

ПОИСК АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ТРАНЗИЕНТОВ НА ПРЕДЕЛЬНЫХ ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБАХ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИИ INTEGRAL

© 2024 г. Г. Ю. Мозгунов¹, А. С. Позаненко^{1,2*}, П. Ю. Минаев¹, И. В. Человеков¹, С. А. Гребенев¹,
А. Г. Демин³, А. В. Ридная³, Д. С. Свинкин³, Ю. Р. Темираев⁴, Д. Д. Фредерикс³

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²НИУ “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

³Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

⁴ГК “Глоубайт”, Москва, Россия

Поступила в редакцию 12.12.2024 г.

После доработки 20.12.2024 г.; принята к публикации 20.12.2024 г.

Проведен поиск сверхдлинных ($\gtrsim 100$ с) гамма-транзиентов в данных антисовпадетельной защиты ACS гамма-спектрометра SPI орбитальной обсерватории INTEGRAL и их классификация методами машинного обучения. Методом “слепого” порогового поиска в данных SPI-ACS найдено около 4364 кандидатов в такие события. Разработан алгоритм автоматической обработки их кривых блеска, выделяющий кандидат в транзиенты на разных временных шкалах и позволяющий определять его длительность и интегральный поток излучения. Алгоритм применен для вычисления (и сравнения) потоков в кривых блеска, зарегистрированных разными детекторами обсерватории: IREM, SPI-ACS, SPI, ISGRI, PICsIT. Полученные значения потоков использовались для обучения классификатора, основанного на градиентном бустинге. Затем был проведен кластерный анализ найденных кандидатов с помощью методов снижения размерности и кластеризации. В заключение выполнено сравнение оставшихся кандидатов с данными гамма-детекторов Konus-WIND. Таким образом, удалось подтвердить 16 кандидатов в транзиенты астрофизической природы, в том числе, 4 кандидата в сверхдлинные гамма-всплески из событий, обнаруженных детектором SPI-ACS. Из вероятных, но не подтвержденных другими экспериментами событий, к реальным гамма-всплескам можно отнести до 270 событий.

Ключевые слова: гамма-транзиенты, космические гамма-всплески, солнечные вспышки, геофизические события, продленное излучение, методы машинного обучения, градиентный бустинг, кластеризация.

DOI: 10.31857/S0320010824120041, EDN: LGAXMK

1. ВВЕДЕНИЕ

Достоверно известно о существовании двух типов космических гамма-всплесков. Первый тип связан с коллапсом ядер массивных звезд, что подтверждается многочисленными наблюдениями сверхновых типа Ic (см., например, Вусли, 1993; Пачинский, 1998; Галама и др., 1998; Кано и др., 2017; Вольнова и др., 2017; Белкин и др., 2020, 2024), ассоциированных с длинными гамма-всплесками. Второй тип (коротких всплесков) был предсказан от слияния системы двух нейтронных звезд (Блинников и др., 1984; Пачинский, 1986) и подтвержден регистрацией GRB 170817 и килоновой (Эббот и др., 2017а; Позаненко и др., 2018) от гравитационно-волнового события GW 170817, вызванного слиянием нейтронных звезд (Эббот и др., 2017б), а также регистрацией, к сожалению, только в гамма-диапазоне GRB 190425A (Позаненко и др., 2019), вызванного вторым в истории зарегистрированным гравитационно-волновым

событием GW 190425 (Эббот и др., 2020) из-за слиянием нейтронных звезд.

Впервые наличие двух популяций было предположено при исследовании распределения длительностей гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте “Конус” (Мазец и др., 1981). Затем это предположение было подтверждено исследованием бимодальности распределения гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте BATSE/CGRO, по параметру длительности T_{90} (Кувелиоту и др., 1993). Последующие исследования (см., например, Тарнопольски, 2016) показали, что это распределение наилучшим образом аппроксимируется суммой логарифмически нормального (короткие всплески, соответствующие слиянию двойных нейтронных звезд) и “скошенного” логарифмически нормального распределения (длинные всплески).

Асимметричность распределения подвыборки длинных всплесков может быть связана с различными селективными эффектами (см., например, Минаев, Позаненко, 2020). Длительность событий может быть искажена, например, вследствие затме-

*Электронный адрес: apozanen@iki.rssi.ru

ния источника Землей или нестабильного уровня фона в случае низкоорбитальных спутников, таких как Swift и Fermi, а также из-за ограничений по объему записи данных в телеметрию космических обсерваторий (например, Konus-WIND). Масштаб переменности фонового сигнала на околоземных обсерваториях (Fermi и Swift) может быть сравним с длительностью самих гамма-всплесков с учетом длительности их продленного излучения (Мозгунов и др., 2021). Также могут возникнуть сложности при регистрации (срабатывании автоматической системы) длительных тусклых событий (при этом их интегральный поток может даже превышать поток от типичных событий) — триггерные алгоритмы большинства экспериментов настроены на поиск достаточно коротких значимых превышений измеряемого потока над фоновым сигналом. Например, система IBAS, анализирующая в автоматическом режиме данные детекторов IBIS/ISGRI и SPI-ACS на борту обсерватории INTEGRAL, работает на масштабах времени лишь до 5 с (Мерегетти и др., 2003). Известны случаи, когда система IBAS оставляла незамеченными даже гамма-всплески умеренной длительности (Гребенев, Человеков, 2007; Минаев и др., 2012; Человеков и др. 2019). Длительность импульсов, составляющих кривую блеска гамма-всплеска, увеличивается с уменьшением нижней границы энергетического диапазона, в котором происходит регистрация (Фенимор и др., 1995). Соответственно и длительность всего гамма-всплеска зависит аналогичным образом от границы энергетического диапазона. Перечисленные особенности и искажения составляют лишь неполный список причин, приводящих к селективным эффектам при определении длительности и просчете длительных тусклых событий.

С другой стороны, существует много физических моделей, предсказывающих существование гамма-всплесков большой длительности (более 1000 с). Среди возможных прародителей таких всплесков — звезды населения POP-III, сверхмассивные голубые гиганты с низкой металличностью, вероятно, образовавшиеся в ранней Вселенной (см., например, Жендр и др., 2013; Жендр, 2014). Благодаря огромной массе звезды-прародителя, при коллапсе ее ядра может образоваться массивный аккреционный диск, способный обеспечить длительную работу “центральной машины” гамма-всплеска за счет аккреции на черную дыру. Если такие сверхмассивные первичные звезды еще и быстро вращались, возможно образование в конце их жизни сверхколлапсаров с мощными магнитодоминированными джетами, проявляющими себя в сверхдлинных жестких рентгеновских всплесках (Комиссаров, Барков, 2010; Барков, 2010). Важно, что в системе отсчета наблюдателя, находящегося на Земле, кривые блеска таких всплесков будут дополнительно заметно растянуты по времени из-за большого космологического красного смещения z , характерного для

такого класса объектов. Этот же релятивистский эффект будет приводить к смягчению спектров гамма-всплесков относительно их истинной жесткости. Наблюдение сверхдлинных гамма-всплесков может быть связано с геометрическими эффектами — чем больше угол между осью релятивистского джета “центральной машины” гамма-всплеска и направлением на наблюдателя, тем больше будет длительность гамма-всплеска для наблюдателя (см., например, Янка и др., 2006). Продленное излучение, объясняющееся дополнительным выделением энергии протомагнитаром (Мецгер и др., 2011), образовавшимся в результате коллапса, также может быть причиной атипично большой длительности всплеска. В обычных условиях эта модель объясняет длительности ~ 10 – 100 с, однако при особых значениях магнитного поля и периода вращения магнитара длительность может достигать $\sim 25\,000$ с (Далоссо и др., 2011; Жендр и др., 2013).

Одним из способов найти недостающие тусклые события большой длительности является “слепой” поиск транзиентов с использованием специальной системы срабатывания триггера, настроенного на поиск небольших превышений сигнала над фоном на больших временных масштабах. Подобные работы по поиску астрофизических транзиентов, но на более коротких масштабах времени проводились, например, по данным детекторов ISGRI (Человеков и др., 2006, 2019; Человеков, Гребенев, 2011), JEM-X (Человеков и др., 2017), SPI-ACS (Pay и др., 2005, Савченко и др., 2012), SPI (Минаев и др., 2014), PICsIT (Роди и др., 2018), размещенных на борту обсерватории INTEGRAL. Поиски могут быть выполнены статистическими методами, например, методом скользящего среднего (Савченко и др., 2012) или с использованием Байесовых блоков (Скаргл и др., 2013). Бильцингером и др. (2020) была продемонстрирована возможность использования физического моделирования фона вместо чисто аналитического его описания, что способно улучшить точность вычитания фона при выделении полезного сигнала. Новейшие методы подразумевают использование нейронных сетей, требующих однако большой объем качественных данных для обучения (см., например, Крупин и др., 2023; Садах, 2019; Пармиджани и др., 2023). Моделирование фона для поиска событий обычно проводится аналитическими методами — аппроксимацией полиномами разной степени. В случае околоземных аппаратов, в зависимости от положения на орбите, могут быть использованы полиномы 4–5 степени (Архангельская, Архангельский, 2016), в то время как для детектора SPI-ACS обсерватории INTEGRAL на небольших масштабах времени подходит линейная аппроксимация (Минаев и др., 2010; Бисноватый-Коган и др. 2011). Классификация найденных событий производится либо методом кросс-идентификации с данными других экспериментов, сравнения спектрально-временных свойств события

с характерными для различных транзиентов значениями, а также с помощью локализации источника на небе (в случае использования телескопов с кодирующей апертурой). Новейшие методы предлагают классификацию методом машинного обучения, в частности, алгоритмами случайного леса (Ло и др., 2014; Фаррел и др., 2015; Янг и др., 2022) или нейронных сетей (Садех, 2019). Обзор результатов исследований и теоретических моделей космических гамма-всплесков посвящено много работ (см., в частности, Леван, 2018; Позаненко и др., 2021).

В настоящей работе мы проводим “слепой” поиск сверхдолгих транзиентов в данных детектора SPI-ACS. Используется синергия методов статистического моделирования (для поиска и обработки гамма-транзиентов) и машинного обучения (для исследования полученных результатов и классификации обнаруженных транзиентов).

2. ИНСТРУМЕНТЫ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

2.1. Обсерватория INTEGRAL

Спутник INTEGRAL был выведен на высокоэллиптическую орбиту с начальным периодом обращения 72 часа и апогеем ~153 тыс. км. Такая орбита обеспечивает стабильность фона на длительных временных интервалах по сравнению с аппаратами на околоземных орбитах. Более 90% времени спутник находится вне радиационных поясов Земли в области слабого магнитного поля. Это ведет к тому, что аппарат подвергается постоянному воздействию солнечных и галактических космических лучей, которые вносят существенный вклад в регистрируемый сигнал. Из-за этого среднее значение фона возрастает, однако улучшается его стабильность. Высокоапогейная орбита (72 часа, а после 2015 г. — 68 часов) позволяет отслеживать эволюцию фона при прохождении радиационных поясов Земли, но также изучать крупномасштабное поведение фона на масштабах свыше 3-х суток.

Основным прибором, используемым в настоящей работе является SPI-ACS. Он представляет собой антисовпадательную защиту охлаждаемого германиевого гамма-спектрометра SPI и является самым массивным детектором, способным регистрировать гамма-всплески, из работавших в космосе за всю историю наблюдений. В качестве детекторов используется 91 сцинтиллятор BGO (германата висмута). С каждым кристаллом BGO сопряжено два фотоумножителя (ФЭУ), отсчеты со всех ФЭУ регистрируются в едином энергетическом канале. Нижний порог канала составляет ~80 кэВ; верхний порог ~10 МэВ. Эксперимент SPI-ACS может регистрировать фотоны со всех направлений, но наименее чувствительным является направление, совпадающее с осью основных телескопов обсерватории (в границах поля зрения телескопа SPI, радиусом 16°). Временное разрешение де-

тектора SPI-ACS составляет 50 мс (фон Киенлин и др., 2003).

Сцинтилляционные детекторы способны регистрировать заряженные частицы так же эффективно, как и фотоны. Детектирование происходит в результате комбинации электрона, выбитого из одного из атома кристалла. Первичное выбивание электрона может быть вызвано как фотоном, так и частицей. Рау и др. (2005) показали, что большая часть коротких пиков (<0.25 мс) в записи скорости счета SPI-ACS происходит от высокоэнергичных космических лучей.

Помимо SPI-ACS на борту обсерватории находятся и другие приборы. Один из них — детектор высокоэнергичных заряженных частиц IREM. Основная его задача — контроль радиационной обстановки для своевременной защиты электроники научных приборов от сильных потоков заряженных частиц. Он состоит из трех полупроводниковых кремниевых детекторов, каждый толщиной 0.5 мм, два — площадью 25 мм² и один — 50 мм². Временное разрешение составляет 60 с. Поток распределяется по 15 каналам, отличающимся энергетическими диапазонами и кривыми отклика. В настоящей работе используются данные канала TC3, так как он имеет самый широкий охват по энергиям (нижний порог для электронов 0.8 МэВ, для протонов 10 МэВ). Телескопы JEM-X (Лунд и др., 1999), SPI (Ведренн и др., 2003), IBIS/ISGRI (Лебран и др., 2003; Лабанти и др., 2003; Квадрини и др., 2003) и IBIS/PICsIT (Ди Кокко и др., 2003), различающиеся по ширине поля зрения и энергетическому диапазону: от стандартного рентгеновского у JEM-X до мягкого гамма — у SPI и IBIS/PICsIT, вместе могут дать широкое представление о транзиенте, попавшем в их поле зрения: энергетический спектр, временная структура и происхождение (частицы или излучение).

2.2. Моделирование фона на различных масштабах времени

Перед началом поиска транзиентов в архивных данных необходимо определить максимальные доступные временные масштабы. Под этим мы понимаем такую длительность интервала, во время которого наблюдалось транзиентное событие + фон, когда фон невозможно описать полиномиальными моделями. С помощью каталога Кевина Орли¹ и результатов Мозгунова и др. (2021) можно выделить интервалы, во время которых не было зарегистрировано никаких транзиентов. Эти интервалы используются для вычисления функционала χ^2 для разных временных масштабов.

Процедура вычисления состоит в следующих шагах:

1. Выбирается фоновый интервал длительностью 0.5 с. Минимальное временное разрешение детектора SPI-ACS равно 50 мс, следовательно, ин-

¹ www.ssl.berkeley.edu/ipn3/masterli.txt

тервал в исходном временном разрешении содержит 10 бинов.

2. Проводится аппроксимация потока внутри этого интервала четырьмя аналитическими моделями: константной, линейной, полиномами 3-й и 5-й степеней.
3. Вычисляется значение функционала χ^2 . В качестве ошибок на уровне одного стандартного отклонения используется значение $(F \times k)^{1/2}$, где F — поток в данном бине, а k — коэффициент “надпуассоновости” для данного интервала. Он вычисляется как отношение дисперсии к среднему значению фона.
4. Интервал аппроксимации расширяется в 2 раза и группируется так, чтобы конечное число бинов было равно 10. Это необходимо для сравнения между собой нормированных на степень свободы значений функционалов $\chi^2/\text{d.o.f.}$, так как в этом случае распределения будут иметь одинаковое число степеней свободы. Так как количество точек всегда равно 10, то количество степеней свободы составляет 9, 8, 6 и 4 для разных моделей соответственно.
5. Шаги 2–4 повторяются до тех пор, пока фоновый интервал не превысит длительность 60 000 с.

Шаги 1–5 повторяются для ~180 случайно выбранных орбит, во время которых не наблюдалось ярких транзитов. После этого диапазон интервалов по длительности от 0.5 с до 6×10^4 с разбивается на 20 групп, расположенных равномерно в логарифмическом пространстве. В каждой группе строится

распределение значений χ^2 , которое аппроксимируется нормальным распределением. В качестве значения χ^2 , присущего данной группе, используется величина, соответствующая максимуму в аппроксимации нормальным распределением, а ошибка взята как полуширина на полувысоте (1/2 от FWHM). После этого сгруппированные значения аппроксимируются степенной функцией с изломом

$$F(D) = A \times \left[\left(\frac{D}{D_c} \right)^{\alpha \cdot w} + \left(\frac{D}{D_c} \right)^{\beta \cdot w} \right]^{-1/w}, \quad (1)$$

в которой параметр $w = -3/2$ фиксирован. С помощью нее определяется критическое значение длительности D_c — положение излома функции. На длительностях фонового интервала, большей чем D_c , выбранная аналитическая модель фона перестает описывать реальные данные. Результаты моделирования, группировки и аппроксимации результатов представлены на рис. 1 (для аппроксимацией константой и линейной моделью) и рис. 2 (для аппроксимацией полиномами 3 и 5 степени). Значения положений излома представлены в табл. 1.

Используя графики на рис. 2 и рис. 1 и данные табл. 1, можно установить максимальную длительность фонового интервала, аппроксимируемого простыми аналитическими моделями. Она составляет

Таблица 1. Положения излома D_c для разных моделей фона

Модель фона	D_c , с
Константа	2080 ± 230
Линейная	5940 ± 580
Полином 3-й степени	8330 ± 910
Полином 5-й степени	11530 ± 1030

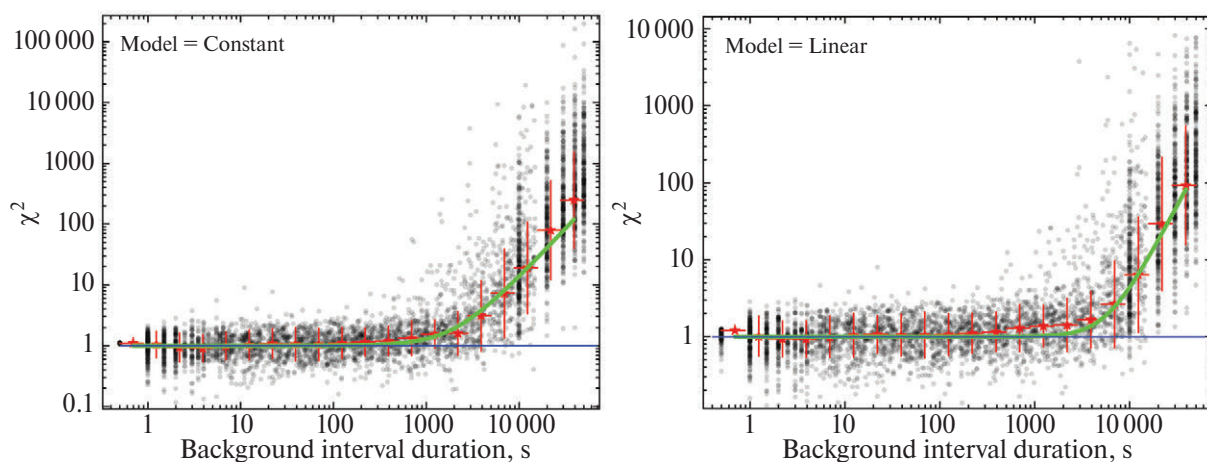


Рис. 1. Результат моделирования фона различными аналитическими моделями. Черными точками показаны результаты для отдельных интервалов, среднее и 1/2 FWHM (полуширина на полувысоте) для распределения точек, лежащих внутри соответствующего диапазона длительности. Синей линией обозначен уровень $\chi^2 = 1$, зеленой — аппроксимация красных точек функцией (1). Слева — константной, справа — линейной моделью. По горизонтальным осям — длина интервала моделирования фона, по вертикальной — соответствующее данному интервалу и модели значение функционала $\chi^2/\text{d.o.f.}$

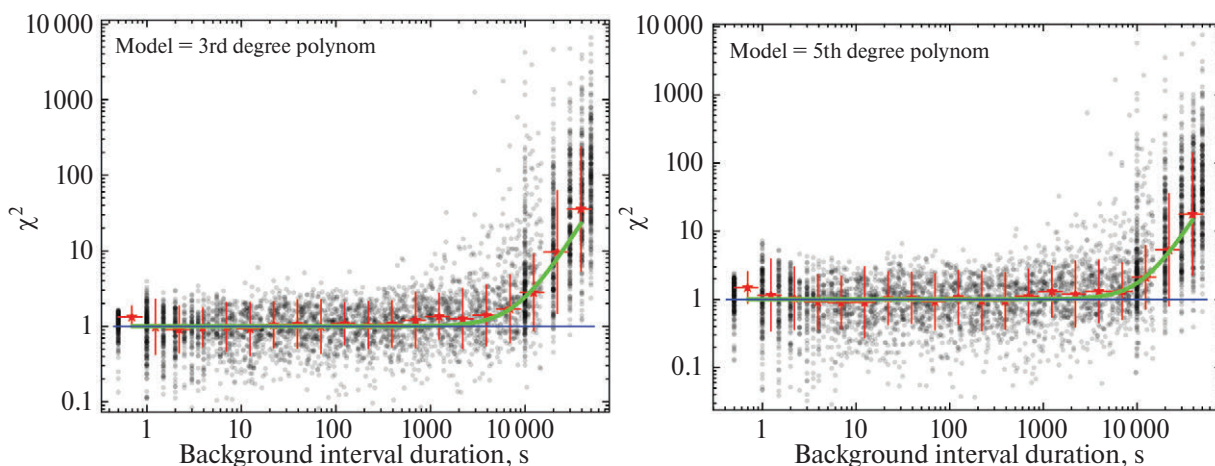


Рис. 2. Результат моделирования фона различными аналитическими моделями. Черными точками показаны результаты для отдельных интервалов, среднее и 1/2 FWHM (полуширина на полувысоте) для распределения точек, лежащих внутри соответствующего диапазона длительности. Синей линией обозначен уровень $\chi^2 = 1$, зеленой — аппроксимация красных точек функцией (1). Слева — полиномом 3-й степени, справа — полиномом 5-й степени. По горизонтальным осям — длина интервала моделирования фона, по вертикальной — соответствующее данному интервалу и модели значение функционала $\chi^2/\text{d.o.f.}$

$\sim 10^4$ с. Очевидно, что максимальная длительность события при таком поиске будет $\lesssim 10^4$ с.

2.3. Поиск сверхдлинных астрофизических транзиентов

Были выбраны три основных рабочих масштаба поиска — 1000, 300 и 120 с. Данные SPI-ACS за ~ 20 лет наблюдений формируются в трех кривых блеска, соответствующих этим временным разрешениям. На основании результатов рис. 2 и рис. 1 и данных табл. 1 были выбраны подходящая модель фона для заданного временного разрешения, а также длительность интервала. Максимальный размер анализируемого интервала не превосходил 9000 с. Пороги значимости были подобраны таким образом, чтобы количество срабатываний на всех временных масштабах было примерно одинаковым. Для каждого временного разрешения проводилась обработка “скользящим окном” по следующей процедуре:

1. **Выделение интервала данных.** Из кривой блеска выделяется интервал из N последовательных бинов, на котором будет проводиться аналитическое моделирование фона и поиск события. Очень важно, чтобы в данных не было “провалов”. Они могут возникнуть из-за того, что детектор SPI-ACS может временно не передавать данные, например, из-за проблем с телеметрией. Если разность между двумя последовательными бинами больше, чем ожидаемое значение (временное разрешение), то мы считаем, что это провал в данных, и если он обнаруживается внутри текущего окна, то оно пропускается, а алгоритм переходит к следующему окну.

Значение N меняется в зависимости от выбранного временного разрешения, соответствие меж-

ду ними приведено в табл. 2. Окно разбивается на два диапазона: исследуемое событие, в котором вычисляется поток и значимость над фоном. Оно находится в центральном (под номером $N/2 + 1$) бине.

2. **Аналитическое моделирование фона.** Модель фона выбирается согласно табл. 2. Для временной шкалы 1000 с используется линейная модель фона. При этом итоговая длительность интервала D составляет 9000 с, что больше D_c для выбранной модели. Данный выбор обусловлен малым количеством фоновых точек (8). При использовании более сложной модели сокращается число степеней свободы. Из-за этого значение $\chi^2/\text{d.o.f.}$ модели, рассчитанное на фоновых интервалах, сокращается, однако возрастает систематическая ошибка, привнесенная выбором модели.
3. **Анализ качества аппроксимации.** На фоновом интервале вычисляется значение функционала $\chi^2/\text{d.o.f.}$ Ошибки потока (скорости счета) вычисляются как $(B \times k)^{1/2}$, где F — поток в бине, а k — значение коэффициента “надпуассоновости”, определенное для исследованного интервала. Данное значение сравнивается с нормальным для данной длительности интервала согласно рис. 1 и рис. 2. Если значение функционала находится вне области $\pm 1\sigma$ в соответствующей группе длительностей, то аппроксимация признается неудачной, и текущее окно исключается из дальнейшего рассмотрения.
4. **Вычисление потока.** Наилучшая модель фона вычитается из исходных данных. Поток (скорость счета) в событии F является потоком в центральном бине. Его значимость вычисляется как

Таблица 2. Параметры “скользящего окна” в зависимости от временного разрешения

Временное разрешение, с	Количество бинов N	Длительность окна, с	Модель фона	Порог значимости, σ_T
1000	9	9000	Линейная	3
300	29	8700	Полином 3-й степени	5
120	29	3480	Полином 3-й степени	7

$\sigma = F/(B_{\text{model}} \times k)^{1/2}$. Если $\sigma < \sigma_T$ для данного временного разрешения, то событие исключается из дальнейшего рассмотрения.

После выполнения шагов 1–4 временное окно сдвигается на 1 бин вперед по временной оси, и процедура повторяется. Таким образом, исследуется вся кривая блеска за ~ 20 лет. Временем события T_0 обозначается время, соответствующее центральному бину в “скользящем окне”. В итоге найдено 4364 превышений скорости счета над фоном.

2.4. Исследование потенциальных кандидатов на меньших временных масштабах

После формирования списка потенциальных кандидатов на шкалах 1000, 300 и 120 с следует процедура их анализа: получение кривой блеска с большим временным разрешением, построение более точной модели фона, определение длительности и потоков. Для этого используются данные детектора SPI-ACS в интервалах ± 6000 , ± 2000 и ± 600 с относительно момента T_0 для событий, найденных на шкалах 1000, 300 и 120 с соответственно.

Процесс обработки является рекурсивным. Он начинается от максимально большого временного разрешения и постепенно уменьшает его до достижения критерия остановки: либо длительность определена с достаточной точностью, либо достигнуто предельное временное разрешение 3 с. Начальное временное разрешение зависит от того, на какой шкале был найден транзиент, например, для события найденного на 1000-секундном масштабе оно составляет 200 с, а для 120-секундном — 20 с. На каждом шаге рекурсии проводится аппроксимация фона полиномом 3-й степени с учетом результатов с предыдущего шага для повышения точности. Блок-схема процесса показана на рис. 3. Более подробно алгоритм описан Мозгуновым и др. (2024).

В результате для каждого события определено время начала события и его длительность, вычислены потоки во всех приборах обсерватории INTEGRAL после вычета фона, а также значение функционала χ^2 для модели фона в каждом приборе.

2.5. Кросс-идентификация

Кросс-идентификация полученного списка событий с каталогами известных транзиентов использовалась с двойной целью: отсеять подтвержденные события и получить разметку для обучения моделей

машинного обучения. В качестве каталога сравнения использовалась компиляция из каталогов гамма-всплесков, солнечных вспышек, а также каталоги триггеров гамма-событий: Konus-WIND waiting-mode events² и Konus-WIND triggered events³, IBAS SPI-ACS bursts⁴, Swift/BAT bursts⁵, Fermi GBM Burst Catalog⁶ и Fermi GBM Trigger Catalog⁷, “мастерлист” Кевина Орли⁸, RHESSI Flare List⁹ и GOES flare list¹⁰.

Konus-WIND ведет практически непрерывный обзор всего неба на протяжении более 30 лет, что полностью охватывает время работы обсерватории INTEGRAL. В режиме ожидания (waiting mode) Konus-WIND ведет непрерывную запись скоростей счета двух детекторов (S1, осматривающего южную эклиптическую полусферу, и S2 — северную) в трех энергетических диапазонах с границами ~ 20 –80 кэВ, ~ 80 –350 кэВ и ~ 350 –1400 кэВ, временное разрешение записи составляет 2.944 с. С учетом пропусков в данных непрерывная запись охватывает более $\sim 95\%$ времени. Благодаря стабильному фону на масштабах до нескольких дней (в основном вне периодов повышенной солнечной активности) данные Konus-WIND позволяют обнаруживать транзиенты с пиковыми потоками $\gtrsim 4 \times 10^{-7}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ (Ридная и др., 2020). Поиск транзиентных событий в непрерывной записи Konus-WIND выполнялся с использованием разложения на Байесовы блоки (Козлова и др., 2019). В результате поиска были обнаружены гамма-всплески, галактические транзиенты и солнечные вспышки, в том числе пропущенные триггерным алгоритмом детекторов Konus-WIND, давшие превышение над фоном более 4 σ .

Кросс-идентификация выполняется средствами пакета pygrb_lc¹¹, написанного на языке программирования Python. Алгоритм устроен следующим образом: для исследуемого кандидата с временем начала события T_0 и длительностью D вычисляется ближайшее к нему событие из каталога сравнения. Между временем из каталога и T_0 вычисляется

²www.ioffe.ru/LEA/kw/wm/

³www.ioffe.ru/LEA/kw/triggers/

⁴www.isdc.unige.ch/integral/science/grb#ACS

⁵swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb_table/

⁶heasarc.gsfc.nasa.gov/w3browse/fermi/fermigbrst.html

⁷heasarc.gsfc.nasa.gov/w3browse/fermi/fermigtrig.html

⁸www.ssl.berkeley.edu/ipn3/masterli.txt

⁹hesperia.gsfc.nasa.gov/hessidata/dbase/hessi_flare_list.txt

¹⁰ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/

¹¹pypi.org/project/pygrb-lc/

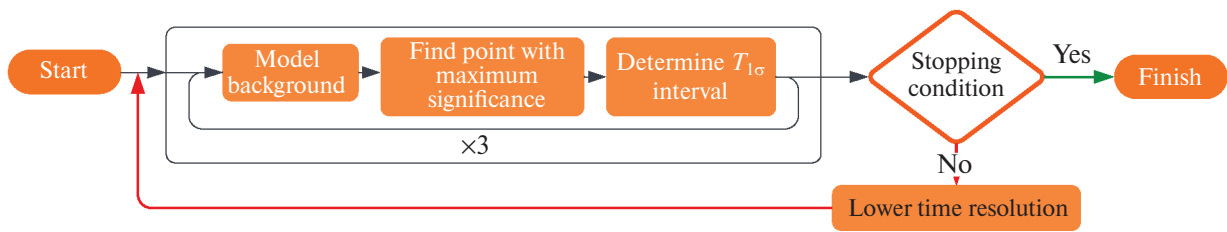


Рис. 3. Блок-схема, описывающая процедуру обработки транзиента.

разница в секундах, и если оно принадлежит интервалу $[-D; D]$, то события считаются совпавшими.

Кандидаты размечены на 4 группы:

1. Солнечные вспышки — кандидат найден в каталоге GOES или RHESSI или в каком-либо другом каталоге, но помечен как солнечное событие.
2. Гамма-всплески — кандидат найден в каталоге гамма-всплесков.
3. Фоновое (геофизическое) событие — значение функционала $\chi^2/\text{d.o.f.}$ при обработке на наименьшем временном масштабе выше номинальных значений (см. рис. 2).
4. Другие — кандидат найден в каталоге, но не классифицирован как гамма-всплеск или солнечная вспышка (например, вспышка источника повторных мягких гамма-всплесков SGR).

В некоторых случаях, когда транзиент был найден в каталогах солнечных вспышек и гамма-всплесков, возникало расхождение между каталогами RHESSI или GOES и всеми остальными. Для таких случаев мы внедрили систему приоритетов: $2 > 1 > 4 > 3$, обосновывая это тем, что энергетические диапазоны GOES и RHESSI заметно отличаются от рабочего диапазона детектора SPI-ACS, поэтому нахождение транзиента

в этих каталогах могло быть случайным совпадением. Также значение функционала χ^2 учитывалось нами в последнюю очередь после сравнения со всеми остальными каталогами и правилами. В самом деле, достоверно определить параметры события можно и при нестабильном фоне, в этом случае мы лишь занижаем значимость результата; гораздо сложнее получить информацию о типе события. Стоит отметить, что мы не обладаем достоверной идентификацией фоновых событий, поэтому правило 3 не гарантирует принадлежность к этому классу, а лишь отражает повышенную вероятность такого исхода. В подразделе 3.2 отдельно объясняется, насколько такой подход действительно эффективен для выполнения классификации событий.

Описанный алгоритм повторялся для всех событий и для каждого из каталогов. Из 4364 потенциальных кандидатов 1935 событий нашлись по крайней мере в одном каталоге. Найденные события представлены в табл. 3, а также на рис. 4.

3. МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ

Отобранные события, подтвержденные данными других каталогов, были использованы в качестве обучающей выборки для моделей машинного обучения.

Таблица 3. Пример результатов работы алгоритма “слепого” поиска кандидатов в транзиенты^e

T_0 UTC	$T_{1\sigma}$ ^a , с	Инт. поток ^b , 10^3 отсч.	S/N , ^c σ	Пик. поток ^d за 1 с, отсч./с	Идентификация
2003-02-12 04:04:53.978	21.8	5.04	9.3	1598	RHESSI: Solar
2003-02-14 04:06:42.816	540	263	34.3	1915	GOES: Solar RHESSI: Solar
2003-02-14 09:52:27.816	194	101	20.8	1822	—
2003-02-15 11:15:55.816	80	622	220.0	30932	K.Hurley: GRB
2003-02-15 15:45:03.816	360	1400	233.7	9642	RHESSI: Solar

^a Длительность непрерывного интервала, в каждом бине которого значимость сигнала превышает фоновое значение более чем на 1σ (Мозгунов и др., 2024).

^b Интегральный по времени поток над уровнем фона (число отсчетов).

^c Отношение сигнала к фону для транзиента по интегральному потоку.

^d Пиковый поток на масштабе 1 с.

^e Полная версия таблицы доступна в электронном виде по ссылке grb.rssi.ru/INTEGRAL/GRB_ACS_candidates.txt

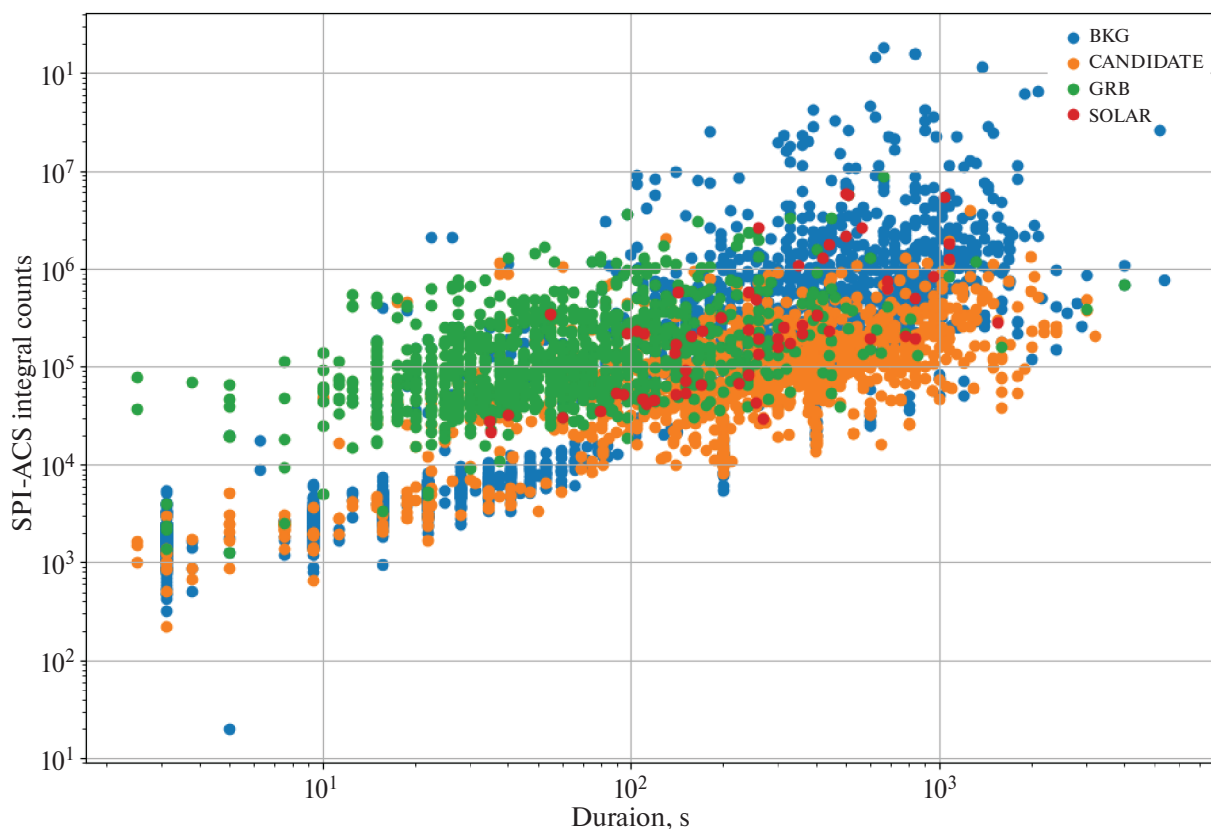


Рис. 4. Диаграмма “длительность—поток” для найденных и обработанных событий, разными цветами обозначены 4 группы событий: солнечные, фоновые, гамма-всплески и кандидаты.

3.1. Обучение модели классификации

В качестве признаков для обучения модели классификации использовались параметры событий, определенные в подразделе 2.5. К ним добавлялись масштаб времени, на котором нашли данный транзиент (1000, 300 или 120 с), минимальное временное разрешение при его обработке в подразделе 2.5, расстояние спутника INTEGRAL до Земли, полученное из телеметрии обсерватории, и форма кривой блеска. За форму кривой блеска транзиента отвечали 10 последовательных бинов внутри интервала длительности события. Метки классов получены в предыдущем разделе с помощью кросс-идентификации. Для предсказания использовались только 3 первых класса — размер выборки “Других” событий слишком мал, и их поиск не являлся прямой целью данной работы. Отметим, для обучения модели не использовались также те солнечные события, которые были идентифицированы только по каталогам GOES или RHESSI из-за несогласованности энергетических диапазонов.

Использовались несколько стандартных моделей классификации: логистическая регрессия, “случайный лес” и градиентный бустинг (Ке и др., 2017). Последняя модель показала наилучшие результаты. При обучении происходил подбор гиперпараметров

для максимизации метрики

$$F_{\beta} = (1 + \beta^2) \times \frac{\text{precision} \times \text{recall}}{(\beta^2 \times \text{precision}) + \text{recall}},$$

где β подбирается вручную в зависимости от задачи.

Значения $\beta < 1$ штрафуют точность сильнее, чем полноту, что совпадает с целями нашей работы — сделать наиболее точный алгоритм для выборки гамма-всплесков. В нашем случае выбираем $\beta = 0.5$. Подробности обучения модели описаны Мозгуновым и др. (2024). Точность и полнота на обучающей выборке составили $91 \pm 4\%$ и $73 \pm 6\%$ соответственно.

Мы применили модель на неразмеченных данных — тех кандидатах во всплески, для которых не нашлось совпадения в каталогах: модель разметила 67 из них как гамма-всплески. Стоит отметить, что неразмеченная и обучающая выборки не принадлежат одному распределению. Это подтверждает многомерный тест Колмогорова—Смирнова, проведенный на тех же параметрах, что использовались для обучения, p -value, вероятность отбросить гипотезу о выборках из одной генеральной совокупности, составляет $< 10^{-40}$. Это говорит о том, что оценка точности, полученная на обучающей выборке, может сильно отличаться для неразмеченных данных.

3.2. Кластерный анализ

Машинное обучение можно использовать не только для построения предиктивных моделей, с помощью них можно уменьшать размерность данных таким образом, чтобы схожие по свойствам параметры располагались близко друг к другу в результирующем пространстве. При этом размерность выходного пространства может быть любой, однако чаще всего выбирают размерность 2 как наиболее удобную для восприятия человеком. Один из наиболее популярных алгоритмов UMAP (Макиннес и др., 2018) использует нелинейные преобразования исходных признаков, чтобы получить отображение с наибольшей дисперсией.

В качестве признаков используются параметры событий из подраздела 3.1. С помощью алгоритма UMAP со стандартными значениями гиперпараметров получен рис. 5 (верхняя панель), по осям отмечены абстрактные единицы — нелинейная комбинация исходных параметров. Можно заметить, что все события располагаются на одной вытянутой изогнутой линии. Эта линия отражает корреляцию “длительность—поток”, ранее обнаруженную на рис. 4. На левой части линии находятся самые энергичные события, на правой — самые тусклые. Также можно увидеть, что эта линия не однородная, у нее есть утолщения и утончения, что дает возможность кластеризации. Для этого используется алгоритм HDBSCAN. Результат представлен на рис. 5 (нижняя панель). Числа, обозначающие номера кластеров, физического содержания не несут.

Для каждого кластера мы посчитали распределение по типам событий. Выделилось 2 кластера, в которых доля гамма-всплесков $>50\%$, это кластеры 2 и 4. Мы используем их для того, чтобы классифицировать неразмеченные кандидаты. Такой метод разметил 544 дополнительных события как гамма-всплески, при этом этот список на 60 событий пересекается с результатами классификатора. Отдельного кластера для солнечных вспышек не выделяется. Также нет различия между двумя кластерами гамма-всплесков ни по длительности, ни по потоку. Точность метода определяется выбором кластеров и распределением событий внутри них и на данный момент оценивается в $\sim 79\%$ на обучающей выборке.

Отметим, что кластеры 0, 1, 3, 5, 6, 7 и 8, расположенные на противоположных краях кривой, полностью доминированы фоновыми событиями. Самые яркие события (на левом краю кривой) предположительно представляют собой транзиенты, связанные с заряженными частицами: они имеют большую энергию во всех приборах спутника INTEGRAL, функционал χ^2 имеет большое значение (более 3.5) из-за того, что либо часть события попадает в интервал аппроксимации фона (из-за огромной длительности), либо несколько событий происходят внутри одного окна

(например, при пересечении радиационных поясов). Правый край представляет собой случайные срабатывания, которые выделяются не за счет аномального значения χ^2 , а за счет низкой значимости на грани порога обнаружения.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В выполненной работе:

1. Определены предельные масштабы времени, на которых можно успешно аппроксимировать фон детектора SPI-ACS разными полиномиальными функциями, наибольший масштаб $\sim 10^4$ с достигается при аппроксимации полиномами 5 степени. Зависимость максимального масштаба от степени полинома можно использовать для проверки качества аппроксимации фона. Для этого для тестового фоновых участка нужно вычислить функционал $\chi^2/\text{d.o.f.}$ и наложить его на соответствующий выбранной модели фона рисунок (рис. 1 или 2). Если значение находится в пределах диапазона для соответствующей группы длительности, значит, модель подходит для описания выбранного фоновых участка. Если нет, то стоит увеличить степень полинома или уменьшить длительность временного интервала.

2. Проведен “слепой” поиск длительных транзиентов в данных SPI-ACS. Найдены 4364 транзиента: 1325 на шкале 1000 с, 1754 на шкале 300 с и 1285 на шкале 120 с. На рис. 4 видно, что классы ранее известных событий отличаются: солнечные вспышки (либо производные от них SEPE — солнечные события выброса энергичных частиц) в среднем более длительны и более энергичны, чем гамма-всплески. Более того, четко выражена граница, ниже которой событий нет — она соответствует минимальному порогу регистрации, выбранному нами для поиска транзиентов. Поведение такой зависимости описывается законом $Fluence \sim Duration^{1/2}$. На рис. 5 солнечным событиям соответствуют кластеры 0, 1 и 3, доля фоновых событий (случайных флуктуаций) в них составляет $\gtrsim 99\%$, а гамма-всплески, попавшие в эти кластеры, скорее всего, являются случайными совпадениями с каталогами и в действительности детектором SPI-ACS не видны.

3. Подготовлены две модели машинного обучения: одна основана на классификации с понижением размерности, другая на кластеризации. С их помощью из 2429 (= 4364 – 1935) потенциальных кандидатов в транзиенты, не совпавших с событиями ни в одном из используемых каталогов, выделено 551 событие, наиболее вероятно относящееся к гамма-всплескам. Точность первой модели на обучающей выборке составила $\sim 91\%$, а второй $\sim 79\%$. Однако выборки для обучения и для проверки модели не являлись однородными, а значит, оценки точности могли немного отличаться от действительных значений.

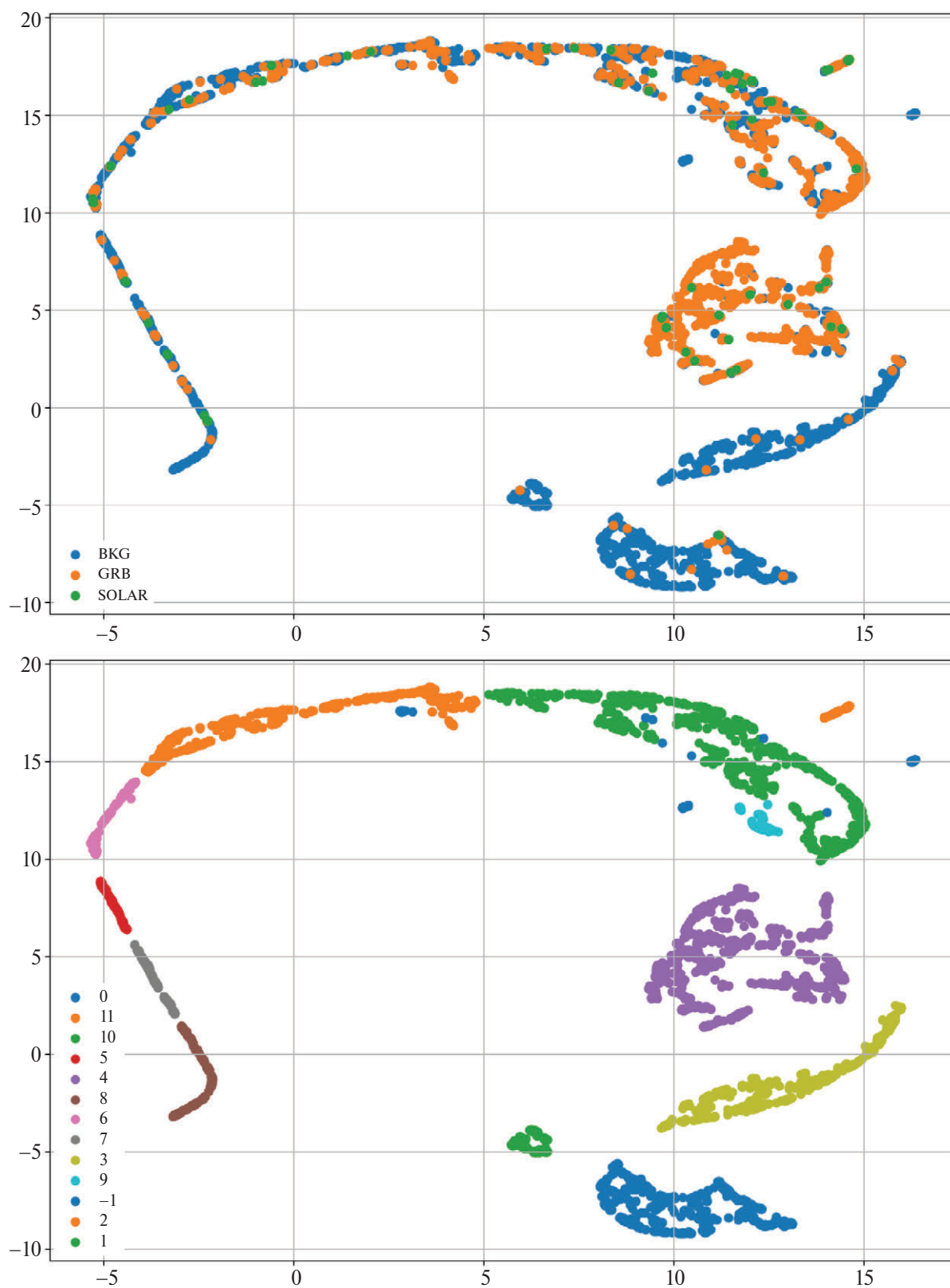


Рис. 5. Результат работы алгоритма уменьшения размерности UMAP и кластеризации HDBSCAN. На верхней панели различными цветами обозначены классы событий, на нижней панели различными цветами размечены все найденные кластеры. Для анализа использовались все найденные в SPI-ACS 4364 превышения над фоном.

4. Проведены дополнительные исследования, чтобы подтвердить реальность полученных кандидатов во всплески. В частности, для целенаправленного поиска и подтверждения интересующих нас событий были повторно обработаны архивные данные детектора Konus-WIND. Из ранее неизвестных транзиентов (551 событие), зарегистрированных детектором SPI-ACS и отнесенных к вероятным гамма-всплескам, в данных детектора Konus-WIND были подтверждены 17 событий (не вошедших в его каталоги гамма-всплесков). Их параметры приведены в табл. 4. Одно из этих событий было обозначено как солнечная вспышка, поэтому мы исключили его из дальнейшего рассмотрения. Среди оставшихся 16 подтвержденных событий есть два кандидата в самые длительные всплески нашей выборки: 2006-05-16 08:23:27 и 2007-06-16 16:31:06, их длительность по данным ACS составила 388 и 75 с соответственно. Кривые блеска этих гамма-всплесков представлены на рис. 7 и рис. 8.

5. Отсутствие регистрации в данных детектора Konus-WIND оставшихся 534 событий еще не означает, что все они фоновые или солнечные. Konus-

WIND мог их не зарегистрировать по причине недостаточной чувствительности по сравнению с чувствительностью детектора SPI-ACS. Чтобы это проверить, сравним пороги регистрации событий детекторами Konus-WIND (Козлова и др., 2019) и SPI-ACS (для пересчета в энергетические единицы используем калибровку Минаева, Позаненко, 2023). Для простоты сравним максимальный порог детектора Konus-WIND и минимальный коэффициент пересчета SPI-ACS и получим, что действительно 403 (75%) из обсуждаемых событий Konus-WIND зарегистрировать не мог. Поскольку оставшиеся события, будь они гамма-всплесками, должны были бы быть обнаружены этим детектором на уровне достоверности $\sim 4\sigma$, мы приходим к выводу, что все они (131 событие) были вызваны в данных SPI-ACS локальными геофизическими причинами.

6. Можно независимо оценить долю реальных гамма-всплесков среди 403 упомянутых кандидатов. Для этого необходимо рассчитать долю фоновых событий в тестовой выборке. Это можно сделать, зная точность модели (91%). Пусть α — число гамма-

Таблица 4. Кандидаты в астрофизические транзиенты, найденные алгоритмами машинного обучения. Представлены только события подтвержденные экспериментом Konus-WIND^e

T_0 UTC	T_{10} с	Шкала ^a с	Интегральный поток ^b		Пиковый поток за 1 с ^c		Метод ^d	Подтв.
			10 ³ отсч.	10 ⁻⁵ эрг см ⁻²	отсч. с ⁻¹	10 ⁻⁶ эрг см ⁻² с ⁻¹		
2003-04-27 09:57:20	130	120	44 ± 4	1.5 (+7.5, -1.1)	1760 ± 319	0.60 (+0.34, -0.05)	HDBS	KW
2003-05-26 08:18:40	120	300	62 ± 3	2.1 (+10.3, -1.6)	2302 ± 320	0.79 (+0.42, -0.06)	HDBS	KW
2003-06-13 17:14:45	180	300	65 ± 4	2.2 (+11.0, -1.7)	1610 ± 319	0.55 (+0.31, -0.04)	HDBS	KW
2003-08-06 06:12:59	388	300	28 ± 6	1.0 (+5.5, -0.8)	1223 ± 318	0.42 (+0.25, -0.03)	HDBS	KW
2004-04-08 15:43:36	43	120	24 ± 2	0.8 (+4.1, -0.6)	1788 ± 319	0.61 (+0.34, -0.05)	HDBS UMAP	KW
2004-07-09 00:59:43	15	120	26 ± 1	0.9 (+4.3, -0.7)	6419 ± 326	2.20 (+1.07, -0.16)	HDBS UMAP	KW
2004-12-24 17:38:58	389	300	57 ± 6	1.9 (+10.1, -1.5)	1304 ± 318	0.45 (+0.27, -0.04)	HDBS	
2005-01-05 16:59:28	389	300	102 ± 6	3.5 (+17.2, -2.6)	2611 ± 320	0.90 (+0.47, -0.07)	HDBS	IBAS, KW
2005-07-03 19:58:16	75	120	49 ± 3	1.7 (+8.1, -1.2)	2957 ± 321	1.01 (+0.52, -0.08)	HDBS UMAP	KW
2006-02-25 15:16:28	56	300	27 ± 2	0.9 (+4.7, -0.7)	1533 ± 319	0.53 (+0.30, -0.04)	HDBS	KW
2006-05-16 08:23:27	389	300	63 ± 6	2.2 (+11.1, -1.6)	1494 ± 319	0.51 (+0.29, -0.04)	HDBS	KW
2007-06-16 16:31:06	75	120	70 ± 3	2.4 (+11.4, -1.8)	3413 ± 322	1.17 (+0.60, -0.09)	HDBS UMAP	KW
2008-02-26 16:13:57	478	300	43 ± 7	1.5 (+8.1, -1.1)	1482 ± 319	0.51 (+0.29, -0.04)	HDBS	KW
2008-04-13 21:19:49	170	120	30 ± 4	1.0 (+5.5, -0.8)	2206 ± 320	0.76 (+0.41, -0.06)	HDBS UMAP	KW
2009-03-23 09:54:57	85	120	33 ± 3	1.1 (+5.7, -0.9)	1799 ± 319	0.62 (+0.34, -0.05)	HDBS UMAP	KW
2011-12-31 13:41:49	20	120	15 ± 1	0.5 (+2.7, -0.4)	4452 ± 323	1.53 (+0.76, -0.11)	UMAP	IBAS, KW
2015-11-20 00:09:05	85	120	19 ± 3	0.7 (+3.5, -0.5)	1164 ± 318	0.40 (+0.24, -0.03)	HDBS UMAP	KW

^a Временная шкала, на которой был зарегистрирован транзиент.

^b Интегральный поток за время события T_{10} по данным SPI-ACS. Методика оценки потока описана в (Минаев и др., 2023).

^c Пиковый поток события на масштабе 1 с по данным SPI-ACS.

^d Машинный метод классификации события: кластеризация HDBSCAN и уменьшение размерности UMAP.

^e Полная версия таблицы доступна в электронном виде по ссылке grb.rssi.ru/INTEGRAL/GRB_ACS_candidates.txt

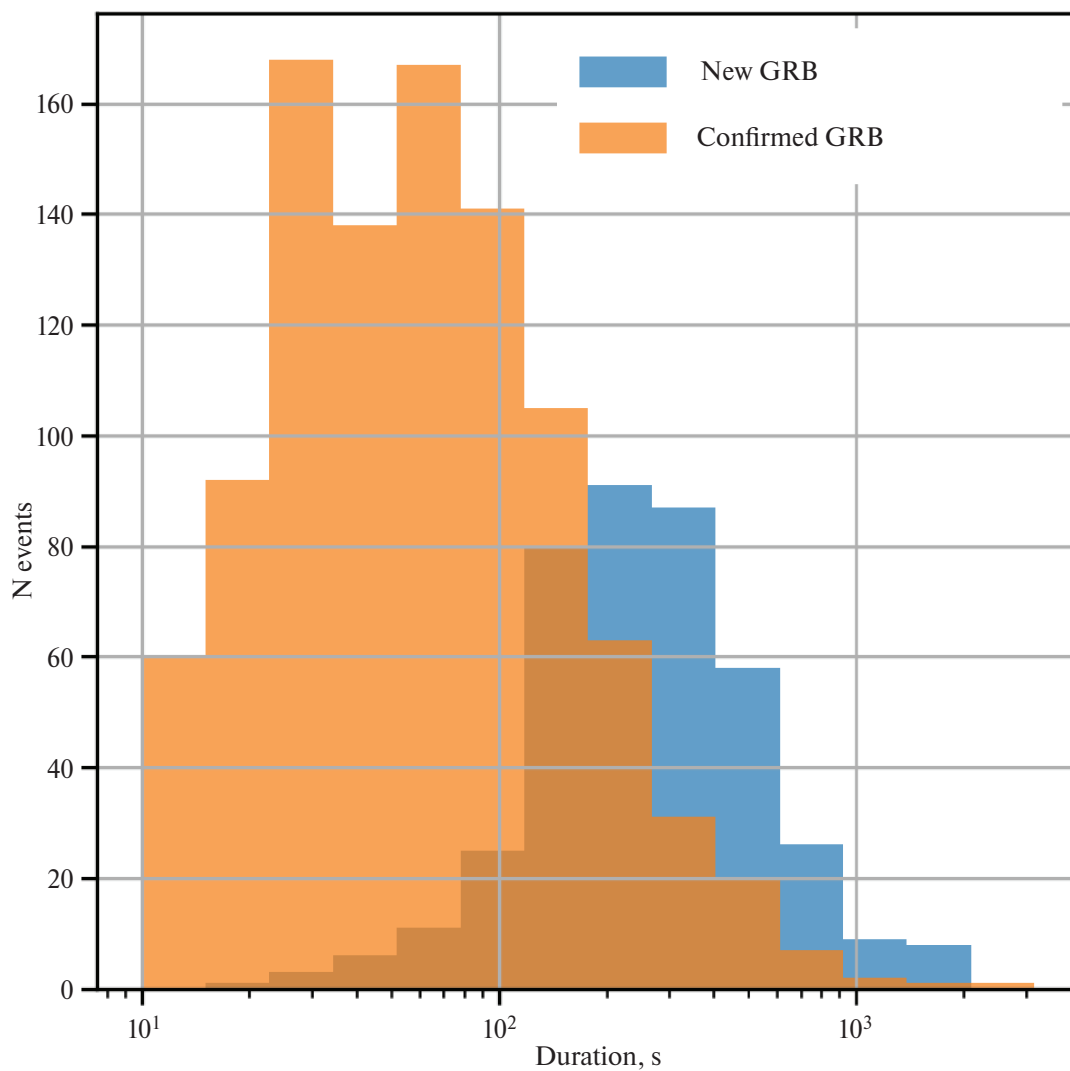


Рис. 6. Распределения по длительности $T_{1\sigma}$, найденных в данных детектора SPI-ACS с помощью разработанного метода, 403 потенциальных сверхдолгих гамма-всплесков (показаны синим) и 1018 гамма-всплесков, отождествленных с ранее известными событиями (оранжевым).

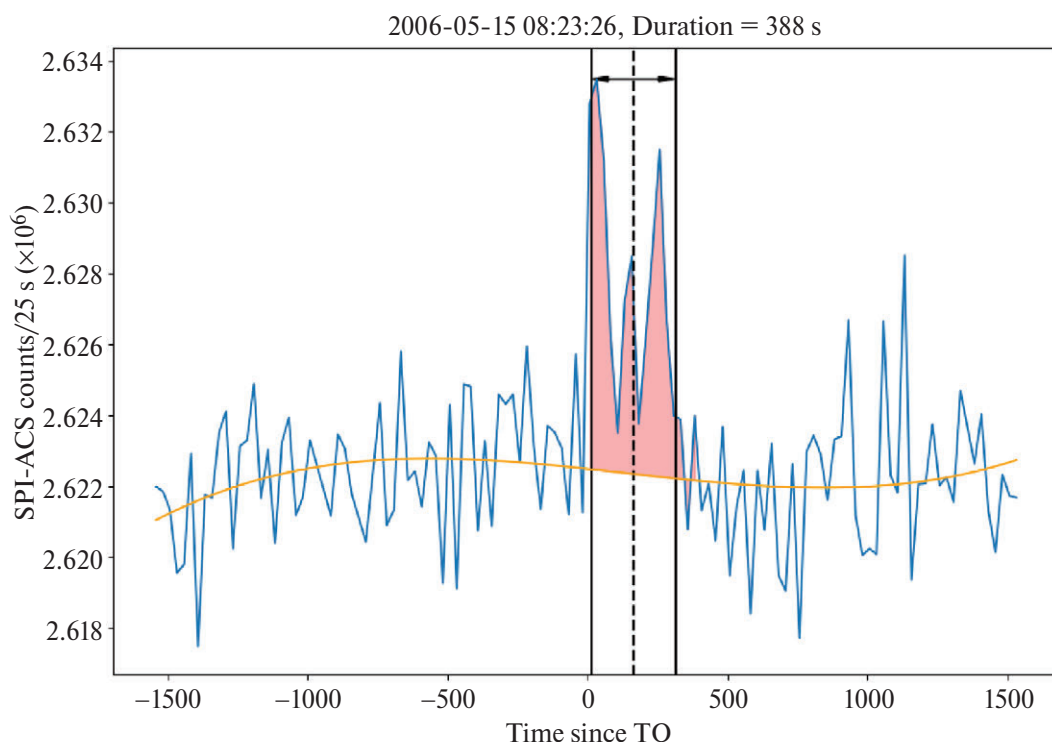


Рис. 7. Кривая блеска GRB 060516 — одного из наиболее долгих кандидатов в гамма-всплески по данным детектора SPI-ACS. Красным цветом выделено событие над фоном. Оранжевым — аппроксимация фона полиномом 3-й степени. Черной пунктирной линией показана середина бина, в котором было найдено событие. Черными сплошными линиями — левая и правая границы этого бина.

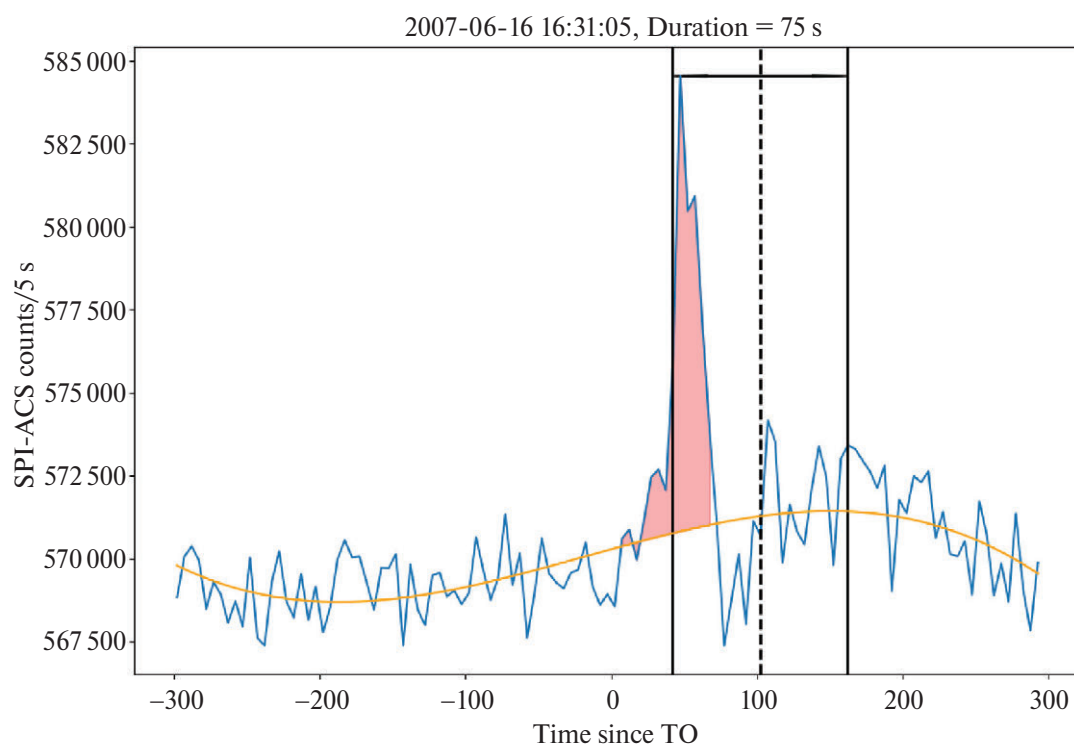


Рис. 8. То же, что на рис. 7, но для кандидата в гамма-всплески GRB 070616.

всплесков в тестовой выборке, тогда

$$(2429 - \alpha) \times 0.09 + \alpha \times 0.91 = 551, \quad (2)$$

соответственно

$$\alpha = \frac{551 - 2429 \times 0.09}{0.91 - 0.09} = 405. \quad (3)$$

Таким образом, из 551 события $405 \times 0.91 = 369$ (67%) получены действительно из выборки гамма-всплесков, это означает, что среди 403 событий до 270 могут быть реальными гамма-всплесками.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работе был проведен “слепой” поиск длительных транзиентных событий на временных интервалах 120, 300 и 1000 с на основе данных детектора SPI-ACS за ~20 лет работы обсерватории INTEGRAL. С помощью машинного обучения реализована задача классификации найденных транзиентных событий с использованием информации других детекторов (ISGRI, IREM) обсерватории INTEGRAL. Благодаря использованию моделей машинного обучения из всех найденных 4364 кандидатов в транзиентные события удалось независимо классифицировать 1018 уже известных гамма-всплесков из других каталогов (распределение их длительности приведено на рис. 6) и 2429 не обнаруженных ранее кандидатов в гамма-всплески. Для 551 события, выделенных моделями как кандидаты в астрофизические события был проведен поиск в данных эксперимента Konus-WIND, и для 17 событий были обнаружены значимые синхронные превышения в кривых блеска в одном из двух детекторов эксперимента Konus-WIND. После детального анализа одно из этих 17 одновременно зарегистрированных событий было отождествлено с солнечной вспышкой. Таким образом, для 16 событий подтверждена их астрофизическая природа как космических гамма-всплесков, эти события ранее не были зарегистрированы космическими гамма-экспериментами.

Показано, что после исключения из оставшихся 534 события вероятных фоновых и солнечных вспышек, в выборке должны все еще присутствовать 403 ранее неизвестных кандидатов в астрофизические транзиенты, не подтвержденные никакими каталогами или данными эксперимента Konus-WIND, из которых, вероятно, до 270 событий могут оказаться реальными космическими гамма-всплесками. Статистика результатов проведенного анализа суммирована в табл. 5. Все эти кандидаты найдены на масштабах поиска более 120 с. Среди классифицированных 1018 уже известных гамма-всплесков, независимо найденных в данной работе с использованием тех же алгоритмов, 5 событий имеют длительность более 900 с. Таким образом, сверхдлинные гамма-всплески действительно обнаруживаются в данных детектора SPI-ACS

Таблица 5. Сводная статистика по результатам поиска и классификации транзиентов

Всего превышений над фоном	4364
Уже известны	1935
Из них известных гамма-всплесков	1018
Кандидатов	2429
Выделено ML-моделями	551
Совпадений по времени с Konus-WIND	17
Из них гамма-всплесков	16
Кандидаты без подтверждения	403
Из них ожидается гамма-всплесков	≤270

в энергетическом диапазоне >80 кэВ, как среди уже известных 1018 гамма-всплесков, так и среди 403 кандидатов в гамма-всплески.

Из ранее неизвестных событий, найденных в данных SPI-ACS, всего лишь 16 были подтверждены в данных эксперимента Konus-WIND в ходе дополнительного анализа, что позволяет отнести эти 16 событий с большой вероятностью к гамма-всплескам, но только 4 из них имеют длительность более 350 с. По-видимому, значительное отличие количества кандидатов SPI-ACS (403) от найденных совпадений с Konus-WIND (16 гамма-всплесков, 1 солнечная вспышка) связаны с селективными эффектами из-за более низкого энергетического порога регистрации в эксперименте Konus-WIND (20 кэВ) по сравнению с порогом регистрации детектора SPI-ACS (80 кэВ).

БЛАГОДАРНОСТИ

Г.Ю. Мозгунов и С.А. Гребенев благодарны Фонду развития теоретической физики и математики “БАЗИС”, грант #22-1-1-57-1 программы “Ведущий ученый” (Теоретическая физика) за поддержку разработки алгоритма обработки кривых блеска с применением методов машинного обучения. А.С. Позаненко и П.Ю. Минаев благодарны Российскому научному фонду (грант 23-12-00198) за поддержку работы, в части проведения анализа наблюдений гамма-всплесков в экспериментах GBM/Fermi, BAT/Swift и каталога Masterlist Кевина Орли. Работа А.Г. Дёмина, А.В. Ридной, Д.С. Свинкина, Д.Д. Фредерикса выполнена в рамках темы госзадания ФТИ им. А.Ф. Иоффе FFUG-2024-0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архангельская, Архангельский (I.V. Arkhangelskaja and A.I. Arkhangelskiy), J. Phys.: Conf. Ser. **675**, Iss. 3, id. 032025 (2016).
2. Барков (M.V. Barkov), Astron. Bull. **65**, 217 (2010).

3. Белкин С.О., Позаненко А.С., Мазаева Е.Д., Вольнова А.А., Минаев П.Ю., Томинага Н., Гребенев А.С., Человеков И.В., Бакли Д. и др., Письма в Астрон. журн. **46**, 839 (2020) [S.O. Belkin, A.S. Pozanenko, E.D. Mazayeva, A.A. Volnova, P.Yu. Minaev, N. Tominaga, S.A. Grebenev, I.V. Chelovekov, D. Buckley, et al., *Astron. Lett.* **46**, 783 (2020)].
4. Белкин и др. (S. Belkin, A.S. Pozanenko, P.Y. Minaev, N.S. Pankov, A.A. Volnova, A. Rossi, G. Stratta, S. Benetti, et al.), *MNRAS* **5271**, 1507 (2024).
5. Бильцингер и др. (B. Biltzinger, F. Kunzweiler, J. Greiner, K. Toelge, and J.M. Burgess), *Astron. Astrophys.* **640**, A8 (2020).
6. Бисноватый-Коган, Позаненко (G.S. Bisnovatyi-Kogan and A.S. Pozanenko), *Astrophys. and Space Sci.* **332**, 57 (2011).
7. Блинные и др. (S.I. Blinnikov, I.D. Novikov, T.V. Perevodchikova, and A.G. Polnarev), *Sov. Astron. Lett.* **10**, 177 (1984).
8. Ведренн и др. (G. Vedrenne, J.-P. Roques, V. Schonfelder, P. Mandrou, G.G. Lichti, A. von Kienlin, B. Cordier, S. Schanne, J. Knodlseder, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L63 (2003).
9. Вольнова и др. (A.A. Volnova, M.V. Pruzhinskaya, A.S. Pozanenko, S.I. Blinnikov, P.Yu. Minaev, O.A. Burkhonov, A.M. Chernenko, Sh.A. Ehgamberdiev, and R. Inasaridze), *MNRAS* **467**, 3500 (2017).
10. Вусли (S.E. Woosley), *Astrophys. J.* **405**, 273 (1993).
11. Галама и др. (T.J. Galama, P.M. Vreeswijk, J. van Paradijs, C. Kouveliotou, T. Augusteijn, H. Bohnhardt, J. P. Brewer, V. Doublier, et al.), *Nature* **395**, 670 (1998).
12. Гребенев С.А., Человеков И.В. Письма в Астрон. журн. **33**, 883 (2007) [S.A. Grebenev, I.V. Chelovekov, *Astron. Lett.* **33**, 789 (2007)].
13. Далоссо и др. (S. Dall’Osso, G. Stratta, D. Guetta, S. Covino, G. De Cesare, and L. Stella), *Astron. Astrophys.* **526**, A121 (2011).
14. Жендр и др. (B. Gendre, G. Stratta, J.L. Atteia, S. Basa, M. Boer, D.M. Coward, S. Cutini, V. DElia, E.J. Howell, et al.), *Astrophys. J.* **766**, id. 30 (2013).
15. Жендр (B. Gendre), 40th COSPAR Scientific Assembly (2–10 August 2014, Moscow), id E1.17–10–14. (2014).
16. Кано и др. (Z. Cano, L. Izzo, A. de Ugarte Postigo, et al.), *Astron. Astrophys.* **605**, id. A107 (2017).
17. Квадрини и др. (E.M. Quadrini, A. Bazzano, A.J. Bird, K. Broenstad, F. Di Marco, G. La Rosa, M. Michalska, P. Orleanski, A. Solberg, and P. Ubertini), *Astron. Astrophys.* **411**, L153 (2003).
18. Ке и др. (G. Ke, Q. Meng, T. Finley, T. Wang, W. Chen, W. Ma, Q. Ye, and T.Y. Liu), 31st Conf. on Neural Information Processing System (2017).
19. фон Кинлин и др. (A. von Kienlin, V. Beckmann, A. Rau, N. Arend, K. Bennett, B. McBreen, P. Connell, S. Deluit, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L299 (2003).
20. Козлова и др. (A.V. Kozlova, D.S. Svinkin, A.L. Lysenko, M.V. Ulanov, A.E. Tsvetkova, and D.D. Frederiks), *JPhCS* **1400**, 022014 (2019).
21. Ди Кокко и др. (G. Di Cocco, E. Caroli, E. Celesti, L. Foschini, F. Gianotti, C. Labanti, G. Malaguti, A. Mauri, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L189 (2003).
22. Комиссаров, Барков (S.S. Komissarov and M.V. Barkov), *MNRAS* **402**, L25 (2010).
23. Круппи и др. (R. Crupi, G. Dilillo, E. Bissaldi, F. Fiore, and A. Vacchi), *astro-ph/2303.15936* (2023).
24. Кувелиоту и др. (C. Kouveliotou, C.A. Meegan, G.J. Fishman, N.P. Bhat, M.S. Briggs, T.M. Koshut, W.S. Paciesas, and G.N. Pendleton), *Astrophys. J.* **413**, L101 (1993).
25. Лабанти и др. (C. Labanti, G. Di Cocco, G. Ferro, F. Gianotti, A. Mauri, E. Rossi, J. B. Stephen, A. Traci, and M. Trifoglio), *Astron. Astrophys.* **411**, L149 (2003).
26. Лебран и др. (F. Lebrun, J. P. Leray, P. Lavocat, J. Crétolle, M. Arques, C. Blondel, C. Bonnin, A. Bouere, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L141 (2003).
27. Леван (A. Levan), *Gamma-ray bursts 2514–3433*. IOP Publishing (2018).
28. Ло и др. (K.K. Lo, S. Farrell, T. Murphy, and B.M. Gaensler), *Astrophys. J.* **786(1)**, 20 (2014).
29. Лунд и др. (N. Lund, N.J. Westergaard, C. Budtz-Jørgensen), *Astrophys. Lett. Commun.* **39**, 339 (1999).
30. Мазец и др. (E.P. Mazets, S.V. Golenetskii, V.N. Ilyinskii, V.N. Panov, R.L. Aptekar, Yu.A. Guryan, M.P. Proskura, I.A. Sokolov, Z.Ya. Sokolova, et al.), *Astrophys. and Space Sci.* **80**, 119 (1981).
31. Макиннес и др. (L. McInnes, J. Healy, J. Melville), *J. Open Source Software* **3** (29), 861 (2018) [arXiv:1802.03426v3].
32. Мерететти и др. (S. Mereghetti, D. Gotz, J. Borkowski, R. Walter, and H. Pedersen), *Astron. Astrophys.* **411**, L291 (2003).
33. Мецгер и др. (B.D. Metzger, D. Giannios, T.A. Thompson, N. Bucciantini, and E. Quataert), *MNRAS* **413**, 2031 (2011).
34. Минаев, Позаненко (P.Yu. Minaev and A.S. Pozanenko), *MNRAS* **492**, 1919 (2020).
35. Минаев, Позаненко (P.Yu. Minaev and A.S. Pozanenko), *MNRAS* **525**, 2411 (2023).
36. Минаев П., Позаненко А., Лозников В., Письма в Астрон. журн. **36**, 744 (2010) [P. Minaev, A. Pozanenko, V. Loznikov, *Astron. Lett.* **36**, 707 (2010)].
37. 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.Y. Minaev, S.A. Grebenev, A.S. Pozanenko, S.V. Molkov, D.D. Frederiks, S.V. Golenetskii, *Astron. Lett.* **38**, 613 (2012)].
38. Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Мольков С.В., Гребенев С.А., Письма в Астрон. журн. **40**, 271 (2014) [P.Yu. Minaev, A.S. Pozanenko, S.V. Molkov, S.A. Grebenev, *Astron. Lett.* **40**, 235 (2014)].
39. Мозгунов Г.Ю., Минаев П.Ю., Позаненко А.С., Письма в Астрон. журн. **47**, 183 (2021) [G.Yu. Mozgunov, P.Yu. Minaev, A.S. Pozanenko, *Astron. Lett.* **47**, 150 (2021)].
40. Мозгунов и др. (G. Mozgunov, A. Pozanenko, P. Minaev, I. Chelovekov, S.A. Grebenev, D. Svinkin, and A. Ridnaia), *Proc. XXV Int. Conf. "Data Analytics and Management in Data Intensive Domains" (DAMDID/RCDL, 2023, Eds. J. Baixerries, et al.), CCIS Series, 2086, 215 (2024).*

41. Пармиджиани и др. (N. Parmiggiani, A. Bulgarelli, A. Ursi, A. Macaluso, A. Di Piano, V. Fioretti, A. Aboudan, L. Baroncelli, A. Addis, M. Tavani, and C. Pittori), *Astrophys. J.* **945**(2) 106 (2023).
42. Пачинский (B. Paczynski), *Astrophys. J.* **308**, L43 (1986).
43. Пачинский (B. Paczynski), *Astrophys. J.* **494**, L45 (1998).
44. Позаненко и др. (A.S. Pozanenko, M.V. Barkov, P.Y. Minaev, A.A. Volnova, E.D. Mazaeva, A.S. Moskvitin, M.A. Krugov, V.A. Samodurov, V.M. Loznikov, and M. Lyutikov), *Astrophys. J. (Lett.)* **852**, L30 (2018).
45. Позаненко и др. (A. Pozanenko, P. Minaev, S. Grebenev, and I. Chelovekov), *Astron. Lett.* **45**, 710 (2019).
46. Позаненко и др. (A.S. Pozanenko, M.V. Barkov, P.Y. Minaev, and A.A. Volnova), *Astron. Lett.* **47**, 791 (2021).
47. Рау и др. (A. Rau, A. van Kienlin, K. Hurley, and G.G. Lichti), *Astron. Astrophys.* **438**, 1175 (2005).
48. Ридная и др. (A. Ridnaia, D. Svinkin, and D. Frederiks), *JPhCS* **1697**, 012030 (2020).
49. Роди и др. (J. Rodi, A. Bazzano, P. Ubertini, L. Natalucci, V. Savchenko, E. Kuulkers, C. Ferrigno, E. Bozzo, S. Brandt, et al.), *Am. Astron. Soc., AAS Meeting # 231*, id. 438.19 (2018).
50. Савченко и др. (V. Savchenko, A. Neronov, and T.J.-L. Courvoisier), *Astron. Astrophys.* **541**, A122 (2012).
51. Садех (I. Sadeh), 36th Int. Cosmic Ray Conf. (ICRC2019, July 24 – August 1, 2019, Madison, WI, USA), *PoS* **358**, id.775 [astro-ph/1908.0161] (2019).
52. Скаргл и др. (J.D. Scargle, J.P. Norris, B. Jackson, and J. Chiang), *Studies in Astronomical Time Series Analysis VI. Bayesian Block Representations* **764**(2), 167 (2013).
53. Тарнопольски (M. Tarnopolski), *MNRAS* **458**, 2024 (2016).
54. Фаррелл и др. (S.A. Farrell, T. Murphy, and K.K. Lo), *Astrophys. J.* **813**(1), 28 (2015).
55. Фенимор и др. (E.E. Fenimore, J.J.M. in't Zand, J.P. Norris, J.T. Bonnell, and R. Nemiroff), *Astrophys. J. (Lett.)* **448**, L101 (1995).
56. Человеков И.В., Гребенев С.А., Сюняев Р.А., Письма в Астрон. журн. **32**, 508 (2006) [I.V. Chelovekov, S.A. Grebenev, R.A. Sunyaev, *Astron. Lett.* **32**, 456 (2006)].
57. Человеков И.В., Гребенев С.А., Письма в Астрон. журн. **37**, 651 (2011) [I.V. Chelovekov, S.A. Grebenev, *Astron. Lett.* **37**, 597 (2011)].
58. Человеков И.В., Гребенев С.А., Мереминский И.А., Просветов А.В., Письма в Астрон. журн. **43**, 859 (2017) [I.V. Chelovekov, et al., *Astron. Lett.* **43**, 781 (2017)].
59. Человеков И.В., Гребенев С.А., Позаненко А.С., Минаев П.Ю., Письма в Астрон. журн. **45**, 683 (2019) [I.V. Chelovekov, S.A. Grebenev, A.S. Pozanenko, P.Yu. Minaev, *Astron. Lett.* **45**, 635 (2019)].
60. Эбботт и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, R.X. Adhikari, et al), *Astrophys. J. (Lett.)* **848**, L12 (2017a).
61. Эбботт и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, P. Addesso, R.X. Adhikari, et al.), *Phys. Rev. Lett.* **119**, 161101 (2017b).
62. Эбботт и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, R.X. Adhikari, et al), *Astrophys. J. (Lett.)* **892**, L3 (2020).
63. Янг и др. (H. Yang, J. Hare, O. Kargaltsev, and I. Volkov), *AAS/High Energy Astrophysics Division*, **54**, p. 110.03 (2022).
64. Янка и др. (H.-Th. Janka, M.-A. Aloy, P.A. Mazzali, and E. Pian), *Astrophys. J.*, **645**, Issue 2, pp. 1305–1314 (2006).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Для иллюстрации представленных выше результатов на рис. 9–23 показаны кривые блеска кандидатов в гамма-всплески, найденных по данным детектора SPI-ACS с помощью алгоритмов машинного обучения, в сравнении с кривыми блеска, зарегистрированными в это же время детектором Konus-WIND. Параметры большинства этих событий приведены в табл. 4.

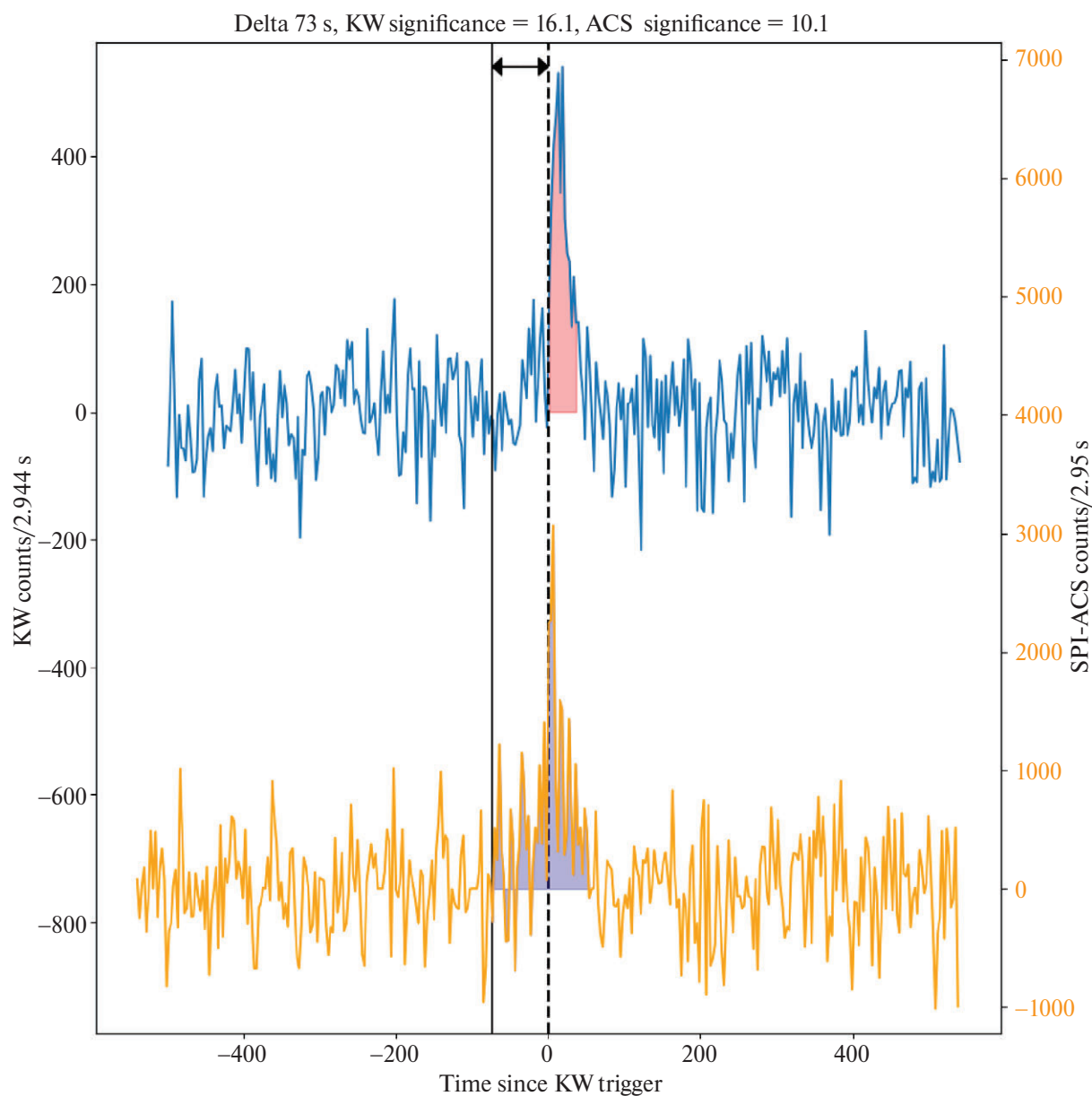


Рис. 9. Сравнение кривых блеска кандидата в гамма-всплески GRB 030427 по данным детекторов Konus-WIND (синяя линия, ось Y слева) и SPI-ACS (желтая линия, правая ось Y справа). Черной пунктирной линией показано время триггера события детектором Konus-WIND, черной сплошной линией — левая граница бина, в котором был найден всплеск при анализе данных SPI-ACS.

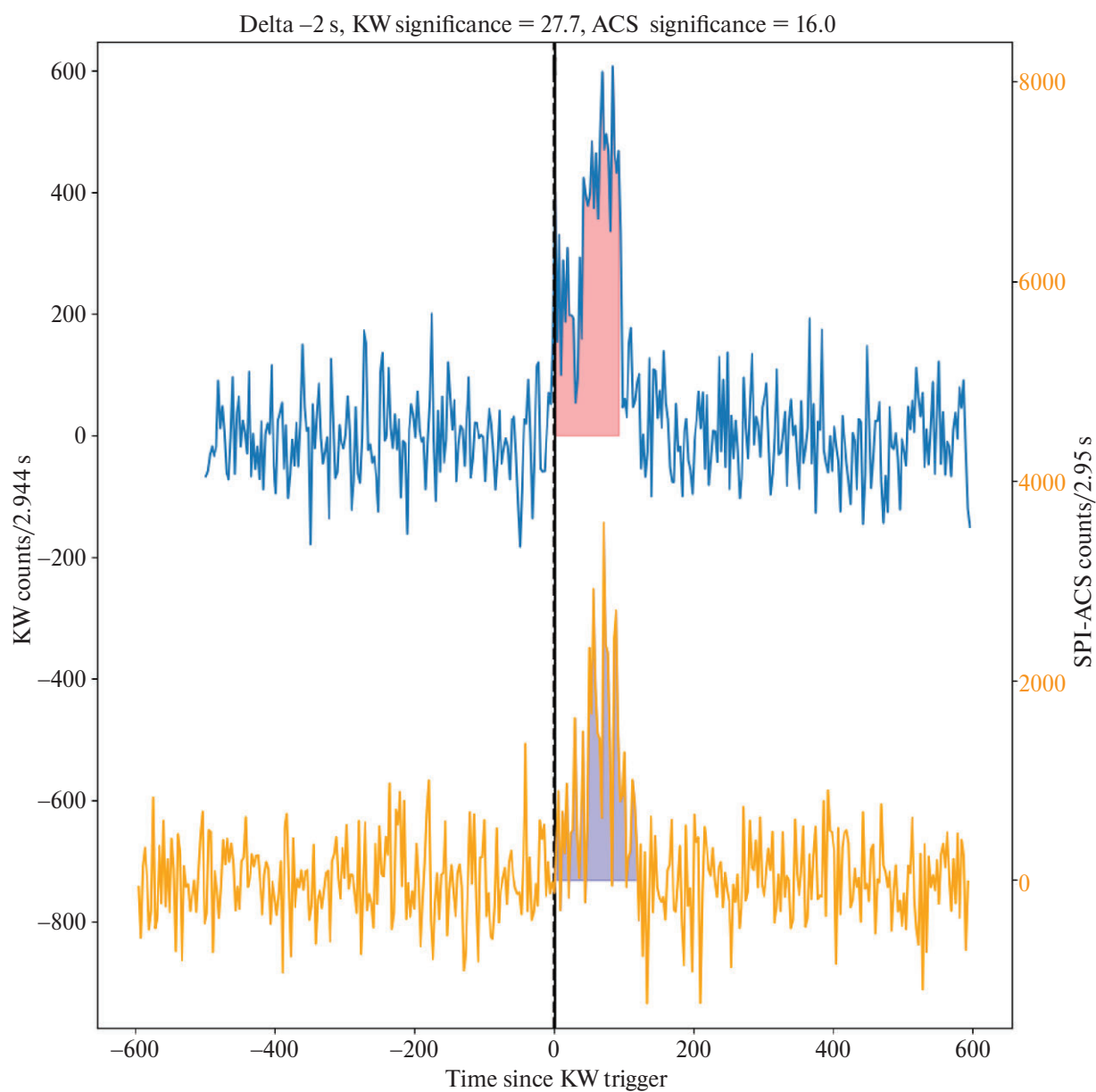


Рис. 10. То же, что на рис. 9, но для кандидата в гамма-всплески GRB 030526.

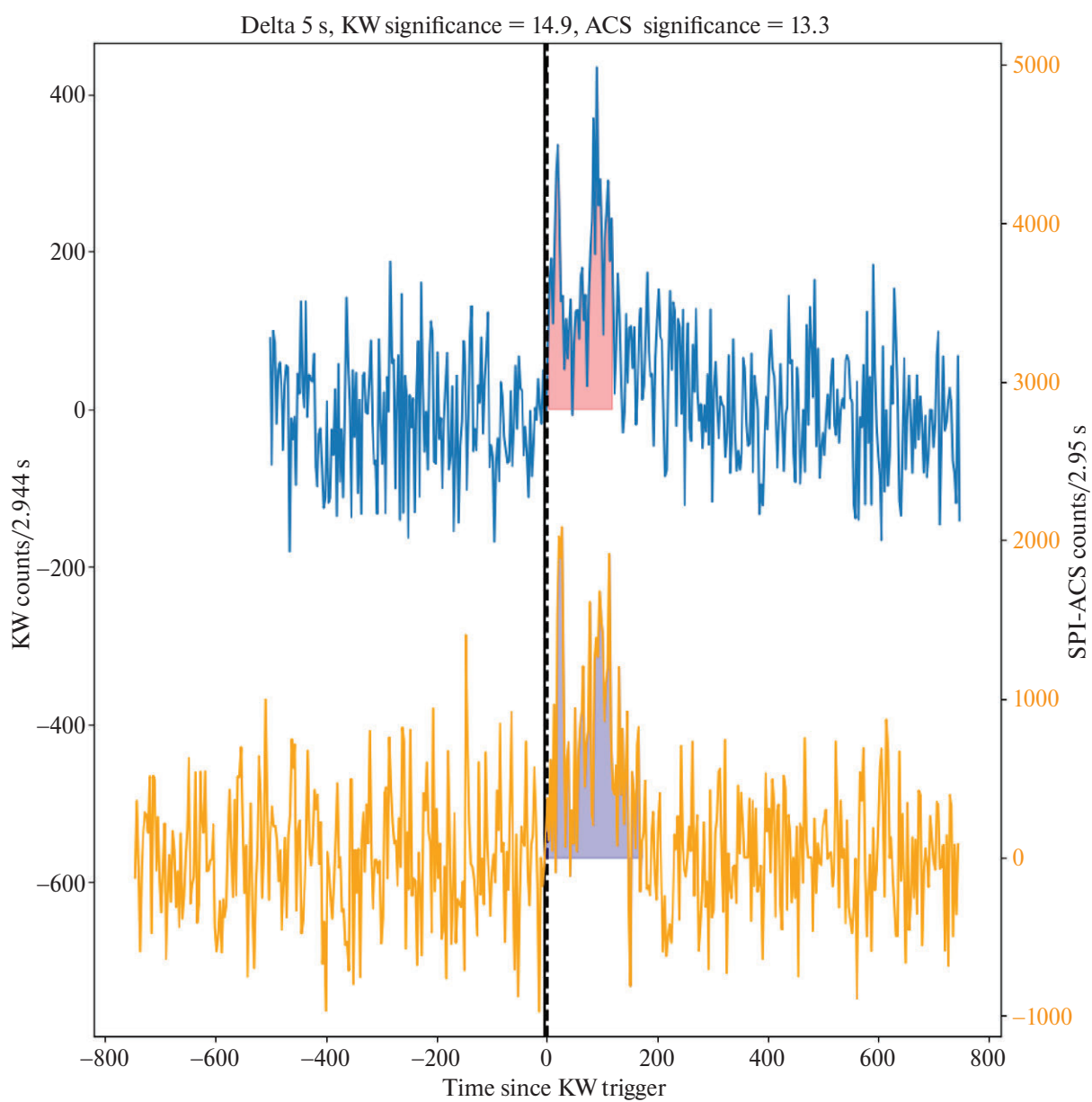


Рис. 11. То же, что на рис. 9, но для кандидата в гамма-всплески GRB 030613.

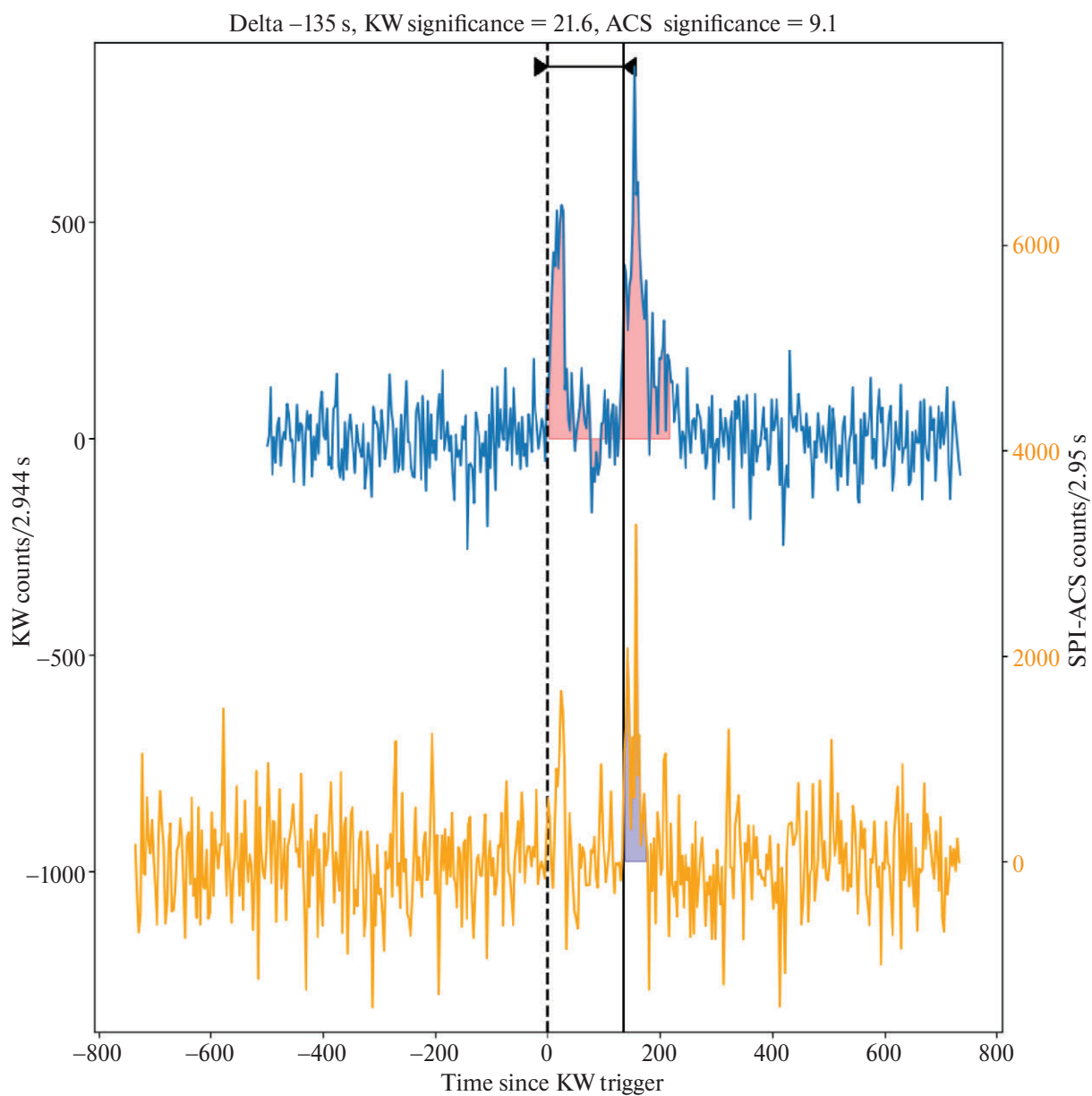


Рис. 12. То же, что на рис. 9, но для кандидата в гамма-всплески GRB 040408.

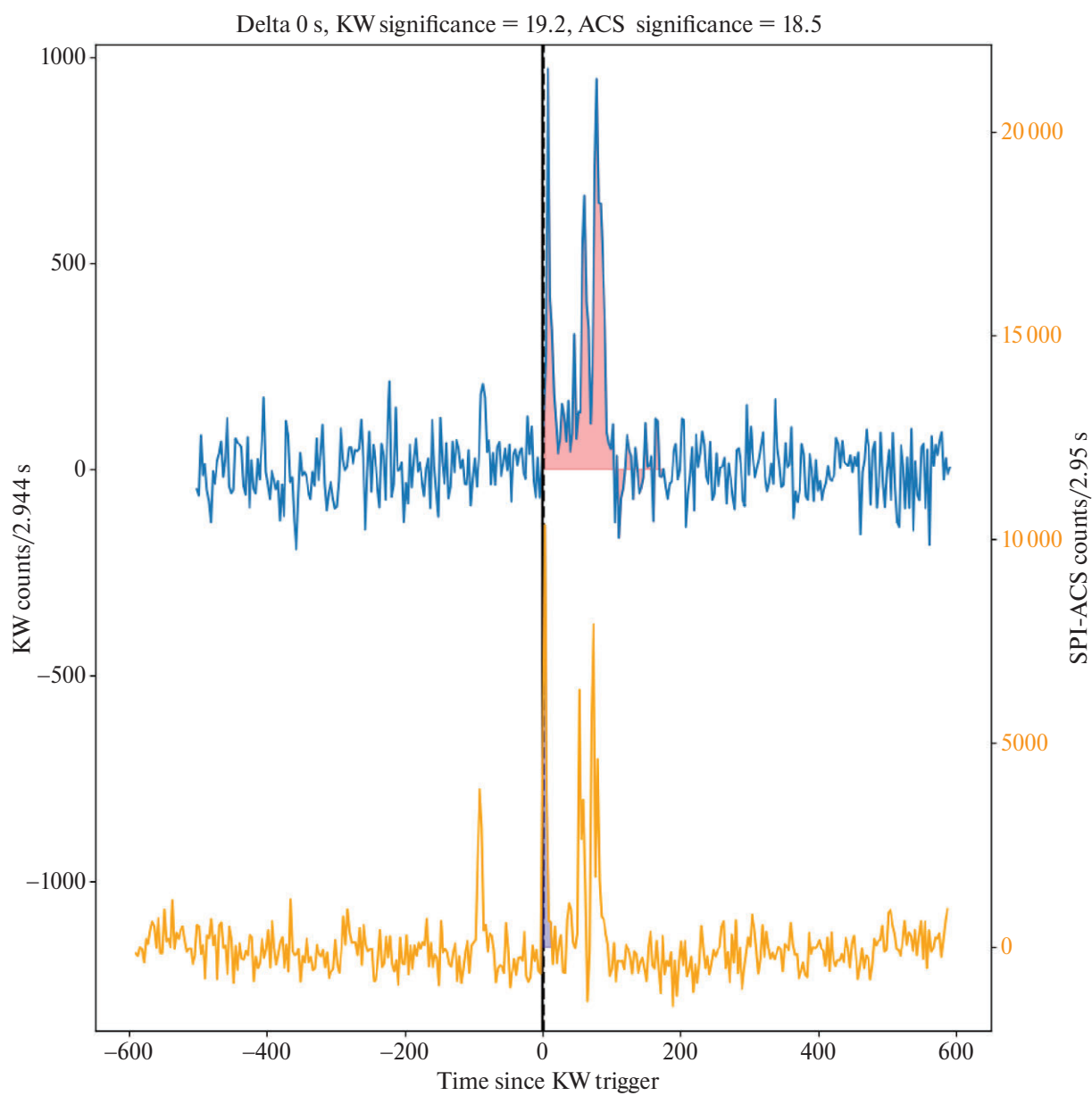


Рис. 13. То же, что на рис. 9, но для кандидата в гамма-всплески GRB 040709.

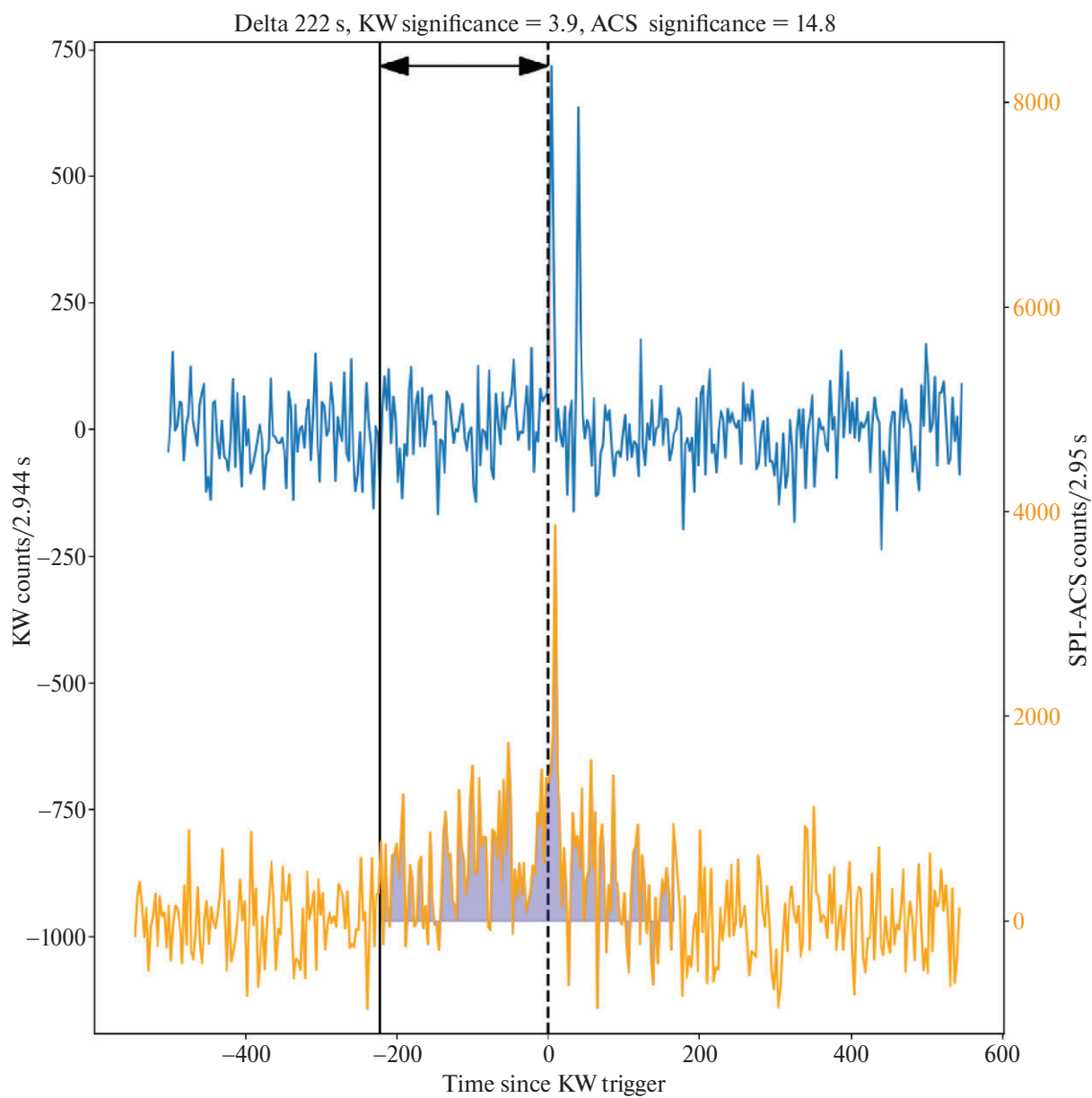


Рис. 14. То же, что на рис. 9, но для кандидата в гамма-всплески GRB 050105.

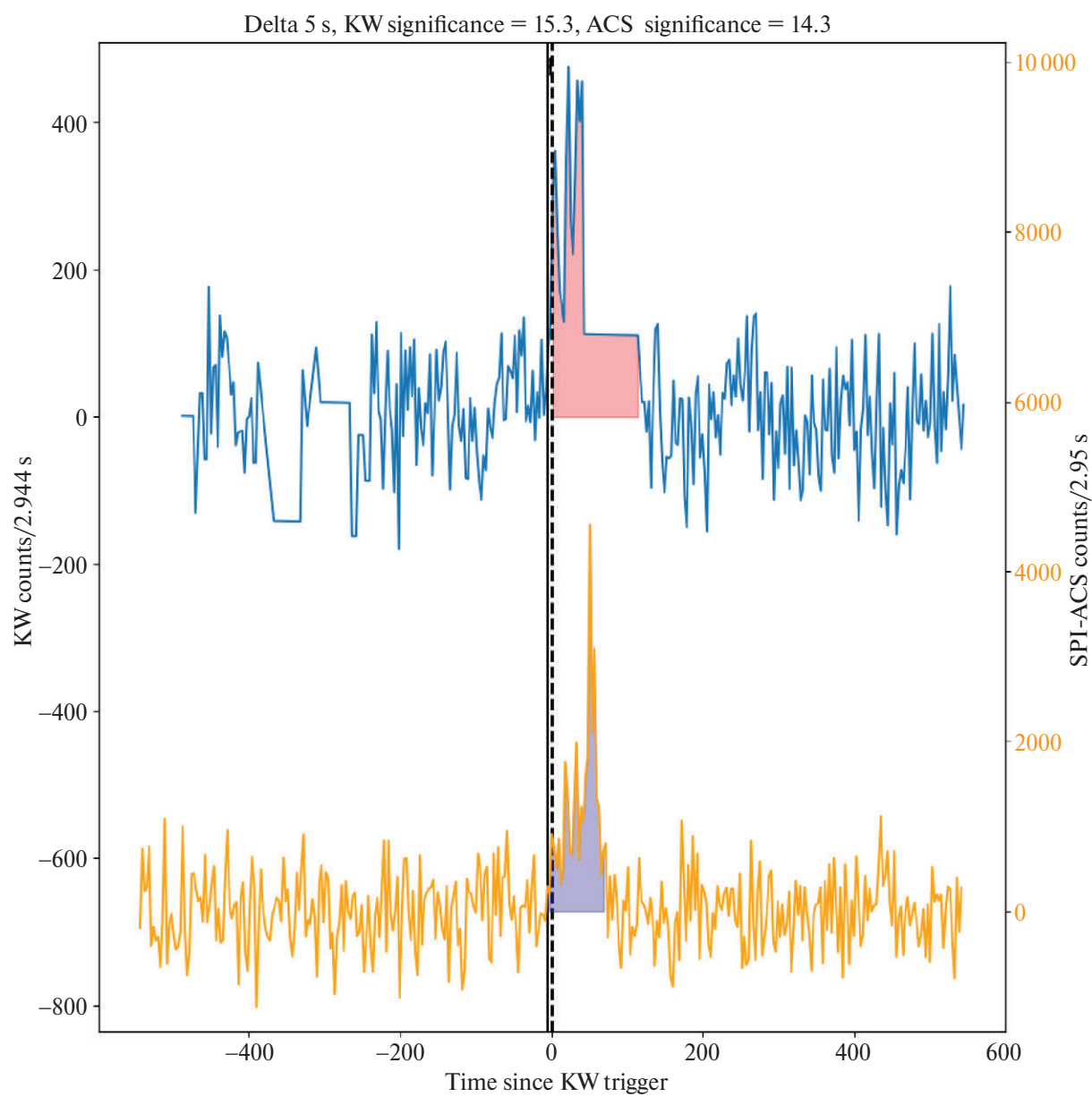


Рис. 15. То же, что на рис. 9, но для кандидата в гамма-всплески GRB 050703.

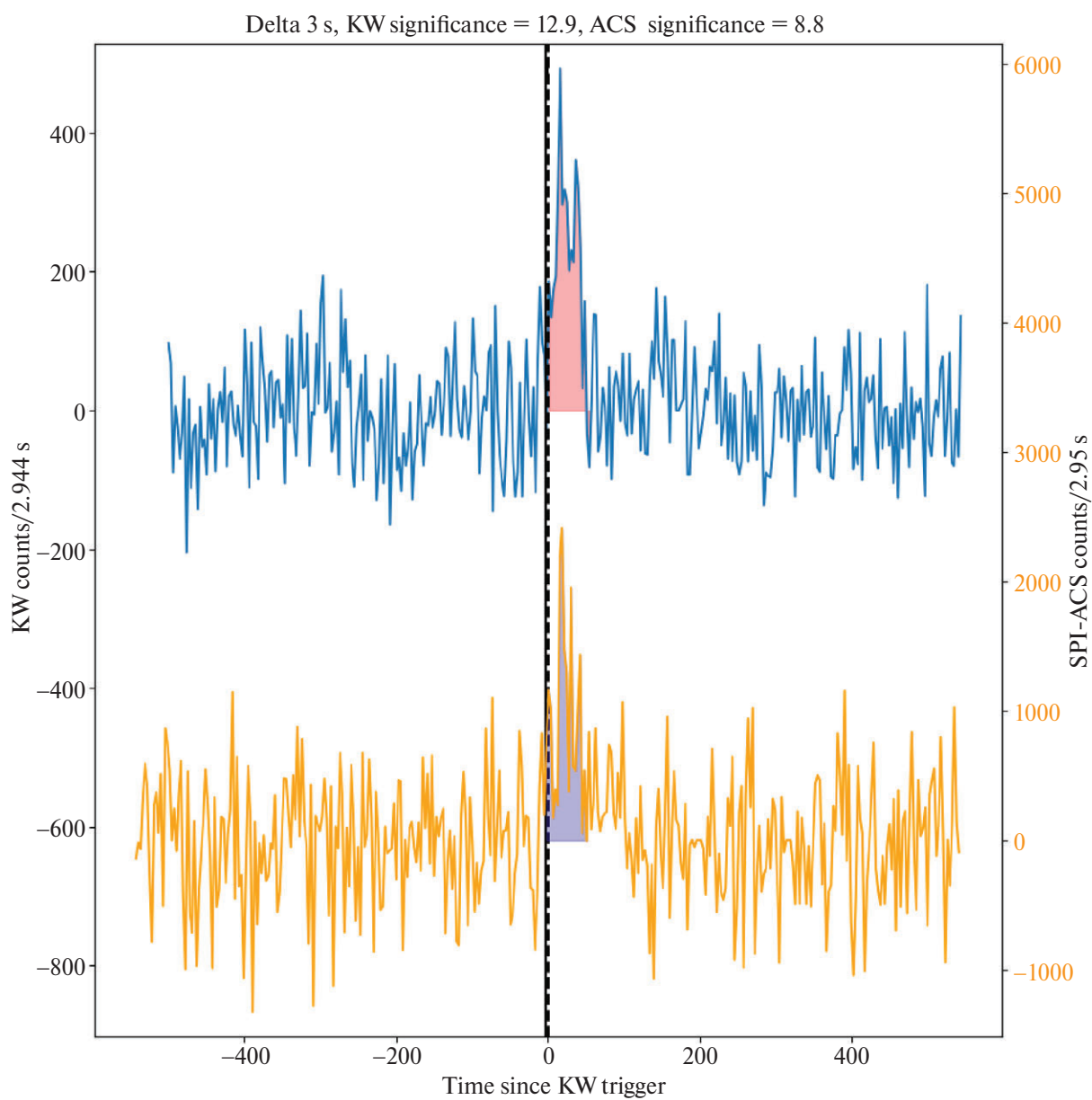


Рис. 16. То же, что на рис. 9, но для кандидата в гамма-всплески GRB 060225.

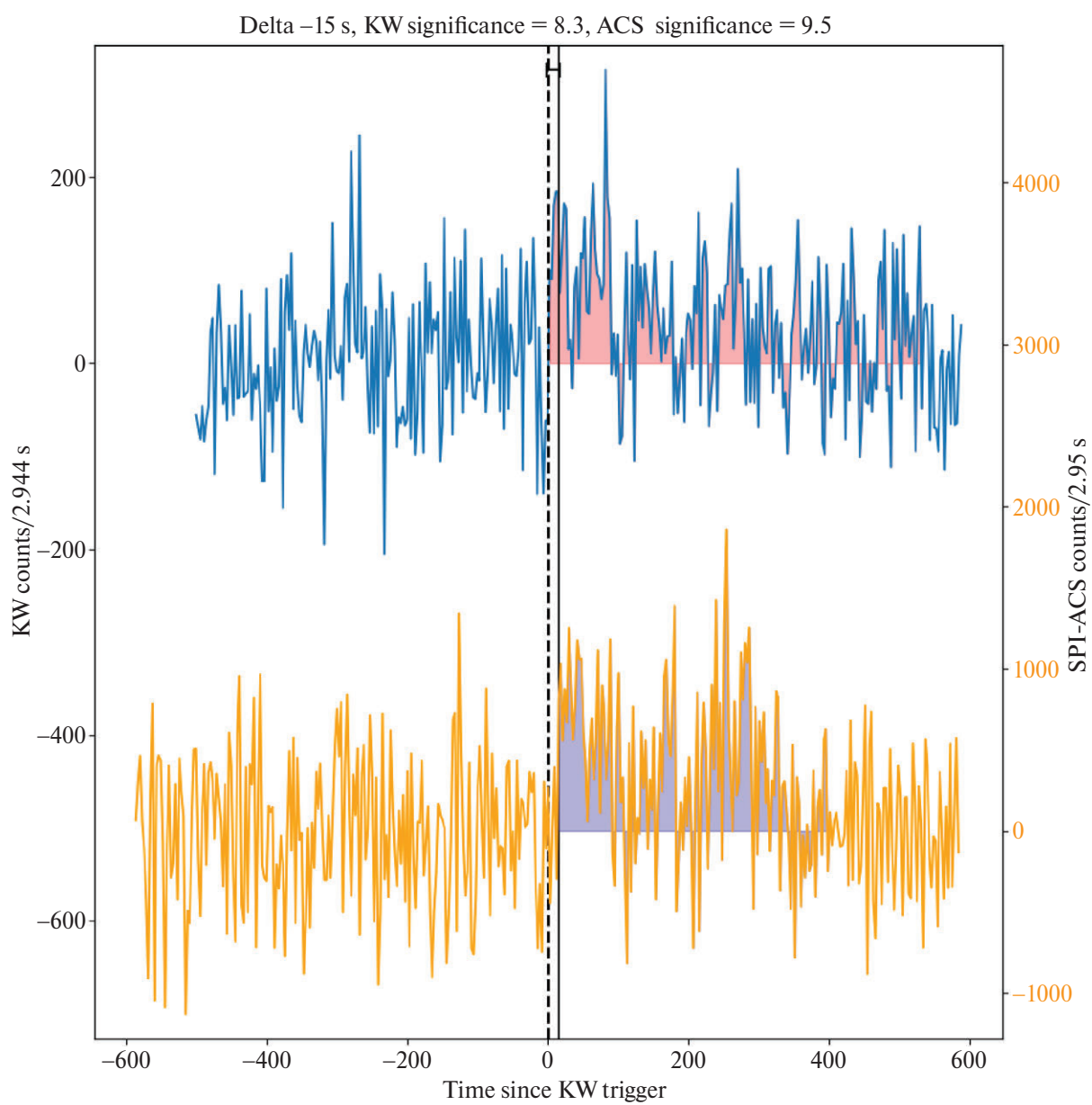


Рис. 17. То же, что на рис. 9, но для кандидата в гамма-всплески GRB 060516.

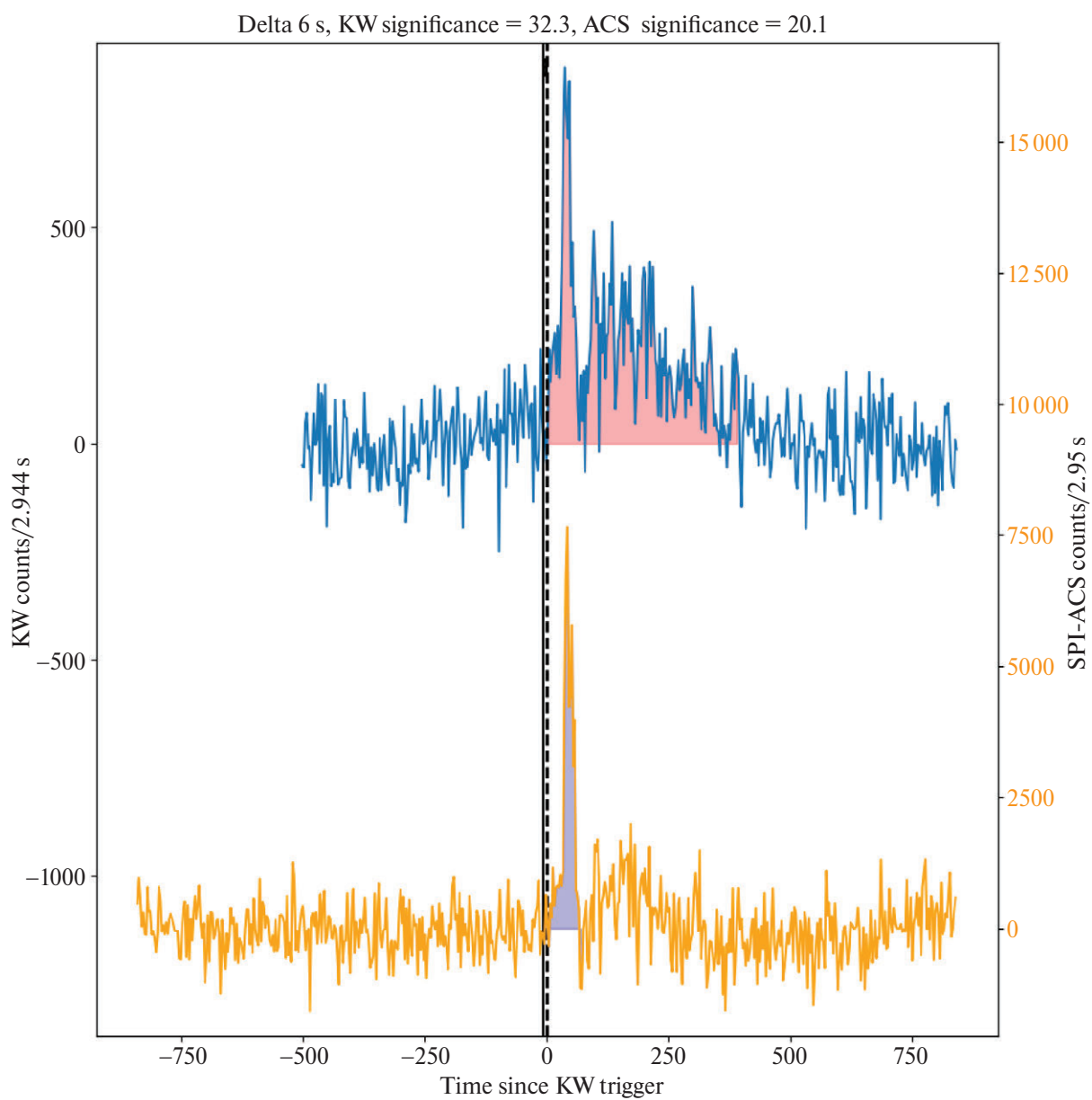


Рис. 18. То же, что на рис. 9, но для кандидата в гамма-всплески GRB 070616.

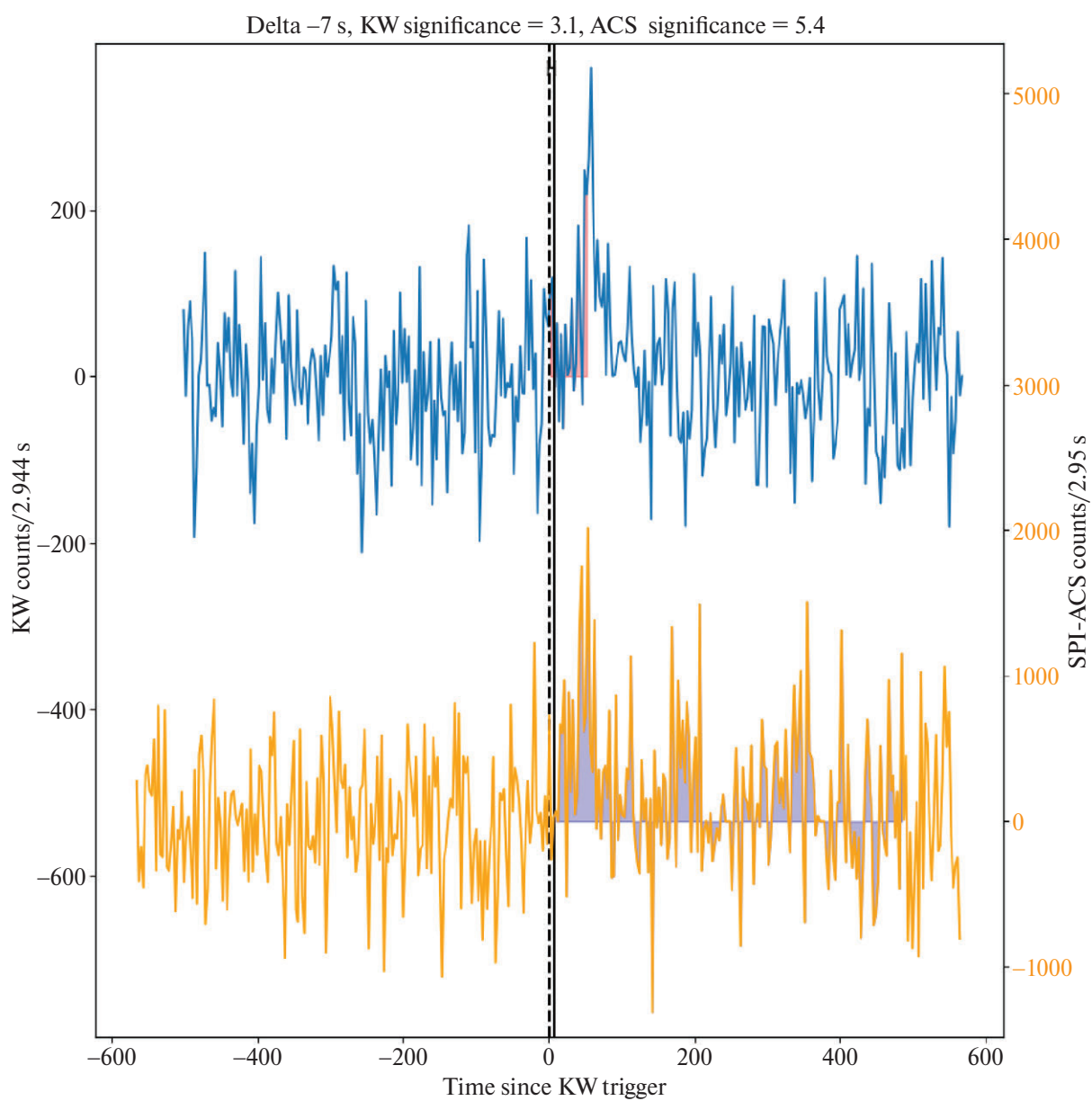


Рис. 19. То же, что на рис. 9, но для кандидата в гамма-всплески GRB 080226.

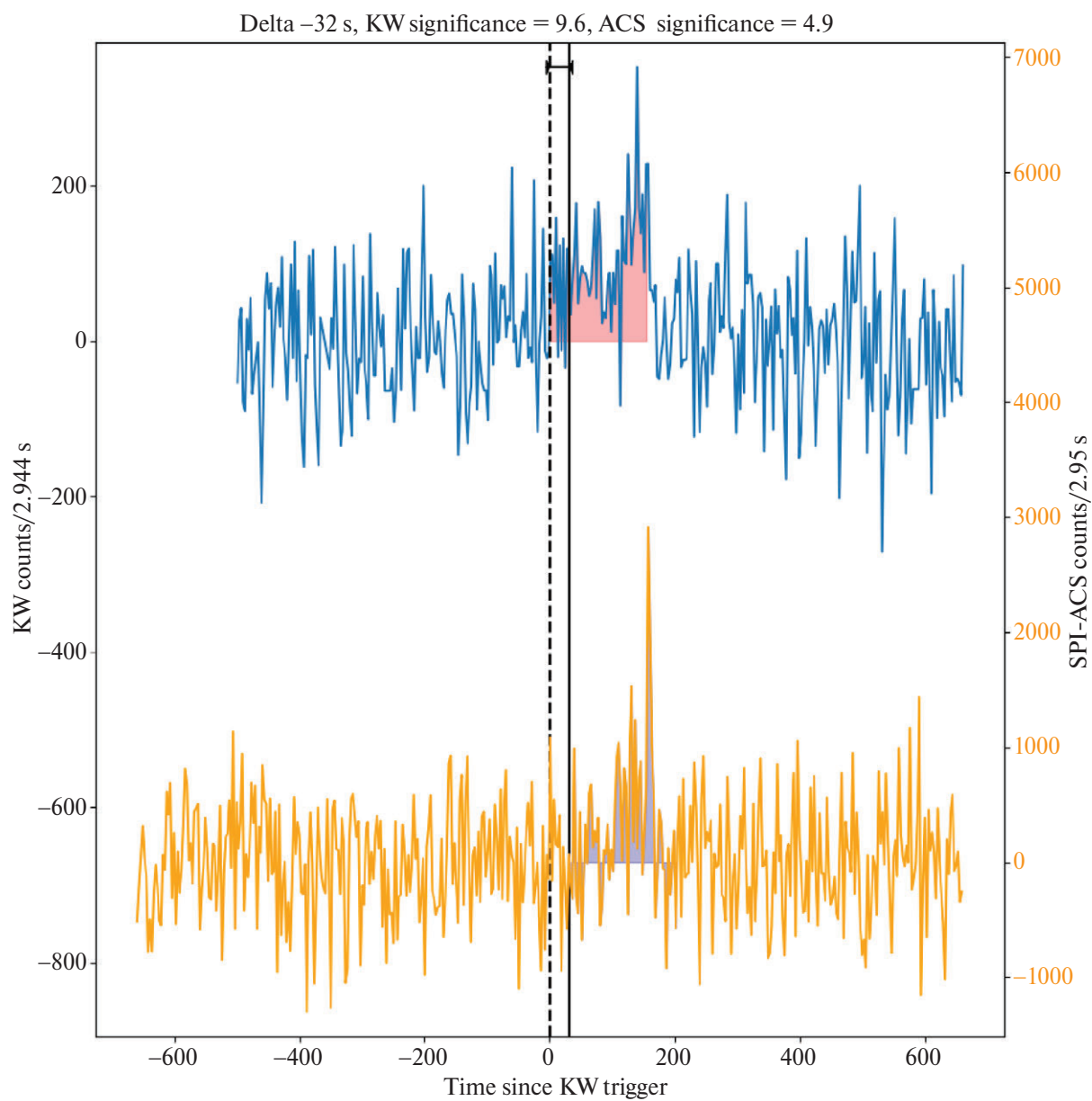


Рис. 20. То же, что на рис. 9, но для кандидата в гамма-всплески GRB 080413.

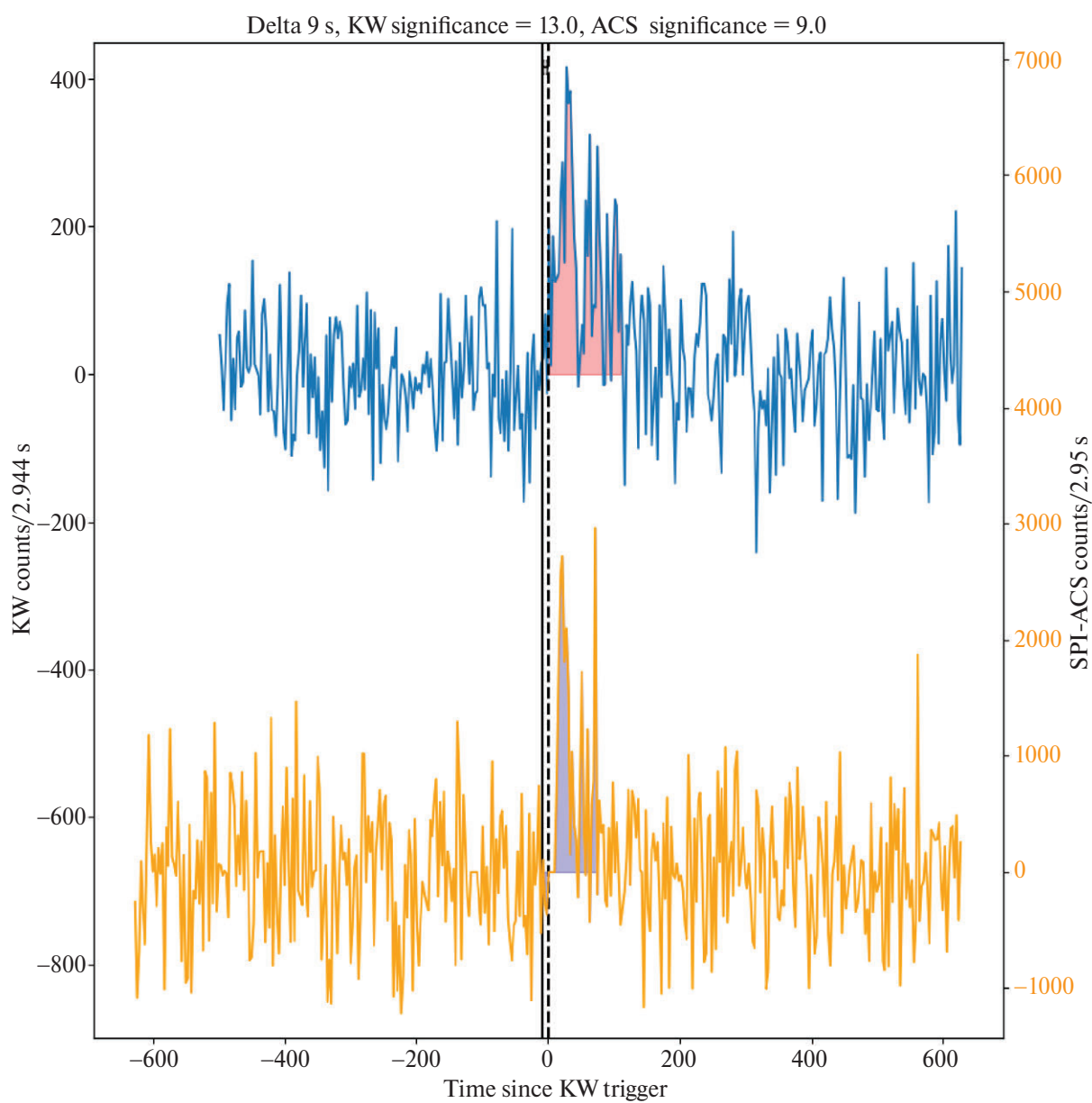


Рис. 21. То же, что на рис. 9, но для кандидата в гамма-всплески GRB 090323.

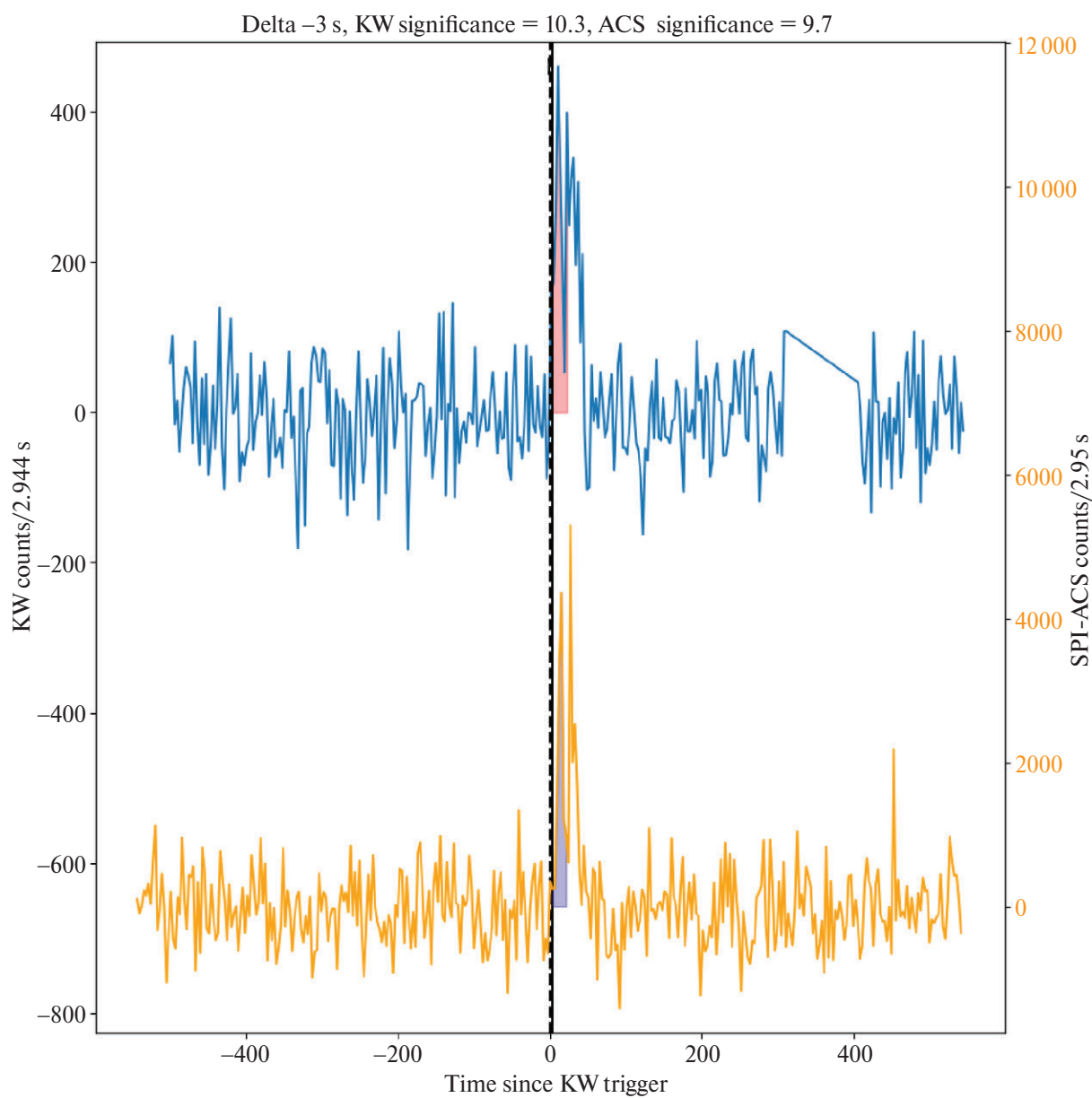


Рис. 22. То же, что на рис. 9, но для кандидата в гамма-всплески GRB 111231.

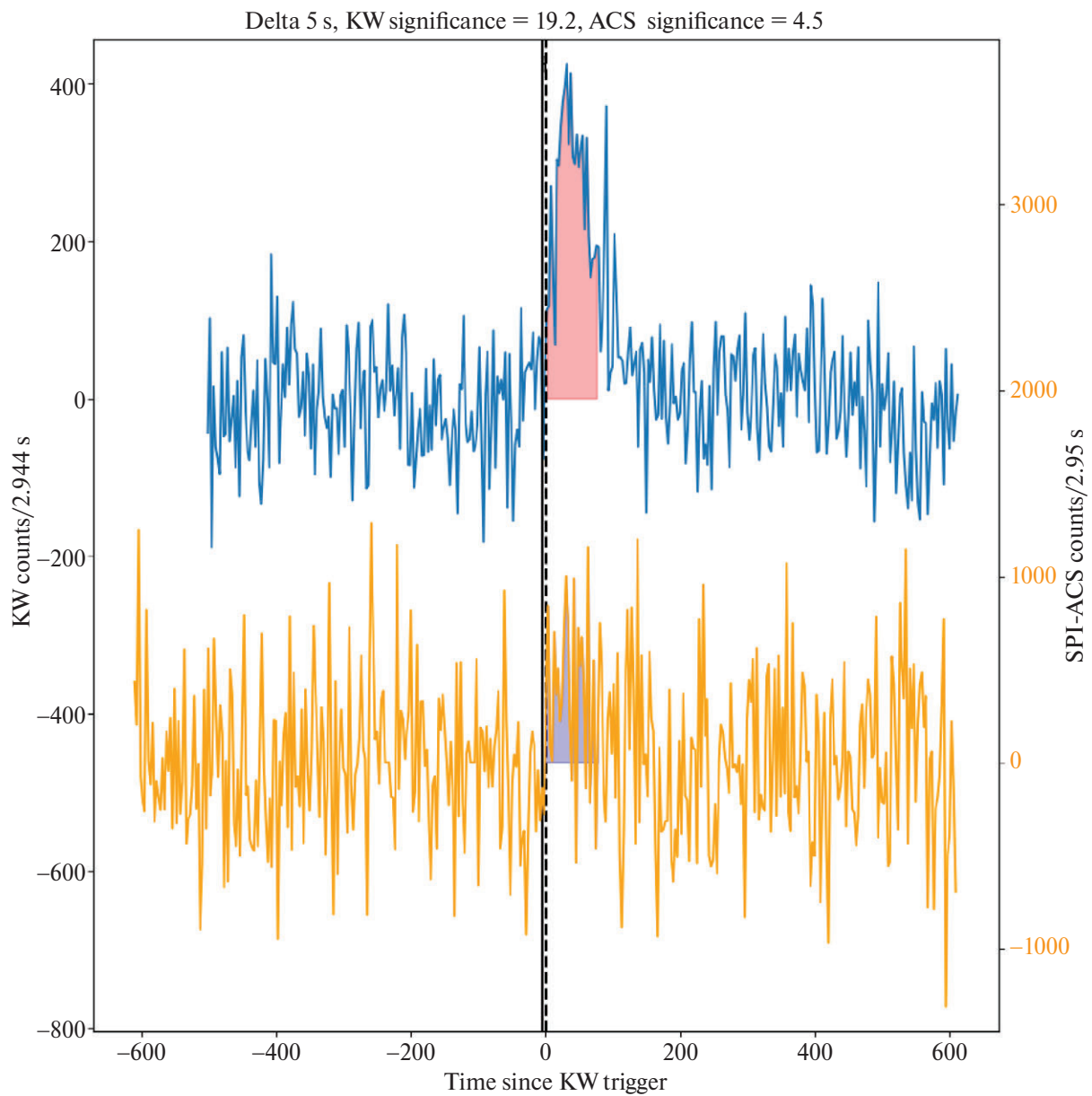


Рис. 23. То же, что на рис. 9, но для кандидата в гамма-всплески GRB 151120.