

АСТРОНОМИЯ И ФИЗИКА КОСМОСА

УДК 524.1

НИЗКОЭНЕРГИЧНЫЕ ФОНОВЫЕ СОБЫТИЯ НА УСТАНОВКЕ ГОРИЗОНТ-Т

НА ТЯНЬ-ШАНЬСКОЙ ВЫСОКОГОРНОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ ФИАН

М. И. Вильданова¹, А. М. Анохина^{2,3}, В. С. Асейкин⁴, К. А. Байгарин⁵, Е. А. Бейсембаева¹,
В. В. Жуков¹, В. А. Рябов¹, М. А. Самойлов^{1,2,3}, Т. Х. Садыков⁶, С. Б. Шаулов¹

Установка Горизонт-Т на Тянь-Шаньской станции ФИАН предназначена для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) сверхвысоких энергий. Возможности аппаратуры позволяют оцифровывать сигнал, регистрируемый в сцинтилляционных детекторных пунктах, с разрешением 2 нс и исследовать тонкую временную структуру ШАЛ, в частности, так называемые мультимодальные события. В настоящей работе изучен возможный вклад низкоэнергичных ($10^{12} \leq E \leq 10^{16}$ эВ) ливней в регистрируемый сигнал. Рассмотрены фоновые события, регистрируемые в эксперименте Горизонт-Т, которые могут быть случайно включены в регистрируемое событие ШАЛ, а также низкоэнергичные искусственные события, смоделированные с помощью кода CORSIKA-77500. Делается вывод об оптимальности параметров моделирования и вкладе случайных низкоэнергичных ливней во временные развертки, регистрируемые от высокоэнергичных ШАЛ.

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни, сцинтилляционные детекторы.

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

² Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991 Россия, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2; e-mail: anokhannamsu@gmail.com.

³ НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991 Россия, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2.

⁴ Независимый исследователь, адрес для корреспонденции: 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53, ФИАН.

⁵ Назарбаев Университет, Казахстан, 010000, Астана, пр. Кабанбай батыра, 53.

⁶ Университет Сатпаева, ТОО “Физико-технический институт”, 050032 Казахстан, Алматы, мкр. Алатау, ул. Ибрагимова, 11.

Введение. В настоящей работе обсуждается сигнал от низкоэнергичной компоненты ШАЛ, регистрируемый на установке Горизонт-Т [1], рис. 1, расположенной на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН и предназначенной для регистрации ШАЛ сверхвысоких энергий. Временная развертка сигнала от сцинтилляционных детекторов установки Горизонт-Т оцифровывается с разрешением 2 нс, что позволяет исследовать тонкую временную структуру ШАЛ. Одна из задач эксперимента Горизонт-Т связана с исследованием так называемых мультимодальных событий, т. е. ШАЛ с несколькими разделенными на сотни нс импульсами [2–4].

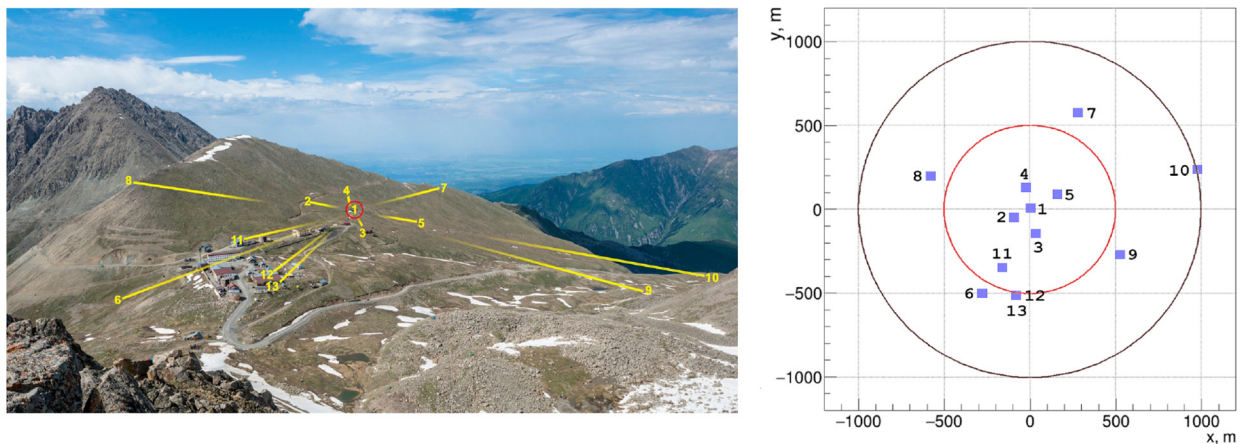


Рис. 1: Общий вид установки Горизонт-Т и схема расположения детекторов в плоскости XY .

Высказывались и продолжают высказываться различные гипотезы для объяснения такого рода событий, проявляющих себя как ШАЛ с несколькими фронтами или с запаздывающими частицами см., напр. [5–8], а также, связанных с частицами и взаимодействиями вне Стандартной Модели [9, 10].

Пороговая энергия установки Горизонт-Т в режиме совпадений составляет около 10^{16} эВ, см. [1]. Для полноценного анализа временной структуры ливней необходимо ответить на вопрос, могут ли частицы атмосферных каскадов от низкоэнергичной (относительно порога) компоненты спектра космических лучей (КЛ) внести вклад в формирование мультимодальных событий, попадая случайно во временные ворота системы регистрации установки при прохождении высокоэнергичных ШАЛ. С другой стороны, оценка фонового сигнала от низкоэнергичных ливней также является полезной для любых других задач, которые поставлены или могут быть поставлены для эксперимента Горизонт-Т.

Была проведена специальная серия записи фонового сигнала во всех детекторных пунктах, причем без критерия наличия совпадений в двух или более детекторах. Т.е. происходило регулярное фиксирование имеющихся сигналов в равных временных промежутках, в которые случайным образом могли попасть ливневые частицы по одиночке или группой. Первый этап анализа этих данных был выполнен в работе [11].

Пример временных разверток, полученных от 7 детекторов с единичным фоновым импульсом по одному из каналов (слева) и пример мультимодального события (справа), показаны на рис. 2.

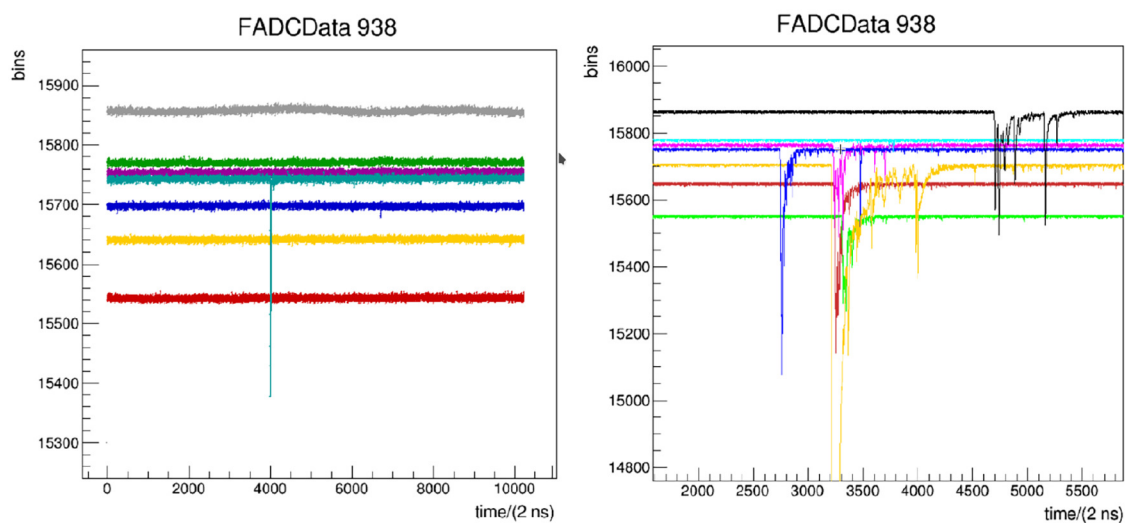


Рис. 2: Временные развертки фонового события (по одному из каналов) и мультимодального события, записанные по нескольким каналам ADC.

Целью данной работы является сравнение собранных таким способом экспериментальных данных, которые могут быть интерпретированы как фоновый сигнал от низкоэнергичных атмосферных каскадов, с модельными данными, полученными с помощью кода CORSIKA-77500 [12, 13] для диапазона энергий первичных частиц от 10^{12} до 10^{16} эВ.

Характеристики установки Горизонт-Т и параметры моделирования ШАЛ. Установка Горизонт-Т состоит из 13 детекторных пунктов и предназначена для регистрации электронно-мюонной компоненты ШАЛ с энергиями выше 10^{16} эВ и зенитными углами до 70° . Схема расположения детекторов представлена на рис. 1. В пункте 1 находится центр регистрации. На расстояниях 110 – 190 м от центра радиально расположены 4 пункта ближней периферии (пп. 2 – 5). На расстояниях 380 – 1030 м от центра ради-

ально расположены 8 пунктов дальней периферии (пп. 6 – 13). Разница высот между пунктами регистрации достигает 255 м. В центр регистрации сигналы с детекторов передаются по линиям связи на основе коаксиальных кабелей.

В каждом пункте находится сцинтилляционный детектор, расположенный в горизонтальной плоскости и состоящий из пластины полистирола с оптическими добавками. Площадь сцинтиллятора составляет 1 м^2 . Толщина сцинтиллятора составляет 10 см (в детекторах ближней периферии и в центре регистрации) и 5 см (в детекторах дальней периферии). В пункте 13 находится подземный детектор с порогом для мюонов в 5 ГэВ [14]. В центре регистрации (п. 1) находится дополнительный черенковский детектор на основе пластины стекла площадью 0.62 м^2 и толщиной 30 мм. Время свечения используемых сцинтилляторов $\sim 5 \text{ нс}$.

В детекторах ближней периферии и в центре регистрации сцинтилляционная вспышка регистрируется с помощью ФЭУ Hamamatsu [15] R7723 с диаметром фотокатода 46 мм и временем нарастания импульса 1.7 нс. В детекторах дальней периферии используются ФЭУ Hamamatsu H6527 с диаметром фотокатода 120 мм и временем нарастания импульса 2.5 нс. ФЭУ с такими параметрами были выбраны специально, чтобы регистрировать частицы ШАЛ с наносекундным временным разрешением.

В центре регистрации сигналы, поступающие с детекторов, оцифровываются с помощью восьмиканальных флэш-АЦП DT5730 фирмы CAEN [16] с разрешением 2 нс по временной шкале и 2^{14} бинов по шкале амплитуд (что соответствует 2 В), и сохраняются в сжатый двоичный файл root. Длина записи события составляет $\sim 20 \mu\text{s}$ (10230 временных отсчетов с $\Delta t = 2 \text{ нс}$). Триггерный сигнал вырабатывается одним из АЦП, подается на размножитель сигналов и затем как внешний триггер подается на группу АЦП. Нуль-пункты используемых АЦП синхронизируются импульсом от триггера с того же размножителя сигналов. Временные ворота триггера составляют $\sim 2 \mu\text{s}$. Наиболее полно характеристики аппаратуры описаны в [1].

Численное моделирование регистрации ШАЛ установкой Горизонт-Т проводилось с помощью кода CORSIKA-77500. Для оптимизации процесса моделирования сигнала от ШАЛ в различных детекторных пунктах было решено сгруппировать все детекторы по семи уровням наблюдения: 3379, 3358, 3350, 3327, 3307, 3252, 3125 м над уровнем моря. Соответственно, моделирование каждого ливня проводилось с записью частиц на каждом из выбранных уровней наблюдения, соответствующих высотам детекторов. С учетом небольших толщин защитных покрытий и световодов в детекторных пунктах были выбраны пороговые энергии 50 МэВ для адронов, 10 МэВ для мюонов, 1 МэВ для

электронов и 5 МэВ для гамма-квантов. В качестве адронной модели взаимодействия при компиляции CORSIKA были использованы опции QGSII и GHEISHA.

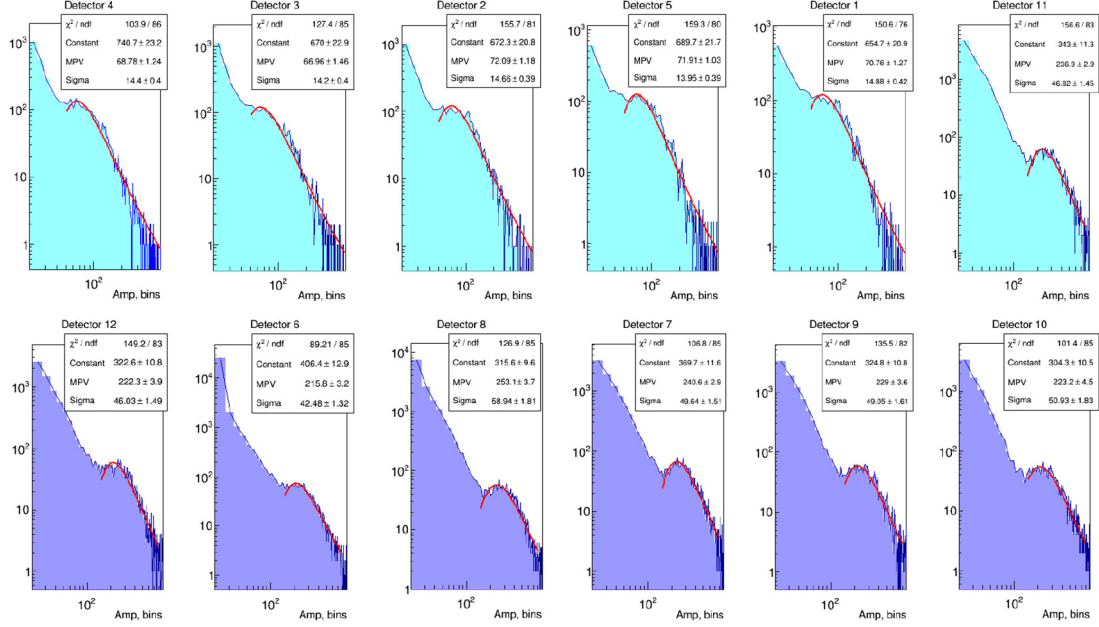


Рис. 3: Участки экспериментальных распределений амплитуд в 12 детекторах установки Горизонт-Т и аппроксимации правой части распределений функциями Ландау.

Экспериментальные события. Для набора экспериментальных фоновых событий установка запускалась триггером, сформированным сигналом от генератора Г5-72 с частотой 10 Гц. Как и в рабочем режиме установки при регистрации ШАЛ, длина записи составляла $\sim 20 \mu\text{s}$. Все импульсы со всех детекторов, пришедшие в данные временные ворота, являются случайными. Порог регистрации для этих импульсов не вводился, регистрировалось все, что происходило в детекторах. Всего было набрано 220 000 событий за 6.1 часа. Суммарное время всех полученных временных разверток составило 4.5 с.

На рис. 3 представлены распределения амплитуд импульсов для всех детекторов за полное время наблюдения, кроме двух особенных (подземный в п. 13 и черенковский в п. 1). Красными линиями обозначены аппроксимации правых участков распределений функциями Ландау, используемые для калибровки.

В течение сезона при регистрации высокоэнергичных ШАЛ установка регулярно калибруется. Калибровка проводится путем самозапуска от сигналов детекторов через рабочий кабель на порогах существенно меньших, чем амплитуда одной частицы для

данного детектора (пороги подобраны экспериментально). Таким образом, калибровка охватывает всю систему детектор — кабель, находящуюся в том же состоянии, как и при регистрации физических событий.

Процедура калибровки экспериментальных данных исследуемого случайного набора импульсов была проведена в предположении, что максимум функции Ландау MPV , соответствующий наиболее вероятному значению энергосвечения в детекторе в условных единицах (бинах), соответствует амплитуде сигнала при прохождении через детектор одной частицы. Во врезках на рис. 3 и в табл. 1 приведены величины параметров MPV , которые были приняты в качестве калибровочных коэффициентов.

Т а б л и ц а 1

Калибровочные коэффициенты

Detector	4	3	2	5	1	11
K	68.8	67.0	72.1	71.9	70.8	236.9
Detector	12	6	8	7	9	10
K	222.3	215.8	253.1	240.6	229.0	223.2

При наличии калибровочных коэффициентов можно получить спектры по количеству вторичных частиц в одном импульсе (рис. 4). Количество частиц, попавших в каждый из детекторов за полное время наблюдения (4.5 с), было получено интегрированием данных распределений справа от оптимально подобранных границ — синие линии на рис. 4. Количество обнаруженных импульсов в каждом из детекторов, амплитуда которых соответствует одной или более частицам N_E , а также полное число частиц N_p за время наблюдения указано в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Количество импульсов и частиц в детекторах за время наблюдения

Detector	4	3	2	5	1	11
N_E	1763	1616	1676	1647	1641	1583
N_p	2648	2517	2345	2333	2329	2309
Detector	12	6	8	7	9	10
N_E	1225	1403	1577	1630	1578	1503
N_p	1727	2006	2319	2373	2482	2356

Вся статистика найденных импульсов во всех детекторах была исследована на временную равномерность. На рис. 5 приведено распределение по времени прихода импуль-

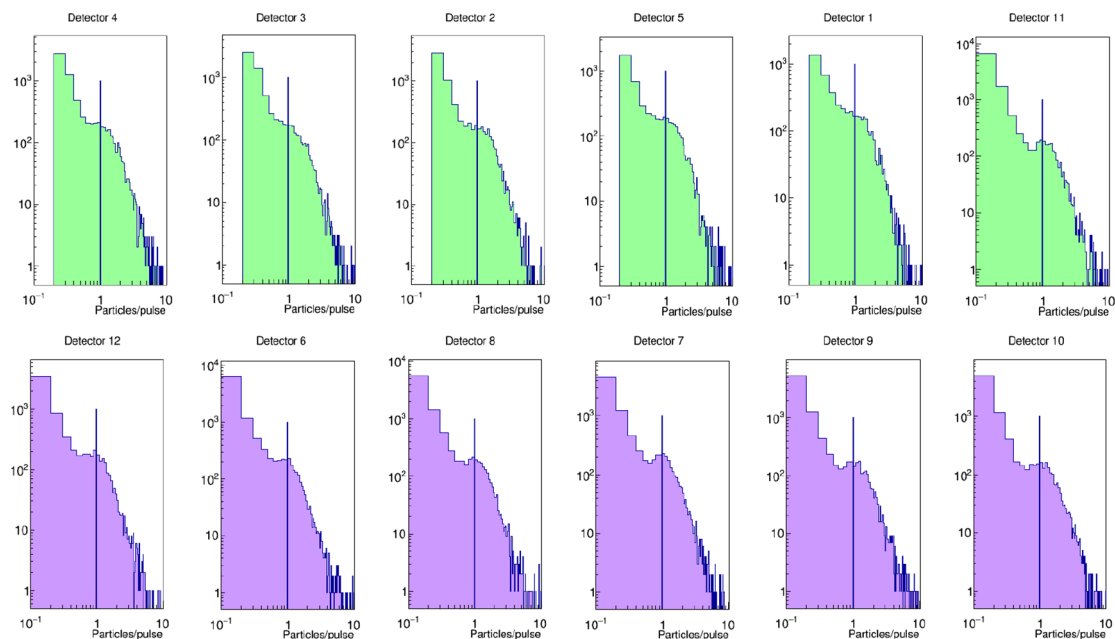


Рис. 4: Распределения по количеству частиц в одном зарегистрированном импульсе, определенные с помощью калибровочных коэффициентов.

са от начала записанного временного промежутка, свидетельствующее об отсутствии каких-либо временных особенностей.

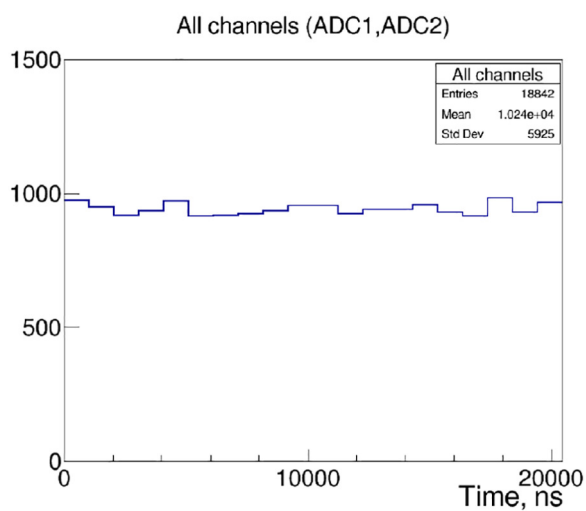


Рис. 5: Распределения по временам прихода импульсов с амплитудами, большими чем амплитуда сигнала от одной частицы с учетом калибровочных коэффициентов.

Смоделированные события. Для сопоставления параметров моделирования искусственных событий с наблюдаемой экспериментальной скоростью счета необходимо было подобрать параметры моделирования (угловой и энергетический диапазон первичных частиц, пороги по энергиям для различных частиц каскада), обеспечивающие близкие величины экспериментальных и расчетных скоростей счета. На рис. 6 приведены энергетические распределения вторичных частиц различных типов на среднем из 7 уровней наблюдения. На основании приведенных распределений можно сделать вывод о том, что указанные выше параметры моделирования (диапазон энергий от 10^{12} до 10^{16} , показатель спектра первичных частиц -2.5 , пороговые энергии 50 МэВ для адронов, 10 МэВ для мюонов, 1 МэВ для электронов и 5 МэВ для гамма-квантов) были подобраны удовлетворительно – распределения на уровне пороговых значений энергии прошли через максимум и значительно спадают. На рис. 6 справа показано распределение зенитных углов первичных протонов, ливневые частицы которых достигли уровня наблюдения и могут быть зарегистрированы.

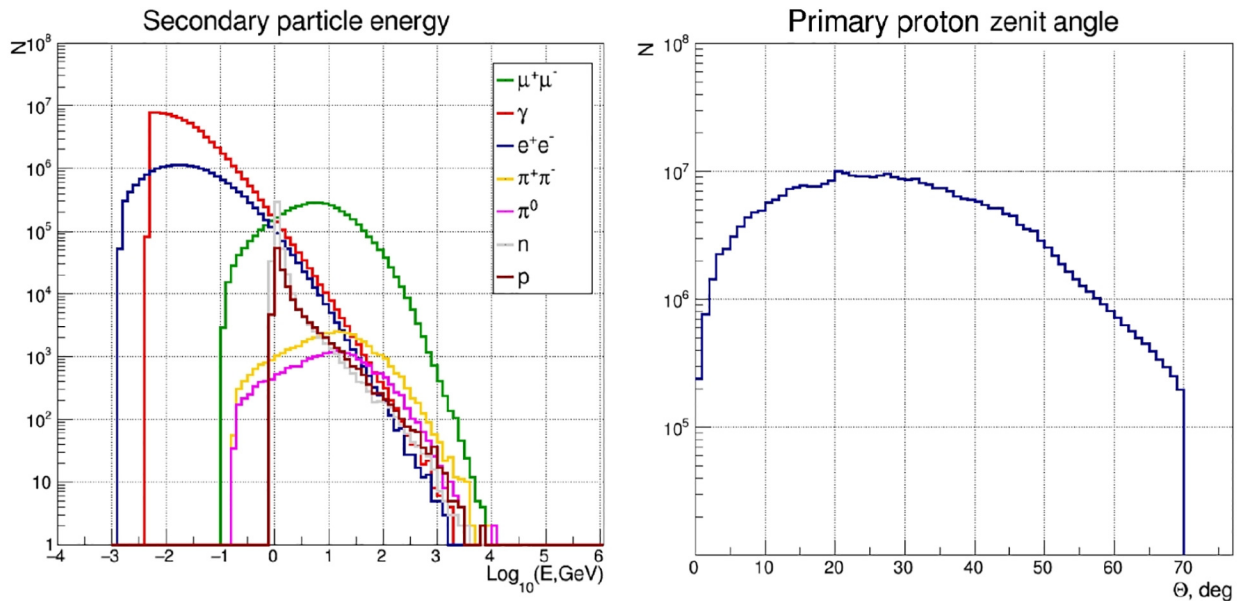


Рис. 6: Энергетические распределения вторичных частиц на уровне наблюдения 3327 м (слева), зенитные углы первичных протонов, ливневые частицы которых достигли уровня наблюдения (справа).

В настоящей работе изучаются допороговые ливни, производящие сигнал в отдельных детекторах Горизонт-Т, без режима совпадений. Эффективность регистрации ШАЛ установкой в зависимости от энергии первичного ядра будет представлена в сле-

дующих работах при моделировании ШАЛ с энергиями больше 10^{16} эВ. Для задачи исследования фоновых событий на рис. 7 приведены расчетные функции пространственного распределения (ФПР) частиц (плотности частиц) с энергиями выше порогов, заданных при моделировании для ливней, близких к вертикальным ($0 - 30^\circ$), и сильно наклонных ($30 - 70^\circ$) для всех семи уровней наблюдения. Плотности частиц были получены усреднением смоделированного сигнала по площади кольца шириной 1 м на уровне наблюдения. В нормировку по количеству ливней не входили смоделированные каскады, частицы которых не достигли уровня наблюдения, что важно для правильной нормировки самых низкоэнергичных ливней. Основываясь на рис. 7 можно предположить, что для задачи определения положения оси ливня по смоделированным функциям пространственного распределения частиц, можно будет пользоваться едиными, например усредненными по всем семи высотам, функциями пространственного распределения, т. к. ФПР для всех семи уровней наблюдения установки Горизонт-Т практически не отличаются. Учитывать разность высот нужно будет при определении направления оси ливня по задержкам сигнала в различных детекторных пунктах. Исходя из приведенных ФПР становится ясно, что фоновые события обеспечиваются одиночными частицами близких к вертикальным ливней с энергиями $> 5 \cdot 10^{12}$ эВ и сильно наклонными с энергиями $> 10^{13}$ эВ.

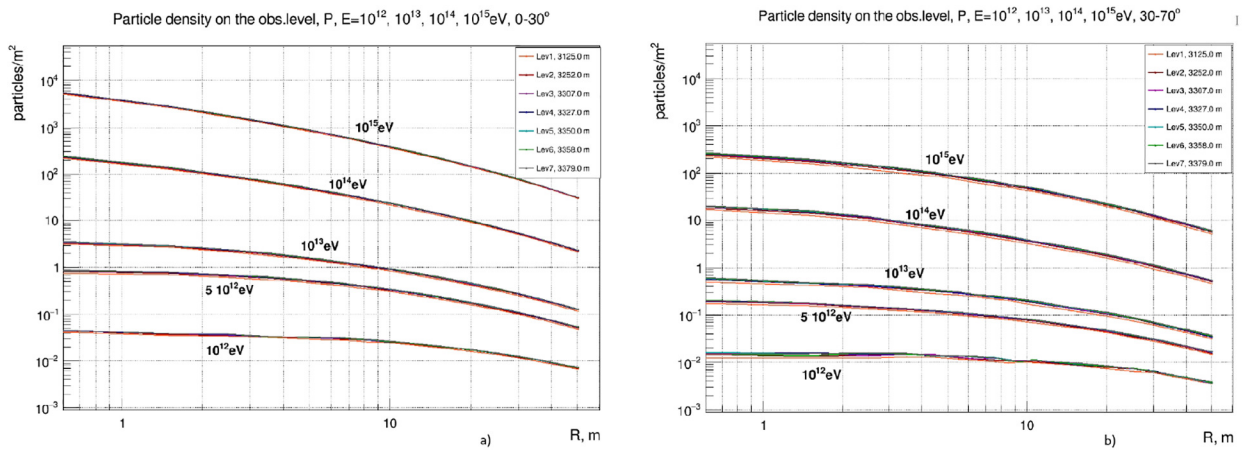


Рис. 7: Пространственные распределения вторичных частиц низкоэнергичных ливней.

На рис. 8 показано, как выглядит усреднённое по выборке из 100000 протонных ливней смоделированное распределение плотности частиц на уровне наблюдения 3327 м.

Нормировка модельных данных по потоку первичных космических ядер. На заключительном шаге моделирования для учета различных расстояний от осей каскадов до

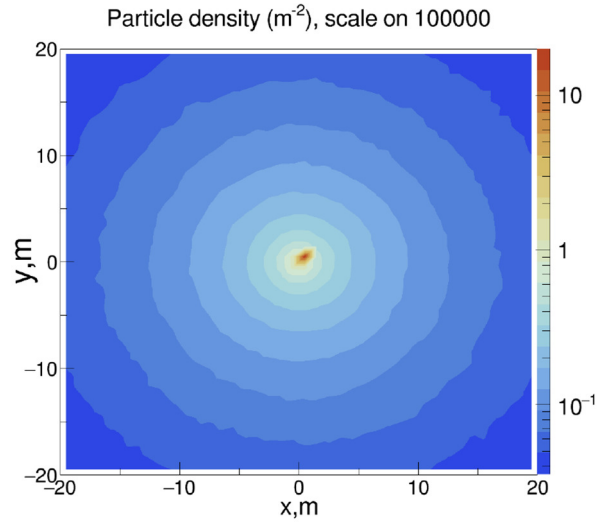


Рис. 8: Средние плотности вторичных частиц (для одного ливня).

детекторов вся система установки Горизонт-Т двигалась случайно равномерно с размещением центрального детектора в пределах круга с радиусом 1000 м. Т.е. каждый из 500 000 смоделированных откликов от 100 000 оригинальных ливней располагался случайно относительно расположения детекторов. С учетом расстояний от центра установки до детекторов дальней периферии эффективная площадь составила круг с радиусом 1640 м. Далее, пересчитывались частицы, которые попадают в 1 м^2 каждого детектора. Результаты показаны на рис. 9. Наиболее часто случаются попадания в детекторы по одной частице, однако возможны и события с несколькими (до 10–12) частицами в детекторе. Среднее значение по всем детекторам, исключая самый удаленный (10), составило 111.0 срабатываний для 500 000 первичных протонных ливней.

Интегральный поток всех ядер КЛ (и, соответственно, количество атмосферных ливней) в диапазоне энергий от 10^{12} до 10^{16} эВ в телесном угле с углом раствора $2 \times 70^\circ$ был получен интегрированием спектра всех частиц из работы [17] и составил $0.59 \text{ с}^{-1} \text{ м}^{-2}$. Следовательно, на эффективную площадь установки должно попадать 2.47×10^6 осей низкоэнергичных ливней в секунду. На рис. 10 показаны исходный спектр протонов и спектр тех протонных ливней, вторичные частицы которых попали в смоделированные детекторы Горизонт-Т, а также зависимость скорости от нижней пороговой энергии рассматриваемого спектра первичных протонов.

С учетом смоделированной эффективности срабатывания детекторов, рассчитанная с помощью кода CORSIKA скорость фонового счета составила около 550 частиц в се-

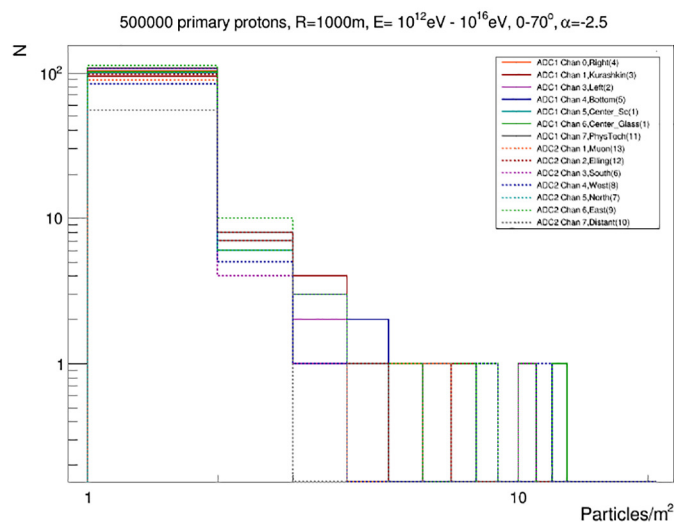


Рис. 9: Распределения по количеству частиц в различных детекторных пунктах установки Горизонт-Т для 500 000 протонных ливней.

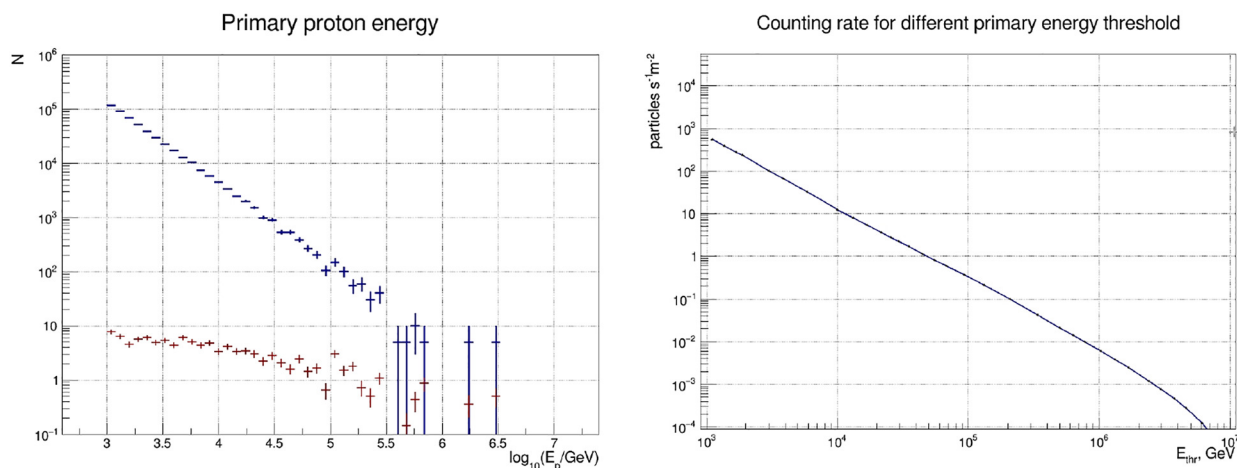


Рис. 10: Исходный смоделированный спектр протонов и первичные энергии протонных ливней, зарегистрированных моделью установки Горизонт-Т (слева); смоделированные скорости счета вторичных частиц в зависимости от пороговой энергии смоделированного спектра протонов (справа).

кунду в детекторе площадью 1 м^2 на уровне наблюдения 3327 м над уровнем моря для пороговой энергии 10^{12} эВ.

Среднее экспериментальное значение скорости счета составило 514 частиц в секунду, что хорошо согласуется с расчетной величиной.

Заключение. В настоящей работе представлены результаты анализа специального набора экспериментальных данных, полученных на установке Горизонт-Т Тянь-Шаньской станции ФИАН, изначально предназначенной для регистрации высокоэнергичных ШАЛ. Данные содержали информацию о фоновых независимых (без режима совпадений) сигналах в каждом из детекторных пунктов. Предполагалось, что такого рода сигнал обусловлен многочисленными низкоэнергичными атмосферными ливнями. Была поставлена задача на основе данного экспериментального материала оценить вклад фоновых событий в так называемые мультимодальные энергичные события ШАЛ, регистрируемые на установке Горизонт-Т.

Экспериментальные временные развертки были проанализированы, с учетом калибровочных коэффициентов построены амплитудные спектры импульсов фоновых событий, оценено среднее количество частиц, попадающее в фоновом режиме в детекторы.

Моделирование ливней, проведенное с помощью кода CORSIKA для протонов с энергиями от 10^{12} до 10^{16} эВ, а также последующая нормировка по соответствующему интегралу участка первичного спектра КЛ позволили получить модельное количество частиц в детекторе площадью 1 м^2 в единицу времени.

Сравнение экспериментальной и модельной скоростей счета позволило заключить, что предположение о том, что экспериментальные фоновые события обусловлены именно низкоэнергичными ливнями является верным. Хорошо совпали также экспериментальные и модельные величины максимального количества частиц, попадающих в детектор площадью 1 м^2 за одно событие.

Что же касается задачи, связанной с мультимодальными событиями, то тут можно сделать вывод о том, что фоновые импульсы, обусловленные низкоэнергичными ливнями, не могут имитировать мультимодальные события, а также вносить значительный вклад в их временную структуру так как, во-первых, не соответствуют по небольшой амплитуде (в основном 1–2 частицы, максимально 10–12 частиц), а, во-вторых, практически не повторяются в течение временных разверток длиной в 20 мкс . Однако такого рода случайные импульсы можно будет учесть при анализе тонкой временной структуры мультимодальных событий.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] 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>.
- [2] Р. У. Бейсембаев, Ю. Н. Вавилов, Н. Г. Вильданов и др., ЯФ **72**, 1913 (2009). <https://doi.org/10.1134/S1063778809110088>.

- [3] В. И. Яковлев, М. И. Вильданова, Н. Г. Вильданов, Письма в ЖЭТФ **85**(2), 111 (2007). DOI: 10.1134/S0021364007020014.
- [4] Р. У. Бейсембаев, Е. А. Бейсембаева, О. Д. Далькаров и др., ЯФ **82**(6), 495 (2019). DOI: 10.1134/S0044002719060035.
- [5] H. Sakuyama, N. Suzuki, K. Watanabe, K. Mizushima, Delayed Particles in EAS at Akeno. Proc. 19 ICRC. 8 279 (1985).
- [6] В. Б. Атрашкевич, О. В. Веденеев, Г. К. Гарипов и др., Изв. РАН. Сер. физ. **58**(12), 98 (1994).
- [7] А. П. Чубенко, А. Л. Щепетов и др., Изв. РАН. Сер. физ. **69**(3), 379 (2005).
- [8] Н. М. Буднев, Р. Вишневский и др., Изв. РАН. Сер. физ. **73**(5), 627 (2009).
- [9] D. Beznosko, K. Baigarin, R. Beisembaev, et al., Probing Fundamental Physics With Multi-Modal Cosmic Ray Events. – 2022. arXiv:2204.04045v4 [hep-ex] 1 May 2022.
- [10] A. Zhitnitsky, Multi-Modal Clustering Events observed by Horizon-10T and Axion Quark Nuggets, Universe 2021, 7, 384.
- [11] Ф. К. Гасратов, Е. А. Бейсембаева, М. И. Вильданова и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **52**(4), 3 (2025).
- [12] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, et al., CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. – 1998. FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE Technik und Umwelt Wissenschaftliche Berichte FZKA-6019. <https://www.iap.kit.edu/corsika/70.php>.
- [13] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, et al., CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers, <https://www.iap.kit.edu/corsika/70.php>.
- [14] А. Л. Щепетов, В. В. Жуков, В. А. Рябов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **51**(11), 5 (2024). <https://doi.org/10.3103/S1068335624600244>
- [15] Hamamatsu Corporation, 360 Foothill Road, PO Box 6910, Bridgewater, NJ 08807-0919, USA; 314-5, Shimokanzo, Toyooka-village, Iwatagun, Shizuoka-ken, 438-0193 Japan.
- [16] CAEN S.p.A. Via della Vetraria, 11, 55049 Viareggio Lucca, Italy. <http://caen.it>
- [17] T. K. Gaisser, Astropart. Phys. **35**, 801 (2012). DOI: 10.1016/j.astropartphys.2012.02.010.

Поступила в редакцию 16 февраля 2025 г.

После доработки 8 апреля 2025 г.

Принята к публикации 9 апреля 2025 г.