

Методика поиска и выделения событий ШАЛ в данных прототипа широкоугольного телескопа SIT

А. В. Пантюхин^{1,*}, А. А. Аминаева^{1,†}, Д. А. Подгрудков^{1,2‡}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики космоса
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцина (НИИЯФ МГУ)
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

(Поступила в редакцию 30.05.2023; подписана в печать 28.09.2023)

Small Imaging Telescope (SIT) — прототип широкоугольного телескопа с апертурой около 0.1 м², оснащенный матрицей из SiPM, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с вакуумными фотоэлектронными умножителями. В данной работе представлена методика поиска и выделения событий ШАЛ в эксперименте SIT, работающего в связке с комплексом HiSCORE. Были проанализированы данные за 2019–2022 гг., всего около 7 млн. кадров, среди которых было обнаружено около 2 млн. событий от ШАЛ. Поиск проводился в несколько этапов: первичная калибровка кадров по синхронимпульсу, поиск событий и их очистка по методике, приведенной в работе.

PACS: 29.40.Ka, 96.50.S-, 95.55.Ka, 07.05.Rm УДК: 524.1, 53.08

Ключевые слова: черенковский телескоп, обработка данных.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на все преимущества метода косвенного исследования гамма-астрономических явлений с помощью черенковских телескопов (IACT, Imaging Atmospheric Cherenkov Technique) [1], у него есть недостатки, связанные с проблемой набора статистики в диапазоне очень высоких энергий. Существует несколько путей решения этой проблемы — это либо увеличение площади, на которой ведётся регистрация, т. е. увеличение количества телескопов, либо увеличение области наблюдаемого неба. Существует несколько подходов к реализации этих методов. Вариантом увеличения угла обзора может послужить подход High Altitude Water Cherenkov Experiment (HAWC) [2]. Другой подход — увеличение площади регистрации — исследуется в гамма-обсерватории Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy (TAIGA) [3], где реализуется совместная работа обычных IACT (TAIGA-IACT) [4] с широкоугольными черенковскими детекторами TAIGA-HiSCORE [5]. С помощью этого подхода можно существенно уменьшить количество используемых в массиве телескопов, при этом сохранив площадь покрытия. Однако и у этой реализации есть минус, связанный с большой разницей в апертуре между IACT и HiSCORE. Из-за этого только 4 % [6] всех событий, зарегистрированных HiSCORE, также регистрируются и IACT. С целью устранения этого недостатка на базе комплекса TAIGA производится тестирование совершенно нового прототипа телескопа SIT.

SIT — прототип малого широкоугольного телескопа (Small Imaging Telescope). Телескоп установлен в оптический контейнер HiSCORE (станция №17). Детектор построен по упрощенной оптической схеме Шмидта (без пластины-корректора) с полным углом обзора 16° [6]. SIT состоит из диафрагмы с диаметром в 400 мм, шестиугольного зеркала и светочувствительной матрицы. Зеркало имеет диаметр 700 мм и радиус кривизны в 940 мм. Матрица делится на семь сегментов шестиугольной формы, на каждом из которых расположено по 7 кремниевых фотоумножителей (SiPM) MicroFC-SMTPA-60035, всего 49 штук. У этих SiPM очень быстрый отклик и чувствительная область 6×6 мм² [7]. Устройство детектора можно увидеть на рис. 1.

Связь между SIT и HiSCORE осуществляется с помощью таймеров на обеих установках. Триггерный сигнал от SIT передается по кабелю к HiSCORE, где время прибытия записывается и сохраняется. SIT работает с 2019 г. и уже успел собрать большую статистику. Так, например, в первый год своей работы было зарегистрировано почти 2 миллиона кадров, часть событий была также одновременно зарегистрирована с помощью HiSCORE [8].

В настоящее время в большинстве IACT используются фотоэлектронные умножители, однако в данном прототипе используются именно кремниевые фотоумножители, у которых есть несколько преимуществ по сравнению с фотоэлектронными умножителями. Например, они не деградируют под действием прямого света, требуют меньшее рабочее напряжение, компактны и имеют малую мощность потребления. Они также используются в других экспериментах, например, в MAGIC II [9], CTA [10] и FACT [11].

* pantiukhin.av19@physics.msu.ru

† amineva.aa19@physics.msu.ru

‡ d.a.podgrudkov@physics.msu.ru

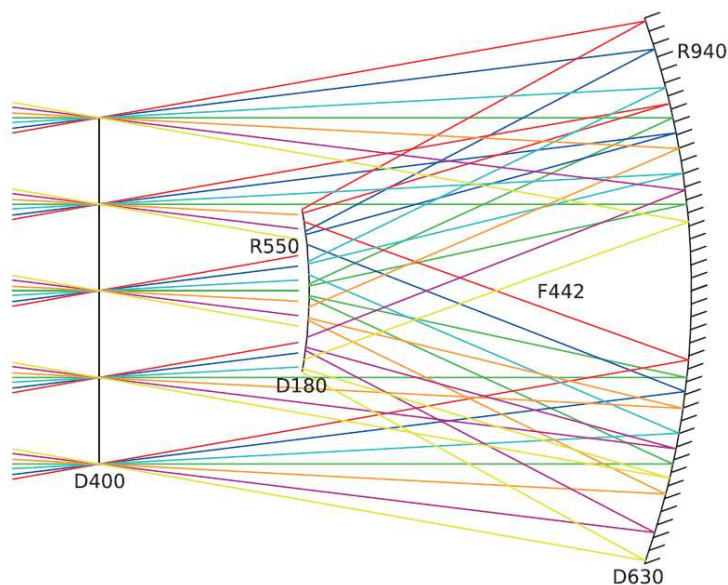


Рис. 1. Фотография детектора (слева). Оптическая схема прототипа, рядом с элементами указаны размеры (справа). Разными цветами обозначены разные углы падения света на детектор. Изображения взяты из [6]

1. СТРУКТУРА ДАННЫХ ПРОТОТИПА SIT

Прототип детектора во время работы фиксирует множество различных параметров своего состояния: напряжение питания на элементах, средний ток с матрицы SiPM, температуры матрицы, окружающей ее среды и плат электроники, частоты срабатывания дискриминаторов на пикселях и пр. Эти данные пишутся в файлы телеметрии с разной частотой: раз в секунду, раз в десять секунд, раз в минуту, раз в десять минут. При обработке и анализе данных можно получить информацию о его состоянии в любой момент времени.

При срабатывании триггера информация о токах в SiPM пишется отдельно в бинарный файл событий. Событие записывается в виде кадра. Каждый кадр представляет собой развертку токов из 49 рабочих каналов (а также нескольких служебных каналов), как представлено на рис. 2. Длина развертки составляет 800 бин. В данной работе бин времени — шаг оцифровки сигнала, который равен 12.5 нс. В служебный канал №64 писался код синхронизации с установкой HiSCORE.

В конце каждого кадра (его длина по времени составляет около 8 мкс) подавался синхроимпульс (200–300 нс), который нужен для синхронизации работы всей электроники. Его амплитуда значительно превышает любые шумы и сигналы от события, поэтому его положение можно определить с хорошей точностью. На определенном расстоянии по времени от синхроимпульса (4–5 мкс) может находиться полезный сигнал, который и представляет наибольший интерес при анализе событий. В кадре также могут присутствовать

различные шумы, такие как: тепловой шум SiPM или фотоэлектроны от фоновой засветки, которые проявляют себя по-разному.

Электроника SIT настроена таким образом, что при регистрации превышения заранее выставленного порога в результирующий кадр попадает часть времени до превышения порога (примерно 1 мкс), и часть времени после (примерно 7 мкс) вплоть до синхроимпульса.

2. МЕТОДИКА ПОИСКА И ВЫДЕЛЕНИЯ СОБЫТИЙ

2.1. Общее описание методики

В схожем с SIT эксперименте FАСТ поиск полезного сигнала и нахождение его характеристик происходит следующим образом [12]. Сначала находятся связанные (смежные друг с другом) пиксели, которые по амплитуде превышают определенное пороговое значение. Эти пиксели в дальнейшем становятся «основными» пикселями изображения ливня. Далее находятся пиксели, амплитуда которых выше чем какое-то нижнее (шумовое) значение. Они классифицируются как «использованные» пиксели. После очистки должны остаться только «основные» пиксели, окруженные «использованными».

Эти пиксели обязательно должны находиться рядом, то есть возможен случай, когда самые большие по значению пиксели изолированы, и от них избавляются при очистке. Дальше производится очистка по времени, так как события должны быть достаточно изохрон-

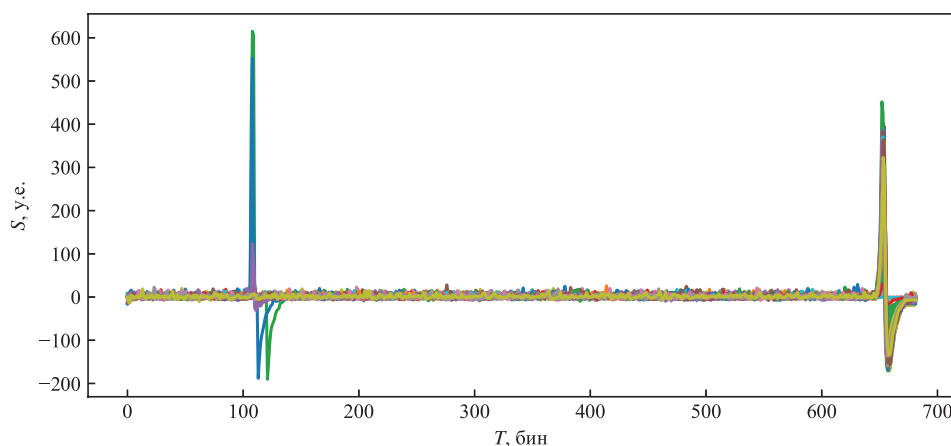


Рис. 2. Развертка кадра №5723620, зарегистрированного 3 февраля 2022 года. Разными цветами обозначены токи в разных каналах

ными. В данном случае два соседних пикселя должны отличаться друг от друга по времени не более, чем на 1.75 нс.

Данная методика была адаптирована и модифицирована специально под прототип SIT, учитывая его особенности (малое число пикселей в камере и малая апертура прототипа). Таким образом, относительно методики FACT остается только один порог для поиска сработавших пикселей, то есть нет деления на основные и шумовые пиксели, что приводит к тому, что сразу начинается этап очистки от изолированных пикселей. Также отличается порог по времени для очистки события.

Итого методика включает в себя следующие этапы:

1. выравнивание каналов по синхроимпульсу;
2. поиск события в районе триггера;
3. восстановление параметров импульса в каждом канале в районе события;
4. очистка события от изолированных пикселей в пространстве;
5. очистка события от изолированных по времени пикселей;
6. реконструкция параметров события.

2.2. Выравнивание каналов по синхроимпульсу

Как уже было описано выше, синхроимпульс нужен для синхронизации работы электроники. Через фиксированное время после срабатывания триггера установки синхроимпульс генерируется вспышкой светодиодов, расположенных на зеркале и направленных на матрицу SiPM. Таким образом на фотоумножители матрицы свет от синхроимпульса попадает изохронно

и регистрироваться в каналах он должен также строго одновременно. Однако из-за особенностей работы электроники — в частности, это связано с работой буфера, линии задержки и системы сбора данных — полезный сигнал от события и синхроимпульса записывается из каналов в память с небольшой случайной задержкой, т. е. каналы «разъезжаются» во времени, возникает сдвиг по времени между каналами, как представлено на рис. 3, а. Для того, чтобы правильно отследить время прихода события, нужно выровнять каналы по времени к эталонному значению. Эталонное время T_e определяется для каждого кадра отдельно средним значением времени синхроимпульса среди всех каналов.

Так как синхроимпульс расположен в конце кадра, то все взаимодействия, описанные ниже, производились в конце развертки.

Пример работы с импульсами в канале описан на рис. 4. В данной работе исследовались только положительные части импульсов. Максимум T_{\max} — максимальное значение импульса в канале в данном районе, «центр масс» T_c — средневзвешенный индекс бина по времени.

Выравнивание каждого канала к эталонному времени T_e происходило следующим образом. Сначала находилось максимальное значение T_{\max} в конце развертки в канале (в районе 600–700 бин). Относительно него находились начало и конец синхроимпульса. Далее находились его «центр масс» T_c . После нахождения положения синхроимпульсов в каждом канале, определялось эталонное время T_e . Далее центры масс импульсов T_c сдвигались к эталонному значению T_e на целое число бин (дробный остаток сохраняется для дальнейшего анализа), а развертка в канале дополнялась нулями. На рисунке 3б можно увидеть изменения, которые произошли с синхроимпульсом после этой процедуры.

В результате выравнивания по синхроимпульсу немного изменялось и положение импульсов в начале кадра. Район события изменился с района, приведен-

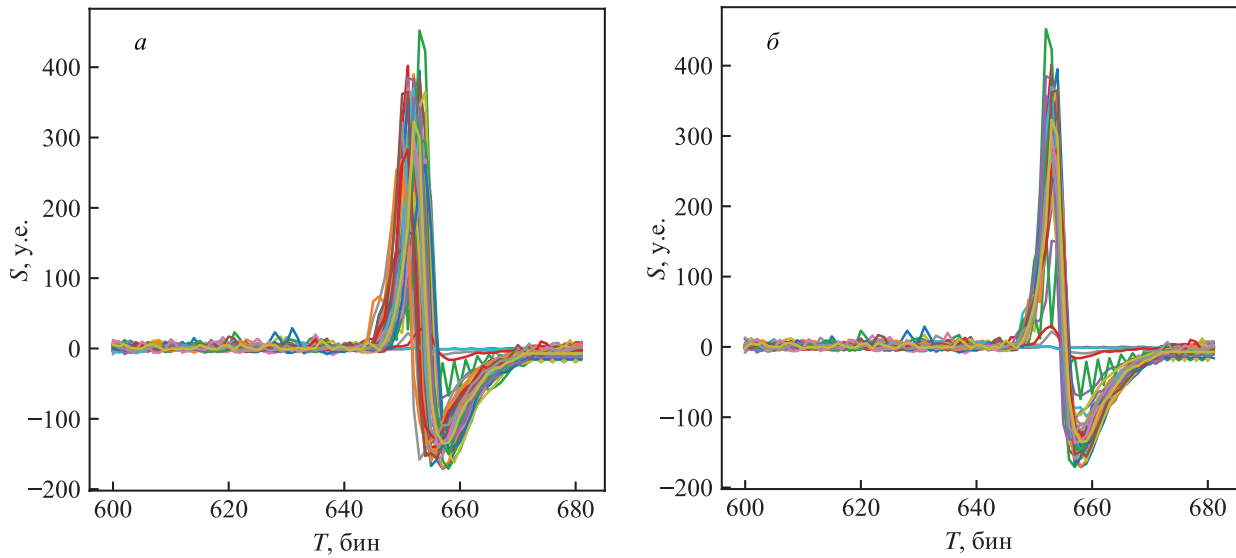


Рис. 3. Район синхроимпульса кадра №5723620, зарегистрированного 3 февраля 2022 г. до (а) и после (б) выравнивания. Разными цветами обозначены токи в разных каналах

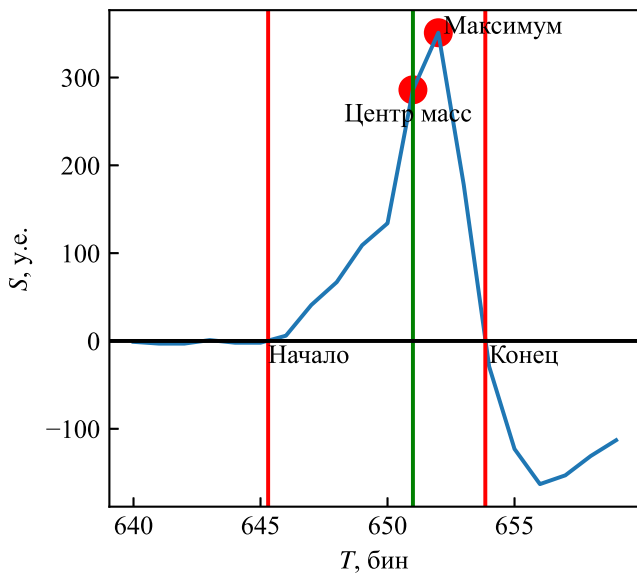


Рис. 4. Пример работы с импульсом. Красными линиями обозначены начало и конец импульса. Зелёной линией обозначено положение центра масс импульса

ного на рис. 5, а, на район, приведенный на рис. 5, б.

2.3. Поиск события в районе триггера

Как уже было описано ранее, прототип SIT сконструирован так, что синхроимпульс подается на матрицу SiPM строго через определенное, известное время после регистрации превышения фона. Это время приблизительно равно 6 мкс. Так как триггерная си-

стема, система синхроимпульса, работает на в 8 раз меньшей частоте, чем система оцифровки сигналов, то положение события известно только с какой-то точностью. Зная положение синхроимпульса, можно указать район расположения события. Также благодаря предыдущему шагу, время прихода события в разные каналы стало одновременным во всех каналах.

Процесс поиска производился в два этапа: грубый и тщательный. Грубый поиск строится на том, что только черенковский свет имеет узкую по времени структуру, которая позволяет отделить его от других событий по длительности. Поэтому если сложить значения импульсов всех каналов в каждом промежутке времени, случайные шумы сложатся и не будут влиять на картину, фон засветки неба и фон тепловых электронов при сложении можно будет вычесть медианой, а событие, наоборот, будет ярко выделяться на фоне всего кадра.

Для этого проводилось суммирование разверток всех 49 каналов. Оно представлено на рис. 6, а. Далее в полученной суммарной развертке от ожидаемого по эталонному времени T_e положения района события (40–50 бин времени) отступался еще 15–20 бин и проводился поиск положительных импульсов. Далее находилась область с максимальным значением. Если это значение было меньше определенной величины (параметр метода в итоговой работе был равен 0), то считалось, что событие не найдено, и кадр исключался из рассмотрения. В ином другом случае найденная область считалась событием. Для него определялся центр масс T_c и получался новый интервал, в котором требовалось провести уже более тщательный поиск.

Далее проводился уже тщательный или глубокий поиск. В интервале, полученном ранее, в каждом канале проводилась процедура поиска положительного наи-

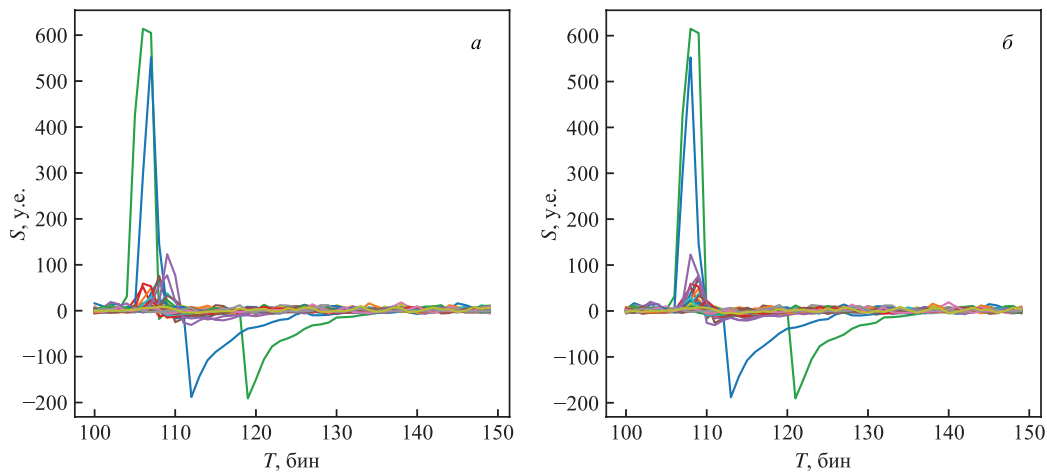


Рис. 5. Район события кадра №5723620, зарегистрированного 3 февраля 2022 года до выравнивания по синхроимпульсу (а) и после (б). Разными цветами обозначены токи в разных каналах

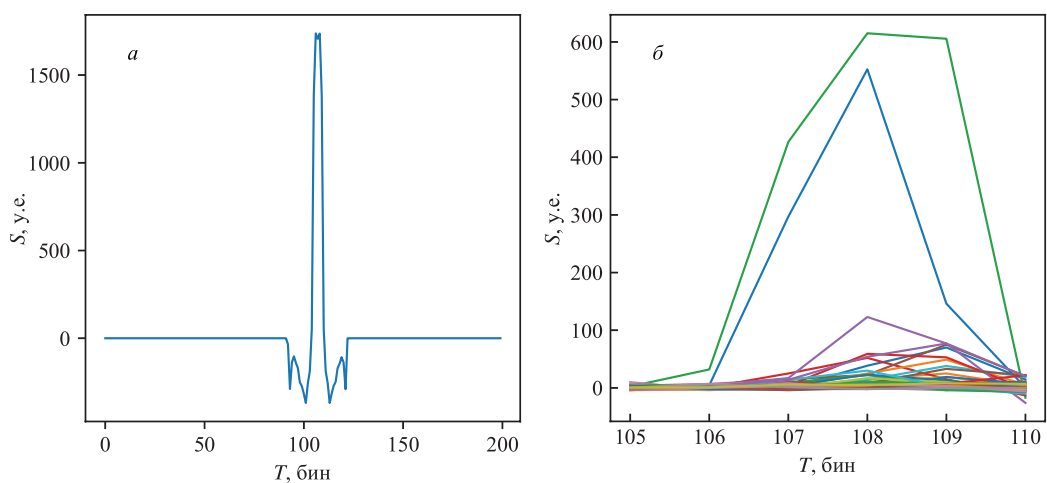


Рис. 6. Грубый поиск события (а) и тщательный поиск события (б) в кадре №5723620. Разными цветами обозначены токи в разных каналах

большого по амплитуде импульса. В районе события они выделяются даже визуально, как это видно из рисунка 6, б. Для найденных импульсов определялась сумма Sum и положение центра масс T_i . Эти импульсы в дальнейшем формируют изображение, а их центры масс используются для очистки изображения по времени.

2.4. Очистка события

При работе с любым видом данных всегда надо принимать в расчет то, что не каждое превышение какого-то шумового предела — это полезный сигнал. На самом деле, только часть из этого массива превышений будет иметь какой-то смысл, потому что всегда возможен сбой или неточность аппаратуры, регистрация какого-то фона и т.д. Очистка события велась посредством двух обширных критериев: геометрического и времен-

ного.

Геометрический критерий основывается на геометрии прототипа детектора. При работе с этим критерием исключаются маловероятные в прототипе приходы лучей на SiPM, в основном таковыми являются изолированные пиксели. Изолированным пикселем же будет считаться такой пиксель, который не имеет рядом с собой сработавших соседних, т.к. поля обзора соседних пикселей перекрывают друг друга, и вероятность того, что свет попал не в зону перекрытия, мала. Методика поиска таких пикселей очень проста: находится самый яркий (т.е. с максимальной суммой импульса) пиксель, и вокруг него либо находятся соседние (то есть находится связанное пятно), либо он исключается. Не исключено, что в кадре может присутствовать сразу несколько таких пятен. В этом случае предполагается, что событие максимально по сумме импульсов, поэтому выбирается пятно с максимальной суммой

импульсов.

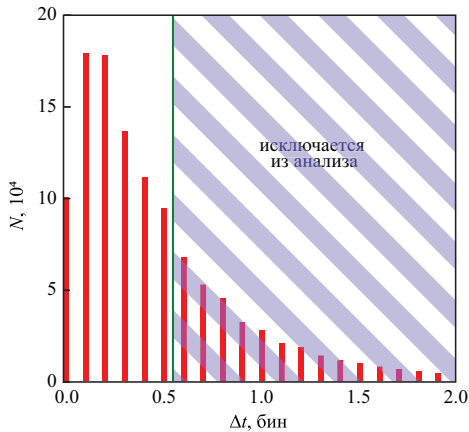


Рис. 7. Гистограмма распределения пикселей по разнице во времени со средним значением в событии. Граница проходит через значение 0.55 бин. Все, что больше отбрасывается из анализа

Далее применяется следующий критерий — временной. Предполагается, что событие пришло на матрицу в очень малом интервале времен, также как это было с синхроимпульсом. Поэтому времена импульсов не должны отличаться на большие значения. Для определения этого значения были рассмотрены все отклонения от среднего по времени Δt между приходом импульса в разные пиксели T_i и средним временем T_c каждого из событий. Полученное распределение представлено на рис. 7. На этом рисунке определено максимальное время запаздывания 0.55 бин времени (зеленая линия).

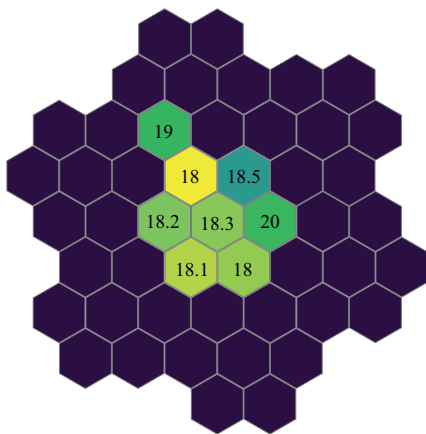


Рис. 8. Иллюстрация временного критерия (здесь отбрасываются пиксели со временами 19 и 20). Цвет на данном рисунке отвечает за величину импульса в канале пикселя

Такое время запаздывания обусловлено небольшой длинной импульса черенковского света на относительно небольших расстояниях до оси ливня (менее 300 м). В эксперименте MAGIC [13] при существенно меньших энергиях на все событие приходится 2 нс. В моделировании для высоких энергий получается до 20 нс на расстояниях 200–300 м [14]. Поэтому для энергий около 300 ТэВ отклонение во времени для события получается около 7 нс или 0.55 бин (полная ширина 14 нс).

Если в пятне встречались пиксели, времена прихода света в которые различаются больше, чем на это время, эти пиксели убирались из расчета. Пример того, какие пиксели убирались, представлен на рис. 8.

По итогам получается событие, очищенное от случайных совпадений.

2.5. Анализ события

На данном шаге производился анализ события. Из-за особенностей строения SIT, связанных с величиной пикселя, определение стандартных параметров Хиллса [15] не дает нужного результата. Поэтому требуется определять другие параметры. Параметры пятна можно выбрать различные, в данном же анализе определяются следующие: множественность m — число пикселей, в которые попал свет, суммарный импульс пятна S , доля света в самом ярком пикселе R и двух самых ярких пикселях $R0$, ширина импульса τ и другие. Эти параметры будут исследоваться уже при дальнейшем анализе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всего за проанализированный период работы установки с октября 2019 по апрель 2022 г. было зарегистрировано 7 миллионов кадров, в них после анализа найдено 2 миллиона событий. Для каждого события определены его параметры. Косвенная проверка путем сравнения с совместными данными HiSCORE, которая проводилась в другой работе [8], показывает, что для 70% из найденных событий SIT находится такое же событие и в данных HiSCORE. А более 90% совместных триггеров с HiSCORE обнаруживаются и в данных SIT. То есть методика эффективно выделяет события от ШАЛ.

[1] Weekes T. C., Cawley M. F., Fegan D. J. et al. // *ApJ*. **342**. 379. (1989).

[2] Abeysekara A. U., Alfaro R., Alvarez C. et al. // *Astropart. Phys.* **50-52**. 26. (2013).

- [3] Астапов И.И., Безъязыков П.А., Бланк М. и др. // ЖЭТФ. **161**, № 4. 548. (2022). (I.I. Astarov, P.A. Bezyazeev, M. Blank et al. // *ZhETP*. **134**. 469. (2019).)
- [4] Бородин А.Н., Гребенюк В.М., Гринюк А.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. **83**, № 8. 1042. (2019). (A.N. Borodin, V.M. Grebenyuk, A.A. Grinyuk et al. // *Bull. of Russian Acad. of Sci. Phys.* **83**. 945. (2019).)
- [5] Pluczykont M., Gress O., Korosteleva E. et al. // *Proc. of the 35th Int. Cosmic Ray Conf.* **301**. 759. (2017).
- [6] Chernov D., Astarov I., Bezyazeev P. et al. // *JINST*. **15**. C09062 (2020).
- [7] *ON Semiconductors* // Introduction to the silicon photomultiplier (SiPM). Version 8. (2021). www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9770-D.PDF
- [8] Подгрудков Д.А., Бонвеч Е.А., Вайман И.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. **85**, № 4. 541. (2021). (D.A. Podgrudkov, E.A. Bonvech, I.V. Vaiman et al. // *Bull. of the Russian Acad. of Sci. Phys.* **85**. N 4. 408. (2021).)
- [9] Fink D., Hahn A., Mazin D. // *Proc of the Int. Conf. on New Photo-detectors*. 2015.
- [10] Aguilar J.A., Bilnik W., Blocki J. et al. // *NIMA*. **845**. 350. (2017).
- [11] Biland A., Bretz T., Bußl. et al. // *JINST*. **9**. P10012. (2014). DOI: 10.1088/1748-0221/9/10/P10012
- [12] Dorner D., Ahnen M.L., Bergmann M. et al. // *5th Fermi Symp. proc. eConf*. 2014. C14102.1.
- [13] Aliu E., Anderhub H., Antonelli L.A. et al. // *Astroparticle Physics*. **30**. 293. (2009).
- [14] Подгрудков Д.А. // Пространственно-временная структура сигналов в сцинтилляционных детекторах частиц и детекторах излучения Вавилова-Черенкова от широких атмосферных ливней. Дисс. канд. физ.-мат. наук. 2011.
- [15] Hillas A.M. // *Proc. of the 19th Int. Cosmic Ray Conf.* **3**. 445 (1985).

A methodology for searching and identifying EAS events in the data from a wide-angle SIT telescope prototype

A. Pantiukhin^{1,a}, A. A. Amineva^{1,b}, D. A. Podgrudkov^{1,2,c}

¹Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University, Moscow 119191, Russia

E-mail: ^apantiukhin.av19@physics.msu.ru, ^bamineva.aa19@physics.ru, ^cd.a.podgrudkov@physics.msu.ru

Small Imaging Telescope (SIT) — a prototype of a wide-angle telescope with an aperture of about 0.1 m², equipped with a SiPM matrix, which has a number of advantages over PMTs. This paper presents the data analysis for this telescope, which operates in conjunction with the HiSCORE complex. Events for the years 2019–2022 were analyzed. A total of about 7 million trigger frames were analyzed, among which about 5 million EAS events were detected. The analysis was carried out in several steps: initial tuning of the frames using a synchro pulse, search for events and their cleaning according to the method given in the work. PACS: 29.40.Ka, 96.50.S-, 95.55.Ka, 07.05.Rm.

Keywords: air Cherenkov telescope, data analysis.

Received 30 May 2023.

Сведения об авторах

1. Пантиухин Артем Владиславович — студент; e-mail: pantiukhin.av19@physics.msu.ru.
2. Аминевана Анна Александровна — студент; e-mail: amineva.aa19@physics.ru.
3. Подгрудков Дмитрий Аркадьевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: d.a.podgrudkov@physics.msu.ru.