

## АСТРОНОМИЯ И ФИЗИКА КОСМОСА

УДК 524.1

ГАММА-АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
НА ТЯНЬ-ШАНЬСКОЙ ВЫСОКОГОРНОЙ СТАНЦИИ  
ФИАН НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВЫДЕЛЕНИЯ ШИРОКИХ  
АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ БЕЗ АДРОННОГО  
И МЮОННОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ

В. А. Рябов<sup>1</sup>, В. В. Жуков<sup>1</sup>, В. В. Пискаль<sup>1</sup>, С. Б. Шаулов<sup>1</sup>,  
А. Л. Щепетов<sup>1</sup>, Т. К. Идрисова<sup>2</sup>, Т. Х. Садыков<sup>2</sup>

*В работе обсуждаются первые результаты и перспективы проведения на детекторах комплекса ТШВНС гамма-астрономических исследований в области энергий ( $10^{12}$ – $10^{17}$ ) эВ без использования дорогостоящих черенковских детекторов. Рассмотрена стратегия использования комплекса детекторов ТШВНС в качестве гамма-астрономической установки: объединение информации о параметрах широких атмосферных ливней (ШАЛ), предоставляемой детекторами ливневой установки, с данными о направлении оси ливня, определенными с помощью детекторов системы измерения задержек фронта ШАЛ, и проведение специального отбора ливневых событий с малым числом мюонов и низким нейтронным сопровождением, а также информации с гамма-блока ионизационного калориметра. Рассмотрены перспективы модернизации комплекса с целью расширения энергетического диапазона вплоть до энергий гамма-ливней  $10^{18}$  эВ.*

**Ключевые слова:** гамма-астрономия, широкие атмосферные ливни, детекторный комплекс, ливневая установка, нейтронный детектор, мюонный детектор, гамма-блок, ионизационный калориметр.

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ryabov@lebedev.ru.

<sup>2</sup> Университет Сатпаева, ТОО “Физико-технический институт”, 050032 Казахстан, Алматы.

В настоящее время во многих астрофизических экспериментах исследования в области гамма-астрономии выходят на передний план [1, 2]. Это связано с тем, что процессы образования и ускорения протонов и ядер в астрофизических источниках сопровождаются генерацией гамма-квантов и нейтрино, которые не рассеиваются в межгалактических и галактических магнитных полях, сохраняя направление на их источник, что, в свою очередь, дает возможность определять местоположение и исследовать природу “космических ускорителей”, таких как пульсары, остатки сверхновых, а также наиболее мощных источников излучения во Вселенной – гамма-всплесков и активных ядер галактик.

Принцип работы подавляющего большинства наземных гамма-телескопов основан на регистрации черенковского света, сопровождающего электромагнитный каскад, порожденный взаимодействием фотонов высокой энергии в верхней атмосфере. Основная проблема при регистрации фотонов наземным гамма-телескопом связана с выделением электромагнитных ливней от фона адронных каскадов, инициированных космическими лучами (в основном протонами). На большинстве современных черенковских гамма-телескопов регистрируется световое изображение поперечного профиля ливня. Разделение воздушных ливней, образованных  $\gamma$ -квантами и частицами космических лучей (КЛ), основано на сравнении наблюдаемой интенсивности черенковского света с результатами расчетов, проводившихся для атмосферных ливней различной природы. Надежная регистрация высокоэнергичных фотонов гамма-телескопом возможна лишь в направлении на какой-либо уже известный астрофизический источник  $\gamma$ -квантов, где интенсивность электромагнитных ливней значительно превышает изотропный фон ливней от взаимодействий адронов в атмосфере. Кроме того, время наблюдения черенковского излучения от атмосферного ливня ограничено периодами безлунных ночей и погодными условиями.

Развитие гамма-астрономических экспериментальных исследований во многом связано с разработкой новых методов наблюдения. В настоящей работе рассмотрены основные принципы проведения гамма-астрономических исследований на ТШВНС, которые не требуют использования дорогостоящих черенковских детекторов, а основаны на выделении среди событий, регистрируемых на детекторах комплекса ШАЛ, ливней с пониженным адронным и мюонным сопровождением.

В настоящее время на ТШВНС работает комплекс регистрации космических лучей, в котором одновременно используются многие типы детекторов, сконцентрированные вокруг двух центров регистрации (рис. 1).

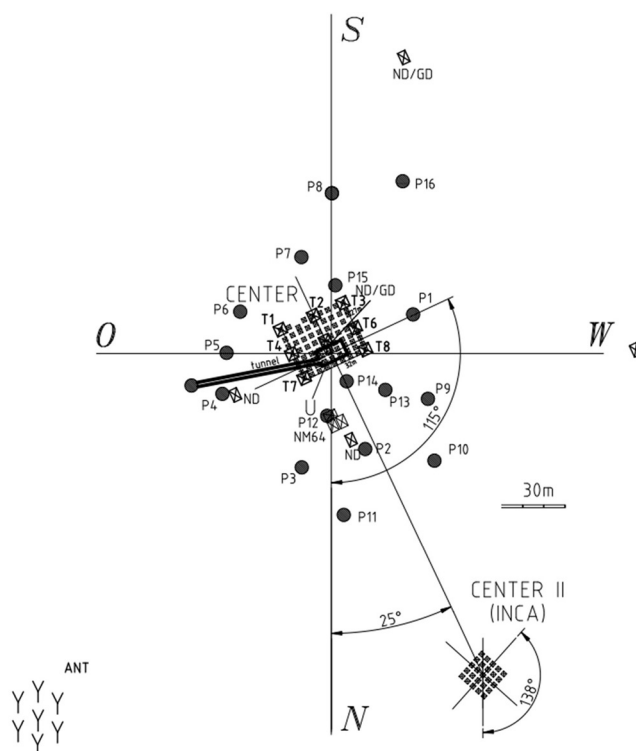


Рис. 1: Общая схема расположения комплекса детекторов ШАЛ на Тянь-Шаньской станции. Квадратами и кружками отмечены детекторы заряженных частиц фронта ШАЛ; CENTER и CENTER II – “ковры” с плотным расположением детекторов; P1–P16 – периферийные детекторы; T1–T8 – временные детекторы для определения направления прихода ШАЛ; INCA – ионизационно-нейтронный калориметр; NM64 – нейтронный монитор; ND/GD – нейтронные и гамма-детекторы; U – комплекс подземных детекторов; ANT – система радиоантенн.

В наземной части первого центра (CENTER) располагается распределенная система сцинтилляционных детекторов заряженных частиц, которая служит для регистрации заряженной компоненты ШАЛ, создаваемых в атмосфере частицами космических лучей с энергией ( $10^{14}$ – $10^{17}$ ) эВ. Установка включает в себя центральный “ковёр” с плотным расположением сцинтилляторов (72 детектора, равномерно распределенных с пространственным шагом  $(3 \times 4)$  м<sup>2</sup>) для регистрации оси ШАЛ с энергией, превышающей (0.31–1 ПэВ), а также 16 периферийных детекторов, которые располагаются на различных расстояниях, вплоть до (30–70) м от центра “ковра”, и служат для измерения плотности потока частиц ШАЛ на периферии ливня. Все детекторы подключены к многоканальной системе АЦП, которая обеспечивает измерение амплитуды сцинтилля-

ционных сигналов в диапазоне  $(1-10^5)$  частиц/м<sup>2</sup>. Достаточно высокая верхняя граница этого диапазона позволяет проводить исследование потока частиц непосредственно в области ствола, то есть на расстояниях  $\sim(0.5-3)$  м от оси ливня, в ШАЛ ПЭВ-ных энергий. Энергетический порог регистрации ШАЛ в ливневой установке составляет значение  $0.3$  ПэВ, что соответствует числу заряженных частиц  $N_e = 10^5$  в ливнях осями, проходящими через площадь центрального “ковра”.

Также к наземной части первого центра относятся нейтронный монитор типа NM64 и распределенная система детекторов тепловых нейтронов и мягких гамма-квантов, служащие для регистрации испарительных нейтронов и связанного с ними гамма-излучения, которые образуются при взаимодействии энергичных адронов ШАЛ как с веществом окружающей среды, так и внутри специальной плотной мишени из свинца в нейтронном мониторе.

Ниже “ковра” сцинтилляционных детекторов первого центра находится подземное помещение, где располагаются детекторы для регистрации мюонной компоненты ШАЛ: мюонный годоскоп и мюонный телескоп, а также подземный нейтронный детектор, предназначенный для регистрации испарительных нейтронов, которые образуются при прохождении мюонов высокой энергии через мишень из плотного вещества [3]. Использование нейтронной методики для исследования мюонной компоненты позволяет оценивать интенсивность потока проходящих через детектор частиц для нескольких порогов по энергии регистрируемых мюонов, начиная с единиц ГэВ и вплоть до сотен ТэВ, а сочетание различных условий выработки триггерного сигнала предоставляет возможность исследования как одиночных мюонов, так и мюонов, следующих в составе ШАЛ. В работе [4] с помощью моделирования в программном пакете Geant 4 исследован отклик подземного детектора на мюоны, рожденные в ШАЛ. Подземный детектор позволяет измерять инклюзивный энергетический спектр мюонов на основе зависимости средней множественности образованных нейтронов от энергии взаимодействующего мюона.

На рис. 2 представлены примеры нескольких событий, соответствующих регистрации нейтронов, образованных в мишени подземного детектора мюонами из стволов ШАЛ. Поскольку после своего рождения испарительные нейтроны быстро, в течение  $\sim 10$  мкс, термализуются, а затем на протяжении нескольких миллисекунд диффундируют во внутреннем объеме детектора, отклик входящих в его состав нейтронных счетчиков на прохождение ствола ШАЛ представляет собой последовательность импульсных сигналов с экспоненциально спадающей интенсивностью. Общее число импульсов,

полученных от всех счетчиков детектора на протяжении некоторого фиксированного времени (“временных ворот”, 4200 мкс в данном эксперименте) после прохождения ливневого фронта, зависит как от числа прошедших через детектор мюонов, так и от их распределения по энергии и может служить характеристикой энерговыделения мюонной компоненты ШАЛ.

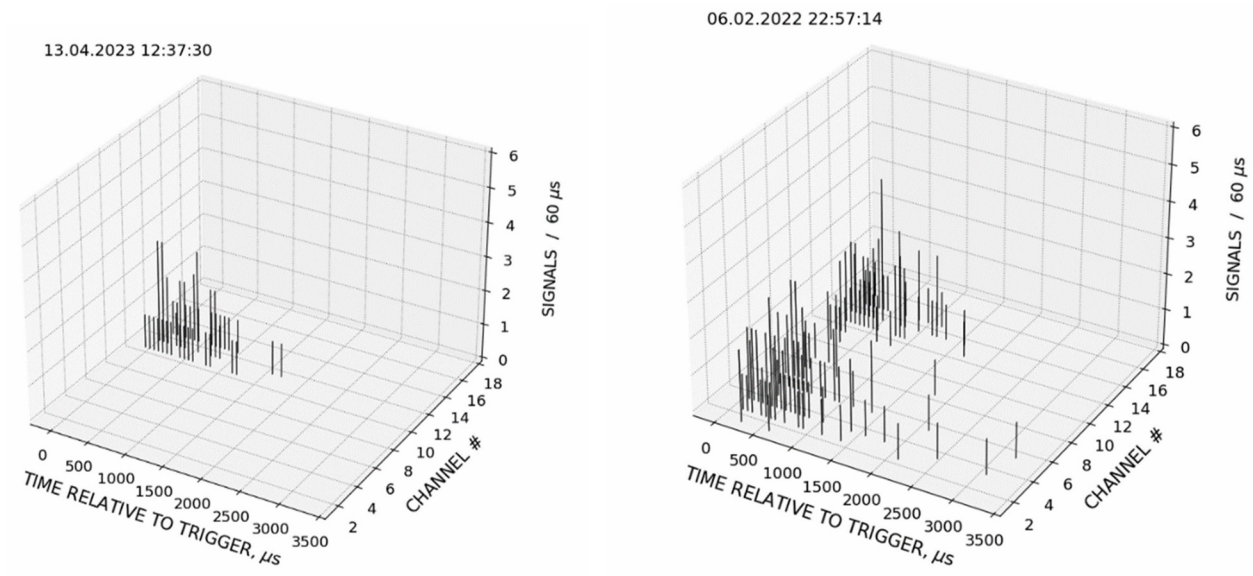


Рис. 2: Примеры событий регистрации нейтронных сигналов в подземном детекторе с ливневым триггером.

К наземной части первого центра относится также временная система быстрых сцинтилляционных детекторов, которая предназначена для определения направления прихода ШАЛ по времени задержки сигналов ливневого фронта, регистрируемых в различных пунктах [5]. Она представляет собой распределенную систему из 8-ми детекторов с малым временем высвечивания сцинтиллятора  $\sim(10-30)$  нс, которые располагаются на площади центрального сцинтилляционного “ковра”, а также включает в себя аппаратуру для непрерывной на протяжении 100 мкс регистрации формы сцинтилляционной вспышки в этих детекторах с временным разрешением порядка нескольких наносекунд. Аналоговые записи сцинтилляционного сигнала используются при расчете взаимных временных задержек между моментами регистрации фронта ШАЛ в нескольких пространственно разделенных пунктах, а эти задержки, в свою очередь, служат для определения направления оси ШАЛ и положения точки прихода первичной частицы космических лучей на небесной сфере. С использованием ливневой установки и систе-

мы определения направления прихода ШАЛ можно восстанавливать азимутальные и зенитные углы для каждого из зарегистрированных ливней.

Все наземные и подземные установки системы CENTER синхронизируются общим ливневым триггером. При этом, используя информацию от нейтронных и гамма-детекторов, возможно выделять события с малым или отсутствующим нейтронным сопровождением, то есть отбирать ливни, образованные гамма-квантами ПэВ-ных энергий. Аналогично, отбирая “безмюонные” события с отсутствующим сигналом от подземных детекторов, можно выделять ШАЛ, образованные первичными гамма-квантами высокой энергии. Кроме того, используя данные с системы определения направления прихода ШАЛ, можно восстанавливать положения источников гамма-излучения ПэВ-ных энергий.

Во втором центре (CENTER II) расположен двухъярусный ионизационно-нейтронный калориметр, состоящий из верхнего гамма-блока и нижнего адронного блока, разделенных двухметровым зазором (рис. 3), а также сеть внутренних и наружных сцинтилляционных детекторов [6]. Гамма- и адронный блоки служат для измерения энерговыделения компонент космического излучения (электронно-фотонной и адронной) и определения траектории движения ШАЛ.

Верхний ярус, называемый гамма-блоком, содержит два ряда ионизационных камер прямоугольного сечения с размерами  $300 \times 12 \times 6$  см<sup>3</sup>, которые располагаются во взаимно-перпендикулярных направлениях и переложены свинцом. Непосредственно поверх этих камер установлены девять сцинтилляционных детекторов, служащие для регистрации заряженных частиц ШАЛ и контроля работы гамма-блока. Нижний ярус, называемый адронным блоком, содержит девять рядов ионизационных камер и один (пятый) ряд, содержащий модули с нейтронными и гейгеровскими счетчиками. Ряды камер чередуются с поглотителем из свинца и железа, а ионизационные камеры в соседних рядах располагаются во взаимно-перпендикулярных направлениях, что позволяет восстанавливать трехмерную структуру прохождения частиц через калориметр. Таким образом происходит одновременное измерение углового и пространственного распределения вторичных частиц различной природы в поперечном и продольном сечениях ливня, что является важной особенностью калориметра.

Принцип регистрации гамма-ливней в ионизационно-нейтронном калориметре заключается в том, что гамма-блок поглощает электронно-фотонную компоненту космических лучей, в то время как адронная компонента, вследствие малой толщины гамма-блока, проходит через него без взаимодействий и начинает взаимодействовать и гене-

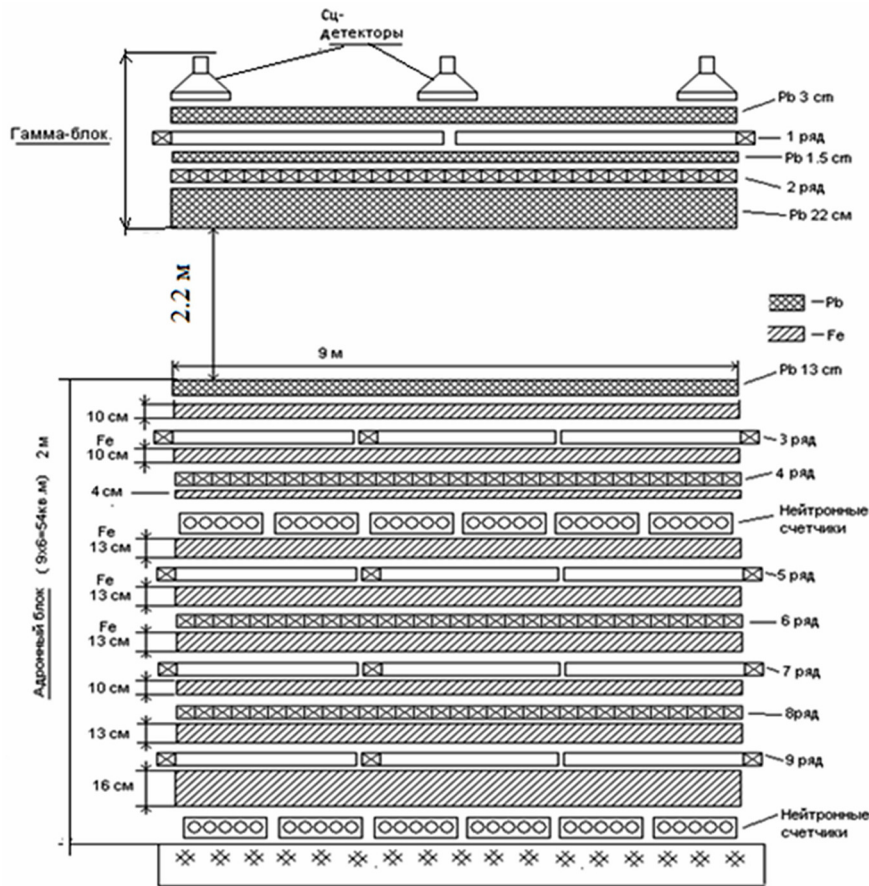


Рис. 3: Схема ионизационно-нейтронного калориметра во втором центре.

ризовать вторичные частицы лишь в адронном-блоке. Поэтому возможно делать отбор связанных с гамма-ливнями событий, в которых взаимодействия частиц регистрируются в гамма-блоке, но отсутствуют в адронном. Порог регистрации гамма-ливней в калориметре составляет  $10^{12}$  эВ. Типичные примеры событий с адронными и гамма-ливнями представлены, соответственно, на рис. 4 и рис. 5.

Энергия электронно-ядерного каскада  $E_0$  является суммой трех типов энергии: энергии, выделившейся в железном поглотителе, энергии электронно-фотонного каскада, образовавшегося в свинцовом поглотителе калориметра, и корректировки на энергию, ушедшую за пределы калориметра и не зарегистрированную из-за конечной толщины поглотителя. В адронном ливне (рис. 4) число зарегистрированных заряженных частиц составило  $N_e = 56458$ , а восстановленная энергия события –  $E_0 = 2.5 \cdot 10^{13}$  эВ. В гамма-ливне (рис. 5) было зарегистрировано  $N_e = 3147$  заряженных частиц, восстановленное значение энергии в этом ливне составило значение  $E_0 = 2.8 \cdot 10^{12}$  эВ.

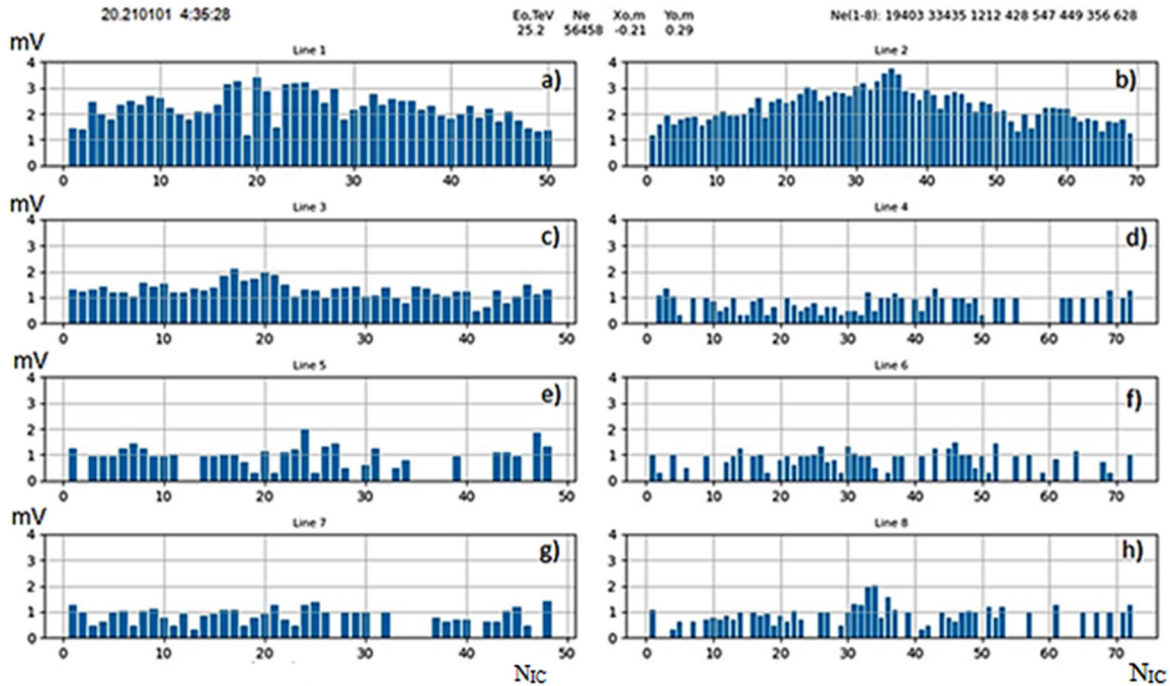


Рис. 4: Событие с регистрацией адронного ливня (данные в милливольтгах): (a) 1 ряд гамма-блок (координатная система  $X$ ); (b) 2 ряд гамма-блока (координатная система  $Y$ ); (c) 1 ряд адронного блока; (d) 2 ряд адронного блока; (e) 3 ряд адронного блока; (f) 4 ряд адронного блока; (g) 5 ряд адронного блока; (h) 6 ряд адронного блока. NiC – номер ионизационной камеры.

Система сцинтиляционных детекторов, расположенная вокруг калориметра и охватывающая площадь  $31000 \text{ м}^2$ , предназначена для исследования электронно-фотонной компоненты ШАЛ и позволяет измерять время прихода ливневого фронта на различные детекторы с точностью до нескольких наносекунд, что необходимо для определения направления инициирующих регистрируемые ШАЛ первичных частиц космических лучей.

При первоначальном анализе банка данных, включающего 1000 зарегистрированных в ионизационно-нейтронном калориметре событий, доля гамма-ливней составила около 5–6%.

Планы дальнейшего развития комплекса ТШВНС связаны также с установкой “Горизонт-Т”, которая была разработана для регистрации ШАЛ, порожденных первичными частицами с энергиями выше  $10^{16}$  эВ и приходящих в широком диапазоне зенитных углов ( $0-80^\circ$ ) [7]. Установка “Горизонт-Т” имеет значительно большую площадь



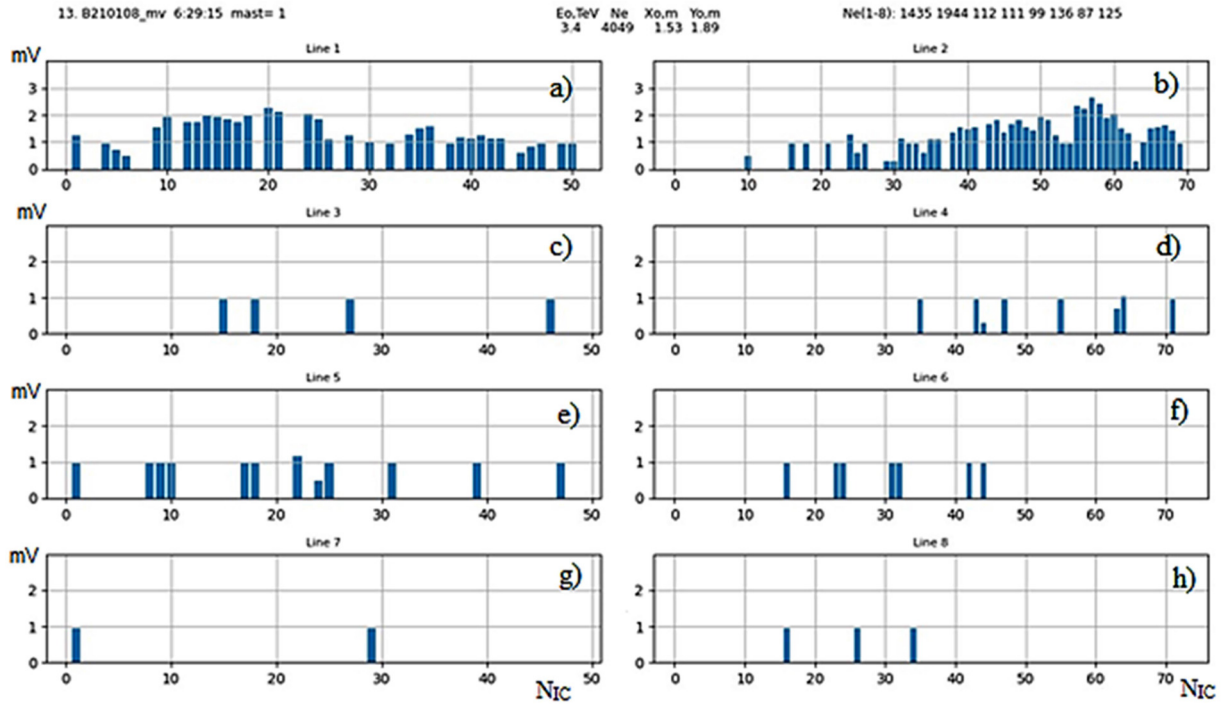


Рис. 5: Событие с регистрацией гамма-ливня (данные в милливольтгах): (a) 1 ряд гамма-блок (координатная система X); (b) 2 ряд гамма-блока (координатная система Y); (c) 1 ряд адронного блока; (d) 2 ряд адронного блока; (e) 3 ряд адронного блока; (f) 4 ряд адронного блока; (g) 5 ряд адронного блока; (h) 6 ряд адронного блока. NIC – номер ионизационной камеры.

размещения детекторов частиц, чем центральная ливневая системе ТШВНС ( $\sim 10 \text{ км}^2$  против  $\sim 0.01 \text{ км}^2$ ). Детекторы установки позволяют определять с точностью 2 нс время прихода заряженных частиц ШАЛ на расстояниях до одного километра путем регистрации полной формы генерируемого этими частицами сцинтилляционного импульса.

Кроме того, развитием методики исследования частиц электронно-фотонной компоненты ШАЛ должна стать система радиоантенн и связанных с ними приемников радиоизлучения в частотном диапазоне 30-100 МГц, предназначенная для регистрации радиоимпульса от заряженных частиц фронта ШАЛ.

Привлечение к управлению подсистемами нейтронных и мюонных детекторов триггерных сигналов от установки “Горизонт-Т” и системы радиоантенн позволит объединить управляющие сигналы всех установок в единый ливневой триггер и, тем самым, расширить энергетический диапазон гамма-астрономических исследований на ТШВНС вплоть до энергий  $10^{18}$  эВ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. M. Hillas, *Astropart. Phys.* **43**, 19 (2013). DOI: 10.1016/j.astropartphys.2012.06.002.
- [2] Zhen Cao, Songzhan Chen, Ruoyu Liu, Ruizhi Yang, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **73**, 341 (2023). <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-112822-025357>.
- [3] А. Л. Щепетов, К. А. Аргынова, Л. И. Вильданова и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **50**(1), 28 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623010074.
- [4] М. Ю. Азаркин, М. Р. Кирокосян, О. В. Мешков и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **51**(5), 74 (2024).
- [5] А. Л. Щепетов, В. В. Жуков, В. А. Рябов и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **51**(5), 18 (2024). DOI: 10.3103/S1068335624600244.
- [6] R. Mukhamedshin, T. Sadykov, A. Serikkanov, et al., *Applied Sciences* **13**(4), 2507 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13042507>.
- [7] R. U. Beisembaev, K. A. Baigarin, D. Beznosko, et al., *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A* **1037**, 166901 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166901>.

Поступила в редакцию 1 августа 2024 г.

После доработки 19 августа 2024 г.

Принята к публикации 20 августа 2024 г.