

Наблюдение астрофизических объектов с помощью установки TAIGA–HiSCORE

© В.С. Самолига

Научно-исследовательский институт прикладной физики Иркутского государственного университета,
664003 Иркутск, Россия
e-mail: vladimir.samoliga@yandex.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 21 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Представлены результаты обзора неба установкой TAIGA–HiSCORE, состоящей из 120 широкоугольных черенковских детекторов, распределенных на площади 1 km^2 . Анализ данных выполнен за два зимних сезона (2019–2021 гг.) при энергиях космических лучей 200–500 TeV. Проведены тестирование модифицированного метода оценки фона и оценка значимости сигнала классическим методом Ли-Ма.

Ключевые слова: гамма-астрономия, Крабовидная туманность, оценка фона, значимость сигнала.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56822.f215-23

Установка TAIGA–HiSCORE — сеть широкоугольных детекторов атмосферного черенковского излучения, возникающего в широких атмосферных ливнях (ШАЛ). Она является частью гибридной гамма-обсерватории TAIGA [1]. Целью установок наземной гамма-астрономии является выделение сигнала от источников гамма-излучения на фоне потока космических лучей. Важной задачей для оценки значимости сигнала является оценка фона.

Настоящая работа посвящена отработке методики оценки фона и значимости сигнала в окрестностях астрофизических объектов. Существует несколько методов оценки фона и их модификации, используемые в ряде экспериментов гамма-астрономии. В работе [2] описаны 4 основных метода: равных зенитных углов, окружающего окна, прямого интегрирования и замены времени. Выбор метода в настоящей работе обусловлен особенностями установки TAIGA–HiSCORE. Ее оптические детекторы имеют постоянный наклон 25° на юг для максимизации времени наблюдения Крабовидной туманности. Угловая чувствительность детекторов имеет сложную форму и асимметрию, связанную с ориентацией фотоэлектронных умножителей [3]. В таких условиях метод равных зенитных углов неприменим.

В настоящей работе применяется модифицированный метод, основанный на методах прямого интегрирования и замены времени. Небо в координатах (RA, Dec) разбивается на ячейки шириной 5° RA с фиксированными границами склонения $\text{Dec}_0 \pm 2.5^\circ$, где Dec_0 — склонение наблюдаемого объекта. Ячейка, содержащая в своем центре наблюдаемый объект, называется сигнальной, остальные ячейки фоновые. Запись событий из сигнальной и фоновых ячеек проводится в соответствующие наборы данных. Фон записывается только из фоновых ячеек, проходящих в поле зрения установки такой же путь, что и сигнальная ячейка. Таким способом в ячейках обеспечивается одинаковое распределение

событий, обусловленное зенитным углом наблюдения и угловой чувствительностью установки. В зависимости от длительности сеанса суммарное время наблюдения фона T_{off} в 5–25 раз больше времени наблюдения T_{on} сигнальной ячейки.

Неоднородность распределения в ячейках может быть обусловлена зависимостью потока событий от времени. В основном это связано с погодными условиями, например, при наступлении облачности. Для учета этого фактора задаются 2 варианта отбора сеансов: строгий и нестрогий. При строгом отборе анализируются только сеансы с числом событий в сигнальной ячейке \tilde{N}_{on} , которое отклоняется от среднего фонового числа не более чем на 5%:

$$\frac{|\tilde{N}_{on} - k \cdot \tilde{N}_{off}|}{k \cdot \tilde{N}_{off}} < 5\%, \quad (1)$$

где \tilde{N}_{off} — общее число фоновых событий за сеанс, $k = T_{on}/T_{off}$. При нестрогом отборе допустимы сеансы с большим отклонением, но они содержат только такие фоновые ячейки, которые были в поле зрения установки одновременно с сигнальной. К этим данным также применяется условие (1). Далее сигнальные ячейки сеансов суммируются, формируя наборы данных сигнала и фона. Отображение этих наборов на координатной сетке (RA, Dec) образуют сигнальную и фоновую карты.

На основе этих карт выполняется построение карты значимости сигнала. В работе [4] проведен обзор и анализ методов оценки значимости сигнала. Исходя из условий применимости, в настоящей работе используется классическая формула Ли-Ма [5]:

$$S = \sqrt{2} \cdot \left\{ N_{on} \cdot \ln \left(\frac{(1+k) \cdot N_{on}}{k \cdot (N_{on} + N_{off})} \right) + N_{off} \cdot \ln \left(\frac{(1+k) \cdot N_{off}}{N_{on} + N_{off}} \right) \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

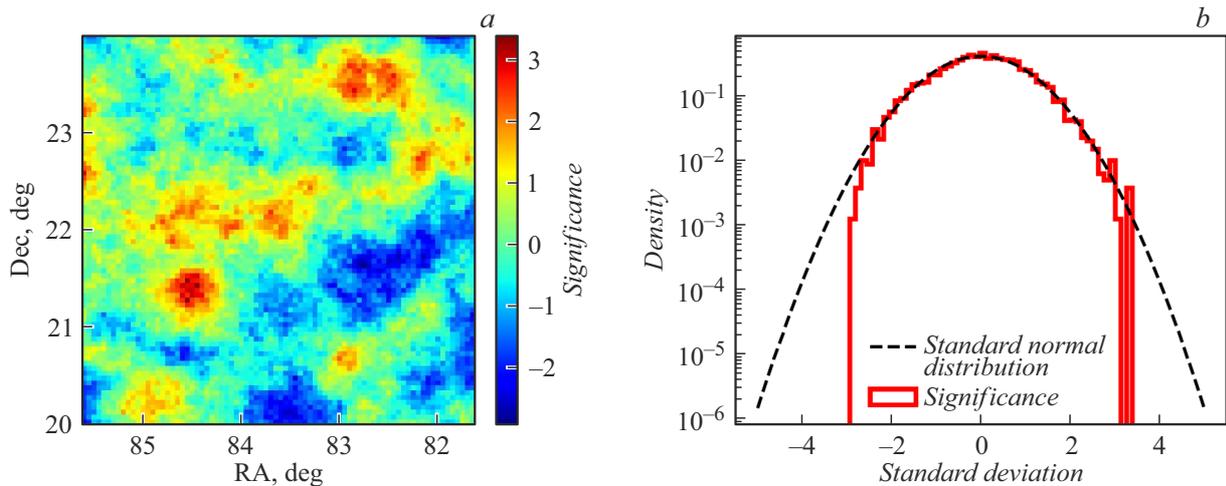


Рис. 1. Карта значимости окрестностей Крабовидной туманности $4^\circ \times 4^\circ$ (a) и одномерное распределение значимости (b) при нестрогом отборе сеансов.

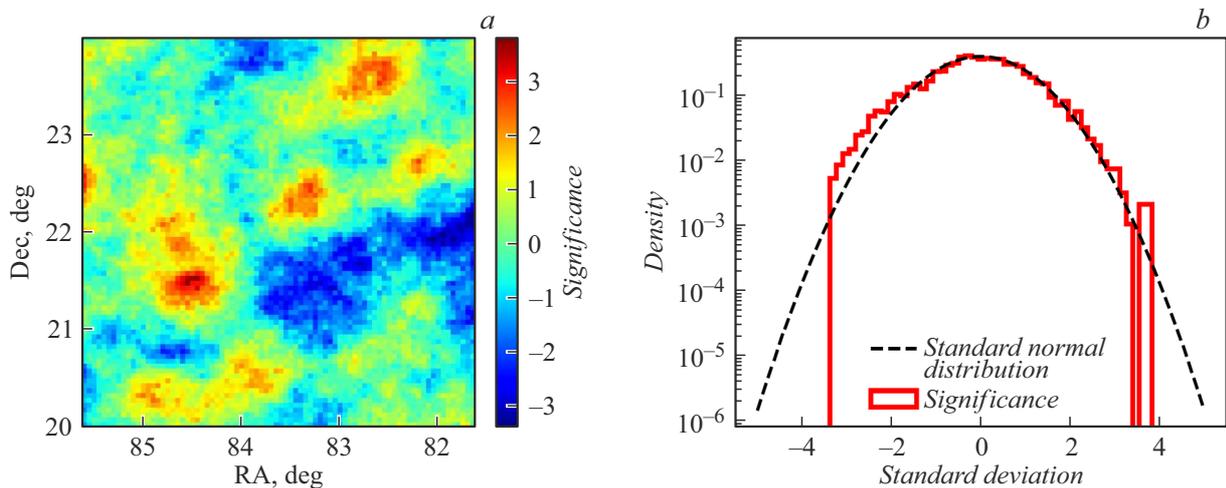


Рис. 2. Карта значимости окрестностей Крабовидной туманности $4^\circ \times 4^\circ$ (a) и одномерное распределение значимости (b) при строгом отборе сеансов.

где $k = T_{on}/T_{off}$, а N_{on} и N_{off} — число событий, попадающих в некоторое окно наблюдения на картах сигнала и фона соответственно. В настоящей работе окно наблюдения задано как 3σ -окрестность направления наблюдения (RA_j, Dec_j) . Окно наблюдения определено угловым разрешением $\sigma = 1.516\sigma$ и содержит 98.89% событий от точечного источника. Окно перемещается по картам сигнала и фона по одинаковым сеткам с шагом 0.05° , а в соответствующих точках на карте значимости отмечается величина S . Для избежания искажений значения S на краях карты значимости она строится с размерами $4^\circ \times 4^\circ$.

На рис. 1 показаны результаты наблюдения окрестностей Крабовидной туманности за 2 зимних сезона с 2019 по 2021 гг. при строгом отборе сеансов. Применено угловое разрешение $\delta = 0.2^\circ$, что дает радиус окна наблюдения около 0.4° . В 3σ -окрестности источника

набрано 722 события за 85.5 h наблюдений. Ожидаемое число гамма-событий за этот период составляет от 7 до 12 согласно спектру гамма-излучения Крабовидной туманности в диапазоне 100–250 TeV [6]. При нестрогом отборе сеансов в 3σ -окрестности источника набрано 1531 событие за 204 h наблюдений (рис. 2). За это время ожидается 17–30 гамма-событий.

На основе числа фоновых и сигнальных событий в окне наблюдения можно оценить степень подавления фона, необходимую для достижения значимости сигнала $S \geq 5$ от Крабовидной туманности. В первую очередь, улучшение углового разрешения от 0.2 до 0.1° может уменьшить фон в 4 раза. При выполнении этого условия требуемое подавление фона методами гамма-адронной сепарации составляет 70–75 раз при строгом и 16–20 раз при нестрогом отборах сеансов. Данное подавление фона планируется достигнуть и протестировать на дей-

ствующем комплексе TAIGA-1 с помощью недорогих так называемых малых черенковских телескопов, и использовать в полной мере в будущей установке TAIGA-10 с гибридной системой детекторов на площади 10 km^2 .

В настоящей работе гамма-адронная сепарация не применялась, поэтому поток частиц можно считать равномерным. Тогда значимость сигнала должна иметь стандартное нормальное распределение с дисперсией $D_0 = 1$, что требует проверки. Для этого применены тесты Колмогорова–Смирнова и Д’Агостино–Пирсона, подходящие для большой выборки [7]: в настоящей работе $n = 6400$ — число пикселей на карте. Результаты тестов показывают, что распределение значимости отличается от нормального для строгого и нестроного отборов. При этом дисперсия при строгом отборе составляет $D_1 = 0.94$ (рис. 1), а при нестрогом — $D_2 = 1.16$ (рис. 2).

Таким образом, применяемый метод оценки фона имеет ограничения, связанные с погодными условиями при наблюдениях. Исключение из анализа сеансов с временными неоднородностями (строгий отбор) уменьшает общее время наблюдений более чем в 2 раза и приводит к недооценке значимости сигнала на 2.7% (при $S = 3$). Использование сеансов с неоднородностями (нестрогий отбор) приводит к переоценке значимости сигнала на 6.7%. Можно использовать полученные значения в качестве поправок при оценке значимости сигнала. В дальнейшем планируется провести сравнение описанного метода с методом окружающего окна. Он считается наиболее устойчивым к пространственным и временным неоднородностям при наблюдениях.

Финансирование работы

Работа выполнена на УНУ „Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ“ (соглашение EB-075-15-2021-675). Поддержана Министерством науки и высшего образования (проекты FZZE-2020-0024, FZZE-2023-0004).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N. Budnev et al, in *16th Vienna Conference on Instrumentation (VCI2022)*, ed. by D. Bortoletto, R. Klanner, P. Krizan, F. Parmigiani, N. Toge, D. Wehe (Nucl. Instrum. Meth. A, 2022), v. 1039, p. 167047. DOI: 10.1016/j.nima.2022.167047
- [2] Y. Wang, M. Zha, S. Hu, C. Gao, J. Zhang, X. Zhang, JINST, **17**, 12003 (2022). DOI: 10.1088/1748-0221/17/12/P12003
- [3] V. Samoliga, A. Pakhorukov, in *International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics*, ed. by M.N. Achasov (J. Instrumentation, 2020), v. 15 (07), p. 07010. DOI:10.1088/1748-0221/15/07/c07010

- [4] Y. Nan, S. Chen, in *35th International Cosmic Ray Conference*, ed. by Y. Kwak, H.S. Lee, S. Oh, I.H. Park (Proceedings Science, 2018), v. 301, p. 879. DOI: <https://doi.org/10.22323/1.301.0879>
- [5] T.P. Li, Y.Q. Ma. *Astrophys. J.*, **272**, 317 (1983). DOI:10.1086/161295
- [6] F. Aharonian et al. *Chinese Physics C*, **45** (2), 025002 (2020). DOI:10.1088/1674-1137/abd01b
- [7] Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко. *Метрология*, **2**, 3 (2005).