для поиска использовались открытые данные гамма-телескопов SPI-ACS и IBIS-ISGRI астрофизической обсерватории INTEGRAL. В случае события S190425z (второго зарегистрированного слияния BNS) такое излучение было найдено (Минаев и др., 2019а; Человеков и др., 2019а, см. также Мартин-Карилло и др., 2019; Савченко и др., 2019).

В настоящей работе мы подробно описываем результаты этих наблюдений, сравниваем найденный гамма-всплеск GRB 190425 со всплеском GRB 170817A, сопровождавшим первое событие слияния BNS, приводим все имеющиеся доводы в пользу достоверности его регистрации.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ

Как уже было сказано, данное исследование основано на наблюдениях, проведенных двумя основными приборами международной астрофизической обсерватории гамма-лучей INTEGRAL (Винклер и др., 2003): гамма-телескопом IBIS-ISGRI (Лебран и др., 2003; Убертини и др., 2003) и гамма-спектрометром SPI (Ведренн и др., 2003; Рок и др., 2003). Для получения изображений неба и исследования свойств индивидуальных космических источников в обоих телескопах используется принцип кодированной апертуры.

Гамма-телескоп IBIS предназначен для картографирования неба в жестком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах и исследования зарегистрированных источников с грубым энергетическим разрешением ($E/\Delta E \sim 13$ на 100 кэВ). Телескоп имеет поле зрения (FWZR) размером $30^\circ \times 30^\circ$ при угловом разрешении $12'$ (FWHM). Положение ярких всплесков может определяться с точностью $\lesssim 2'$. Максимум чувствительности детектора ISGRI телескопа, представляющего собой массив из 16384 элементов CdTe, приходится на диапазон 18–200 кэВ. Его полная площадь равна 2620 см^2 , эффективная площадь для событий в центре поля зрения $\sim 1100 \text{ см}^2$ (половина затеняется непрозрачными элементами маски).

Гамма-спектрометр SPI предназначен для тонкой ($E/\Delta E \sim 550$ на 1.7 МэВ) гамма-спектроскопии космического аннигиляционного излучения (из центральных областей Галактики) и излучения в ядерных гамма-линиях радиоактивной природы (из остатков молодых близких сверхновых). Телескоп имеет максимум чувствительности в диапазоне 0.05–8 МэВ, гексагональное поле зрения диаметром 32° (FWZR), угловое разрешение $2.5'$ (FWHM); геометрическая площадь 19 охлаждаемых детекторов из сверхчистого Ge $\simeq 500 \text{ см}^2$.

Для оперативного выявления гамма-всплесков и других транзитных событий, попавших в поле зрения телескопов IBIS и SPI, а также срочного оповещения о них через электронные циркуляры GCN (Gamma-ray Coordinates Network) была разработана и успешно используется автоматическая программная система IBAS (Мерегетти и др., 2003). Регистрация всплесков может быть осуществлена и независимо, при анализе полученных или даже архивных данных телескопов. Таким образом были найдены гамма-всплески, не зарегистрированные по различным причинам системой IBAS (Гребенев, Человеков, 2007; Минаев и др., 2012, 2014; Человеков и др., 2019б). Анализ таких данных может быть проведен с помощью стандартного пакета программ обработки данных обсерватории INTEGRAL — OSA (Курвазь и др., 2003). В данной работе использовалась версия OSA 10.2 пакета.

Защита ACS гамма-спектрометра SPI

Хотя отдельные гамма-всплески успешно регистрируются гамма-спектрометром SPI и гамма-телескопом IBIS-ISGRI внутри поля зрения (например, Мерегетти и др., 2003; Фоли и др., 2008, 2009; Вианелло и др., 2009; Минаев и др., 2014) и вне его (например, Минаев и др., 2014; Человеков и др. 2019б), значительно большее их число регистрируются антисовпадательной защитой ACS

спектрометра SPI, имеющей намного большую площадь (Рау и др., 2004, 2005)¹. Защита SPI-ACS является одним из самых чувствительных за всю историю наблюдений гамма-всплесков все-направленным детектором. Благодаря высокоэллиптической орбите спутника INTEGRAL (Эйсмонт и др., 2003) с периодом 72 ч (после 2015 г. — 64.8 ч), для него почти не существует зон затенения Землей (покрытие $\gtrsim 80\%$ неба), а стабильный фон на масштабах сотен и даже тысяч секунд позволяет проводить подпороговый поиск транзиентов разной длительности. Детектор SPI-ACS удачно использовался при поиске гамма-излучения от гравитационно-волнового события GW 170817 (Савченко и др., 2017в; Позаненко и др., 2018), подтвердив регистрацию гамма-всплеска GRB 170817A монитором *Fermi*/GBM (Голдстейн и др., 2017). Данное исследование мы начнем также с анализа данных детектора SPI-ACS.

Защита SPI-ACS состоит из 91 сцинтилляционного кристалла $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) общей массой 512 кг (фон Кинлин и др., 2003а, 2003б; Райд и др., 2003). Их суммарная эффективная площадь для регистрации гамма-всплесков достигает $\sim 0.7 \text{ м}^2$. На Землю передается общая скорость счета с разрешением 50 мс, никакой пространственной или спектральной информации в телеметрию не поступает. Энергетический диапазон известен неточно, т.к. параметры фотоумножителей и световой выход кристаллов слегка различаются и точно неизвестны. Нижний порог можно грубо оценить как ~ 80 кэВ, верхний — как $\gtrsim 10$ МэВ. В силу особенностей геометрии конструкции спектрометра SPI, его защита, почти всенаправленная, малочувствительна к всплескам, приходящим под малыми углами к оси телескопа.

Методика поиска гамма-всплесков

Данные детектора SPI-ACS представляют собой запись скорости счета фотонов в одном широком энергетическом канале, однако, аппроксимацию средней скорости счета, оценку и вычитание фона, поиск гамма-всплесков по этим данным и анализ их достоверности можно выполнять, используя разные методики (см., например, Мерегетти и др., 2003; Савченко и др., 2012, 2017а; Минаев и др. 2014; Минаев, Позаненко, 2017).

¹ У детектора IBIS-ISGRI тоже есть активная антисовпадательная защита, так называемая VETO System, но ее данные сгруппированы и передаются на Землю по интервалам длительностью 8 с, что делает ее мало пригодной для поиска коротких гамма-всплесков (Убертини и др., 2003; Квадрини и др., 2003).

При использовании разных методик возможно получение слегка отличающихся результатов. Как мы увидим дальше, важным фактором, влияющим на результаты, является выбор адекватной временной шкалы для анализа (размера временного бина исследуемой кривой блеска).

При поиске в данных SPI-ACS коротких транзитных всплесков, связанных с гравитационно-волновыми событиями LIGO/Virgo, нами использовалась следующая методика. Сначала на интервалах времени ($T_0 - 200$ с, $T_0 - 30$ с) и ($T_0 + 30$ с, $T_0 + 200$ с), равноотстоящих от момента T_0 прихода гравитационно-волнового сигнала, производилась аппроксимация скорости счета полиномиальными моделями 1 и 3-го порядка с использованием данных SPI-ACS исходного разрешения 50 мс. Модель с наилучшей невязкой принималась за модель фона. Относительно этой модели вычислялась выборочная дисперсия скорости счета. Отметим, что выборочная дисперсия данных SPI-ACS отличается от пуассоновской в 1.2–1.6 раза (фон Кинлин и др., 2003а; Райд и др., 2003; Рау и др., 2004, 2005). Принятая модель фона экстраполировалась во временной интервал ($T_0 - 30$ с, $T_0 + 30$ с), в котором проводился поиск значимых превышений скорости счета над фоном. Использовались временные ряды с разной длительностью шага (бина) от 0.1 до 10 с (естественно, кратной длине бина исходного временного ряда 50 мс). Оценка значимости обнаруженного превышения значения скорости счета в бине над фоновой скоростью осуществлялась, исходя из величины выборочной дисперсии, приведенной к используемому размеру бина. Алгоритм оптимален для поиска импульсного сигнала, длительность которого примерно совпадает с выбранной для поиска длиной бина (от 0.1 с до 10 с).

Поиск коротких гамма-всплесков в данных спектрометра SPI подробно описан в работе Минаева и др. (2014), поиск всплесков в данных телескопа IBIS-ISGR1 — в работе Человекова и др. (2019б). Использование этой методики в настоящей работе применительно к поиску всплеска жесткого рентгеновского и мягкого гамма-излучения, сопутствующего гравитационно-волновому сигналу, отличалось лишь выбором более мелкого шага для анализируемого временного ряда. Был взят тот же набор шагов, что использовался при построении кривых блеска по данным детектора SPI-ACS.

СОБЫТИЕ S190425Z

Гравитационно-волновое событие S190425z было зарегистрировано детекторами LIGO/Virgo

25 апреля 2019 г. в $08^{\text{h}}18^{\text{m}}05^{\text{s}}.017$ UTC. С достоверностью $>99\%$ оно было отнесено к событиям, вызванным слиянием BNS (Зингер, 2019а), став вторым обнаруженным актом такого слияния за всю историю наблюдений. Темп регистрации случайных событий этого типа (False Alarm Rate) был оценен очень низко $\text{FAR} = 4.5 \times 10^{-13} \text{ с}^{-1}$ или 1 событие за $69\,834$ года².

В момент регистрации работали только два детектора гравитационно-волнового интерферометра: LIGO L1 (Ливингстон, США) и Virgo V1 (Италия). Соответственно, локализация события была намного более неопределенной, чем в случае события GW 170817 (Аббот и др., 2017а). Площадь области 50%-локализации составила 1378 кв. град., 90% — 7461 кв. град. (Зингер, 2019б). Область разделена на две близкие по размеру части — северную и южную (см. далее рис. 5). Источник оказался в 4 раза более далеким, чем GW 170817, он находился на расстоянии 156 ± 41 Мпк. Это еще более усложнило поиск его проявлений во всех диапазонах электромагнитного спектра. Характеристики события S190425z приведены в табл. 1. Для сравнения там же можно найти подобные данные по событию GW 170817.

Сразу после сообщения о событии S190425z и его отождествлении (Зингер, 2019а) оптические, мягкие рентгеновские и радиотелескопы по всему миру включились в поиск возможного послесвечения этого объекта или килоновой, которая могла бы появиться на месте слияния BNS (например, Аббот и др., 2017б). Некоторые первые результаты этого исследования представлены в работах Коухлина и др. (2019), Хусейнзаде и др. (2019). Хотя уже ясно, что соответствующего события в этих диапазонах быстро обнаружить не удалось, нет сомнений, что это лишь первые в потоке работ по результатам таких исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как показывает верхняя панель рис. 1 и как впервые было сообщено Мартином-Кариллой и др. (2019), Минаевым и др. (2019а), через ~ 5.94 с после момента T_0 события S190425z (Зингер, 2019а) детектор SPI-ACS на борту обсерватории INTEGRAL зарегистрировал достоверное превышение скорости счета фотонов над фоном. Размер бина в записи скорости счета на этом рисунке равен 0.85 с. Априорная достоверность регистрации (отношение сигнала к шуму, скорректированное на непуассоновость скорости счета детектора SPI-ACS) $S/N \simeq 4.4$ стандартных отклонений (табл. 2).

² gracedb.ligo.org/superevents/S190425z

Таблица 1. Основные параметры гравитационно-волновых событий GW 170817 и S190425z и сопровождавших их гамма-всплесков GRB 170817A и GRB 190425

Событие LIGO/Virgo	S190425z	GW 170817	
Момент T_0^a	2019-04-25 08:18:05	2017-08-17 12:41:04	
Расстояние до источника, Мпк	156 ± 41	40 ± 8	
Область локализации ^б , 90%	7461	16	
Угол к оси детектора SPI-ACS	$26^\circ - 60^\circ$	105°	
Гамма-всплеск	GRB 190425	GRB 170817A	
Импульс в профиле события	первый + второй	первый	первый + второй
Эксперимент	SPI-ACS	SPI-ACS	<i>Fermi</i> /GBM ^в
Начало события ^г , с	0.44	2.0	1.7
Полная длительность ^г , с	6.0	0.1	4.1
Интегральное число отсчетов	2300 ± 420	570 ± 120	—
Значимость (отношение S/N), σ	5.5	4.6	8.7
Вероятность ^д	1.9×10^{-8}	2.1×10^{-6}	1.7×10^{-18}
FAR ^е , событий/с	6.4×10^{-5}	4.2×10^{-4}	—
Совместная вероятность ^ж	1.6×10^{-4}	4.8×10^{-3}	—
Интегральный поток $F^з$	$8.0 \times 10^{-8} - 2.4 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-8} - 5.2 \times 10^{-7}$	$(2.1 \pm 0.3) \times 10^{-7}$
Энерговыведение $E_{\text{iso}}^и$	$2.2 \times 10^{47} - 6.7 \times 10^{48}$	$3.8 \times 10^{45} - 1.2 \times 10^{47}$	$(4.7 \pm 0.7) \times 10^{46}$

^а Момент регистрации события детекторами LIGO/Virgo, UTC.

^б Площадь области локализации события, кв. град.

^в Согласно Голдштейну и др. (2017), Позаненко и др. (2018).

^г Начало (от момента T_0) и полная длительность гамма-всплеска, с.

^д Вероятность случайного выброса в предположении гауссовой статистики для S/N .

^е Частота случайных событий такой временной структуры (по данным всей орбиты).

^ж Вероятность с учетом случайности отождествления с гравитационно-волновым событием и перебора временных рядов с разным размером бина (Блэкбурн и др., 2015, $T_{\text{min}} = 0.1$ с, $T_{\text{max}} = 30$ с).

^з Эквивалентный поток излучения в диапазоне 10–1000 кэВ, эрг см⁻².

^и Эквивалентная изотропная энергия, излученная во время всплеска, эрг.

Из рисунка хорошо видно, что превышение действительно значимое, — в интервале длительностью 500 с и центром в T_0 кроме названного нет ни одного выброса даже на 3σ (уровень, показанный пунктирной красной линией).

На нижней панели рисунка показана аналогичная запись скорости счета фотонов вблизи события GRB 170817A. Значимых превышений скорости счета на ней нет. Это связано с тем, что длительность гамма-всплеска, зарегистрированного в данных SPI-ACS от этого события (≈ 0.1 с, Са-

вченко и др., 2017в; Позаненко и др., 2018), была намного меньше выбранного размера бина. Если рассмотреть запись скорости счета с меньшим бином — 0.15 с, см. нижнюю панель рис. 2, значимый ($S/N \approx 4.3$) выброс, соответствующий GRB 170817A, появляется. При уменьшении размера бина до 0.1 с его значимость достигает максимума $S/N \approx 4.6$ (табл. 1).

Поразительно, но на верхней панели рис. 2 в скорости счета, записанной с шагом 0.15 с вблизи гравитационно-волнового события S190425z, так-

Таблица 2. Сравнение параметров гамма-всплесков, ассоциированных с событиями слияния нейтронных звезд GW 170817 и S190425z, по данным эксперимента SPI-ACS

Событие	GRB 190425		GRB 170817A
	первый	второй	первый
Импульс в профиле события			
Начало импульса T_i^a	0.44	5.54	2.00
Максимум скорости счета T_m^a	0.54	5.94	2.05
Бинирование N_i^b	5	17	2
Длительность ΔT_i^b	0.25	0.85	0.10
Интегральное число отсчетов C_i в импульсе i	700 ± 200	1600 ± 370	570 ± 120
Значимость (отношение S/N), σ	3.5	4.4	4.6
Вероятность ^г	2.3×10^{-4}	5.4×10^{-6}	2.1×10^{-6}
FAR, событий/с ^д	1.4×10^{-3}	2.7×10^{-5}	4.2×10^{-4}
Консервативная вероятность ^е	3.5×10^{-3}	8.5×10^{-4}	4.8×10^{-3}

^а Начало импульса i и его максимум (от момента T_0 GW события), с.

^б Оптимальное бинирование относительно исходного ряда с бином 50 мс.

^в Соответствующая оптимальная длительность бина $\Delta T_i = 0.05 N_i$ с (характеризует длительность данного импульса).

^г Вероятность в предположении гауссовой статистики для S/N .

^д Частота подобных случайных событий (по данным всей орбиты).

^е Вероятность с учетом случайности ассоциации с GW событием и перебора рядов с разным размером бина (Блэкбурн и др., 2015, $T_{\min} = 0.1$ с, $T_{\max} = 30$ с).

же появляется еще один значимый (с $S/N \simeq 3.6$) выброс через ~ 0.5 с после момента T_0 (Минаев и др., 2019а). Полная длительность этого выброса достигает ~ 0.5 с, хотя максимум излучения содержится в очень узком ($\simeq 0.15$ с) пике. Значимость второго выброса на этой кривой блеска заметно понизилась (до $S/N \simeq 3.1$ в одном бине), что не удивительно при таком мелком разбиении временного ряда, так как реальная длительность второго выброса достигает ~ 1.3 с.

Таким образом, в интервале ± 30 с вблизи T_0 для этого события было найдено два значимых превышения уровня фона (рис. 2, верхняя панель). В дальнейшем мы будем называть их первым и вторым импульсами во временном профиле этого гамма-всплеска, который таким образом в целом имеет длительность ~ 6.0 с. Общая значимость двойного события составляет $S/N \simeq 5.5$ (см. табл. 1). Приведенная в таблице оценка интегрального потока энергии от такого всплеска со средним значением $F_m \simeq 4.4 \times 10^{-7}$ эрг см⁻² в диапазоне 10–1000 кэВ получена с учетом нормировки отсчетов детектора SPI-ACS по потокам, измеренным монитором *Fermi*/GBM у ряда коротких гамма-всплесков, одновременно зарегистри-

рованных обоими приборами (см. Приложение). Подробнее она будет обсуждена ниже.

Каждый из импульсов достигает максимальной значимости на кривой блеска со своим вполне определенным размером бина: 0.15 с для первого и 0.85 с для второго импульса. На кривой блеска с размером бина 0.25 с оба импульса имеют одинаково высокую значимость $S/N \simeq 3.5$ и 3.3 стандартных отклонения. Совместная вероятность, учитывающая наряду со статистической значимостью импульсов вероятность случайной ассоциации с событием S190425z (а также увеличение числа испытаний из-за подбора оптимального размера бина), будет рассчитана ниже именно для такой кривой блеска. В табл. 2 приведены основные параметры обоих импульсов всплеска.

Для сравнения там же приведены аналогичные параметры всплеска GRB 170817A по данным детектора SPI-ACS. По кривой блеска на рис. 2 кажется, что этот всплеск содержит лишь один довольно узкий импульс. На самом деле, как было отмечено в работе Позаненко и др. (2018), детектор SPI-ACS зарегистрировал лишь его начальную жесткую часть. Согласно данным монитора

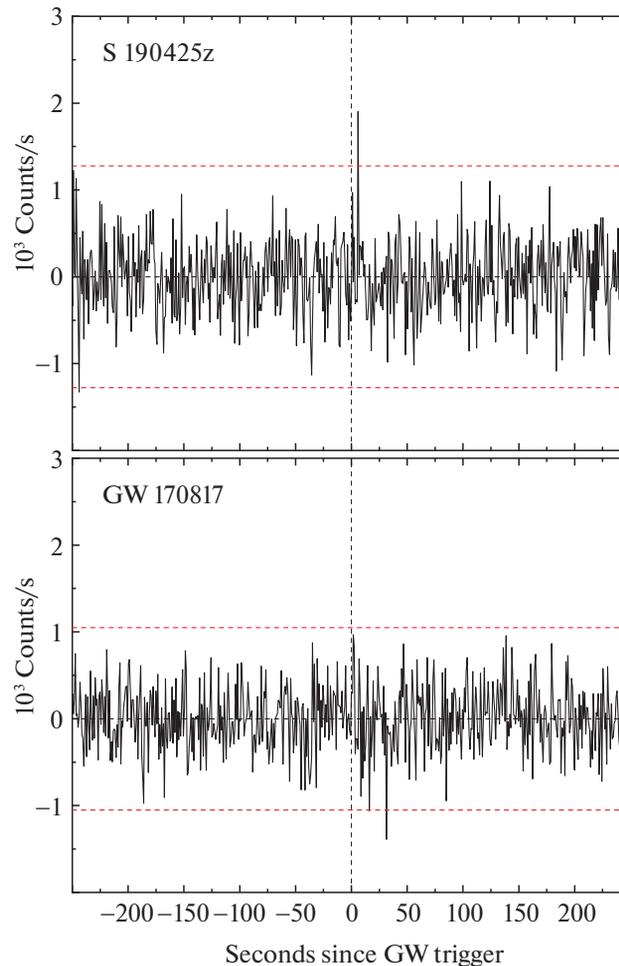


Рис. 1. Зависимость от времени скорости счета фотонов детектором SPI-ACS непосредственно до и после (± 250 с) гравитационно-волновых событий S190425z (вверху) и GW 170817 (внизу). Длительность бина равна 0.85 с, время отсчитывается от момента регистрации события детекторами LIGO/Virgo (вертикальная штриховая линия), фон вычтен согласно модели. Штриховые (красные) линии отмечают диапазон случайных отклонений на уровне 3σ .

Fermi/GBM (Голдстейн и др., 2017), в рентгеновском диапазоне 8–50 кэВ всплеск GRB 170817A имел намного более протяженный профиль с полной длительностью ~ 4.1 с. Это хорошо видно на рис. 3, на котором показаны кривые блеска вблизи этого события, зарегистрированные монитором *Fermi*/GBM (красная и синяя гистограммы), в сравнении с кривой блеска, зарегистрированной детектором SPI-ACS (черная гистограмма). В диапазоне 50–300 кэВ этого прибора, близком диапазону SPI-ACS (> 80 кэВ), в профиле всплеска доминирует узкий начальный гамма-импульс, но также есть указание на присутствие слабого второго импульса длительностью ~ 1 с через ~ 5.3 с после момента слияния нейтронных звезд. Таким образом, гамма-всплески, сопровождавшие оба близких зарегистрированных гравитационно-волновых события, имеют сравнимую длительность

и одинаковую двухкомпонентную структуру временного профиля.

Отметим, что никакого продленного излучения, которое можно было бы принять за послесвечение, в кривой блеска, зарегистрированной детектором SPI-ACS, нет вплоть до 250 с после момента T_0 (см. рис. 1). Продленное излучение не было зарегистрировано и в кривой блеска GRB 170817A (Позаненко и др., 2018). Не было зарегистрировано и гамма-излучение, которое можно было бы связать с гравитационно-волновым событием, в самом телескопе SPI. Впрочем, регистрация излучения защитой SPI-ACS подразумевает, что гамма-фотоны пришли под большим углом к оси телескопа и не могли быть зарегистрированы в его поле зрения.

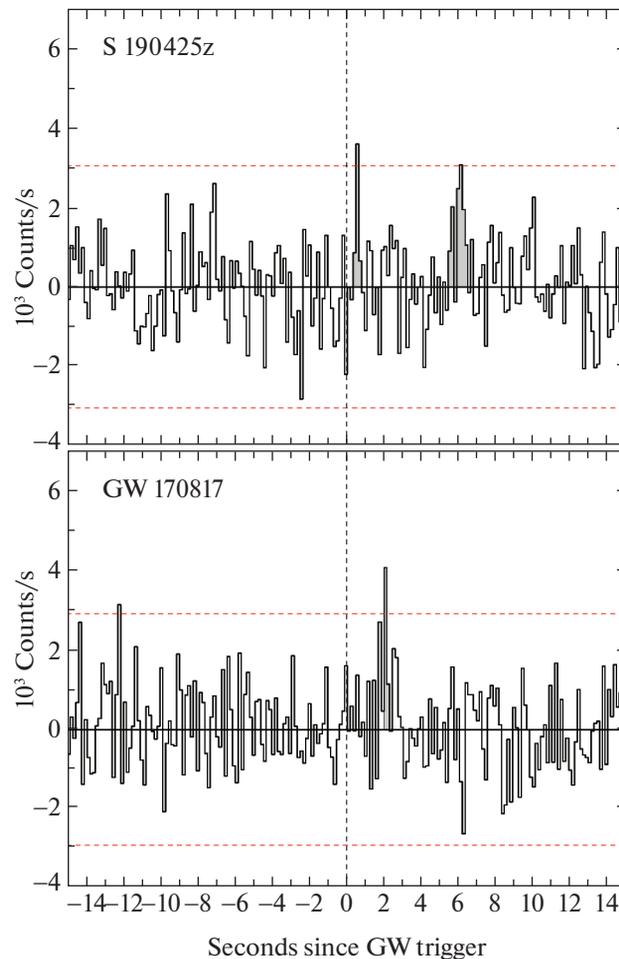


Рис. 2. Зависимость от времени скорости счета фотонов детектором SPI-ACS непосредственно до и после гравитационно-волновых событий S190425z (вверху) и GW 170817 (внизу), т.е. то же, что на рис. 1, но в более узком временном интервале (± 15 с) и с длительностью бина 0.15 с. Время отсчитывается от момента срабатывания детекторов LIGO/Virgo (вертикальная штриховая линия), горизонтальные штриховые (красные) линии обозначают уровень 3σ для случайного выброса.

Оценка достоверности события

Для оценки вероятности того, что два импульса на жесткой рентгеновской кривой блеска сразу после момента T_0 регистрации события S190425z появились случайно, воспользуемся двухпараметрической формулой расчета вероятности (Блэкбурн и др., 2015, 2019), учитывающей наряду со статистической достоверностью импульсов вероятность их случайной ассоциации с событием S190425z, т.е. их появление через определенный интервал времени после события. Формула учитывает также повышение вероятности найти значимый случайный импульс из-за подбора оптимального временного шага записи скорости счета — просто за счет увеличения числа испытаний. Впервые эта формула была применена при оценке значимости зарегистрированной монитором *Fermi*/GBM слабой транзи-

ентной вспышки гамма-излучения вскоре после первого найденного LIGO/Virgo гравитационно-волнового события GW 150914 (Конатон и др., 2016).

Оценка выполняется в несколько этапов. Сначала вычисляется False Alarm Rate (FAR) — определенная эмпирически частота появления на кривой блеска случайных событий (импульсов) со значимостью, равной или большей определенного значения. Затем вычисляется вероятность для такого события произойти не позже времени dT после T_0 . Оценка вероятности прямо не зависит от шага кривой блеска, на которой происходил поиск событий (импульсов). Оценим частоту появления комплекса из двух импульсов с параметрами, соответствующими гамма-всплеску GRB 190425 (табл. 1 и 2). Для этого воспользуемся данными

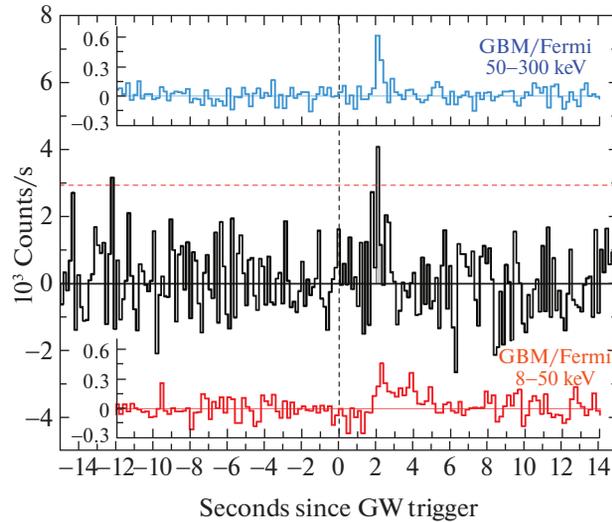


Рис. 3. Временной профиль гамма-всплеска GRB 170817A, сопровождавшего гравитационно-волновое событие GW 170817, по данным детекторов SPI-ACS (черный цвет, ≥ 80 кэВ, см. нижнюю панель на рис. 2) и *Fermi*/GBM в мягком (красный цвет, 8–50 кэВ) и жестком (синий цвет, 50–300 кэВ) диапазонах. Видно, что в мягком диапазоне всплеск продолжался по крайней мере до ~ 6 с после слияния нейтронных звезд.

SPI-ACS, полученными за всю ту орбиту обсерватории INTEGRAL, на которой был зарегистрирован всплеск (rev. 2083). Будем исследовать запись скорости счета с шагом 0.25 с (временной ряд состоит из 591 200 бинов). Всего за 125 кс в записи было найдено 8 такого рода комплексов с расстоянием между началами импульсов менее 5.5 с, причем для 5 из них короткий импульс предшествовал более длительному, для остальных — запаздывал. Таким образом,

$$\text{FAR} \simeq \frac{8}{1.25 \times 10^5 \text{ с}} = 6.4 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}.$$

Совместная, очень консервативная (завышенная) оценка вероятности появления совпадающего по времени случайного выброса (Блэкбурн и др., 2015; Конатон и др., 2016) записывается в виде

$$P = \text{FAR} \times \ln(1 + T_{\text{max}}/T_{\text{min}})dT,$$

где dT — длительность интервала от T_0 до начала первого импульса; T_{max} — длительность интервала временного ряда после T_0 , на котором происходил поиск событий; T_{min} — длительность минимального измеряемого совпадения. Консервативно, T_{max} можно ограничить значением 30 с; T_{min} — очевидно, является длиной минимального бина временного ряда, для которого еще проводился поиск импульсов, в нашем исследовании это 0.1 с (см. также Конатон и др., 2016). Подставляя эти значения, получаем следующую оценку вероятности

$$P = 6.4 \times 10^{-5} \ln\left(1 + \frac{30}{0.1}\right) \times 0.44 \simeq 1.6 \times 10^{-4}.$$

Эта оценка отражает вероятность случайного появления комплекса из двух импульсов заданной интенсивности на расстоянии 0.44 с после гравитационно-волнового события S190425z.

Такую же оценку можно получить отдельно для каждого из зарегистрированных импульсов. Результаты приведены в табл. 2. Отметим, что на кривой блеска с размером бина 0.25 с (всего 591 200 бинов — кривая за всю орбиту) найдено 198 положительных и 139 отрицательных выбросов, превышающих уровень $S/N = 3.5$. Число отрицательных выбросов соответствует ожидаемому при гауссовой статистике с $P(> 3.5\sigma) \simeq 2.3 \times 10^{-4}$, число положительных — на 40% превышает его. Скорее всего это происходит из-за присутствия в скорости счета SPI-ACS заметного числа импульсов большой интенсивности, связанных с заряженными частицами. Они дают только положительные выбросы. При этом выбросы малой значимости ($S/N \lesssim 3$) с гауссовой вероятностью согласуются. Ясно, что в таких условиях для определения вероятности регистрации случайного выброса необходимо использовать эмпирические оценки (см. табл. 2).

На кривой блеска с размером бина 0.85 с (содержащей всего 173 900 бина) обнаружены 4 положительных (включая второй импульс GRB 190425) и 1 отрицательный выброс, имеющие уровень сигнала к шуму $S/N = 4.4$ или превышающие его. При гауссовой статистике с вероятностью $P(> 4.4\sigma) \simeq 5.4 \times 10^{-6}$ мы должны были бы зарегистрировать лишь 1 случайный выброс за 125 кс.

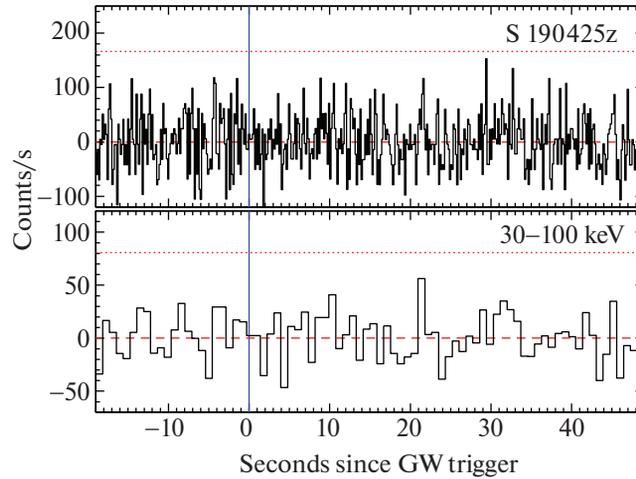


Рис. 4. Зависимость от времени скорости счета фотонов детектором IBIS-ISGRI с -20 с до и $+50$ с после гравитационно-волнового события S190425z. Длительность бина равна 0.15 с (вверху) и 0.85 с (внизу), время отсчитывается от момента срабатывания детекторов LIGO/Virgo, фон вычтен, красная пунктирная линия отмечает диапазон случайных отклонений на уровне 3σ .

Сравнение с достоверностью GRB 170817A

Для сравнения с оценкой достоверности всплеска GRB 190425 проведем аналогичный анализ данных первого зарегистрированного детектором SPI-ACS гамма-всплеска GRB 170817A, сопутствующего событию GW 170817 слияния BNS. Напомним, что максимальная значимость регистрации этого всплеска составила $S/N \simeq 4.6$ на кривой блеска с размером бина 0.1 с (табл. 1).

В записи скорости счета детектора с таким размером бина за всю соответствующую этому гамма-всплеску орбиту обсерватории INTEGRAL (rev. 1851), имевшую длительностью 155 кс ($1\,549\,000$ бинов), зарегистрировано 65 положительных выбросов с $S/N \geq 4.6$ и 3 отрицательных. При гауссовой статистике вероятность случайно зарегистрировать такой импульс равна 2.1×10^{-6} , т.е. за 155 кс мы должны были зарегистрировать 3 положительных выброса. Ложные импульсы, связанные с заряженными частицами, кардинально ухудшают статистику. Согласно измеренному числу ложных всплесков для этого события $FAR = 4.2 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ (табл. 2).

Консервативная оценка вероятности случайного совпадения для этого события, проведенная методом двухпараметрического анализа (Блэкбурн и др., 2015; Конатон и др., 2016), дает

$$P = 4.2 \times 10^{-4} \ln \left(1 + \frac{30}{0.1} \right) \times 2.0 \simeq 4.8 \times 10^{-3}.$$

Оценка не позволяет исключить случайное происхождение события. Впрочем, достоверность гамма-всплеска GRB 170817A подтверждена

независимо — его одновременной регистрацией монитором *Fermi*/GBM с намного более высокой значимостью $S/N \simeq 8.7$ (табл. 1).

Наблюдения телескопом IBIS-ISGRI

На рис. 4 показана зависимость от времени вблизи события S190425z скорости счета фотонов детектором ISGRI другого телескопа обсерватории INTEGRAL — IBIS. Верхняя и нижняя панели рисунка соответствуют разному выбору длины шага этих кривых, 0.15 и 0.85 с соответственно. Данные взяты в диапазоне энергий $30\text{--}100$ кэВ. Видно, что с момента $T_0 - 20$ с до $T_0 + 50$ с никаких значимых всплесков излучения, которые могли бы быть интерпретированы как продолжение гамма-всплеска GRB 190425 в жесткий рентгеновский диапазон, в записи скорости счета не обнаружено. Не обнаружено всплесков излучения и на более долгой временной шкале, см. Человеков и др. (2019a), Савченко и др. (2019).

Конечно, мы не могли ожидать регистрации гамма-всплеска, обнаруженного детектором SPI-ACS, в поле зрения телескопа. Однако, как недавно было показано Человековым и др. (2019b), телескоп IBIS-ISGRI способен успешно регистрировать и всплески, пришедшие сбоку, под большими углами к его оси, поэтому какое-то излучение от всплеска GRB 190425 могло бы быть зарегистрировано. Верхний предел (3σ) на поток любого возможного избыточного излучения длительностью ~ 1 с в диапазоне $10\text{--}1000$ кэВ равен 2.1×10^{-6} эрг см^{-2} (если использовать данные детектора IBIS-ISGRI в диапазоне энергий $30\text{--}100$ кэВ)

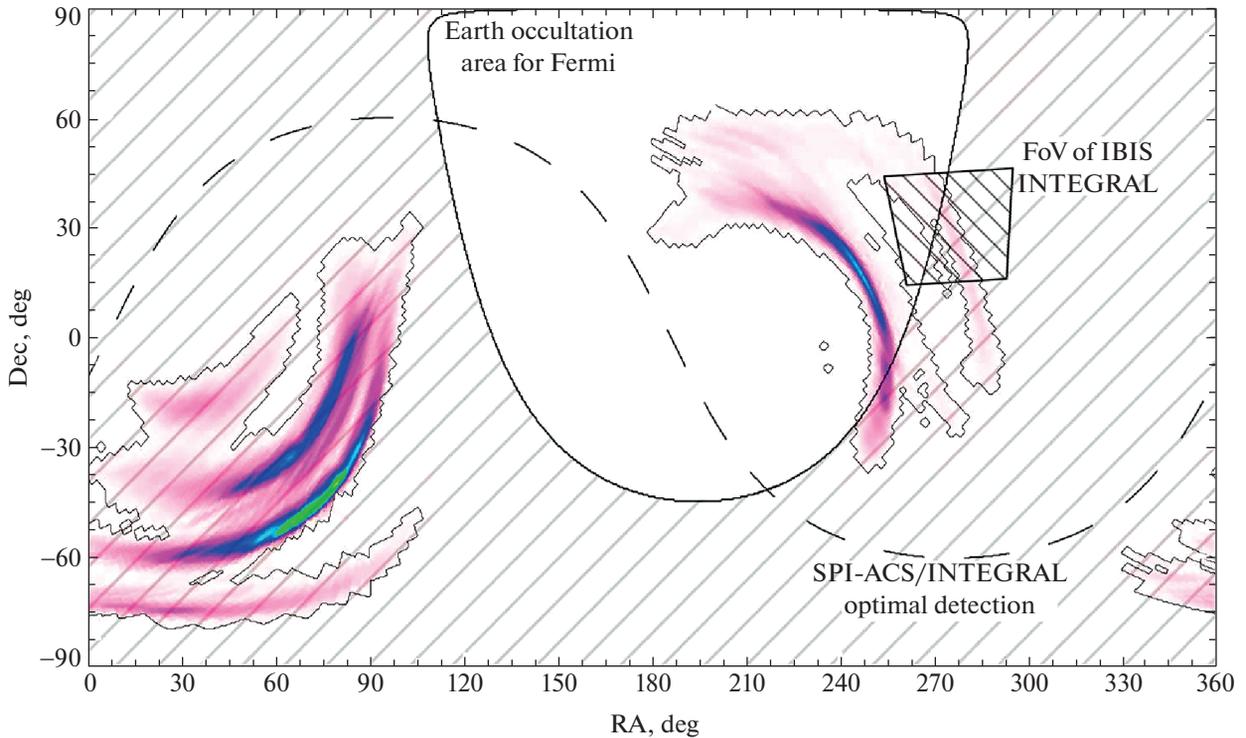


Рис. 5. Карта областей наиболее вероятной локализации детекторами LIGO/Virgo гравитационно-волнового события S190425z (gracedb.ligo.org/superevents/S190425z/view, синий и зеленый цвета соответствуют наибольшей вероятности). На карту нанесены область затенения Земли поля зрения монитора *Fermi*/GBM в момент UTC 2019-04-25 08:18:05, а также область, попадавшая в это время в поле зрения телескопа IBIS-ISGRI обсерватории INTEGRAL. Источник гамма-всплеска может находиться лишь в незаштрихованной части карты — в северной области локализации LIGO/Virgo. Штриховая линия обозначает полосу оптимальной регистрации события детектором SPI-ACS обсерватории INTEGRAL (показаны центральные точки полосы, расположенные под углом 90° к оси телескопа).

и 1.2×10^{-6} эрг см^{-2} (если использовать данные в диапазоне 100–500 кэВ). Для оценки потока от всплеска, предположительно пришедшего под углом 26° – 60° к оси телескопа, использовалась нормировка, основанная на нескольких сотнях гамма-всплесков, одновременно наблюдавшихся детекторами *Fermi*/GBM и IBIS-ISGRI (Человеков и др., 2019б). Полученный предел не противоречит потоку, измеренному от всплеска детектором SPI-ACS.

Регистрация S190425z другими экспериментами

Ни в одном из других рентгеновских и гамма-экспериментов, SWIFT/BAT (Сакамото и др., 2019), MAXI/GSC (Шугизаки и др., 2019), WIND/KONUS (Свинкин и др., 2019), AGILE/MCAL (Казентини и др., 2019), *Fermi*/GBM (Флетчер, 2019), Insight-HXMT/HE (Хяо и др., 2019), всплеск GRB 190425 от события LIGO/Virgo S190425z обнаружен не был. Впрочем, для всех этих приборов, кроме

Fermi/GBM, поток, зарегистрированный SPI-ACS (см. табл. 1), был заведомо ниже порога детектирования. Полученные 3σ верхние пределы на поток импульсного излучения длительностью 1 с в лучшем случае были сравнимы с пределами, поставленными телескопом IBIS-ISGRI, а чаще заметно его превосходили.

Согласно проведенному нами анализу представительной выборки коротких всплесков, зарегистрированных одновременно детекторами *Fermi*/GBM и INTEGRAL/SPI-ACS (см. Приложение и рис. 7), гамма-всплеск с характеристиками рассматриваемого события должен был бы обязательно зарегистрирован *Fermi*/GBM. Тем не менее этот прибор всплеск в интервале ± 30 с от момента T_0 гравитационно-волнового события не зарегистрировал, 3σ предел на поток излучения в диапазоне 10–1000 кэВ в зависимости от используемой спектральной модели составил $(0.9\text{--}8.4) \times 10^{-7}$ эрг см^{-2} для очень короткого (длительностью ~ 0.1 с) всплеска, $(0.3\text{--}2.5) \times 10^{-6}$ эрг см^{-2} для обычного короткого (~ 1 с)

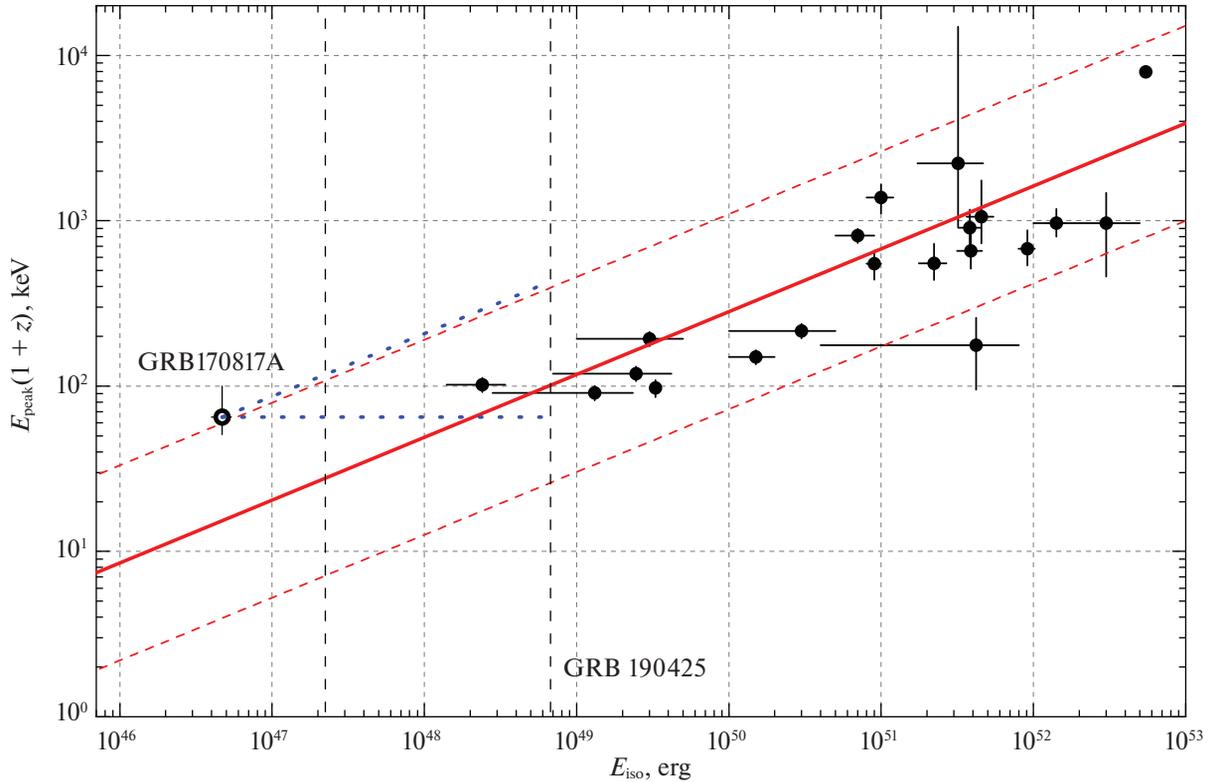


Рис. 6. Возможное положение всплеска GRB 190425, сопровождавшего зарегистрированное детекторами LIGO/Virgo событие слияния нейтронных звезд S190425z, на диаграмме Амати (2002), построенной с учетом лишь коротких всплесков (Минаев и др., 2019б). Вертикальные штриховые линии обозначают границы 2σ -области неопределенности значения E_{iso} всплеска GRB 190425. Они были получены по результатам калибровки SPI-ACS (см. Приложение) путем пересчета интегрального потока F в E_{iso} для фотометрического расстояния 156 Мпк ($E_{\text{iso,min}} = 2.2 \times 10^{47}$ эрг и $E_{\text{iso,max}} = 6.7 \times 10^{48}$ эрг). Пересечение этих линий с 2σ -областью неопределенности зависимости $E_p - E_{\text{iso}}$ дает предельно возможные значения E_p (на уровне 2σ): $E_{p,\text{min}} = 7$ и $E_{p,\text{max}} = 400$ кэВ. Синие пунктирные линии дополнительно ограничивают E_p в предположении, что энергия, излученная во время всплесков GRB 170817A и GRB 190425, была одинаковой, а различия в их наблюдаемых проявлениях связаны лишь с разной ориентацией оси релятивистского выброса по отношению к наблюдателю.

всплеска и $(0.9-7.7) \times 10^{-6}$ эрг см $^{-2}$ для длинного (~ 10 с) всплеска (Флетчер, 2019).

ОБСУЖДЕНИЕ

Мы считаем, что описанное выше превышение скорости счета детектором SPI-ACS сразу после гравитационно-волнового события слияния нейтронных звезд S190425z было действительно связано с регистрацией от его источника гамма-всплеска. В этой связи уместно отметить следующие наблюдательные факты.

Отсутствие регистрации Fermi/GBM

Отсутствие регистрации гамма-всплеска GRB 190425 монитором Fermi/GBM можно объяснить затмением его источника Землей. Согласно Флетчеру (2019) наблюдения Fermi/GBM покрывали

лишь 56% области начальной локализации источника детекторами LIGO/Virgo.

На рис. 5 представлены уточненная карта областей локализации события S190425z детекторами LIGO/Virgo (Зингер, 2019б) и область затенения спутника Fermi Землей (незаштрихована). Действительно, видно, что почти вся северная часть области локализации гравитационно-волнового сигнала в момент регистрации гамма-всплеска была закрыта Землей. Кривая оптимальной регистрации всплеска детектором SPI-ACS (под углом 90° к оси телескопа) показана штриховой линией. Детектор чувствителен к событиям в широкой полосе, отстоящей, по крайней мере, на $\pm 75^\circ$ от этой кривой; в эту полосу попадает вся зона максимальной вероятности из северной области локализации события S190425z.

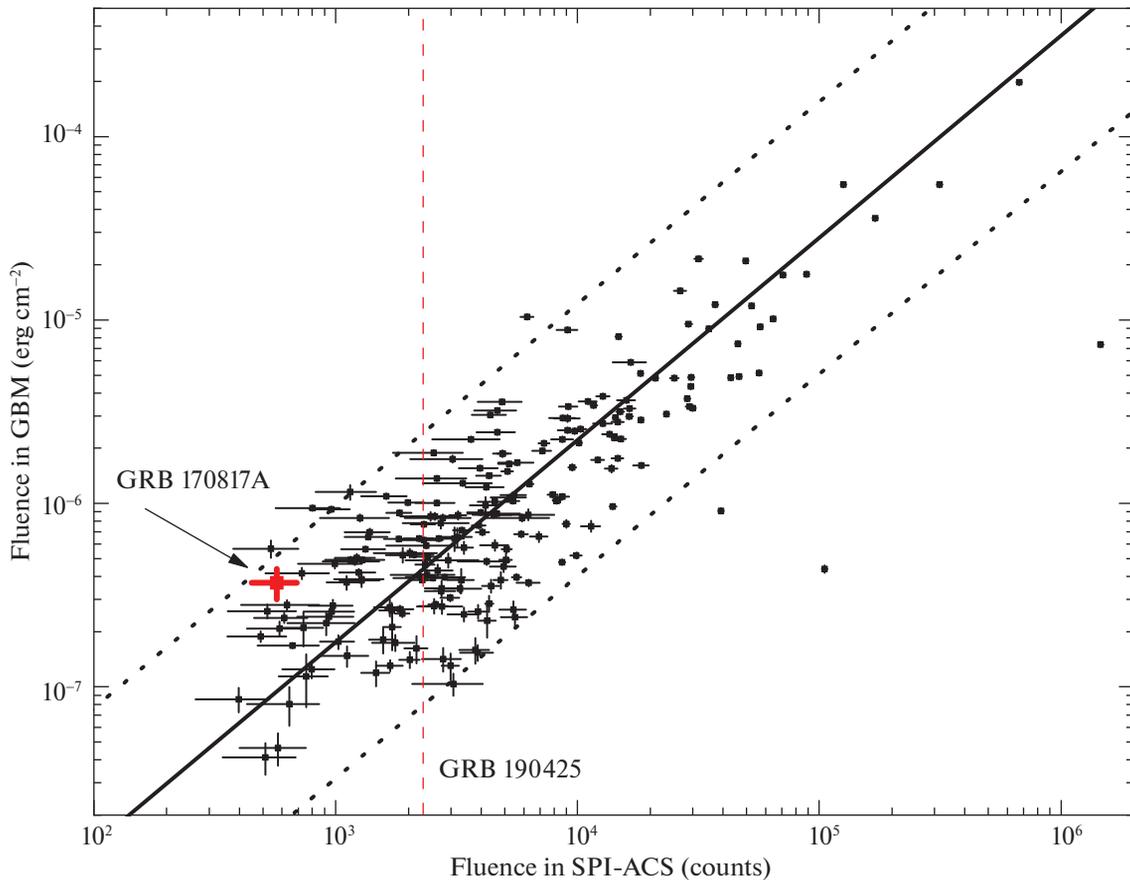


Рис. 7. Соотношение между интегральным по времени потоком фотонов (в отсчетах), зарегистрированным детектором SPI-ACS обсерватории INTEGRAL в диапазоне >80 кэВ от коротких ($T_{90} < 6$ с) гамма-всплесков, и интегральным потоком излучения, измеренным от тех же всплесков монитором *Fermi*/GBM в диапазоне 10–1000 кэВ (в эрг см $^{-2}$). Пунктирные линии ограничивают $\pm 2\sigma$ область отклонений потока, измеренного монитором *Fermi*/GBM, от наилучшей аппроксимации данного соотношения (показана сплошной линией). Пересечение пунктирных линий с вертикальной штриховой (красной) линией задает диапазон возможных значений потока излучения от всплеска GRB 190425 (сопутствующего гравитационно-волновому событию S190425z) в диапазоне 10–1000 кэВ.

Таким образом, пересечение области затенения спутника *Fermi* Землей с областью локализации события детекторами LIGO/Virgo является зоной вероятного нахождения оптического источника (послесвечения гамма-всплеска или килоновой), возможно, сопровождавшего слияние нейтронных звезд S190425z. Из этой зоны можно также исключить участок в поле зрения телескопа IBIS-ISGRI (заштрихованная трапециевидная область с центром в точке R.A. $\approx 277^\circ$, Decl. $\approx 30^\circ$), в котором всплеск был бы заведомо зарегистрирован. Поле зрения спектрометра SPI практически совпадает с полем зрения IBIS-ISGRI.

Сходство и отличия GRB 190425 и GRB 170817A

Характеристики гамма-всплесков GRB 170817A и GRB 190425, зарегистрированных в

эксперименте SPI-ACS, даны в сравнении в табл. 1 и 2.

Гамма-всплески GRB 190425 и GRB 170817A похожи тем, что оба состояли из двух эпизодов — импульсов: первого, короткого (в случае GRB 170817A только он и был зарегистрирован SPI-ACS), и второго, более длительного. В случае GRB 170817A второй импульс продолжался почти 4 с, в случае GRB 190425 — 1.3 с (с максимумом через 5.4 с после первого импульса, см. табл. 2). Полная продолжительность обоих гамма-всплесков была сравнима и составляла ~ 4 –6 с. Повторные импульсы наблюдались во временном профиле у ряда других коротких гамма-всплесков (Джерелс и др., 2006, и ссылки там), эффективно увеличивая их длительность.

Второй импульс всплеска GRB 170817A был заметно мягче первого (см. рис. 3 и подроб-

нее — Позаненко и др., 2018). Второй импульс GRB 190425 оставался достаточно жестким, именно поэтому он и был зарегистрирован детектором SPI-ACS, нижний порог чувствительности которого превышает ~ 80 кэВ. Если бы этот импульс был столь же мягким, как второй импульс всплеска GRB 170817A ($kT \sim 11$ кэВ), то SPI-ACS не смог бы его зарегистрировать. Более того, как было показано Готтлибом и др. (2018), Позаненко и др. (2018), второй импульс в профиле всплеска GRB 170817A, скорее всего, был связан с тепловым нагревом оболочек при выходе джета (излучением кокона). Поскольку расстояние до источника GRB 190425 (~ 156 Мпк) заметно превышает расстояние до источника GRB 170817A (~ 40 Мпк, см. табл. 1), интенсивность тепловой компоненты в спектре излучения GRB 190425 должна была бы быть в $(156/40)^2 \sim 15$ раз меньше интенсивности тепловой компоненты в спектре GRB 170817A, ее не смог бы зарегистрировать не только SPI-ACS, но даже *Fermi*/GBM. Не исключено, что вторые импульсы в этих двух всплесках имели разное происхождение.

Учитывая, что в случае GRB 190425 два импульса отстоят друг от друга на 5.4 с, в нем мог быть реализован сценарий двухджетового гамма-всплеска (Барков, Позаненко, 2011), когда первый короткий импульс соответствует джету, образовавшемуся в результате нейтринной аннигиляции (Чен, Белобородов, 2007), а второй, более длительный, — появляется в результате аккреции из сформировавшегося аккреционного диска и эффекта Блэнфорда-Знаека (Блэнфорд, Знаек, 1977). В этом случае угол, под которым наблюдатель видит джет гамма-всплеска GRB 190425, должен быть меньше угла наблюдения джета в GRB 170817A. Таким образом, природа двух наблюдаемых эпизодов излучения в кривых блеска GRB 170817A и GRB 190425 может быть различна.

Классификация и спектральные свойства

Нет сомнений, что оба гамма-всплеска принадлежат к классу всплесков типа I (называемых также короткими всплесками), источниками и прародителями которых являются сливающиеся нейтронные звезды. Это следует из наблюдений и анализа данных LIGO/Virgo.

Хотя детектор SPI-ACS не имеет спектральных каналов, некоторые заключения о спектральных свойствах гамма-излучения всплеска GRB 190425 можно дать. Так, используя эмпирическую зависимость “энергия максимума E_p в энергетическом спектре νF_ν — эквивалентная изотропная излученная энергия в гамма-диапазоне E_{iso} ” (Амати, 2002) для гамма-всплесков типа I (Минаев и др.,

2019б), можно поставить пределы, внутри которых должно находиться значение энергии $E_p(1+z)$ для GRB 190425 (рис. 6). Сплошной линией на этом рисунке показана наилучшая зависимость

$$E_p(1+z) \simeq 105 \left(\frac{E_{iso}}{10^{49} \text{ эрг}} \right)^{0.38 \pm 0.06} \text{ кэВ},$$

штриховыми (красными) линиями — область $\pm 2\sigma$ разброса реальных всплесков относительно этой зависимости. Красное смещение источника всплеска $z \simeq 0.0364 \ll 1$, поэтому в дальнейшем фактором $(1+z)$ мы будем пренебрегать.

Энергию E_{iso} определим, исходя из оценок минимально/максимально возможного интегрального по времени потока от всплеска, приведенного к диапазону *Fermi*/GBM 10–1000 кэВ. Оценки были рассчитаны по потоку, измеренному детектором SPI-ACS (в отчетах, см. табл. 1), с использованием результатов калибровки соотношения потоков от ряда коротких гамма-всплесков, измеренных монитором *Fermi*/GBM и одновременно детектором SPI-ACS (см. Приложение и рис. 7). Граничные значения интегрального потока были затем пересчитаны в E_{iso} с учетом фотометрического расстояния до источника 156 Мпк. Полученные пределы $E_{iso,min} = 2.2 \times 10^{47}$ эрг и $E_{iso,max} = 6.7 \times 10^{48}$ эрг показаны на рис. 6 вертикальными штриховыми линиями. Их пересечение с 2σ -областью разброса всплесков относительно зависимости $E_p - E_{iso}$ дает предельно возможные значения E_p на уровне достоверности 2σ : $E_{p,min} = 7$ и $E_{p,max} = 400$ кэВ (соответствуют нижнему и верхнему углам зоны пересечения полос неопределенности на рис. 6).

Если предположить, что зависимость $E_p - E_{iso}$ связана с геометрией наблюдений источника гамма-всплесков, а именно, с величиной угла между осью релятивистского выброса (джета) и направлением на наблюдателя (Эйхлер, Левинсон, 2004; Левинсон, Эйхлер, 2005; Ито и др., 2015, 2019), то можно получить дополнительные ограничения на значение E_p .

Действительно, предположим, что полная энергия, излученная в гамма-диапазоне во время всплесков GRB 170817A и GRB 190425, была приблизительно одинаковой. Тогда угол θ между осью джета и направлением на наблюдателя в источнике GRB 190425 должен быть меньше угла θ в источнике GRB 170817A (см. Сонг и др., 2019), так как E_{iso} для GRB 190425 во много раз превышает E_{iso} для GRB 170817A (см. рис. 6). Уменьшение возможных значений угла θ при увеличении E_{iso} подтверждается и детальными расчетами в рамках модели джета с гауссовым профилем (Жанг, Мезарос, 2002; Троя и др.,

2018). Консервативно E_p можно ограничить снизу значением $E_{p,\min} = 70$ кэВ, так как для наличия общей положительной корреляции необходимо, чтобы $E_p \sim E_{\text{iso}}^\alpha$, где $\alpha > 0$ (нижняя пунктирная синяя линия на рисунке). Верхний предел $E_{p,\max} = 400$ кэВ останется прежним, он ограничен неопределенностью наблюдаемой зависимости $E_p - E_{\text{iso}}$ (верхняя пунктирная линия). Полученные пределы не противоречат регистрации гамма-всплеска GRB 190425 детектором SPI-ACS на энергиях выше 80 кэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сообщение Минаева и др. (2019a) об обнаружении детектором SPI-ACS обсерватории INTEGRAL возможного всплеска гамма-излучения в интервале времени 0.5–6.0 с после гравитационно-волнового события S190425z осталось практически незамеченным. Сказалось отсутствие регистрации этого всплеска монитором *Fermi*/GBM, а, возможно, также и недостаточно серьезная оценка реальности всплеска Мартино-Кариллой и др. (2019) и Савченко и др. (2019), основанная на анализе тех же данных детектора SPI-ACS. В данной работе подтверждена достаточно высокая статистическая достоверность всплеска, объяснено отсутствие его регистрации монитором *Fermi*/GBM и приведен ряд дополнительных аргументов в пользу его существования.

1. Гамма-всплеск GRB 190425 зарегистрирован детектором SPI-ACS через 0.44 с после обнаружения гравитационно-волнового события S190425z. Всплеск состоял из двух импульсов (эпизодов) излучения длительностью 0.25 с и 0.85 с (второй импульс начался через 5.1 с после первого). Всплеск имел общую длительность (~6.0 с) и временной профиль, во многом аналогичные длительности и профилю гамма-всплеска GRB 170817A, сопровождавшего первое зарегистрированное LIGO/Virgo событие слияния BNS GW 170817.
2. Совместная вероятность случайного появления комплекса, состоящего из двух описанных выше импульсов, составляет 1.6×10^{-4} . Эта вероятность учитывает наряду с обычной значимостью $S/N \simeq 5.5\sigma$ двойного всплеска возможность его ошибочной ассоциации с событием S190425z и увеличение числа испытаний при подборе оптимально временной шкалы (Блэкбурн и др., 2015). Для сравнения, вероятность регистрации детектором SPI-ACS всплеска

GRB 170817A с длительностью 0.1 с и значимостью $S/N \simeq 4.6\sigma$ через ~2.0 с после события GW 170817 составляет 4.8×10^{-3} .

3. Оба источника зарегистрированных всплесков, GRB 170817A и GRB 190425, находятся на расстояниях (40 и 156 Мпк соответственно), много меньше расстояний до других событий слияния BNS (а также BBH и NSBH), зарегистрированных в циклах наблюдений O2 и O3 LIGO и LIGO/Virgo.
4. Ни в одном из зарегистрированных детекторами LIGO/Virgo отдельно взятых событий слияния BBH или NSBH сколь-нибудь значимых признаков присутствия гамма-излучения выявлено не было (Савченко и др., 2016, 2017б, 2018).
5. Полученная консервативная оценка изотропной энергии E_{iso} , излученной во время всплеска GRB 190425, ограничена 2σ интервалом от 2.2×10^{47} до 6.8×10^{48} эрг, что минимум в 5 раз превышает оценку E_{iso} для GRB 170817A. Оценка энергии максимума E_p в спектре излучения всплеска GRB 190425 ограничена 2σ интервалом от 70 до 400 кэВ (рис. 6).
6. Поскольку E_{iso} для GRB 190425 во много раз превышает E_{iso} для GRB 170817A, угол между направлением на наблюдателя и осью джета в GRB 190425z должен был быть меньше, чем в GRB 170817A (например, Сонг и др., 2019). Это очевидно в предположении одинаковой излученной энергии всплесков и подтверждается расчетами в рамках модели гауссова профиля джета (Жанг, Мезарос, 2002; Троя и др., 2018). Оценка угла к оси джета служит независимой оценкой угла между направлением на наблюдателя и орбитальной плоскостью двойной системы сливающихся нейтронных звезд, плохо определяющегося непосредственно из гравитационно-волновых наблюдений (в предположении, что ось джета перпендикулярна орбитальной плоскости системы).
7. Отсутствие регистрации гамма-всплеска GRB 190425 монитором *Fermi*/GBM (одним из самых чувствительных всенаправленных гамма-всплесковых экспериментов в диапазоне выше 10 кэВ) может быть объяснено тем, что его источник в момент всплеска находился в тени Земли.

8. В результате наложения области локализации события S190425z детекторами LIGO/Virgo и области, затененной для *Fermi*/GBM во время всплеска GRB 190425 Землей, область возможной локализации события существенно уменьшена (по сравнению с исходной областью локализации LIGO/Virgo) и состоит только из северной ее части (рис. 5).
9. Отсутствие регистрации оптического компонента события в виде послесвечения, помимо большого размера области локализации события (7461 кв. град.), может быть связано с заметным отклонением оси джета от направления наблюдателя, что приводит к экспоненциальной подавленности регистрируемого потока. Значительное расстояние до источника (156 Мпк) не позволяет эффективно исследовать возможный объем локализации источника. Целенаправленные наблюдения галактик в этом объеме осложняются неполнотой существующих каталогов галактик, а обзорные наблюдения не обеспечивают необходимой для регистрации источника чувствительности. Так, интенсивные наблюдения, направленные на поиск килоновой (например, телескопами ZTF и Palomar Gattini-FR было просмотрено ~20% области локализации события, Коухлин и др., 2019; а телескопами MMT и SOAR — 40% возможного объема локализации, Хусейнзаде и др., 2019), не увенчались успехом, возможно, именно по этим причинам.

Для продолжения поиска оптического компонента события S190425z необходимо сконцентрироваться на уточненной в данной работе области его локализации в северном полушарии и более внимательно исследовать обнаруженные в ней оптические транзиенты.

Работа основана на данных наблюдений, выполненных международной астрофизической обсерваторией гамма-лучей INTEGRAL и полученных через Российский и Европейский центры научных данных обсерватории. Авторы благодарны Российскому Научному Фонду за финансовую поддержку (грант 18-12-00522).

Приложение

КАЛИБРОВКА ПОТОКА ОТ КОРОТКИХ ВСПЛЕСКОВ В ДЕТЕКТОРЕ SPI-ACS

Чтобы оценить интегральный по времени поток излучения, соответствующий отсчетам, зарегистрированным детектором SPI-ACS во время

всплеска GRB 190425, нами была отобрана и исследована представительная выборка коротких гамма-всплесков, наблюдавшихся одновременно детектором SPI-ACS обсерватории INTEGRAL и монитором *Fermi*/GBM. В результате было установлено соответствие между потоками, измеренными этими приборами (в отчетах и эрг см⁻² соответственно).

В выборку из каталога³ всплесков монитора *Fermi*/GBM (Бхат и др., 2016) были отобраны события, зарегистрированные с 14 июля 2008 г. по 30 июня 2019 г., в интервале T_{90} ⁴ которых на кривой блеска SPI-ACS, построенной с шагом 50 мс, присутствовал хотя бы один выброс над средней скоростью счета, превышающий уровень значимости 3σ . Учитывая происхождение обсуждаемых в работе всплесков GRB 170817A и GRB 190425 и их реально измеренную длительность, мы оставили в выборке только всплески, для которых определенный по данным монитора GBM интервал T_{90} был меньше 6 с.

Для всех отобранных таким образом 278 всплесков выборки фоновая скорость счета фотонов детектором SPI-ACS была аппроксимирована полиномом третьей степени в интервалах ($T_0 - 300$ с, $T_0 - 50$ с) и ($T_0 + 200$ с, $T_0 + 500$ с) — в каждом интервале отдельно; момент начала всплеска T_0 был взят из каталога монитора GBM. В качестве фоновой скорости счета B в интервале ($T_0 - 50$ с, $T_0 + 200$ с) использовалось среднее значение двух модельных скоростей счета на границах этого интервала. Интегральное число отсчетов C , зарегистрированных во время всплеска, вычислялось как суммарное превышение скорости счета над B в интервале времени T_{100} ⁵. Для дальнейшего анализа были оставлены только те всплески, значимость определения C которых превышала 3 стандартных отклонения.

На рис. 7 интегральные по времени потоки F (в эрг см⁻²), зарегистрированные монитором *Fermi*/GBM во время оставшихся всплесков, приведены в зависимости от интегрального числа отсчетов C , зарегистрированных от этих всплесков детектором SPI-ACS. Эта зависимость может

³ Постоянно обновляемый каталог всплесков этого монитора можно найти по электронному адресу heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/fermi/fermigbrst.html

⁴ Интервал времени между моментами накопления монитором GBM 5% и 95% интегрального количества отсчетов (Кошут и др., 1996).

⁵ Интервал, использованный при построении спектра и вычислении энерговыделения в данном всплеске в каталоге монитора GBM.

быть аппроксимирована степенной модельной функцией

$$F_m = 2.19 \times 10^{-6} \left(\frac{C}{10^4 \text{ отсч.}} \right)^{1.10 \pm 0.06} \text{ эрг см}^{-2},$$

показанной на рис. 7 сплошной линией. Пунктирными линиями показана $\pm 2\sigma$ полоса разброса реально измеренных потоков от гамма-всплесков выборки относительно этой прямой. Ранее подобная зависимость была построена Вигано, Меретти (2009), но для более ограниченной (по числу всплесков) и менее однородной (учитывающей как короткие, так и длинные всплески) выборки.

Вертикальной красной штриховой линией показано возможное положение на этой зависимости всплеска GRB 190425, соответствующего событию S190425z, согласно измеренному детектором SPI-ACS интегральному числу отсчетов. Пересечение этой линии с двумя пунктирными линиями, ограничивающими полосу неопределенности модельной зависимости $F_m(C)$, задает предельные значения (на уровне достоверности 2σ) интегрального потока излучения от этого всплеска в диапазоне 10–1000 кэВ: $F_{\min} \simeq 8.0 \times 10^{-8} \text{ эрг см}^{-2}$, $F_{\max} \simeq 2.4 \times 10^{-6} \text{ эрг см}^{-2}$ (см. табл. 1).

Крестом красного цвета на этом рисунке показано положение гамма-всплеска GRB 170817A, соответствующего событию GW 170817, и ошибки измерения потоков от него двумя приборами. Сильное смещение вправо (и вверх) положения всплеска относительно линии наилучшей аппроксимации зависимости $F_m(C)$, вероятно, отражает факт неполной регистрации фотонов всплеска детектором SPI-ACS из-за уже отмечавшейся мягкости его излучения (Позаненко и др., 2018; напомним, что SPI-ACS чувствителен выше 80 кэВ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аббот и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, M. R. Abernathy, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, et al.), *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016).
- Аббот 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**, L12 (2017a).
- Аббот 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 (2017b).
- Аббот и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, S. Abraham, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, R.X. Adhikari, et al.), *Phys. Rev. X* **9**, 031040 (2019) [arXiv:1811.12907 (2018)].
- Амати (L. Amati), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **372**, 233 (2002).
- Барков, Позаненко (M.V. Barkov and A.S. Pozanenko), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **417**, 2161 (2011).
- Блинников и др. (S.I. Blinnikov, I.D. Novikov, T.V. Perevodchikova, and A.G. Polnarev), *Sov. Astron. Lett.* **10**, 177 (1984).
- Блэкбурн и др. (L. Blackburn, M.S. Briggs, J. Camp, N. Christensen, V. Connaughton, P. Jenke, R.A. Remillard, and J. Veitch), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **217**, 8 (2015).
- Блэкбурн и др. (L. Blackburn, S. Doeleman, J. Dexter, J.L. Gómez, M.D. Johnson, D. C. Palumbo, J. Weintraub, J.R. Farah, et al.), arXiv190901411B (2019).
- Блэндфорд, Знаек (R.D. Blandford and R.L. Znajek), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **179**, 433 (1977).
- Бхат и др. (P.N. Bhat, C.A. Meegan, A. von Kienlin, W.S. Paciesas, M.S. Briggs, J.M. Burgess, E. Burns, V. Chaplin, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **223**, 28 (2016).
- Ведренн и др. (G. Vedrenne, J.-P. Roques, V. Schönfelder, P. Mandrou, G.G. Lichti, A. von Kienlin, B. Cordier, S. Schanne, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L63 (2003).
- Вианелло и др. (G. Vianello, D. Götz, and S. Mereghetti), *Astron. Astrophys.* **495**, 1005 (2009).
- Вигано, Меретти (D. Vigano and S. Mereghetti), *POS* **96**, id. 49 (2009).
- Винклер и др. (C. Winkler, T.J.-L. Courvoisier, G. Di Cocco, N. Gehrels, A. Gimenez, S. Grebenev, W. Hermsen, J.M. Mas-Hesse, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L1 (2003).
- Голдстейн 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).
- Готтлиб и др. (O. Gottlieb, E. Nakar, T. Piran, and K. Hotokezaka), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **479**, 588 (2018).
- Гребенев С.А., Человеков И.В., Письма в Астрон. журн. **33**, 883 (2007) [S.A. Grebenev and I.V. Chelovekov, *Astron. Lett.* **33**, 789 (2007)].
- Джерелс и др. (N. Gehrels, J.P. Norris, S.D. Barthelmy, J. Granot, Y. Kaneko, C. Kouveliotou, C.B. Markwardt, P. Mészáros, et al.), *Nature* **444**, 1044 (2006).
- Жанг, Мезарос (B. Zhang and P. Meszaros), *Astrophys. J.* **571**, 876 (2002).
- Зингер (L. Singer), *GCN Circ.* **24168**, 1 (2019a).
- Зингер (L. Singer), *GCN Circ.* **24228**, 1 (2019b).
- Ито и др. (H. Ito, J. Matsumoto, S. Nagataki, D.C. Warren, and M.V. Barkov), *Astrophys. J.* **814**, L29 (2015).
- Ито и др. (H. Ito, J. Matsumoto, S. Nagataki, D.C. Warren, M.V. Barkov, and D. Yonetoku), *Nature Com.* **10**, id. 1504 (2019).
- Казентини и др. (C. Casentini, G. Piano, M. Tavani, M. Cardillo, A. Ursi, F. Lucarelli, C. Pittori, F. Verrecchia, et al.), *GCN Circ.* **24180**, 1 (2019).
- Квадрини и др. (E. M. Quadrini, A. Bazzano, A. J. Bird, K. Broenstad, F. Di Marco, G. La Rosa, M. Michalska, P. Orleanski, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L153 (2003).

27. фон Кинлин и др. (A. von Kienlin, V. Beckmann, A. Rau, N. Arend, K. Bennett, B. McBreen, P. Connell, S. Deluitt, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L299 (2003a).
28. фон Кинлин и др. (A. von Kienlin, N. Arend, G.G. Lichti, A.W. Strong, and P. Connell), *Proc. SPIE "X-ray and Gamma-Ray Telescopes and Instruments for Astronomy"* (Eds. J.E. Truemper and H.D. Tananbaum) **4851**, 1336 (2003b).
29. Конатон и др. (V. Connaughton, E. Burns, A. Goldstein, L. Blackburn, M.S. Briggs, B.-B. Zhang, J. Camp, N. Christensen, et al.), *Astrophys. J.* **826**, L6 (2016).
30. Коултер и др. (D.A. Coulter, C.D. Kilpatrick, M.R. Siebert, R.J. Foley, B.J. Shappee, M.R. Drout, J.S. Simon, A.L. Piro, et al.), *GCN Circ.* **21529**, 1 (2017).
31. Коухлин и др. (M.W. Coughlin, T. Ahumada, S. Anand, K. Shreya, K. De, M.J. Hankins, M.M. Kasliwal, L.P. Singer, et al.), *Astrophys. J.* **885**, L19 (2019).
32. Кошут и др. (T.M. Koshut, W.S. Paciasas, C. Kouvelioutou, J. van Paradijs, G.N. Pendleton, G. J. Fishman, and C.A. Meegan), *Astrophys. J.* **463**, 570 (1996).
33. Курвазье и др. (T.J.-L. Courvoisier, R. Walter, V. Beckmann, A.J. Dean, P. Dubath, R. Hudec, P. Kretschmar, S. Mereghetti, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L53 (2003).
34. Лебран и др. (F. Lebrun, J.P. Leray, P. Lavocat, J. Crétonne, M. Arqués, C. Blondel, C. Bonnin, A. Bouère, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L141 (2003).
35. Левинсон, Эйхлер (A. Levinson and D. Eichler), *Astrophys. J.* **629**, L13 (2005).
36. Мартин-Карилло и др. (A. Martin-Carillo, V. Savchenko, C. Ferrigno, J. Rodi, A. Coleiro, S. Mereghetti), *GCN Circ.* **24169**, 1 (2019).
37. Мерегетти и др. (S. Mereghetti, D. Götz, J. Borkowski, R. Walter, and H. Pedersen), *Astron. Astrophys.* **411**, L291 (2003).
38. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Письма в Астрон. журн. **43**, 1 (2017) [P.Yu. Minaev and A.S. Pozanenko, *Astron. Lett.* **43**, 1 (2017)].
39. Минаев П.Ю., Гребенев С.А., Позаненко А.С., Мольков С.В., Фредерикс Д.Д., Голенецкий С.В., Письма в Астрон. журн. **38**, 687 (2012) [P.Yu. Minaev et al. *Astron. Lett.* **38**, 613 (2012)].
40. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Мольков С.В., Гребенев С.А., Письма в Астрон. журн. **40**, 271 (2014) [P.Yu. Minaev et al., *Astron. Lett.* **40**, 235 (2014)].
41. Минаев и др. (P. Minaev, A. Pozanenko, S. Grebenev, and I. Chelovekov), *GCN Circ.* **24170**, 1 (2019a).
42. Минаев и др. (P.Yu. Minaev and A.S. Pozanenko), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, in press (2019b).
43. Орли (K. Hurley), Компилятивный (сводный) каталог гамма-всплесков разных миссий www.ssl.berkeley.edu/ipn3/masterli.txt (2010).
44. Пачинский (B. Paczynski), *Acta Astron.* **41** 257 (1991).
45. Позаненко и др. (A.S. Pozanenko, M.V. Barkov, P.Yu. Minaev, A.A. Volnova, E.D. Mazaeva, A.S. Moskvitin, M.A. Krugov, V. A. Samodurov, V.M. Loznikov, and M. Lyutikov), *Astrophys. J.* **852**, L30 (2018).
46. Постнов К.А., Куранов А.Г., Симкин И.В., Письма в Астрон. журн. **45**, в печати (2019) [K.A. Postnov, et al., *Astron. Lett.* **45**, in press (2019)].
47. Райд и др. (F. Ryde, L. Borgonovo, S. Larsson, N. Lund, A. von Kienlin, and G. Lichti), *Astron. Astrophys.* **411**, L331 (2003).
48. Рай и др. (A. Rau, A. von Kienlin, K. Hurley, and G.G. Lichti), *ESA SP* **552**, 607 (2004).
49. Рай и др. (A. Rau, A. von Kienlin, K. Hurley, and G.G. Lichti), *Astron. Astrophys.* **438**, 1180 (2005).
50. Рок и др. (J.P. Roques, S. Schanne, A. von Kienlin, J. Knödseder, R. Briet, L. Bouchet, Ph. Paul, S. Boggs, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L91 (2003).
51. Савченко и др. (V. Savchenko, A. Neronov, and T.J.-L. Courvoisier), *Astron. Astrophys.* **541**, A122 (2012).
52. Савченко и др. (V. Savchenko, C. Ferrigno, S. Mereghetti, L. Natalucci, A. Bazzano, E. Bozzo, S. Brandt, T.J.-L. Courvoisier, et al.), *Astrophys. J.* **820**, L36 (2016).
53. Савченко и др. (V. Savchenko, A. Bazzano, E. Bozzo, S. Brandt, J. Chenevez, T.J.-L. Courvoisier, R. Diehl, C. Ferrigno, et al.), *Astron. Astrophys.* **603**, A46 (2017a).
54. Савченко и др. (V. Savchenko, C. Ferrigno, E. Bozzo, A. Bazzano, S. Brandt, J. Chenevez, T.J.-L. Courvoisier, R. Diehl, et al.), *Astrophys. J.* **846**, L23 (2017b).
55. Савченко и др. (V. Savchenko, C. Ferrigno, E. Kuulkers, A. Bazzano, E. Bozzo, S. Brandt, J. Chenevez, T.J.-L. Courvoisier, et al.), *Astrophys. J.* **848**, L15 (2017b).
56. Савченко и др. (V. Savchenko, C. Ferrigno, E. Bozzo, E. Kuulkers, C. Sanchez, S. Mereghetti, J. Rodi, A. Bazzano, et al.), *GCN Circ.* **23517** (2018).
57. Савченко и др. (V. Savchenko, C. Ferrigno, A. Martin-Carillo, J. Rodi, A. Coleiro, and S. Mereghetti), *GCN Circ.* **24178**, 1 (2019).
58. Сакамото и др. (T. Sakamoto, S.D. Barthelmy, A.Y. Lien, D.M. Palmer, A.A. Breeveld, A.P. Beardmore, D.N. Burrows, S. Campana, et al.), *GCN Circ.* **24184**, 1 (2019).
59. Свинкин и др. (D. Svinikin, S. Golenetskii, R. Aptekar, D. Frederiks, M. Ulanov, A. Tsvetkova, A. Lysenko, A. Kozlova, and T. Cline), *GCN Circ.* **24417**, 1 (2019).
60. Сонг и др. (H.-R. Song, S.-K. Ai, M.-H. Wang, N. Xing, H. Gao, and B. Zhang), *Astrophys. J.* **881**, L40 (2019).
61. Троя и др. (E. Troja, L. Piro, H. van Eerten, R.T. Wollaeger, M. Im, O.D. Fox, N.R. Butler, S.B. Cenko, et al.), *Nature* **551**, 71 (2017).
62. Троя и др. (E. Troja, L. Piro, G. Ryan, H. van Eerten, R. Ricci, M. H. Wieringa, S. Lotti, T. Sakamoto, S. B. Cenko), *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **478**, L18 (2018).

63. Убертини и др. (P. Ubertini, F. Lebrun, G. Di Cocco, A. Bazzano, A.J. Bird, K. Broenstad, A. Goldwurm, G. La Rosa, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L131 (2003).
64. Флетчер (C. Fletcher), *GCN Circ.* **24185**, 1 (2019).
65. Фоли и др. (S. Foley, S. McGlynn, L. Hanlon, S. McBreen, and B. McBreen), *Astron. Astrophys.* **484**, 143 (2008).
66. Фоли и др. (S. Foley, S. McGlynn, L. Hanlon, S. McBreen, and B. McBreen), *Sixth Huntsville Symposium "Gamma-Ray Bursts"*, *AIP Conf. Proc.* **1133**, 362 (2009).
67. Хиао и др. (S. Xiao, Q. Luo, C. Cai, Q.B. Yi, C.K. Li, X.B. Li, G. Li, J.Y. Liao, et al.), *GCN Circ.* **24213**, 1 (2019).
68. Хусейнзаде и др. (G. Hosseinzadeh, P.S. Cowperthwaite, S. Gomez, V.A. Villar, M. Nicholl, R. Margutti, E. Berger, R. Chornock, et al.), *Astrophys. J.* **880**, L4 (2019).
69. Человеков и др. (I. Chelovekov, A. Pozanenko, P. Minaev, and S. Grebenev), *GCN Circ.* **24181**, 1 (2019a).
70. Человеков И.В., Гребенев С.А., Позаненко А.С., Минаев П.Ю., *Письма в Астрон. журн.* **45**, 683 (2019б) [I.V. Chelovekov et al., *Astron. Lett.* **45**, 635 (2019б)].
71. Чен, Белобородов (W.X. Chen and A.M. Beloborodov), *Astrophys. J.* **657**, 383 (2007).
72. Шугизаки и др. (M. Sugizaki, N. Kawai, H. Negoro, M. Serino, S. Sugita, M. Nakajima, W. Maruyama, M. Aoki, et al.), *GCN Circ.* **24177**, 1 (2019).
73. Эванс и др. (P.A. Evans, S.B. Cenko, J.A. Kennea, S.W.K. Emery, N.P.M. Kuin, O. Korobkin, R.T. Wollaeger, C.L. Fryer, et al.), *Science* **358**, 1565 (2017).
74. Эйсмонт и др. (N.A. Eismont, A.V. Ditrikh, G. Janin, V.K. Karrask, K. Clausen, A.I. Medvedchikov, S.V. Kulik, N.A. Vtorushin, and N.I. Yakushin), *Astron. Astrophys.* **411**, L37 (2003).
75. Эйхлер, Левинсон (D. Eichler and A. Levinson), *Astrophys. J.* **614**, L13 (2004).