

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ШАЛ ЧЕРЕНКОВСКОГО ТЕЛЕСКОПА TAIGA-IACT АСТРОФИЗИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА НИИПФ ИГУ В ТУНКИНСКОЙ ДОЛИНЕ

Е.О. Гресь, О.А. Гресс

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия
GresEO@mail.ru

INVESTIGATION OF THE EAS IMAGE PARAMETERS FROM AIR CHERENKOV TAIGA-IACT TELESCOPE LOCATED AT API ISU ASTROPHYSICAL POLIGON IN THE TUNKA VALLEY

E.O. Gres, O.A. Gress

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia
GresEO@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты обработки данных, полученных с помощью первого атмосферного черенковского телескопа (АЧТ) установки TAIGA-IACT, регистрирующего изображения широких атмосферных ливней в черенковском свете. Регистрация гамма-квантов является самым эффективным методом поиска, так называемых галактических ПэВатронов, и исследования механизмов ускорения космических лучей в этих источниках до сверхвысоких энергий. Для этого требуется эффективный метод селекции атмосферных ливней, вызванных гамма-квантами, от адронных ливней, т. е. метод параметров Хилласа. Получены распределения параметров Хилласа за суммарное время ~ 24 ч наблюдений в направлении Крабовидной Туманности и выполнен их анализ. По экспериментальным данным проведено исследование относительной чувствительности камеры ФЭУ телескопа. Приводится оценка диапазона энергий регистрируемых широких атмосферных ливней. Быстродействие разработанного программного обеспечения позволяет использовать его для анализа регистрируемых событий в режиме выполнения набора данных.

Ключевые слова: астрофизика, космические лучи, атмосферный ливень, обработка изображений.

Abstract. The article presents the data processing results obtained using the first Image Atmospheric Cherenkov Telescope (IACT) of the TAIGA-IACT installation, which records Cherenkov light images of the extensive air showers (EAS). Registration of gamma-quanta is the most effective method for searching for so-called galactic PeVatron and studies of the cosmic ray acceleration mechanisms in these sources to ultrahigh energies. This requires an effective method for the selection of atmospheric showers caused by gamma rays from hadronic showers, i.e. Hillas' parameter method. The distribution of the Hillas parameters for the total time of ~ 24 hours of observations in the direction of the Crab Nebula is obtained and their analysis is performed. According to the experimental data, the PMT camera relative sensitivity was studied. EAS energy range estimation of recorded data was obtained. The speed of the developed software allows it to be used to analyze the recorded events in real time.

Keywords: astrophysics, cosmic rays, air shower, image processing.

ВВЕДЕНИЕ

Для создания целостной картины эволюции Вселенной и проверки адекватности теоретических моделей необходимо изучение взаимодействий элементарных частиц в диапазоне энергий выше 100 ТэВ [Hillas, 2013]. Основными инструментами для наблюдения гамма-излучения сверхвысоких энергий являются наземные атмосферные черенковские телескопы. Для наблюдения астрофизических событий, особенно быстропротекающих событий (транзиенты), необходимо уметь быстро обрабатывать и извлекать параметры событий из первичных данных.

В настоящей работе применена методика обработки изображений наземных черенковских телескопов на большом объеме реальных данных с телескопа TAIGA-IACT, расположенного в Тункинской долине. Разработан алгоритм построения, очистки изображений атмосферных ливней и расчета параметров изображения — параметров Хилласа, реализовано программное обеспечение для данного алгоритма. Проведена обработка реальных данных с телескопа TAIGA-IACT, полученных за суммарное время ~24 ч наблюдений в направлении Крабовидной Туманности. Получена оценка диапазона энергий регистрируемых событий и исследована относительная чувствительность триггера камеры телескопа.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ШАЛ ТЕЛЕСКОПА TAIGA-IACT

Широкий атмосферный ливень (ШАЛ) — это лавинообразный каскад вторичных частиц, образовавшихся в результате взаимодействия первичной частицы космического излучения с атомами атмосферы. Существует два основных метода регистрации ШАЛ: интегральный метод («амплитуда-время») и метод изображений. Телескоп TAIGA-IACT (рис. 1, а) осуществляет регистрацию изображений атмосферных ливней [Postnikov, 2017]. Используется 560 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) в камере телескопа, поле зрения камеры 9×9 град² и угловой размер пикселя (ФЭУ) ~0.36 град, что значительно больше чем в других телескопах IACT. Все ФЭУ объединены в 22 группы (кластеры).

Черенковский свет, возникающий в процессе развития ливня, падает на сферическое зеркало телескопа и, отражаясь, попадает на находящуюся в фокусе зеркала камеру телескопа с матрицей ФЭУ, которая преобразует фотоны в электрический сигнал. По сработавшим пикселям строится «изображение» ливня, которое похоже на эллипс (рис. 1, б).

Параметры Хилласа позволяют «описать» пятно на матрице ФЭУ эллипсом [Weekes, 1989; Holler, 2014],

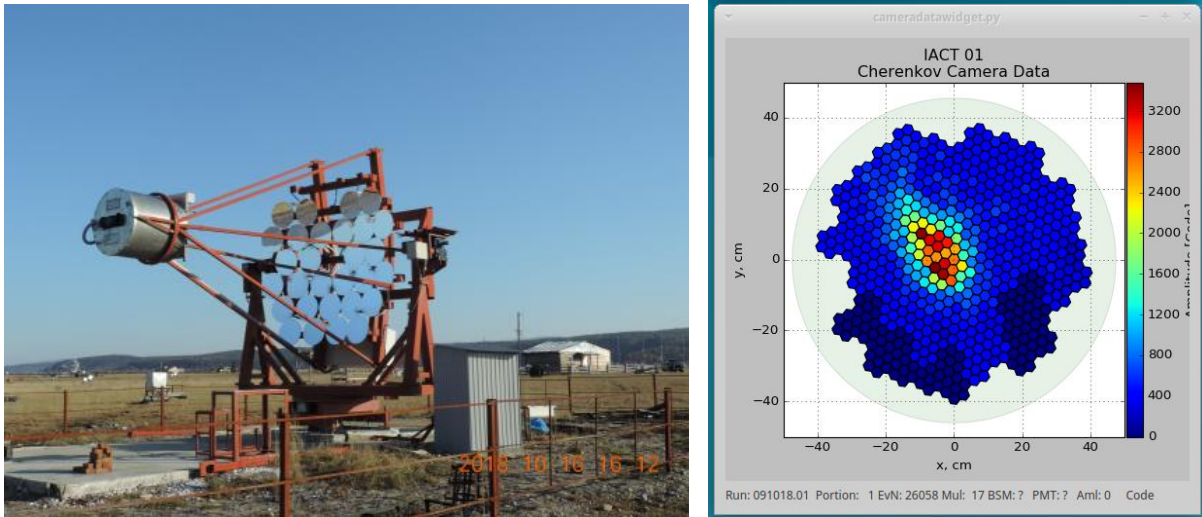


Рис. 1. Общий вид телескопа TAIGA-IACT (а) и регистрируемые изображения (б) атмосферных ливней камерой телескопа

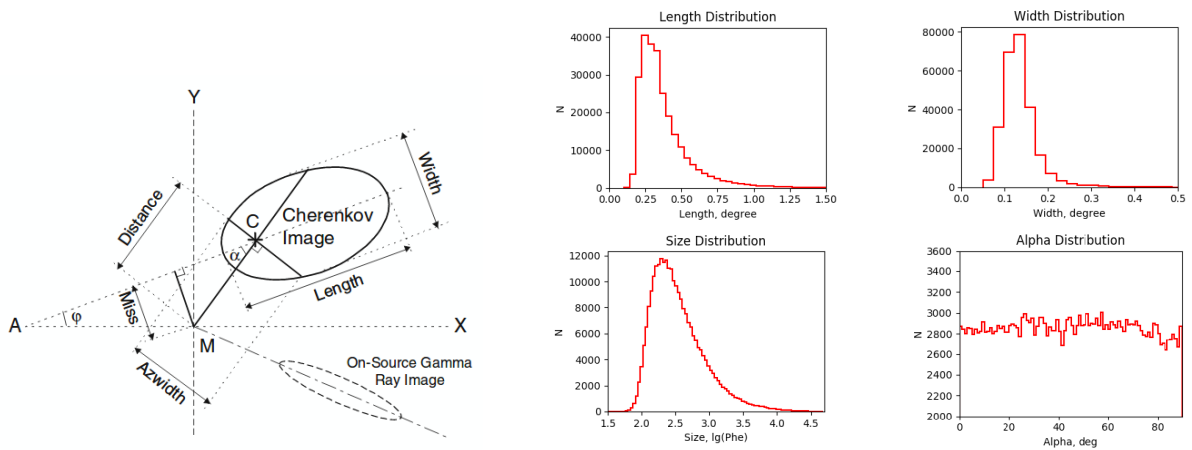


Рис. 2. Схема эллиптического изображения ШАЛ, сформированное на матрице IACT, где C — это центр тяжести эллипса (а); графики распределений параметров Хилласа, полученные с реальных данных телескопа за период наблюдения ~ 24 ч (б)

(см. рис. 2, а). Их условно можно разделить на 3 группы: 1) информация о форме эллипса (большая полуось эллипса — длина ($Length$), малая полуось \times ширина ($Width$) и азимутальная ширина ($Azwidth$)); 2) местоположение и ориентация эллипса относительно центра камеры (центр тяжести эллипса, расстояние от центра камеры ($Distance$), ошибка ($Miss$), угол α и угол φ); 3) интенсивность события и характер распределения интенсивности (размер изображения ($Size$), концентрация ($Concentration$) и коэффициент асимметрии γ).

ОБРАБОТКА ДАННЫХ С ТЕЛЕСКОПА

Основными этапами алгоритма обработки изображений являлись: вычитание «нулевого» уровня (пьедесталы) с учетом флуктуаций, очистка изображения для удаления одиночных срабатываний ФЭУ вдали от основного изображения (фоновые события) и расчет параметров Хилласа.

С помощью данного алгоритма было обработано 7 Гб первичных реальных данных за суммарное

время ~ 24 ч наблюдения телескопа. В результате обработки получено $\sim 360\,000$ событий, средняя частота полезных событий около 4 Гц. Время обработки — от 10 до 20 мин в зависимости от мощности ЭВМ. С учетом скорости набора данных с телескопа (55 Мб/мин) данная программа примерно в 7 раз быстрее вычисляет параметры событий, чем они накапливаются в режиме набора данных. Это позволяет ее использовать в режиме «онлайн»-регистрации.

На рис. 2, б представлены некоторые характерные распределения параметров Хилласа, полученные после обработки реальных данных. Из рис. 2, б видно, что в распределении $Length$ и $Width$ максимум распределений наблюдается при 0.25° (2.1 см) и 0.15° (1.3 см) соответственно. Распределения значений угла α показывает нам, что события приходят равномерно со всех направлений, характерного для ШАЛ от гамма-квантов увеличения числа событий вблизи 0° не наблюдается.

Параметр $Size$ характеризует полное количество фотоэлектронов (ф.э.) в изображении, пропорциональ-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано и реализовано программное обеспечение экспресс-анализа данных черенковского телескопа изображения атмосферных ливней TAIGA-IACT. Это позволит в будущем проводить предварительный анализ регистрируемых событий в режиме реального времени, особенно в случае транзитных или алертных событий. Кроме того, на основании полученных данных выполнены оценка диапазона энергий регистрируемых ШАЛ и оценка неоднородности срабатывания фотоприемников камеры телескопа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Hillas A.M. Evolution of ground-based gamma-ray astronomy from the early days to the Cherenkov Telescope Arrays // *Astroparticle Physics*. 2013. V. 43. P. 19–43.

Holler M. Photon reconstruction for the H.E.S.S. 28 m telescope and analysis of Crab Nebula and galactic centre observations // Abstract of dissertation, Potsdam University, 2014. URL: https://publishup.uni-potsdam.de/opus4-ubp/frontdoor/deliver/index/docId/6973/file/holler_diss.pdf (дата обращения 25.05.2019).

Postnikov E., et al. Commissioning the joint operation of the wide angle timing HiSCORE Cherenkov array with the first IACT of the TAIGA experiment // 35th International Cosmic Ray Conference, 10–20 July, 2017, Bexco, Busan, Korea. URL: <https://pos.sissa.it/301/756/pdf> (дата обращения 25.05.2019).

Weekes T.C., et al. Observation of TeV gamma rays from the Crab Nebula using the atmospheric cerenkov imaging technique // *Astrophys. J.* 1989. V. 342. P. 379–395.

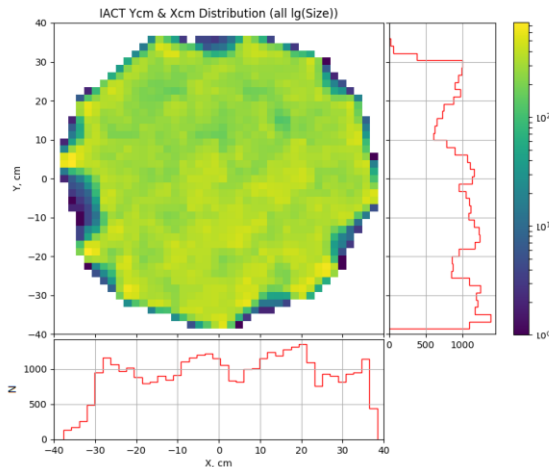


Рис. 3. Распределение центров тяжести изображений на матрице ФЭУ камеры телескопа для всех наблюдаемых событий за период времени ~24 ч

ное общему количеству фотонов, и в конечном итоге, первичной энергии частицы вызвавшей ШАЛ. Привлекая разного типа данные по моделированию телескопа TAIGA-IACT можно оценить регистрируемые энергии ливней E (вне зависимости от типа первоначальной частицы и в диапазоне до 200 м от телескопа) по параметру $Size$ по формуле:

$$E = [\text{ТэВ}] : \frac{1}{2} Size[\text{ф.э}].$$

Из рис. 2, б видно, что для диапазона $Size$ от 100 до 10 000 ф.э. диапазон регистрируемых энергий телескопа TAIGA-IACT составляет от 5 ТэВ до 500 ТэВ.

При оценке относительной чувствительности триггера камеры телескопа необходимо рассмотреть распределение центров тяжести изображений на матрице камеры (рис. 3).

На рис. 3 отчетливо видна неравномерность: прорисовываются формы кластеров матрицы. Полученные распределения вблизи осей X и Y показывает, что количество событий отклоняется от своего среднего значения и по оси X , и по оси Y на 25–30 %, при этом резкие спады распределения находятся на краях кластеров. Данный эффект связан с проблемой в триггерной системе телескопа: при регистрации событий наблюдается несрабатывание одного или нескольких кластеров при регистрации, из-за чего теряется информация о ШАЛ. И, как следствие, параметры Хилласа для отбора гамма/адронных ливней также будут иметь высокую погрешность.