

Короткие транзиентные гамма-события в эксперименте SPI/INTEGRAL: поиск, классификация и интерпретация

© П.Ю. Минаев

© А.С. Позаненко

Институт космических исследований Российской академии наук,
Москва, Россия

minaevp@mail.ru

apozanen@iki.rssi.ru

Аннотация. Рассмотрены возможности поиска и анализа транзиентных гамма-событий различной природы в архивных данных гамма-спектрометра SPI космической обсерватории INTEGRAL. Обсуждены проблемы обработки массивов наблюдательных данных эксперимента, в том числе алгоритма поиска и методики автоматической классификации обнаруженных событий на основе комплекса критериев. Кратко приведены результаты анализа архивных данных эксперимента SPI/INTEGRAL, полученных за период 2003–2010 гг.

Ключевые слова: космические гамма-всплески, GRB, гамма-всплески земного происхождения, TGF, SGR, AXP, поиск, классификация, каталог, INTEGRAL/SPI.

Short Gamma-ray Transients in SPI/INTEGRAL: Search, Classification and Interpretation

© P.Yu. Minaev

© A.S. Pozanenko

Space Research Institute of Russian Academy of sciences,
Moscow, Russia

minaevp@mail.ru

apozanen@iki.rssi.ru

Abstract. The possibilities of searching and analyzing gamma-ray transients of various nature in the archival data of the SPI spectrometer of the INTEGRAL space observatory are considered. The problems of processing the arrays of row observational data of the experiment, including the search algorithm and the method of automatic classification of detected events based on a set of criteria are discussed. The results of the analysis of the archived data of the SPI / INTEGRAL experiment obtained for the period 2003–2010 are briefly presented.

Keywords: cosmic gamma-ray bursts, GRB, terrestrial gamma-ray flashes, TGF, SGR, AXP, search, classification, catalog, INTEGRAL/SPI.

1 Введение

Одной из актуальных задач современной астрофизики высоких энергий является исследование гамма-всплесков космического (GRB) и земного (TGF) происхождения. Космические гамма-всплески – одни из самых мощных взрывов во Вселенной – наблюдаются как спорадические вспышки гамма-излучения длительностью 0.1–100 с в энергетическом диапазоне выше 10 кэВ [1]. Гамма-всплески земного происхождения значительно короче (менее 1 мс). Считается, что они генерируются в верхней атмосфере Земли при пробое на убегающих электронах и сопровождаются грозовой активностью [2, 3].

Большинство современных космических гамма-телескопов (в том числе, спектрометр SPI/INTEGRAL) позволяет регистрировать отдельные гамма-кванты, записывая момент регистрации отсчета, его энергию и некоторые другие параметры (например, номер детектора или пикселя матрицы, в котором произошла регистрация) [1, 4]. Это открывает большие возможности в анализе наблюдательных данных, в том числе разработки алгоритмов поиска транзиентных событий различных типов, а также методики автоматической классификации обнаруженных событий по определенным критериям. Автоматическая классификация событий в рамках анализа значительных массивов данных (более 10 Тб для эксперимента SPI), накопленных за несколько лет наблюдений, имеет чрезвычайно большую роль вследствие огромного числа (более 15000 за год наблюдений) «ложных» срабатываний алгоритма поиска событий,

связанных с различными инструментальными эффектами (например, взаимодействие заряженных частиц с детектором).

В данной работе рассмотрены оригинальные алгоритмы поиска и классификации обнаруженных событий в архивных данных эксперимента SPI/INTEGRAL, а также интерпретация полученных результатов.

2 Эксперимент SPI/INTEGRAL

Обсерватория INTEGRAL была запущена 17 октября 2002 года на высокоэллиптическую орбиту (перигей начальной орбиты – 9 тыс. км, апогей – 153 тыс. км) с периодом 72 часа [5]. На обсерватории размещены два основных гамма-телескопа (IBIS/ISGRI, SPI) и несколько вспомогательных телескопов (JEM-X, OMC, SPI-ACS). Все апертурные телескопы (SPI, IBIS/ISGRI, JEM-X, OMC) соосны, но форма и размер полей зрения различны.

Гамма-спектрометр SPI состоит из 19 детекторов шестиугольной формы, изготовленных из сверхчистого германия, с общей геометрической площадью 508 см² [6]. Для построения изображений используется кодирующая маска, изготовленная из вольфрама. Спектральное разрешение спектрометра SPI/INTEGRAL достигает значения 2.2 кэВ @ 1.33 МэВ – одно из лучших на момент запуска обсерватории (2002 г). Энергетический диапазон чувствительности 20 кэВ – 8 МэВ. Полное поле зрения телескопа составляет 30°.

Для увеличения чувствительности телескопа SPI за счет устранения фона, связанного с взаимодействием аппаратуры с космическими лучами, используется антисовпадательная защита SPI-ACS, состоящая из 91 кристалла германата висмута (BGO) с эффективной площадью 0.3 м² [7].

3 Алгоритм поиска событий

Нами разработан собственный алгоритм поиска событий в архивных данных эксперимента SPI/INTEGRAL, полученных за период с 12 июля 2003 года по 23 января 2010 года.

Гамма-спектрометр SPI/INTEGRAL позволяет регистрировать отдельные гамма-кванты, записывая момент регистрации фотона, его энергию и номер детектора, в котором произошла регистрация. Поиск событий проводился в энергетическом диапазоне [20–650, 2000–8000] кэВ. Диапазон [650–2000] кэВ был исключен, поскольку значительная часть отсчетов в этом диапазоне связана с шумом электроники. Отбор событий производился на масштабах времени 0.001, 0.01, 0.1, 1 и 10 сек с порогами значимости 20, 6, 5, 5 и 4 σ , соответственно. Порог в 20 σ для интервала 0.001 сек выбран таким образом, чтобы за исследуемый период времени минимизировать количество флуктуаций так, чтобы при начальном отборе получить только события большой интенсивности. Только такие короткие события

длительностью 0.001 сек можно было бы обнаружить в данных других экспериментов (с более грубым временным разрешением).

При поиске событий использовалась сумма трех типов отсчетов. SGL – «обычный» отсчет, зарегистрированный в одном детекторе. PSD – отсчет, зарегистрированный в одном детекторе, форма импульса которого подтверждает его фотонную природу. DBL – отсчеты, которые зарегистрированы одновременно в двух различных детекторах вследствие комптоновского рассеяния исходного фотона внутри одного из детекторов.

Всего данным алгоритмом отобрано более ста тысяч событий на различных масштабах времени (от 1 мс до 10 сек). Для каждого обнаруженного события были построены кривая блеска и энергетическая диаграмма, проанализировано распределение отсчетов по детекторам, что затем было использовано для классификации событий.

4 Классификация обнаруженных событий

Для классификации событий, обнаруженных в эксперименте SPI, были использованы данные антисовпадательной защиты SPI-ACS и телескопа IBIS/ISGRI, также размещенных на обсерватории INTEGRAL.

Выделено три класса событий: флуктуации, кандидаты в «реальные» гамма-события (например, гамма-всплески) и 3 типа инструментальных явлений, связанных с взаимодействием детектора с заряженными частицами (взаимодействия с пучками электронов, протонами и галактическими космическими лучами высоких энергий). События типа «флуктуации», как правило, были обнаружены на пороге значимости и отсутствуют в данных других космических телескопов (в первую очередь – в данных экспериментов IBIS/ISGRI и SPI-ACS) и поэтому исключались из анализа.

Классификация построена на основе следующих критериев:

Длительность. Для космических гамма-всплесков значение этого параметра обычно лежит в пределах (0.1, 100) сек, для гамма-всплесков земного происхождения – в пределах (0.1, 1) мс, для вспышек источников SGR и AXP – в интервале (0.01, 3) сек. События, связанные с взаимодействием детекторов с заряженными частицами, в зависимости от типа имеют длительность от долей миллисекунд до долей секунды.

Вид энергетического спектра. В качестве параметра, характеризующего жесткость энергетического спектра, использовалось отношение отсчетов в диапазоне (100, 1000) кэВ к отсчетам в диапазоне (20, 100) кэВ. Для вспышек источников SGR и AXP значение данного параметра значительно меньше единицы. Спектры гамма-всплесков отличаются большим разнообразием – значение параметра жесткости может изменяться в широких пределах и составляет, в среднем, около единицы. Для

взаимодействий детекторов с заряженными частицами, в зависимости от типа, значение этого параметра либо значительно меньше единицы, либо значительно больше единицы.

Распределение отсчетов по детекторам. Для количественной оценки распределения отсчетов события по детекторам использовалось отношение максимальной скорости счета в одном детекторе к среднему значению скорости счета. Для «реальных» гамма-событий (гамма-всплесков, вспышек источников SGR и AXP), находящихся в поле зрения телескопа SPI (в том числе, для событий на краю поля зрения), значение этого параметра, как правило, лежит в интервале (1–3). Для событий второго типа взаимодействий детекторов с заряженными частицами значение этого критерия значительно превышает значение 3.

Характер спектральной эволюции служил в качестве дополнительного критерия для отбора событий, связанных с взаимодействием детекторов с заряженными частицами. Для большинства «реальных» событий характерна эволюция энергетического спектра – от жесткого к мягкому. Эволюция спектра событий, связанных с взаимодействием детекторов SPI с (предположительно) протонами, имеет, как правило, прямо противоположный характер. События, связанные с взаимодействием детекторов SPI с (предположительно) галактическими космическими лучами высоких энергий, наблюдаются в виде спектральных линий с энергиями 55, 64, и 198 кэВ, соответствующих ядерным реакциям захвата тепловых нейтронов ядрами Ge [8], когда нейтроны рождаются в результате каскадных реакций. Для отбора событий такого типа также введен параметр, представляющий собой отношение количества отсчетов в интервале (0, 50) мс относительно триггера к отсчетам в интервале (–50, 0) мс в узком диапазоне энергий (195, 201) кэВ. Данный критерий применялся лишь для отбора событий на масштабах времени 10 и 100 мс, поскольку события такого типа имеют длительность, в среднем, около 50 мс.

Особенности темпа регистрации. Большая часть вспышек источников SGR и AXP наблюдается в течение активности соответствующего источника, которая длится около месяца. Крайне неравномерный темп регистрации характерен для событий, связанных с взаимодействием детекторов SPI с протонами и пучками электронов. Темп регистрации гамма-всплесков – равномерный. Это связано с их космологической природой.

Обнаружение события в данных SPI-ACS, IBIS/ISGRI и других экспериментов. Большая часть (более 90%) «реальных» гамма-событий (подтвержденных другими космическими экспериментами) также обнаружена в данных IBIS/ISGRI, и около трети событий – в данных SPI-ACS. Обнаружение и локализация события в данных IBIS/ISGRI являются надежным

признаком «реального» гамма-события. Часть событий, связанных с взаимодействием детекторов SPI с пучками электронов (около 30% событий) и галактическими космическими лучами высоких энергий (около 70% событий), обнаружены в данных SPI-ACS. Для событий-кандидатов в реальные гамма-события проведен поиск подтверждений в известных каталогах гамма-транзиентов [9–11].

5 Результаты

Рассмотрим детально свойства различных типов обнаруженных событий.

5.1 Флуктуации

Для этого типа характерно квазиравномерное распределение отсчетов по детекторам и по энергиям. Профиль кривой блеска также не выявляет каких-либо особенностей. В эту категорию входят также срабатывания, которые не удастся отнести к другому классу событий. Все события этого типа исключены из дальнейшего анализа.

5.2 Взаимодействие детекторов SPI с высокоэнергичными протонами

Срабатывания данного типа легко идентифицировать, поскольку они обладают сразу несколькими наблюдательными особенностями. Пример такого события представлен на Рис. 1.

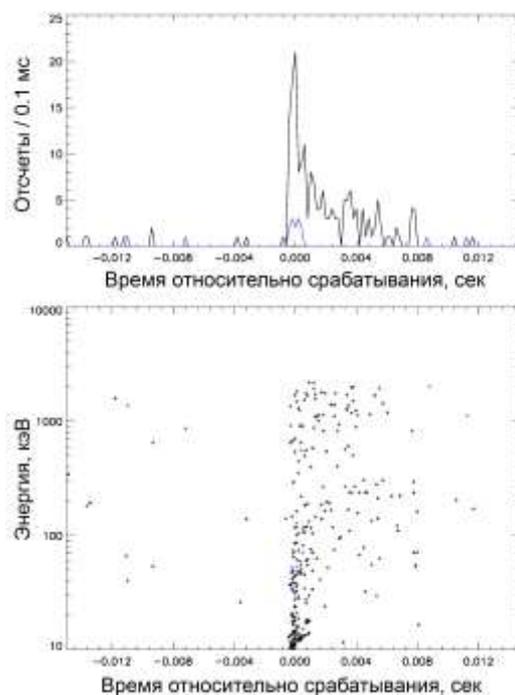


Рисунок 1 Событие, связанное с взаимодействием детекторов SPI с высокоэнергичным протоном. В верхней части рисунка – кривая блеска в диапазоне 20 кэВ – 8 МэВ. В нижней части рисунка – соответствующая кривой блеска энергетическая диаграмма. Черным цветом показаны SGL- и PSD-отсчеты, синим

DBL-отсчеты

Длительность составляет в среднем около 10 мс. Форма кривой блеска обычно несимметричная и характеризуется быстрым ростом и медленным экспоненциальным спадом. Главная особенность – крайне неравномерное распределение отсчетов по детекторам. Энергетический спектр, как правило, жесткий, с резким обрывом на 2 МэВ, причем жесткость спектра растет со временем. Темп регистрации событий этого типа неравномерный – наблюдается несколько достаточно коротких эпизодов активной регистрации длительностью 1–2 дня каждый, в промежутках между которыми события не регистрируются.

Мы предполагаем, что эти события связаны с взаимодействием детекторов с высокоэнергичными частицами космических лучей (вероятно, протонами), которые генерируют ливень вторичных частиц в одном из германиевых детекторов SPI, которые затем им же и регистрируются.

5.3 Взаимодействие детекторов SPI с пучками электронов

Пример события данного типа приведен на Рис. 2. Длительность в большинстве случаев не превышает 1–2 мс, однако встречаются более длинные события, состоящие из отдельных миллисекундных импульсов. Форма импульсов в большинстве случаев симметричная. Энергетический спектр – мягкий, с завалом на 100 кэВ. Распределение отсчетов по детекторам – равномерное. Около трети событий обнаружено в данных SPI-ACS и представляют собой короткие импульсы длительностью 50 мс.

Темп регистрации событий неравномерный: наблюдается несколько периодов активной регистрации длительностью около месяца каждый. В промежутки времени между этими эпизодами события практически не регистрируются. Темп регистрации периодичен и меняется с периодом 3 сут (период обращения обсерватории INTEGRAL вокруг Земли). Вероятно, что эти события регистрируются в те моменты, когда орбита обсерватории пересекает хвост магнитосферы Земли, и связаны с взаимодействием детекторов с пучками электронов внешнего радиационного пояса.

5.4 Спектральные линии 53 кэВ, 66 кэВ, 198 кэВ

Данный тип событий связан с кратковременным значительным увеличением скорости счета в фоновых спектральных линиях 198 кэВ, 53 кэВ и 66 кэВ, вызванных следующими ядерными реакциями захвата тепловых нейтронов:
 $^{70}\text{Ge}+n > ^{71\text{m}}\text{Ge}$ (время жизни ≈ 20.4 мс) $> ^{71}\text{Ge}+\gamma$
двухступенчатое излучение $175+23=198$ кэВ [8];
 $^{72}\text{Ge}+n > ^{73\text{m}}\text{Ge}$ (время жизни 0.5 с) $> ^{72}\text{Ge}+\gamma$ 53 кэВ [8].

$^{72}\text{Ge}+n > ^{73\text{m}}\text{Ge} > ^{72}\text{Ge}+\gamma$ двухступенчатое

излучение $53+13=66$ кэВ [8].

Длительность транзитного излучения в линии 198 кэВ составляет десятки мс. Транзитное излучение в спектральных линиях 53 кэВ и 66 кэВ наблюдается не во всех случаях. Длительность интенсивного излучения в этих линиях может составлять несколько секунд.

Событиям этого класса в 25% случаев сопутствует «насыщение» германиевых детекторов SPI – отсутствие сигнала в одном или нескольких соседних детекторах в течение нескольких секунд. Природа насыщения не ясна.

Темп регистрации – квазиравномерный на уровне около 2 событий в сутки.

Более 70% событий наблюдаются также в данных SPI-ACS. В [12] показано, что кристаллы BGO, из которых состоит SPI-ACS, в результате взаимодействия с космическими лучами (ядерные реакции скалывания) испускают вторичные нейтроны, которые, в свою очередь, термализуются и захватываются ядрами Ge детекторов эксперимента SPI. Вероятно, рассмотренные события связаны с взаимодействием наиболее энергичных галактических космических лучей, генерирующих мощный каскад вторичных частиц в SPI-ACS и регистрируемых затем детекторами SPI.

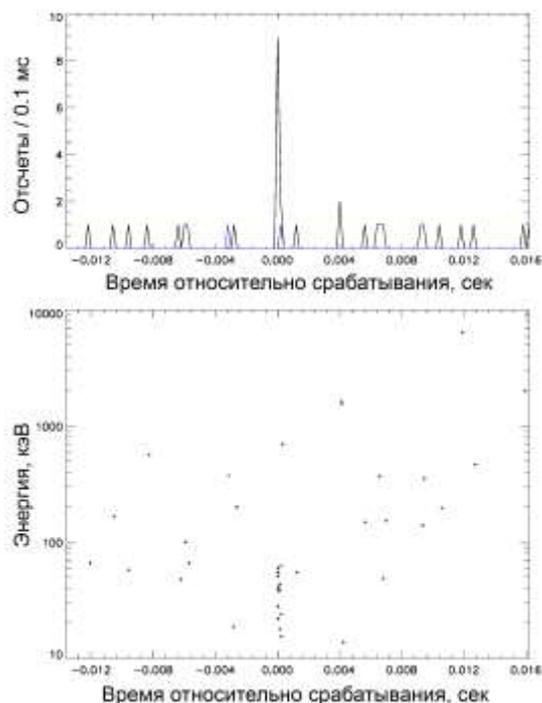


Рисунок 2 Событие, связанное с взаимодействием детекторов SPI с пучком электронов магнитосферы Земли. То же, что на Рис. 1

5.5 Кандидаты в гамма-всплески земного происхождения

Для исследования диффузного рентгеновского фона обсерваторией INTEGRAL был произведен ряд наблюдений, когда в апертуру телескопов на

борту обсерватории попадала Земля. Мы использовали эти данные общей длительностью 496 кс для поиска гамма-всплесков земного происхождения (TGF). Всего было отобрано 28 кандидатов на основе известных свойств TGF: длительность ≤ 1 мс, энергетический спектр – жесткий, с регистрацией фотонов свыше 1 МэВ, форма кривой блеска – симметричная, спектральная эволюция отсутствует, распределение зарегистрированных отсчетов по детекторам SPI – квазиравномерное. Один из кандидатов представлен на Рис. 3. Детальное исследование кандидатов в TGF, обнаруженных в данных SPI/INTEGRAL, см. в [13].

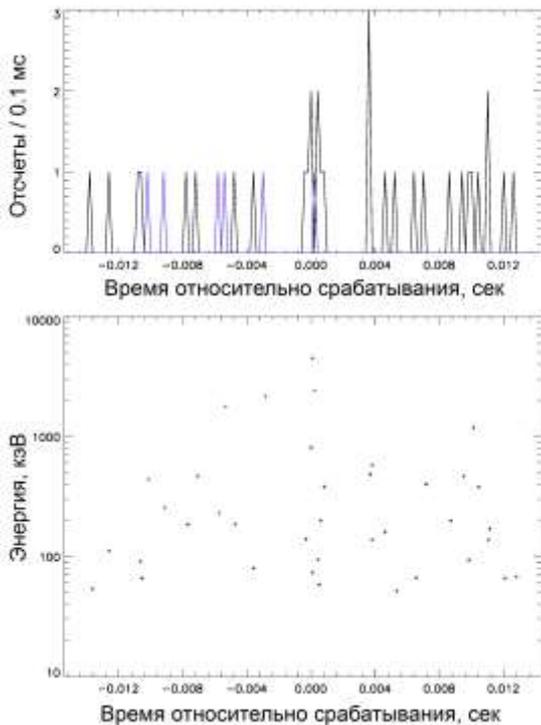


Рисунок 3 Пример кандидата в гамма-всплеск земного происхождения (TGF). То же, что на Рис.1

5.6 Вспышки источников SGR 1806-20 и AXP 1E_1547.0-5408

Были обнаружены 223 вспышки источника мягкого повторного гамма-излучения SGR 1806-20 (Рис. 4) и 23 вспышки аномального рентгеновского пульсара AXP 1E_1547.0-5408, которые были обнаружены и локализованы в эксперименте IBIS/ISGRI (см. таблицы 1–3 в [1]). Часть событий также обнаружена в данных SPI-ACS.

Кроме того, составлен список из 90 кандидатов во вспышки источников повторного мягкого излучения (SGR и AXP), отобранных в соответствии с наблюдаемыми свойствами подтвержденных вспышек источников типа SGR, а именно: длительность отдельных импульсов события находится в пределах (0.01–3) сек; доля фотонов с энергией выше 200 кэВ пренебрежимо мала (мягкий спектр); распределение по детекторам близко к равномерному.

5.7 Космические гамма-всплески

Было обнаружено 48 космических гамма-всплесков, подтвержденных другими космическими экспериментами (см. таблицы 4–6 в [1]). На Рис. 5 представлены кривая блеска и энергетическая диаграмма для гамма-всплеска GRB 050525.

Помимо подтвержденных гамма-всплесков было отобрано 160 кандидатов (см. таблицу 7 в [1]), из них 151 событие относится к коротким вспышкам с длительностью менее 2 сек. Кандидаты отбирались в соответствии с наблюдаемыми свойствами гамма-всплесков, подтвержденных другими космическими телескопами, а именно: длительность отдельных импульсов события – более 5 мс; жесткий энергетический спектр у событий с длительностью менее 2 сек (данный критерий также позволяет отсеивать события, связанные с активностью источников повторного мягкого гамма-излучения SGR); распределение по детекторам близко к равномерному.

Детали исследования космических гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте SPI/INTEGRAL, в том числе спектральный анализ, исследование спектральной эволюции и распределения гамма-всплесков по длительности, см. в работах [1, 14].

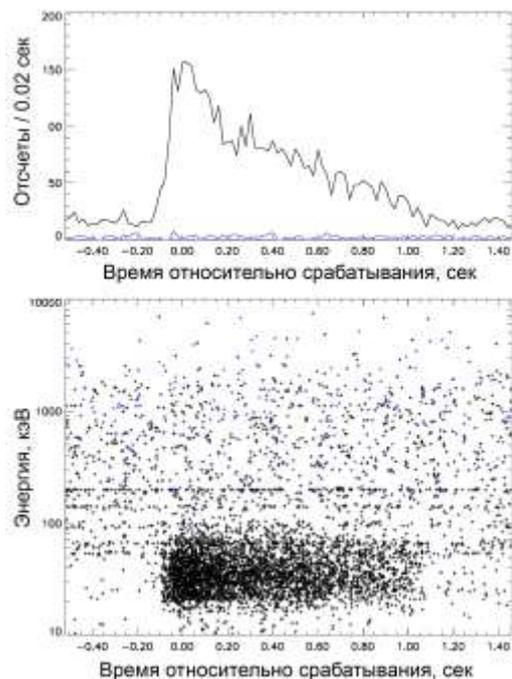


Рисунок 4 Пример вспышки источника SGR 1806-20. То же, что на Рис. 1

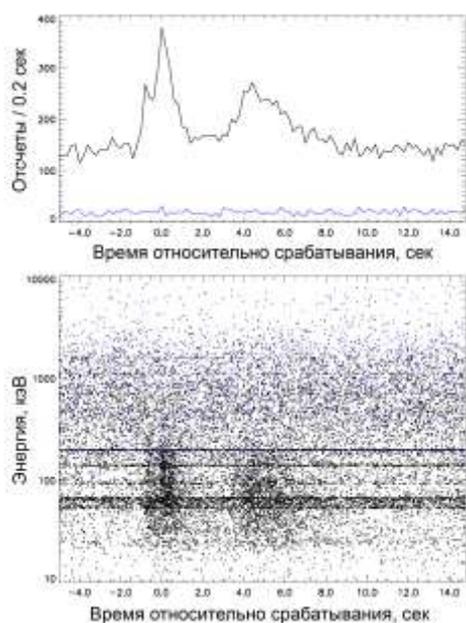


Рисунок 5 Космический гамма-всплеск GRB 050525. То же, что на Рис. 1

6 Заключение

Проведено комплексное исследование архивных наблюдательных данных гамма-спектрометра SPI, накопленных за 7 лет работы обсерватории INTEGRAL.

Предложен алгоритм поиска транзитных событий на различных временных масштабах от 1 мс до 10 сек, с помощью которого было обнаружено более 100 000 событий. Разработана методика классификации обнаруженных событий на основе ряда критериев, которая может применяться автоматически непосредственно после обнаружения события в наблюдательных данных.

Выделены три класса событий: флуктуации; «реальные» гамма-события (гамма-всплески космического (GRB) и земного (TGF) происхождения, вспышки источников SGR и АХР); три типа инструментальных явлений, связанных с взаимодействием детектора с заряженными частицами (взаимодействия с пучками электронов, протонами, и галактическими космическими лучами высоких энергий).

Составлены каталоги космических гамма-всплесков и вспышек источников SGR 1806-20 и АХР 1E_1547.0-5408.

Благодарности

Работа поддержана грантом РФФИ (проект 16-32-00489 мол_а) и частично грантами РФФИ 17-02-01388, 16-07-01028.

Литература

[1] Minaev, P.Yu., Pozanenko, A.S., Molkov, S.V., Grebenev, S.A.: Catalog of Short Gamma-ray Transients Detected in the SPI/INTEGRAL

Experiment. *Astronomy Letters*, 40, p. 235 (2014)

[2] Gurevich, A.V., Milikh, G.M., Roussel-Dupre, R.: Runaway Electron Mechanism of Air Breakdown and Preconditioning During a Thunderstorm. *Physics Letters A*, 165, pp. 463-468 (1992)

[3] Briggs, M.S., Xiong, S., Connaughton, V. et al.: Terrestrial Gamma-ray Flashes in the Fermi Era: Improved Observations and Analysis Methods. *J. of Geophysical Research* (2013). doi: 10.1002/jgra.50205

[4] Vedrenne, G., Roques, J.-P., Schönfelder, V. et al.: SPI: The Spectrometer Aboard INTEGRAL. *Astronomy and Astrophysics*, 411, L63-L70 (2003)

[5] Winkler, C., Courvoisier, T. J.-L., Di Cocco, G. et al.: The INTEGRAL Mission. *Astronomy and Astrophysics*, 411, L1-L6 (2003)

[6] Vedrenne, G., Roques, J.-P., Schönfelder, V. et al.: SPI: The Spectrometer Aboard INTEGRAL. *Astronomy and Astrophysics*, 411, L63-L70 (2003)

[7] von Kienlin, A., Beckmann, V., Rau, A. et al.: INTEGRAL Spectrometer SPI's GRB Detection Capabilities. GRBs Detected Inside SPI's FoV and with the Anticoincidence System ACS. *Astronomy and Astrophysics*, 411, L299-L305 (2003)

[8] Weidenspointner, G., Harris, M.J., Sturmer, S. et al.: MGGPOD: a Monte Carlo Suite for Modeling Instrumental Line and Continuum Backgrounds in Gamma-Ray Astronomy. *Astrophys. J. Suppl.*, 156 (69), astro-ph/0408399 (2005)

[9] Chelovekov, I.V., Grebenev, S.A.: Hard X-ray Bursts Recorded by the IBIS Telescope of the INTEGRAL Observatory in 2003-2009. *Astronomy Letters*. 37, p. 597, arXiv:astro-ph.HE/1108.2421 (2011)

[10] IBAS IBIS/ISGRI triggers: <http://ibas.iasf-milano.inaf.it/>

[11] Hurley, K.: Masterlist, <http://www.ssl.berkeley.edu/ipn3/chronological.txt>

[12] Jean, P., von Ballmoos, P., Vedrenne, G., Naya, J.E.: Performance of Advanced Geospectrometer for Nuclear Astrophysics. *Gamma-Ray and Cosmic-Ray Detectors, Techniques, and Missions*. Ed. by B.D. Ramsey, T.A. Parnell. Vol. 2806 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, p. 457 (1996)

[13] Минаев, П.Ю., Позаненко, А.С., Гребнев, С.А., Мольков, С.В.: Возможности и оценки наблюдений гамма-всплесков земного происхождения (TGF) космической обсерваторией INTEGRAL. (в печати)

[14] Minaev, P.Yu., Grebenev, S.A., Pozanenko, A.S. et al.: GRB 070912 – A gamma-ray Burst Recorded from the Direction to the Galactic Center. *Astronomy Letters*, 38, pp. 613 (2012)