УДК 524.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ПРИХОДА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ДЕТЕКТОРОВ ФРОНТА ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ НА ТЯНЬ-ШАНЬСКОЙ ВЫСОКОГОРНОЙ СТАНЦИИ

А. Л. Щепетов[1], В. В. Жуков[1], В. А. Рябов[1], Н. О. Садуев[3], Т. Х. Садыков[2]

На Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН создана система детекторов фронта широких атмосферных ливней, обладающая высоким временным разрешением и служащая для определения направлений прихода порождающих ливни частиц первичных космических лучей. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для анализа информации, поступающей от этой системы, которые позволяют получать оценки азимутального и зенитного углов для каждого из зарегистрированных ливней. Эта информация дает возможность исследовать крупномасштабное распределение направлений прихода первичных частиц космических лучей на небесной сфере.

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни, сцинтилляционные детекторы, направления прихода фронта ливня.

Измерения энергетического спектра космических лучей (КЛ), массового состава и изучение анизотропии направлений их прихода из космического пространства являются предметом исследования многочисленных экспериментов. При энергиях КЛ около $3 \cdot 10^{15}$ эВ в различных экспериментах наблюдается излом спектра, получивший название “колено”, природа которого является предметом дискуссий на протяжении более чем

[1] ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ryabov@lebedev.ru.

[2] Университет Сатпаева, ТОО “Физико-технический институт”, 050032 Казахстан, Алматы.

[3] Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Институт экспериментальной и теоретической физики, 050040 Казахстан, Алматы.

60-летней истории наблюдений. Для объяснения поведения КЛ в области энергий "колена" предложен ряд астрофизических моделей, для проверки которых был разработан высокочувствительный разностный метод анализа данных распределения направлений прихода первичных частиц КЛ на небесной сфере [1, 2].

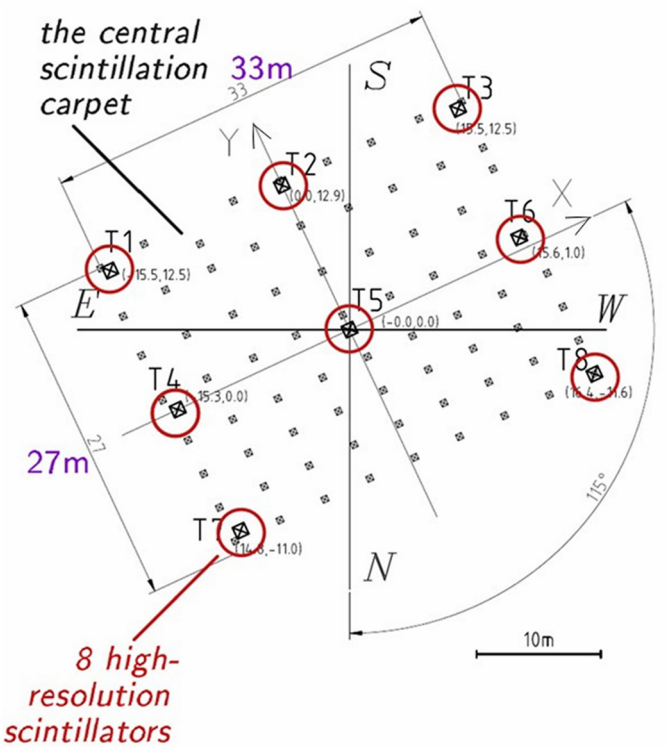


Рис. 1: *Схема расположения быстрых сцинтилляторов-детекторов ливневого фронта в составе ливневой установки Тянь-Шаньской станции.*

В состав экспериментального комплекса Тянь-Шаньской высокогорной станции (ТШВНС) [3] входит система специальных детекторов, которые служат для определения направления оси широких атмосферных ливней (ШАЛ) по относительным задержкам моментов прохождения ливневого фронта через ряд пространственно-разнесенных пунктов. Общая схема расположения детекторов системы определения направлений ШАЛ показана на рис. 1. Восемь детекторов установки (T1–T8) размещаются в середине и по краям центрального "ковра" сцинтилляционных детекторов ливневой системы Тянь-Шаньской станции. Детекторы "ковра" обеспечивают измерение пространственного распределения плотности потока частиц в плоскости установки, а также служат для выработки общего синхронизирующего сигнала, триггера, который индицирует момент прохождения ШАЛ и инициирует сбор и анализ информации от детекторов ливне-

вой установки. Как следует из рис. 1, максимальное расстояние между детекторами подсистемы определения углов ШАЛ составляет ∼(30–35) м. Начало используемой в данном эксперименте системы координат совпадает с геометрическим центром “ковра” ливневых детекторов; в этой же точке находится центральный детектор T5 подсистемы определения углов прихода ШАЛ.

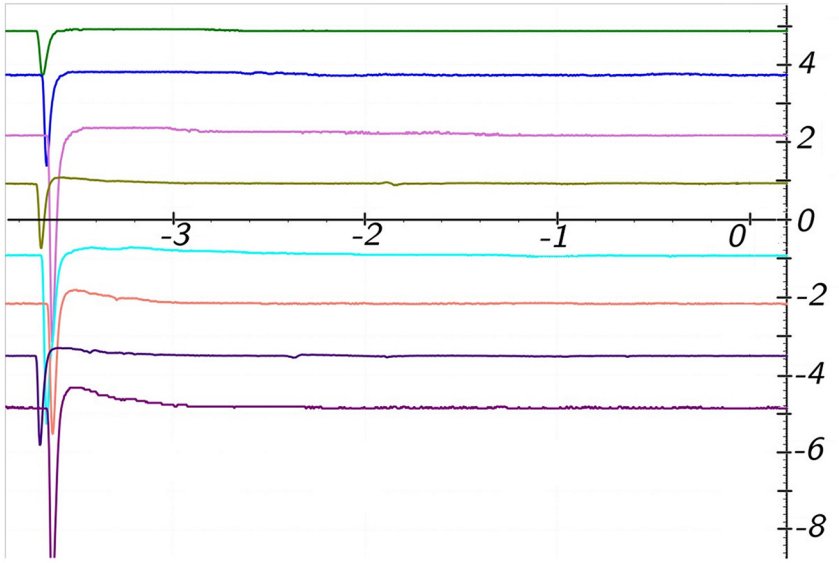


Рис. 2: *Пример записи сигналов от сцинтилляторов-детекторов ливневого фронта при регистрации события ШАЛ. По горизонтальной оси – время в микросекундах; нуль оси* ($t = 0$) *соответствует моменту ливневого триггера. По вертикальной оси – амплитуда сцинтилляционного сигнала в относительных единицах.*

Выходные сигналы сцинтилляционных детекторов T1–T8 подключены с помощью коаксиальных кабелей строго одинаковой длины к системе сбора данных, которая представляет собой блок амплитудно-цифровых преобразователей (АЦП), обеспечивающих одновременную оцифровку восьми аналоговых сигналов с точностью 14 двоичных бит и временным разрешением 4 нс. Процесс оцифровки запускается триггерным импульсом, который вырабатывается ливневой установкой Тянь-Шаньской станции. Типичный пример осциллограмм сигнала от частиц ШАЛ показан на рис. 2. Как следует из рис. 2, характерная продолжительность регистрируемых импульсов составляет (50–100) нс, длительность их переднего (спадающего) фронта равняется (10–30) нс, а сигнал триггера запаздывает на (3.5–4) мкс относительно момента прохождения релятивистских частиц ШАЛ – фиксированное время, необходимое для устойчивой генерации триггерного импульса и его трансляции между отдельными подсистемами ливневой установки.

Разработанная для управления системой детекторов фронта ШАЛ программа r13 обеспечивает содержательный анализ поступающих от блока АЦП данных: автоматизированный поиск переднего фронта импульса в каждой зарегистрированной осциллограмме; расчет временных задержек (в долях микросекунд) между положениями фронта в сигналах детекторов T1–T8; оценку на основе этих задержек наиболее вероятных углов, определяющих направление оси ШАЛ: азимутального Ф (растет против часовой стрелки от положительного направления оси X на рис. 1) и зенитного θ (растет от зенита к горизонту).

Математически процедура, разработанная для определения направления прихода ШАЛ, основана на минимизации функционала, представляющего собой сумму квадратов разницы между измеренными задержками момента регистрации фронта ШАЛ в центральном пункте T5, относительно семи периферийных пунктов, с одной стороны, и теми задержками, которые должны были бы наблюдаться при определенных значениях азимутального (Ф) и зенитного (θ) углов с учетом геометрических координат расположения этих пунктов (x_T, y_T), с другой.

Помимо комбинации временных задержек, для каждого ШАЛ в данном эксперименте известно также пространственное распределение плотности потока заряженных частиц по площади центрального "ковра" сцинтилляционных детекторов, которое позволяет определить основные параметры этого ШАЛ: координаты его оси, полное число заряженных частиц в ливне (его размер) N_e и "возраст" ливня s путем аналогичной процедуры, основанной на минимизации квадратичного функционала, зависящего от разности между зарегистрированными значениями плотности в каждой точке $\rho_{\exp}$, и ее теоретическим распределением, рассчитанным по функции Нишимуры–Каматы–Грейзена. Важно подчеркнуть, что в настоящее время две математические процедуры, как служащая для определения угловых параметров ШАЛ, так и его ливневых характеристик, выполняются полностью независимо друг от друга, что дает возможность взаимно протестировать правдоподобие полученных с их помощью результатов.

Одно из средств такой проверки заключается в построении распределения зарегистрированных в эксперименте ШАЛ по значениям рассчитанных для них зенитного и азимутального углов. Такие распределения показаны на рис. 3, где представлены результаты обработки экспериментального материала объемом $\sim 10^6$ ливней с первичной энергией $E > 0.3$ ПэВ.

Из показанного на рис. 3 двумерного распределения ШАЛ по азимутальному и зенитному углам следует, что вдоль оси θ зарегистрированные ливни распределяются до-

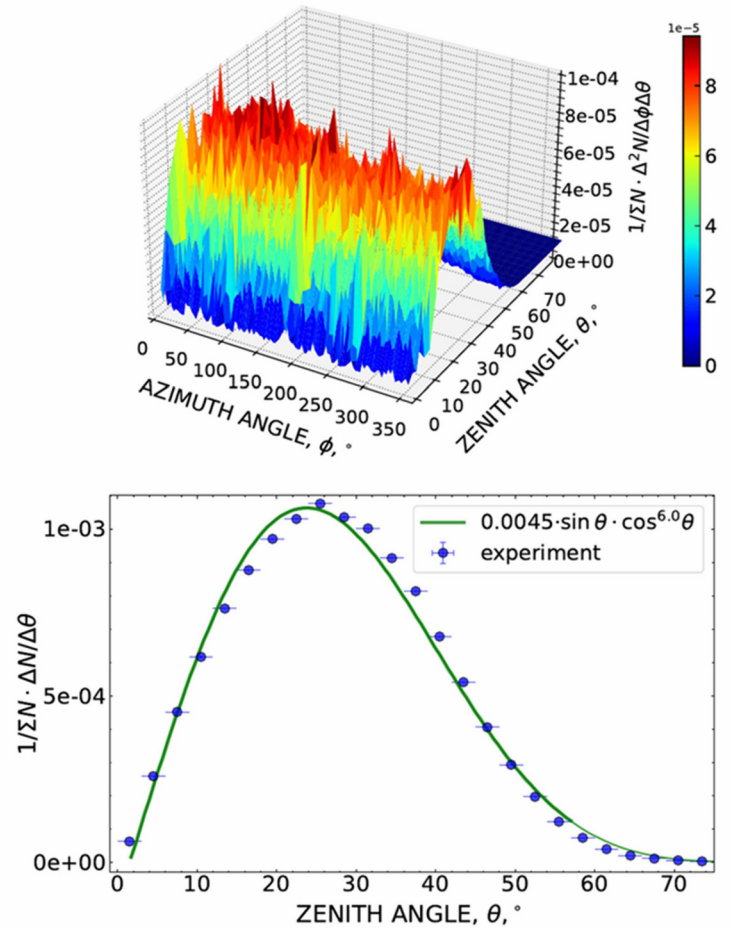


Рис. 3: *Распределение зарегистрированных ШАЛ по зенитному и азимутальному углам в горизонтальной системе координат.*

статочно равномерно, хотя и наблюдаются незначительные выбросы интенсивности в области азимутов 0, 90, 180, 270 градусов, которые, по-видимому, возникают из-за особенностей используемого алгоритма аппроксимации временных задержек. Вдоль оси θ наблюдается сильная зависимость количества наблюдаемых ШАЛ от их зенитного угла.

Более подробно зависимость числа регистрируемых ШАЛ от зенитного угла отображена на нижнем графике рис. 3. Как видно, это распределение имеет немонотонный вид с максимумом в области $\theta \sim (25-27)^\circ$. Аппроксимация экспериментальных точек распределения функцией вида $\sin(\theta)\cdot\cos^{\alpha}(\theta)$ дает в результате значение показателя $\alpha \sim 6$, что хорошо согласуется с известным распределением зенитных углов ШАЛ, которое объясняется взаимным соотношением между длиной пробега взаимодействия частиц

космических лучей и возрастанием толщины проходимого ими в атмосфере вещества-поглотителя по мере увеличения θ.

На графиках рис. 4 отражена существенная корреляция между средними значениями "возраста" регистрируемых ШАЛ s и величины их зенитного угла θ.

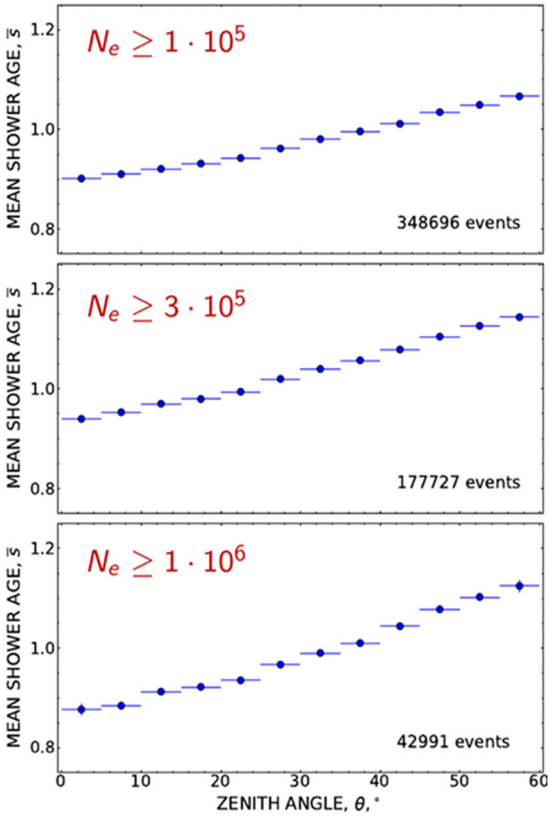


Рис. 4: *Корреляция между средними значениями зенитного угла и параметром "возраста" ШАЛ.*

Как следует из этих графиков, независимо от условий отбора ливней по числу электронов N_e, их "возраст" монотонно возрастает с увеличением зенитного угла, то есть опять же, с увеличением толщины слоя пройденного в атмосфере вещества. Это важный результат, который служит непосредственным подтверждением корректности двух независимых процедур, разработанных для обработки исходной информации в данном эксперименте: определения параметров ШАЛ на основе пространственного распределения плотности потока заряженных частиц и расчета направления оси ливня по задержкам между моментом прибытия ливневого фронта в ряд пространственно-разнесенных пунктов.

Точность определения угловых параметров ШАЛ с помощью разработанной методики можно оценить путем моделирования работы всех используемых алгоритмов по методу Монте-Карло, используя простую модель процесса регистрации ливневого фронта в детекторах T1–T8. В процессе расчетов для каждого модельного события случайным образом задавалась пара "истинных" углов θ_0 и Φ_0, причем зенитный угол разыгрывался согласно экспериментальному распределению $\sin(\theta) \cdot \cos^6(\theta)$, а азимутальный – по равномерному распределению в пределах (0–360)°. Затем согласно этим углам и с учетом координат детекторов T1–T8 рассчитывались моменты прохождения плоского фронта ливня через эти детекторы. К каждому из полученных временных моментов добавлялись две случайные поправки: полученная согласно гауссовскому распределению с нулевым средним и стандартным отклонением 0.5 нс, которая имитировала разброс частиц в пределах реального фронта ШАЛ, и второе случайное число, разыгранное согласно равномерному распределению в пределах (0–4) нс и соответствующее дискретности временного преобразования в каналах используемого АЦП. Далее к полученному набору чисел T1–T8 применялась рассмотренная выше процедура определения углов, и "восстановленные" таким образом значения Φ и θ сравнивались с "истинными" углами θ_0 и Φ_0.

Результаты модельных расчетов показаны на графиках рис. 5 в виде распределения величин R, представляющих собой разницу между восстановленными и "истинными" значениями углов. Как следует из этих данных, средняя ошибка определения зенитного угла при данной конфигурации детекторов равняется 3°. Ошибка, допускаемая при определении азимута довольно сильно варьирует в зависимости от θ; как и следовало ожидать, увеличение зенитного угла ливня приводит к улучшению определения его азимута. Усредненное же по всей статистике стандартное отклонение в ошибках азимутального угла составляет 7°.

В дальнейшем, для улучшения точности определения угловых характеристик ШАЛ можно как увеличивать число детекторов с высоким временным разрешением, одновременно используемых в составе Тянь-Шаньской ливневой установки, так и разносить их на большие относительные расстояния. Для подбора оптимальной конфигурации детекторов, составляющих систему определения угловых параметров ШАЛ, можно использовать разработанный к настоящему времени комплекс программного обеспечения r13.

В течение ∼5500 ч живого времени работы ливневой установки Тянь-Шаньской станции в двух зимних сезонах 2021–2022 и 2022–2023 гг. с подключенной подсистемой определения направления оси ШАЛ было зарегистрировано $\sim 10^6$ ливневых событий, кото-

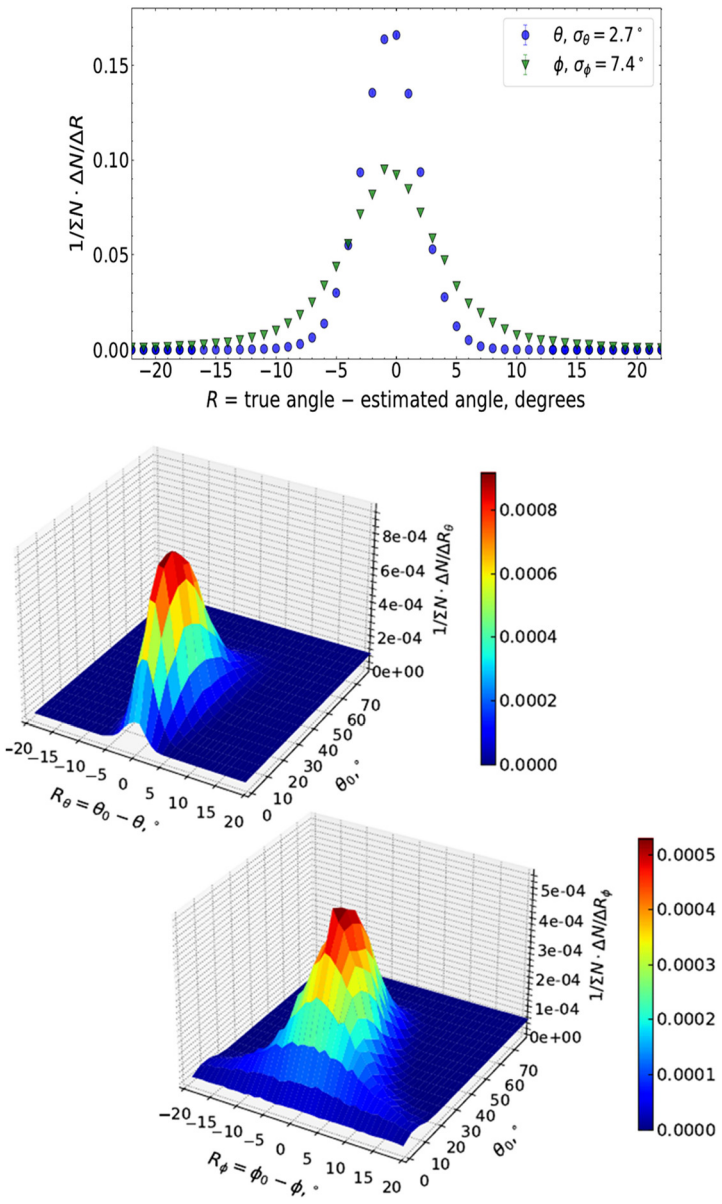


Рис. 5: *Результаты моделирования: распределение разницы R между истинным и восстановленным значениями угловых параметров.*

рые можно использовать для построения углового распределения направлений прихода частиц космических лучей на небесной сфере. Такое распределение показано на двух контурных графиках рис. 6. Представленные здесь крупномасштабные распределения построены для покрывающих всю небесную сферу ячеек размером 5×5°; количество событий ШАЛ, направления прихода которых попадали в каждую из этих ячеек, нор-

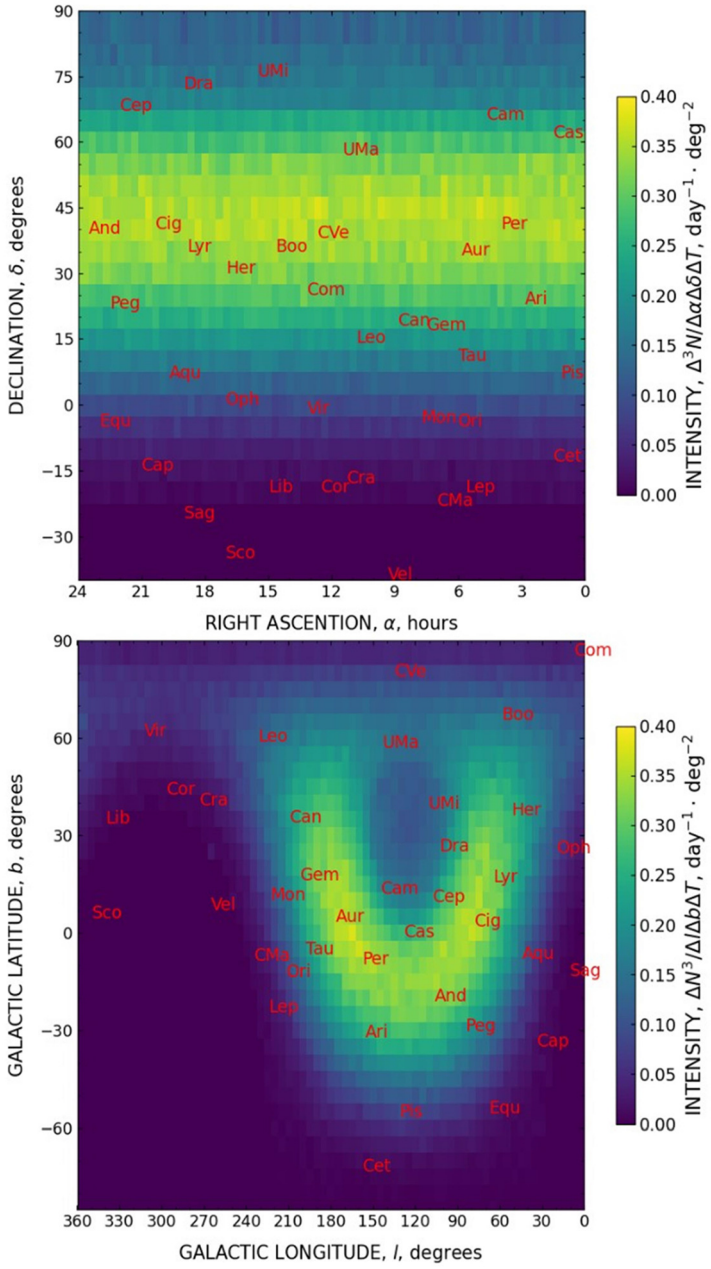


Рис. 6: *Угловое распределение зарегистрированных ШАЛ на небесной сфере в экваториальной и галактической системах координат. Расположение созвездий показано их соответствующими обозначениями.*

мированы на длительность ее наблюдения T, представляющую собой суммарное время, на протяжении которого зенитный угол центра ячейки не превышал 70°. Какой-либо специальный отбор событий ШАЛ, вошедших в рассматриваемую статистику, в данном

случае не делался, так что в распределениях используются все ливни, размер которых превышал порог генерации триггера на ливневой установке, соответствующий минимальной первичной энергии регистрируемых ШАЛ $\sim$0.3 ПэВ.

Верхнее распределение на рис. 6 построено в сетке экваториальных координат (прямое восхождение α в часах, и склонение δ в градусах). Как и следовало ожидать, максимальная интенсивность космических лучей на Тянь-Шаньской станции регистрируется в диапазоне склонений (30–50)°, который соответствует тем точкам на небесной сфере, которые проходят вблизи зенита на местной географической широте 43°. На нижнем графике та же информация представлена в виде распределения, построенного в галактических координатах: выраженных в градусах галактической широте b и долготе l.

Для построения такого рода графиков и дальнейшего статистического анализа направлений прихода космических частиц по экспериментальным данным Тянь-Шаньской ливневой установки была разработана специальная программа r12, построенная на основе общедоступной библиотеки астрономических расчетов Astropy.

Таким образом, к настоящему времени на ТШВНС создана и введена в постоянную эксплуатацию система обладающих высоким временным разрешением детекторов фронта ШАЛ, служащая для определения направлений прихода порождающих ливни частиц первичных космических лучей. Для обработки информации, поступающей от этих детекторов, разработаны все необходимые алгоритмы и создано программное обеспечение, тестирование которых на реальных данных показало приемлемое качество определения угловых параметров.

В дальнейшем предполагается, что полученные с помощью детекторов ливневого фронта угловые распределения интенсивности космических лучей в галактических координатах, аналогичные представленному на рис. 6, должны использоваться для прецизионного изучения крупномасштабной анизотропии в направлениях прихода космических лучей на основе т. н. дифференциального метода, который на протяжении нескольких лет специально разрабатывался для этой цели в ФИАН [1, 2]. В частности, ожидается, что подобный анализ распределений интенсивности для сгруппированных по значениям своих характеристик ШАЛ (размеру/первичной энергии, “возрасту”, множественности мюонной компоненты, глубине максимума развития в атмосфере) мог бы пролить свет на многие нерешенные до сих пор вопросы, касающиеся свойств космических лучей в диапазоне энергий (1–100) ПэВ, в том числе на проблему происхождения “излома” энергетического спектра космических лучей при 3 ПэВ.

ЛИТЕРАТУРА

[1] В. П. Павлюченко, Краткие сообщения по физике ФИАН **41**(3), 3 (2014). https://doi.org/10.3103/S1068335614030014.

[2] V. P. Pavlyuchenko, R. M. Martirosov, N. M. Nikolskaya, A. D. Erlykin, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **45**, 015202 (2018). DOI: 10.1088/1361-6471/aa904d.

[3] A. P. Chubenko, A. L. Shepetov, V. P. Antonova, et al., Nucl. Instrum. Methods A **832**, 158 (2016). DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.068.

Поступила в редакцию 20 февраля 2024 г.

После доработки 21 марта 2024 г.

Принята к публикации 22 марта 2024 г.