

## АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИИ ИМПУЛЬСОВ УСТАНОВКИ HiSCORE

В.С. Самолига

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия  
samoligavs@gmail.com

## ANALYSIS OF CORRELATION OF HiSCORE PULSES

V.S. Samoliga

Irkutsk state university, Irkutsk, Russia

---

**Аннотация.** Установка HiSCORE — сеть широкоугольных детекторов черенковского излучения широких атмосферных ливней. В качестве отклика на ливни в детекторах формируются электрические импульсы. В то время как стандартные методы анализа ливней используют только некоторые параметры импульсов, в настоящей работе используются полные осциллограммы импульсов и исследуется степень их схожести для детекторов, расположенных симметрично относительно оси ливня.

**Ключевые слова:** широкие атмосферные ливни, черенковское излучение.

**Abstract.** The HiSCORE is an array of wide-angle detectors of Cherenkov light generated in extensive air showers. As a response to showers the detectors give electric pulses. Whereas standard shower analysis methods use only some parameters of the pulses, in this work full pulse oscillograms are used and their similarity is studied for the detectors placed symmetrically about the shower axis.

**Keywords:** extensive air showers, Cherenkov light.

---

### Введение

Ряд вопросов космологии и физики элементарных частиц может быть решен путем изучения космических лучей ультравысоких энергий ( $>30$  ТэВ). Для поиска источников таких лучей — так называемых ПэВатронов — необходимо определять направления, с которого приходят частицы, однако заряженные частицы движутся по искривленным траекториям из-за воздействия галактических магнитных полей. Информацию о направлении на источник несут электрически нейтральные частицы — нейтрино и фотоны, в том числе высоких энергий — гамма-кванты. В связи с этим гамма-астрономия начала свое интенсивное развитие в конце XX века и продолжает активно развиваться.

Существующие астрофизические установки и методы гамма-астрономии покрыли диапазон энергий от десятков ГэВ до примерно 50 ТэВ. Для исследования гамма-излучения энергий ниже 100 ГэВ используются детекторы, размещенные на спутниках. С повышением энергии поток частиц падает и для их регистрации применяются наземные Атмосферные черенковские телескопы (АЧТ) — телескопы, в которых черенковское изображение широкого атмосферного ливня (ШАЛ) регистрируется с помощью многоканальных камер на базе ФЭУ. Выше 50 ТэВ поток так мал, что для набора достаточного количества событий требуются на порядок большие площади и время работы установки. В связи с этим для данного диапазона был предложен подход, применяемый для исследования космических лучей — сеть детекторов на площади порядка квадратных километров. Одной из таких установок является TAIGA-HiSCORE, часть астрофизической обсерватории TAIGA [Budnev et al., 2014], расположенной в Республике Бурятия.

### Установка HiSCORE

TAIGA-HiSCORE — наземный широкоугольный детектор черенковского излучения ШАЛ, распределенный в перспективе на площади  $5 \text{ км}^2$ , использующий пространственное и временное распределения черенковских фотонов; предназначен для регистрации гамма-квантов и космических лучей с энергиями 30 ТэВ–1 ЭэВ [Pluczykont, 2014]. Поле зрения установки составляет около 1 стерadiana и позволяет исследовать обширную область неба. Благодаря большой площади и режиму работы в указанном диапазоне энергий возможна регистрация первичных заряженных частиц в переходной области между Галактической и внегалактической компонентами спектра космических лучей.

Каждая оптическая станция установки включает в себя четыре 8-дюймовых ФЭУ, оснащенных конусами Винстона, и блок электроники. Четыре канала обеспечивают с одной стороны подавление ложных срабатываний, а с другой увеличивают площадь светосбора на ФЭУ, которая составляет около  $0.5 \text{ м}^2$ . Станция регистрирует событие, если сумма сигналов четырех каналов превышает порог в 100 фотоэлектронов в наносекунду. Для регистрации события необходимо срабатывание минимум четырех соседних станций.

В качестве отклика станции на событие формируется импульс, параметры которого используются для вычисления положения оси ШАЛ, энергии первичной частицы и глубины максимума ШАЛ. На рис. 1, а показаны данные параметры.

В настоящей работе для восстановления характеристик ШАЛ используется полная информация об импульсах, а не только их амплитуда и время возникновения. Проведено моделирование установки в составе 63 станций с использованием программы

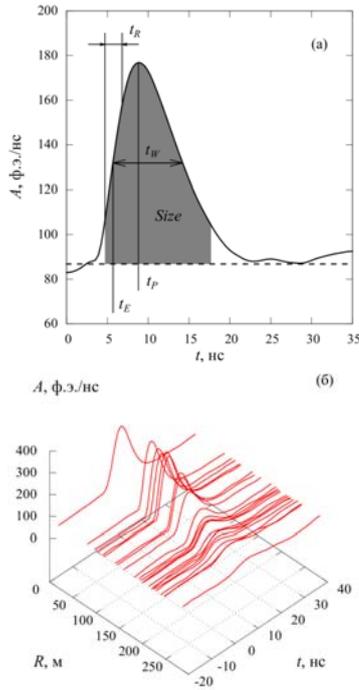


Рис. 1. Параметры импульса (а); сортировка импульсов по расстоянию до оси ШАЛ (б)

sim\_score++ и выполнены симуляции ШАЛ в диапазоне энергий 30-500 ТэВ с помощью пакета CORSIKA [Heck, Pierog, 2013].

**Анализ импульсов**

Предполагается, что для ливней, вызванных гамма-квантами, должна наблюдаться большая схожесть импульсов станций, расположенных симметрично относительно оси ливня, чем для адронных ливней, в силу различия их развития.

Установка имеет свою систему координат, в которой заданы положения станций и вычисляется положение ливня. Для того чтобы определить положение станции относительно ливня, вычисляется угол между осью ШАЛ и направлением от максимума ШАЛ на станцию, то есть ось ШАЛ и направление на станцию можно описать векторами **A** и **B** соответственно, используя координаты станции ( $X_{st}, Y_{st}, Z_{st}$ ), максимума ливня ( $X_{max}, Y_{max}, Z_{max}$ ) и его ядра — точки пересечения оси ШАЛ и уровня наблюдения ( $X_{core}, Y_{core}, Z_{core}$ ):

$$A = \begin{pmatrix} X_{max} - X_{core} \\ Y_{max} - Y_{core} \\ Z_{max} - Z_{core} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} X_{max} - X_{st} \\ Y_{max} - Y_{st} \\ Z_{max} - Z_{st} \end{pmatrix}.$$

Тогда угол  $\alpha$  между векторами есть

$$\alpha = \arccos \left( \frac{(AB)}{|A||B|} \right).$$

Для удобства угловое расстояние  $\alpha$  переводится в метрическое  $R_{st}$ :

$$R_{st} = |A| \operatorname{tg}(\alpha).$$

На рис. 1, б изображен пример события с сортировкой по расстоянию.

После сортировки определяются рабочие области импульсов, которые подлежат сравнению — это участки, которые превышают значение 101.36 ф.э./нс. На рис. 2, а они отмечены синим цветом. Затем выбираются пары станций для сравнения исходя из условия, что их значения  $R_{st}$  не должны отличаться более чем на 10 м. Для таких пар определяются моменты превышения порога, производится смещение обеих рабочих областей к этому моменту и увеличение “короткого” импульса до размеров “длинного” (рис. 3).

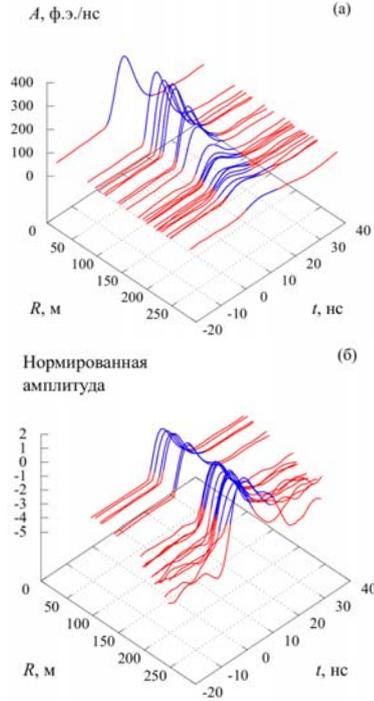


Рис. 2. Определение рабочих областей импульсов (а); нормализация и отсев импульсов (б)

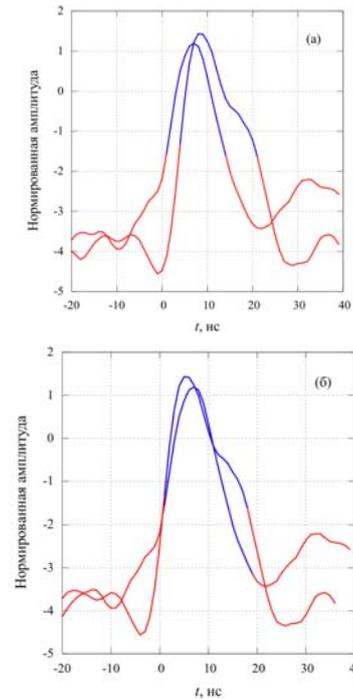


Рис. 3. Сравнение импульсов: а — исходное положение; б — сдвиг и расширение области

Учитывая данные условия была оценена зависимость корреляции между импульсами от расстояния до оси ШАЛ. Для обоих типов частиц — гамма-квантов и протонов — средний коэффициент корреляции убывает от 1 до 0.8 с увеличением  $R_{st}$ .

Также была исследована зависимость евклидова расстояния между импульсами от расстояния  $R_{st}$ . Для этого импульсы подвергаются нормализации (рис. 2, б):

$$Z_i = \frac{S_i - M_S}{\sigma_S}, -20 \leq i \leq 40$$

где  $S_i$  и  $Z_i$  — старое и новые значения сигнала соответственно,  $M_S$  и  $\sigma_S$  — среднее значение и среднеквадратичное отклонение рабочей области. Евклидово расстояние  $D_E$  вычисляется между рабочими областями импульсов  $X$  и  $Y$  следующим образом:

$$D_E = \sqrt{\sum_{i=0}^n (X_i - Y_i)^2}$$

Для обоих типов частиц среднее значение  $DE$  увеличивается от 0.5 до 2 с удалением от оси ШАЛ.

### Заключение

В результате анализа схожести импульсов станций HiSCORE — оценки корреляции и евклидова расстояния между импульсами — не было выявлено различий в зависимостях данных показателей от расстояния до оси ливня для гамма-квантов и адронов. Данный метод либо непригоден для гамма-адронной сепарации, либо требует доработок.

Работа выполнена при поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации (проекты №14.B25.31.0010, 2017-14-595-0001, № 3.9678.2017/8.9, №3.904.2017/4.6, 3.6787.2017/7.8, 1.6790.2017/7.8), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 16-02-00738, 16-32-00329, 17-02-00905), а также Российского научного фонда (грант 15-12-20022).

Численные эксперименты были проведены на вычислительном кластере “Академик В.М. Матросов” ЦКП “Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН” [<http://hpc.icc.ru>].

### Список литературы

- Budnev N., Astapov I., Samoliga V., et al. TAIGA — the Tunka advanced instrument for cosmic ray physics and gamma astronomy — present status and perspectives / (TAIGA collaboration) // J. Instrumentation. 2014. V. 9. C09021.
- Heck D., Pierog T. Extensive air shower simulation with CORSIKA: A user’s guide (Version 74xxx). Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology, 2013. 151 p.
- Gluczykont M., Hampf D., Horns D., et al. The HiSCORE concept for gamma-ray and cosmic-ray astrophysics beyond 10 TeV // Astroparticle Phys. 2014. V. 56. P. 42–53.
- Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН [Электронный ресурс]: сайт. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН. URL: <http://hpc.icc.ru> (дата обращения: 28.05.2017).