УДК 524.1

РЕГИСТРАЦИЯ МЮОННОЙ КОМПОНЕНТЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙТРОННОЙ МЕТОДИКИ НА ТЯНЬ-ШАНЬСКОЙ ВЫСОКОГОРНОЙ СТАНЦИИ

А. Л. Щепетов¹, К. А. Аргынова², Л. И. Вильданова¹, Т. К. Идрисова²,

Б. М. Искаков², В. В. Жуков¹, О. Н. Крякунова³, Е. А. Куприянова¹,

С. А. Мамина¹, Н. О. Садуев⁴, Т. Х. Садыков², С. Б. Шаулов¹, В. А. Рябов¹

Использование нейтронной методики для регистрации мюонной компоненты космических лучей на Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН позволяет оценивать интенсивность потока проходящих через детектор частиц для нескольких порогов по энергии регистрируемых мюонов, начиная с единиц ГэВ и вплоть до сотен ТэВ. Сочетание различных условий выработки триггерного сигнала дает возможность исследовать как одиночные мюоны, так и мюоны, следующие в составе широких атмосферных ливней. В ходе многолетнего эксперимента с подземным детектором испарительных нейтронов энергетический спектр мюонной компоненты космических лучей был измерен с большой точностью в диапазоне $(10^2 - 10^5)$ ТэВ.

Ключевые слова: мюоны космических лучей, энергетический спектр космических лучей, широкие атмосферные ливни, ШАЛ, нейтронный детектор.

Традиционное направление экспериментальных исследований, ведущихся на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции ФИАН (ТШВНС), связано с изучением частиц космических лучей (КЛ) и процессов их взаимодействия с веществом. Для ре-

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

 $^{^2}$ Университет Сатпаева, ТОО "Физико-технический институт", 050032 Казахстан, Алматы.

 $^{^{3}}$ Институт и
оносферы, 050020 Казахстан, Алматы.

⁴ Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Институт экспериментальной и теоретической физики, 050040 Казахстан, Алматы.

гистрации КЛ в области энергий (10¹⁴–10¹⁷) эВ на ТШВНС создан ряд современных установок, детекторы которых постоянно модернизируются и совершенствуются [1, 2].

На протяжении последних десятилетий для регистрации мюонов КЛ на ТШВНС применяется установленный в подземном помещении детектор, внутреннее устройство которого аналогично структуре стандартного нейтронного монитора НМ64, широко используемого в экспериментах по исследованию вариаций интенсивности КЛ. В состав подземного мюонного детектора входят газоразрядные нейтронные счетчики СНМ15, обеспечивающие генерацию электрических сигналов при попадании тепловых нейтронов во внутренний объем счетчика, свинцовая мишень, при взаимодействиях с которой энергичные частицы КЛ генерируют испарительные нейтроны, а также слои полиэтилена, которые служат в качестве замедлителя этих нейтронов до тепловой энергии. Подземный мюонный детектор (рис. 1) состоит из двух секций с размерами $(3.7 \times 2.0 \times 1.2)$ м³, в каждой из которых находятся по 9 нейтронных счетчиков CHM15, окруженных чередующимися слоями свинца, полиэтилена и резины $((C_2H_2)_n)$. Секции располагаются вертикально друг над другом и разделены сплошным железным поглотителем с толщиной ~0.6 м. Находящийся над подземным помещением слой скального грунта суммарной толщиной ~2000 г/см² обеспечивает эффективное поглощение ядерно-активной компоненты КЛ, снижая в ~3 · 10⁴ раз поток нуклонов и пионов, достигающих глубины подземного детектора. В то же время, грунт обеспечивает минимальный энергетический порог ~5 ГэВ для мюонов, которые могут регистрироваться этим детектором.

Процессы генерации нейтронов во внутренней мишени и их последующей регистрации счетчиками подземного детектора изучались путем моделирования с применением программного пакета Geant4 [3]. В результате моделирования было показано, что преобладающий источник тепловых нейтронов образуют взаимодействия мюонной компоненты КЛ с веществом внутренней мишени детектора, которые происходят как непосредственно по каналу ядерного взаимодействия мюонов, так и опосредованно, через фотоядерные реакции тормозных гамма-квантов, излучаемых мюонами. Помимо этого, в ходе моделирования была получена простая степенная зависимость между средним числом M испарительных нейтронов, зарегистрированных после прохождения через подземный детектор мюона с энергией E_{μ} :

$$E_{\mu} \approx 27 \cdot M^{1.3} \text{ T} \mathfrak{s} \text{B}.$$
 (1)



Рис. 1: Схема подземного детектора ТШВНС для регистрации нейтронов, образующихся при взаимодействиях мюонной компоненты КЛ: 1 – газоразрядные нейтронные счетчики типа СНМ15, 2 – полиэтиленовый замедлитель, 3 – свинцовая мишень, 4 – резина, 5 – железный поглотитель, 6 – сцинтилляционный телескоп совпадений. Размеры указаны в мм.

Как следует из этого соотношения, даже минимальным значениям $M \sim 1$ соответствует энергия мюона порядка нескольких десятков ТэВ. Таким образом подземный детектор, основанный на регистрации нейтронов, которые рождаются во взаимодействиях мюонов с веществом внутренней мишени, представляет собой установку для исследования мюонной компоненты КЛ с весьма высоким энергетическим порогом.

Регистрация образующихся в подземном детекторе испарительных нейтронов велась непрерывно с ноября 2012 г. по март 2022 г. На рис. 2 показаны вариации усредненной скорости счета сигналов от нейтронных счетчиков верхней (UPPER) и нижней (LOWER) секций этого детектора, зарегистрированные на протяжении указанного периода, а также синхронные с этими измерениями данные по интенсивности адронной компоненты КЛ, полученные с помощью находящегося на территории ТШВНС нейтронного монитора HM64, и измерения основных метеорологических параметров, атмосферного давления и температуры воздуха. Как следует из этих графиков, в записях интенсивности сигналов на обоих типах детекторов КЛ обнаруживается ярко выраженная сезонная вариация: рост средней величины атмосферного давления в летние месяцы сопровождается понижением скорости счета испарительных нейтронов от взаимодействия КЛ как на наземном (монитор HM64), так и подземном детекторах. Отрицательный барометрический эффект в показаниях нейтронных мониторов объясняется возрастанием, при понижении атмосферного давления, средней энергии достигающих уровня расположения установки адронов КЛ, который происходит из-за уменьшения суммарной толщины поглощающего вещества на их пути через атмосферу. Это же уменьшение толщины вещества приводит к возрастанию относительной вероятности распада энергичных пионов, которые образуются при взаимодействиях первичных КЛ в верхних слоях атмосферы, по сравнению с конкурирующим процессом их ядерного взаимодействия с нуклонами в ядрах атомов воздуха [4]. Поскольку регистрируемые ниже поверхности земли мюоны высокой энергии представляют собой непосредственные продукты этих распадов, обнаруженный в записях интенсивности на подземном детекторе отрицательный барометрический эффект служит еще одним подтверждением связи наблюдаемых в нем нейтронных сигналов с взаимодействиями частиц мюонной компоненты КЛ.

Для регистрации событий образования испарительных нейтронов мюонами КЛ в подземном детекторе использовался специальный триггерный сигнал, который вырабатывался в случае, если счетчики одной из его секций на протяжении короткого промежутка времени (сотни микросекунд) регистрировали определенное, превышающее предустановленный порог, количество нейтронных импульсов.

Альтернативным сигналом для записи событий на подземном детекторе служил триггерный импульс от ливневой установки ТШВНС, которая представляет собой пространственно-распределенную систему сцинтилляционных детекторов и служит для регистрации заряженных частиц широких атмосферных ливней (ШАЛ). Триггерный сигнал ливневой установки вырабатывался в случае, если ось ШАЛ с первичной энергией $E_0 > (0.3 - 1) \cdot 10^{15}$ эВ, попадала в центральный "ковер" сцинтилляционных детекторов, расположенный непосредственно над подземным помещением ТШВНС. Анализируя пространственное распределение плотности потока ливневых частиц, среди всех зарегистрированных ШАЛ можно было выделить те события, в которых продолжение оси ливня ниже поверхности грунта оказывалось в непосредственной близости к подземному детектору, что позволяло регистрировать в нем сигналы группового прохождения входящих в состав ствола ШАЛ энергичных мюонов.



Рис. 2: Результаты непрерывного мониторинга за период 2012–2022 г.г. по скорости счета сигналов от испарительных нейтронов в верхней и нижней секциях подземного детектора, а также нейтронов – продуктов взаимодействия адронной компоненты КЛ в наземном нейтронном мониторе HM64, совместно с измерениями атмосферного давления и температуры воздуха. Все данные усреднены по последовательным временным интервалам длительностью 3 ч.

Независимо от типа сопровождающего триггера, основной характеристикой зарегистрированного на подземном детекторе нейтронного события является суммарное число импульсов от его нейтронных счетчиков, полученных на протяжении короткого (несколько миллисекунд) интервала времени после момента триггера – множественность зарегистрированных нейтронов M. Именно эта величина фигурирует в приведенной выше формуле (1) для оценки энергии провзаимодействовавшего в детекторе мюона. В проводимых на ТШВНС экспериментах верхняя и нижняя секции подземного детектора всегда рассматривались как отдельные установки, и параметры M для каждой из них рассчитывались независимо друг от друга. Спектры по множественности M нейтронных сигналов, зарегистрированных в этих двух секциях, показаны на рис. 3 раздельно для двух типов событий. Событиям, связанным с прохождением одиночных мюонов, которые регистрировались с внутренним триггером подземного детектора, соответствует верхняя пара распределений (для верхней, UPPER, и нижней, LOWER, секций), а к случаям попадания в детектор групп мюонов, следующих в составе стволов ШАЛ, относятся два нижних спектра. Существенно меньшая абсолютная интенсивность последних объясняется относительной редкостью событий ШАЛ по сравнению с прохождениями одиночных мюонов.



Рис. 3: Спектры событий генерации испарительных нейтронов в подземном детекторе по суммарной множественности M нейтронных сигналов, зарегистрированных в верхней (UPPER) и нижней (LOWER) секциях детектора. Верхняя шкала оцифрована в соответствии с формулой (1). Квадраты – одиночные мюоны, треугольники – ШАЛ.

Как следует из рассматриваемого графика, в данном эксперименте не наблюдается заметной разницы между спектрами, относящимися к верхней и нижней секциям подземного детектора, несмотря на разделяющий их железный поглотитель с эквивалентным количеством вещества ~3500 г/см², который обеспечивает для нижней секции увеличение энергетического порога на $\Delta E \approx (5 - 7)$ ГэВ по отношению к регистрации частиц, проходящих в близком к вертикальному направлении. Отсутствие различия в спектрах по множественности M, относящихся к двум секциям, означает, что основная масса регистрируемых в подземном детекторе событий относится к взаимодействиям мюонов с энергией, существенно превышающей указанную величину ΔE , что, опятьтаки, согласуется с выводом о нижнем пороге регистрации мюонов в данном детекторе, имеющем порядок нескольких ТэВ. Так как энергетические потери частиц, взаимодействующих как внутри каждой из секций подземного детектора, так и в находящемся между ними поглотителе составляют единицы-десятки ГэВ, то есть оказываются существенно меньше их первичной энергии (начиная от десятков ТэВ и выше), можно полагать, что при регистрации мюонной компоненты КЛ обе секции действуют полностью независимо друг от друга. Поэтому в дальнейшем анализе полученные от обеих секций данные усреднялись.



Рис. 4: Дифференциальные спектры мюонной компоненты космических лучей, рассчитанные по данным о множественности образованных в секциях подземного детектора испарительных нейтронов. Кружками показан спектр для событий, связанных с прохождением одиночных мюонов через детектор, треугольниками – для событий, сопровождавшихся прохождением ШАЛ. Спектры усреднены по событиям, регистрировавшимся в верхней и нижней секциях подземного детектора.

Применяя калибровочную формулу (1) к данным о распределении множественности нейтронных событий с графиков рис. 3, можно рассчитать энергетический спектр мюонов, взаимодействия которых приводили к генерации испарительных нейтронов в подземном детекторе. Усредненные по двум секциям подземного детектора энергетические спектры представлены на рис. 4, по-прежнему раздельно для событий прохождения одиночных мюонов, которые сопровождались внутренним триггером подземного детектора, и мюонов из стволов ШАЛ, регистрировавшихся под управлением ливневого триггера. Поскольку формула (1) была получена на основе моделирования, которое проводилось для одиночных частиц, применение ее в последнем случае не вполне корректно, и для событий, связанных с триггером ШАЛ, более правильно говорить о суммарном энерговыделении мюонов ствола ШАЛ в двух секциях подземного детектора. Этим обстоятельством объясняется существенно более жесткий характер энергетических спектров, показанных на рис. 4 для событий с ливневым триггером, по сравнению со спектром одиночных мюонов.

На рис. 4 видно, что энергетический спектр мюонов, полученный с помощью подземного детектора ТШВНС, может быть аппроксимирован комбинацией степенных функций вида $\Delta N/\Delta E = \Sigma_i a_i E^{\gamma i}$. Для событий, относящихся к прохождению одиночных мюонов, энергетический спектр аппроксимировался комбинацией трех компонент с показателями степеней γ_1 , γ_2 и γ_3 . На графике рис. 4 результаты такой аппроксимации показаны сплошными линиями. Полученные методом минимизации квадратичного функционала χ^2 численные значения показателей в этом случае составляют $\gamma_1 = -3.2$, $\gamma_2 = -3.5$ и $\gamma_3 = -5.0$, а точки перегиба между составляющими степенной аппроксимации располагаются при энергиях $E_{\mu} \approx 2400$ ТэВ и $E_{\mu} \approx 19000$ ТэВ. Спектр энерговыделений мюонной компоненты стволов ШАЛ на этом же графике хорошо аппроксимируется степенной зависимостью с единым показателем $\gamma = -2.6$.

Независимые результаты различных экспериментов, связанных с исследованиями мюонной компоненты КЛ на ряде основ независимых методик, могут способствовать решению "мюонной загадки" [5], природа которой до настоящего времени остаётся неизвестной, и может быть связана как с астрофизикой космических лучей (изменением энергетического спектра и/или массового состава КЛ, либо появлением в составе первичных КЛ новой компоненты) [6, 7], так и с ядерно-физическим аспектом взаимодействия частиц – генерацией новых частиц-продуктов или состояний материи в ядроядерных взаимодействиях [8].

ЛИТЕРАТУРА

 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.

- [2] A. Shepetov, S. Mamina, V. Piscal, et al., Physics of Atomic Nuclei 84(6), 919 (2021).
 DOI: 10.1134/S1063778821130329.
- [3] A. Shepetov, A. Chubenko, O. Kryakunova, et al., IOP Publishing: Journal of Physics: Conf. Series 1181, 012017 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1181/1/012017.
- [4] L. I. Dorman, *Meteorological effects of cosmic ray* (M., Nauka, 1972).
- [5] A. A. Petrukhin, Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A 742, 228 (2014). DOI: 10.1016/j.nima.2013.12.011.
- [6] A. L. Shepetov, S. B. Shaulov, O. I. Likiy, et al., Astropart. Phys. 133, 102642 (2021).
 DOI: 10.1016/j.astropartphys.2021.102642.
- [7] С. Б. Шаулов, В. А. Рябов, А. Л. Щепетов и др., Письма в ЖЭТФ 116, 3 (2022).
 DOI: 10.31857/S1234567822130018.
- [8] А. А. Петрухин, Ядерная физика 84(1), 77 (2021). DOI: 10.31857/ S0044002721010141.

Поступила в редакцию 8 ноября 2022 г.

После доработки 30 ноября 2022 г.

Принята к публикации 1 декабря 2022 г.