

# ИЗМЕРЕНИЯ МЮОНОВ В ШАЛ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПО ДАННЫМ ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКИ И ЭКСПЕРИМЕНТА ОЖЕ

© 2023 г. А. В. Глушков<sup>1)\*</sup>, А. В. Сабуров<sup>1)\*\*</sup>, Л. Т. Ксенофонтов<sup>1)\*\*\*</sup>, К. Г. Лебедев<sup>1)\*\*\*\*</sup>

Поступила в редакцию 13.05.2023 г.; после доработки 04.07.2023 г.; принята к публикации 05.07.2023 г.

Рассмотрены результаты прямых измерений плотности мюонов в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) с зенитными углами  $\theta \leq 45^\circ$  и энергиями  $E_0 \geq 10^{17}$  эВ, полученных в эксперименте Оже и на Якутской установке. Мюоны в обоих случаях регистрировались подземными сцинтилляционными детекторами с одинаковой пороговой энергией  $E_\mu \approx 1.0 \sec \theta$  ГэВ. Измеренные величины сравниваются с теоретическими значениями, вычисленными по модели развития ШАЛ QGSJET-II-04 из пакета программ CORSIKA. Они различаются между собой в  $1.53 \pm 0.13(\text{stat})$ . Показано, что это различие обусловлено завышенной в 1.22 раза плотностью мюонов и заниженной в 1.25 раза первичной энергией в эксперименте Оже.

DOI: 10.31857/S0044002723060041, EDN: OVBDFS

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] коллаборация Оже сообщила о прямых измерениях мюонов в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) с энергиями  $2 \times 10^{17} - 2 \times 10^{18}$  эВ и зенитными углами  $\theta \leq 45^\circ$ . Измерения проводились сцинтилляционными детекторами площадью 5 и 10 м<sup>2</sup> с порогом регистрации  $\approx 1.0 \sec \theta$  (помещенными под слоем грунта толщиной 2.3 м). Один из результатов [1] приведен на рис. 1. В этой работе рассматривался параметр  $\rho_{MD}(450, 35^\circ)$  — плотность мюонов, измеренная в индивидуальных ливнях на расстоянии от оси 450 м и приведенная к зенитному углу  $35^\circ$  с помощью соотношений

$$\rho(450, 35^\circ) = \rho(450, \theta) / f_{att}(\theta), \quad (1)$$

$$f_{att}(\theta) = 1 + (0.54 \pm 0.10)x + (1.02 \pm 0.69)x^2, \quad (2)$$

где  $x = \cos^2(\theta) - \cos^2(35^\circ)$ . Полученные результаты указывают на аномально высокое содержание мюонов ШАЛ в сравнении с модельными предсказаниями. Они не исключают своего происхождения от первичных ядер железа. Эта особенность мюонов рассматривалась ранее в совместном анализе международной рабочей группой

данных восьми установок: ШАЛ МГУ, IceCube, KASCADE-Grande, NEVOD-DECOR, The Pierre Auger Observatory (Оже), SUGAR, Telescope Array (TA) и Якутской комплексной установки [2]. Данные на рис. 1 противоречат результатам Якутской установки [2–6]. Нужно отметить, что в эксперименте [1] мюонная компонента ШАЛ была измерена аналогично тому, как это делается на Якутской установке. Это дает возможность сравнить между собой методы измерения мюонов в обоих экспериментах напрямую, чтобы выяснить причины их разногласий.

## 2. ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЧАСТИЦ ШАЛ НА ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКЕ

### 2.1. Сцинтилляционный счетчик

Для измерения потока частиц на Якутской установке используются счетчики площадью  $S = 2$  м<sup>2</sup> с пластмассовыми сцинтилляторами на основе полистирола с люминесцирующими добавками (п-терфенила (PPP)  $\sim 2\%$  и (РОРО)  $\sim 0.02\%$ ) в виде блоков размером  $50 \times 50 \times 5$  см<sup>3</sup>. Восемь таких блоков располагаются по периметру на платформе светогерметичного контейнера, в центре которой крепится фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) типа ФЭУ-49 (рис. 2). Свет, образующийся в сцинтилляционных блоках при прохождении сквозь них заряженных частиц, попадает на ФЭУ за счет диффузионного отражения от внутренней поверхности крышки контейнера, которая покрыта специальной белой краской. Крышка контейнера изготовлена из листового дюрала толщиной 1.5 мм. Максимум высвечивания сцинтиллятора находится в области

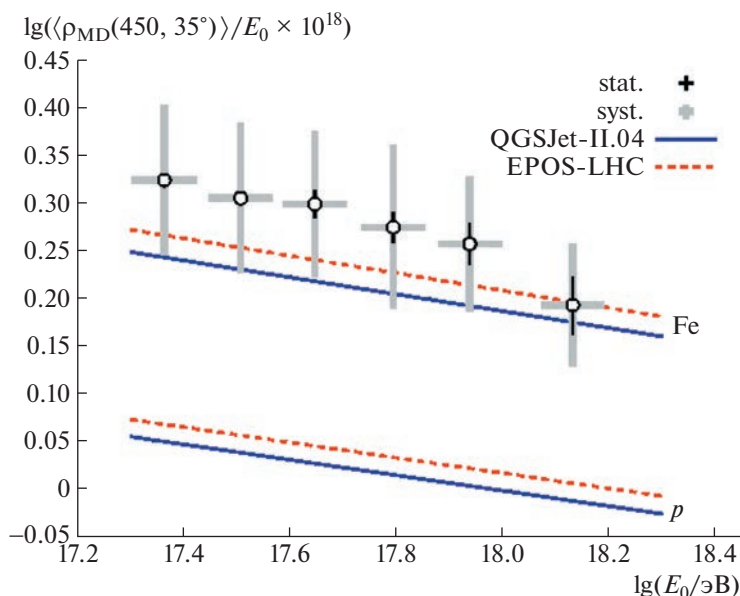
<sup>1)</sup>Институт космофизических исследований и аэронавтики Якутского научного центра им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия.

\*E-mail: glushkov@ikfia.ysn.ru

\*\*E-mail: vs.tema@gmail.com

\*\*\*E-mail: ksenofon@ikfia.ysn.ru

\*\*\*\*E-mail: LebedevKG@ikfia.ysn.ru



**Рис. 1.** Плотности мюонов в ШАЛ на расстоянии от оси 450 м, нормированные на первичную энергию. Результаты прямых измерений, выполненных на установке Оже на подземных сцинтилляционных детекторах с порогом  $\simeq 1.0$  sec  $35^\circ$  ГэВ. Данные и модельные расчеты взяты из рис. 11 в работе [1].

$\sim 440$  нм, что хорошо согласуется со спектральной характеристикой ФЭУ-49 и отражательной способностью окрашенной поверхности контейнера. Время высвечивания сцинтиллятора составляет  $\sim 2 \times 10^{-9}$  с. Бока и низ каждого блока сцинтиллятора также окрашены белой краской для повышения сбора света вспышки. С целью выравнивания светосбора от центральной части счетчика к периферии наносится маска — окрашивается белой краской определенная площадь верхней поверхности всех пластмассовых блоков в виде нескольких концентрических кругов. Она поглощает свет от центральной области. В дальнейшем от ее нанесения отказались из-за незначительного влияния маски на измеряемые плотности частиц.

## 2.2. Калибровка счетчиков

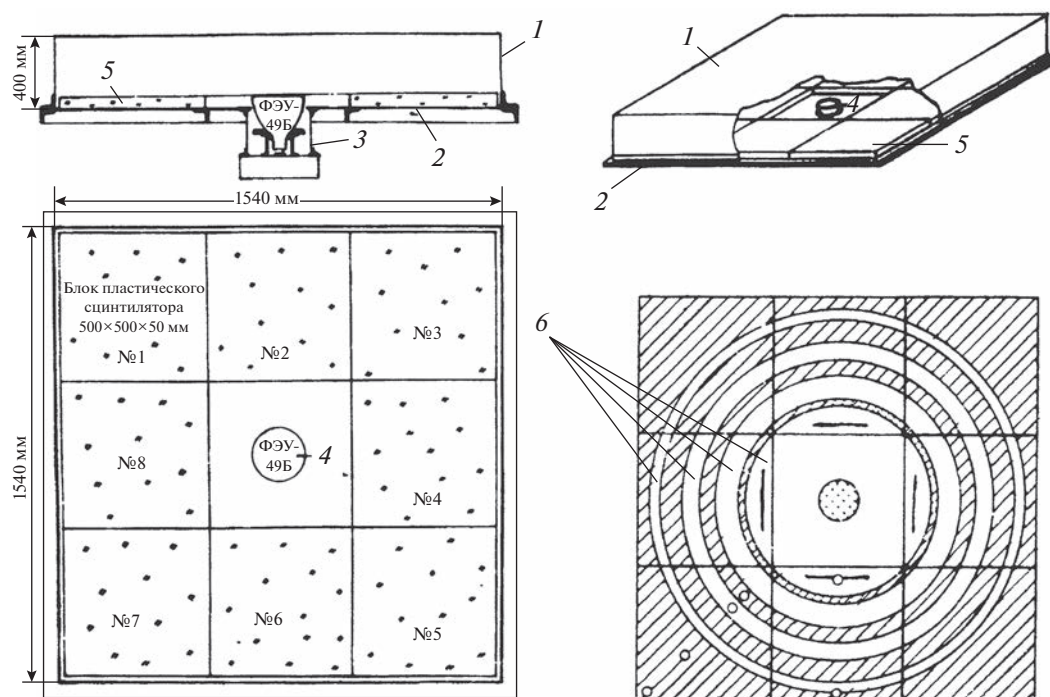
Для контроля за работой и регулярной калибровки счетчика используется фоновый поток вторичных космических частиц, который на уровне моря состоит в основном из одиночных мюонов достаточно высокой энергии и с определенным распределением по зенитному углу. На счетчик площадью  $2 \text{ м}^2$  на уровне моря попадает около 400 событий в секунду. На рис. 3 показан типичный спектр отклика (response) для неуправляемого счетчика от такого фона. Круто падающая ветвь при малых амплитудах — это шумы, которые образуются как в самом ФЭУ, так и от слабых вспышек из-за низкоэнергичных заряженных частиц из атмосферы и от радиоактивных примесей, если они присутствуют в материале сцинтиллятора и конструкции.

Величина  $A_{\max}$  на рис. 3 близка амплитуде  $Um$  отклика на выходе ФЭУ при прохождении через счетчик одного вертикального мюона (см. ниже). При прохождении через него в момент регистрации ШАЛ  $n$  частиц амплитуда на выходе ФЭУ будет равна  $U = nUm$ .

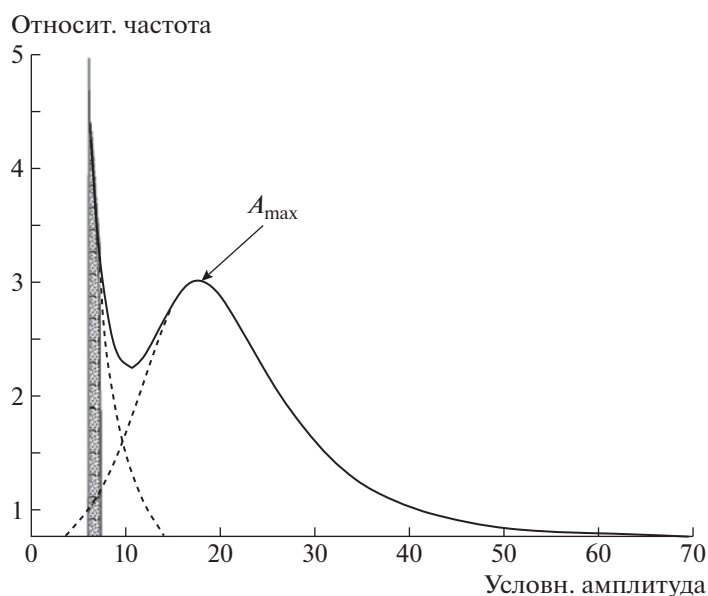
## 2.3. Единицы измерения

Плотности наземной и мюонной компонент ШАЛ измеряются на Якутской установке в единицах энергии вертикальных релятивистских мюонов в пластическом сцинтилляторе (плотность  $1.06 \text{ г/см}^2$ ) толщиной 5 см. Эта энергия  $E_1(0^\circ) = 5 \times 1.06 \times 2.217 = 11.75 \text{ МэВ}$  (условно изображена на рис. 4 в блоке сцинтиллятора красным треком) расходится мюоном, как сказано выше, на ионизацию вещества сцинтиллятора и превращается в световую вспышку. Эта вспышка, в свою очередь, конвертируется на выходе ФЭУ в амплитуду электрического импульса  $U_1(0^\circ)$  — уровень одной частицы (уровень калибровки). Уровень одной частицы регулярно измеряется в процессе набора амплитудных спектров сцинтилляционного детектора. На рис. 4 показаны суммарные потери энергии в наклонных  $\Delta E(\theta)$  (а) и вертикальных  $\Delta E(0^\circ)$  (б) ливнях соответственно. Эти потери при любых зенитных углах равны. Число частиц на расстоянии от оси ливня  $R$  находится по формуле

$$n(R, 0^\circ) = \Delta E(R, 0^\circ)/E_1(0^\circ) = U(R, 0^\circ)/U_1(0^\circ). \quad (3)$$



**Рис. 2.** Стандартный сцинтилляционный счетчик Якутской установки площадью  $S = 0.25 \times 8 = 2 \text{ м}^2$ . В центре фотоумножитель ФЭУ-49Б.



**Рис. 3.** Дифференциальный спектр отклика сцинтилляционного счетчика площадью  $2 \text{ м}^2$  от фона космических лучей.

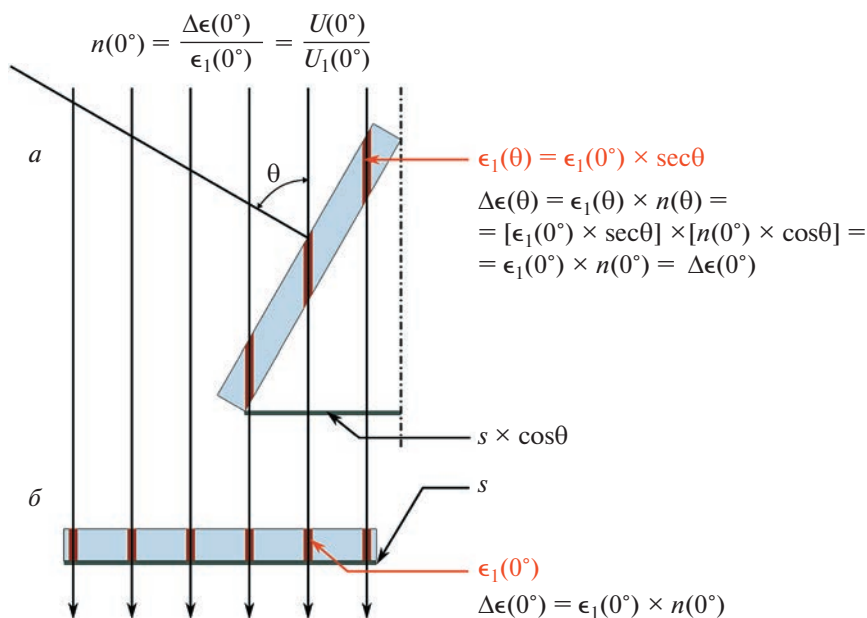
Плотность частиц в ливне с зенитным углом  $\theta$ , прошедших через площадь детектора  $S$  на расстоянии от оси  $R$  соответственно равна:

$$\begin{aligned} \rho^Y(R, \theta) &= n(R, \theta)/S(\theta) = \\ &= [n(R, 0^\circ) \cos \theta]/S \cos \theta = U(R)/U_1(0^\circ)/S = \\ &= n(R)/S = [\text{м}^{-2}]. \end{aligned} \quad (4)$$

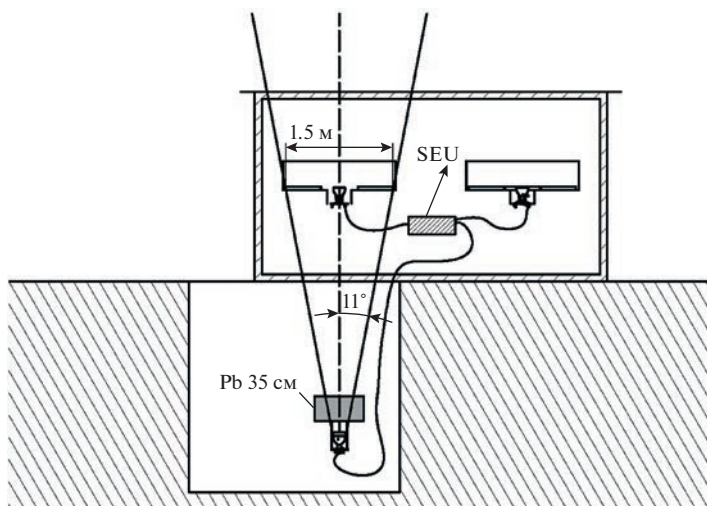
Она не зависит от угла падения ливня, так как амплитуда сигнала на выходе ФЭУ не меняется.

#### 2.4. Абсолютная калибровка детекторов

Распределение отклика стандартного счетчика от одиночного вертикального мюона было получено в специальном эксперименте [7], схема которого



**Рис. 4.** Схема формирования суммарного отклика  $\Delta E$  при прохождении через сцинтилляционный счетчик площадью  $S$  некоторого числа ( $n$ ) частиц в ШАЛ под разными зенитными углами  $\theta$  к вертикали.



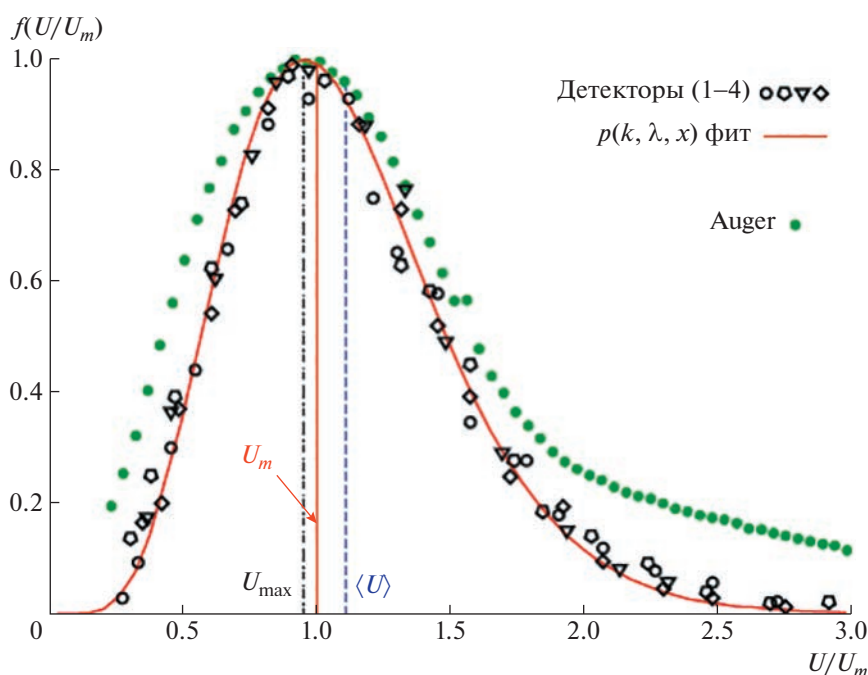
**Рис. 5.** Измерение спектра отклика сцинтилляционного счетчика от вертикального релятивистского мюона.

показана на рис. 5. Телескоп из двух детекторов отбирал частицы с максимальным отклонением от вертикали  $\approx 11^\circ$ , которые вызывали одновременное срабатывание как основного детектора (сверху), так и специального управляющего счетчика площадью  $0.04 \text{ м}^2$ , показанного в нижней части рисунка. Слой свинца над управляющим счетчиком поглощал мягкие частицы и гарантировал срабатывание системы только от релятивистских мюонов. Средняя скорость совпадений была равна  $0.5 \text{ с}^{-1}$ . На рис. 6 показаны полученные распределения откликов для нескольких счетчиков (значки) от вертикальных мюонов. Сплошная кривая —

аппроксимация этих амплитудных спектров гамма-распределением:

$$p(k, \lambda, x) = (\lambda^k k^{-0.5}) x^{k-1} e^{-\lambda x}. \quad (5)$$

Штрихпунктирной линией показан максимум этого распределения  $U_{\max} = (k - 1)/\lambda = 0.822$ , сплошной линией — медиана  $U_m = 0.863$  и штриховой линией — средняя амплитуда  $\langle U \rangle = k/\lambda = 0.96$ . За единицу отклика на Якутской установке была выбрана медиана. Такой выбор объясняется тем, что на момент проведения эксперимента по абсолютной калибровке сцинтилляционных детекторов (в



**Рис. 6.** Дифференциальное распределение отклика сцинтилляционного счетчика площадью  $2 \text{ м}^2$  от вертикального мюона. Разные значки соответствуют различным индивидуальным детекторам. Кривые: сплошная — аппроксимация этих данных гамма-распределением (5), точечная — калибровочный спектр [1].

первые годы работы Якутской установки) медиана спектра на рис. 6 находилась точнее, чем максимум.

В работе [1] за уровень калибровки принят максимум точечной кривой. Она суммирует сигналы 64 отдельных ФЭУ каждого мюонного детектора. Вероятно, этим обусловлено его более широкое распределение. Сами уровни калибровки детекторов обеих установок в пределах 5% одинаковы.

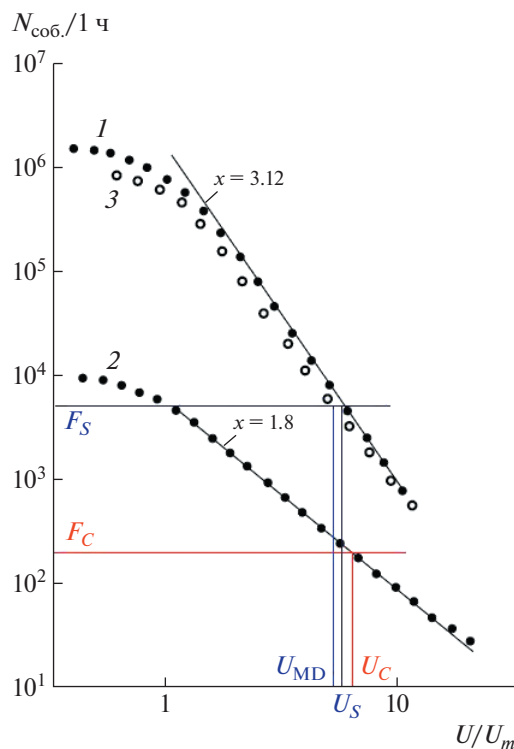
### 2.5. Калибровка и контроль за работой детекторов

Для повседневной калибровки и контроля всех сцинтилляционных детекторов установки измерять спектр вертикального мюона с помощью телескопа невозможно. Для этой цели хорошо подходят спектры от фоновых событий [7]. Электроника станций наблюдения (рис. 5) отбирает совпадения между двумя счетчиками, и только для таких событий производится запись цифрового значения амплитуды сигналов с детекторов в память. Система централизованного управления установки позволяет получать информацию о таких событиях с любой станции и накапливать спектр от двойных совпадений в центральной регистрирующей системе. Частота двойных совпадений составляет  $\sim 2\text{--}3 \text{ с}^{-1}$ . Распределение амплитуды каждого счетчика в этом случае отражает так называемый спектр плотностей от ШАЛ малых энергий. В интегральном виде спектр описывается степенной функцией

$U^{-\chi}$  с показателем  $\chi \approx 1.5$  в достаточно широком диапазоне плотностей.

Кроме того, в спектр двойных совпадений при малых плотностях вносит вклад распределение отклика одиночных частиц от случайных совпадений. При разрешающем времени схемы отбора  $\tau = 2 \text{ мкс}$  и темпе счета  $N \approx 400 \text{ с}^{-1}$  в каждом счетчике случайных событий окажется достаточно много ( $2\tau N_1 N_2 \approx 0.6\text{--}0.7 \text{ с}^{-1}$ ), и они увеличивают крутизну реального распределения в рабочем диапазоне плотностей приблизительно от 2 до 20 частиц на детектор. Экспериментально измеренный наклон спектра в этой области составляет  $\chi = 1.7\text{--}1.8$ . На рис. 7 показан интегральный спектр от двойных совпадений для одного из сцинтилляционных счетчиков (кривая и точки, обозначенные цифрой 2).

Для того чтобы использовать такой спектр для регулярной калибровки работающих счетчиков, был проведен эксперимент (рис. 5), в котором для стандартного счетчика одновременно измерялись как спектр от вертикального мюона при отборе событий с помощью телескопа, так и спектр двойных совпадений с установленным рядом (как на станциях) вторым таким же счетчиком. В спектре двойных совпадений была выбрана фиксированная интенсивность  $F_c = 200 \text{ соб./ч}$  и по спектру вертикального мюона было определено отношение соответствующей амплитуды  $U_c$  (уровень калибровки) к уровню одной частицы.



**Рис. 7.** Интегральные спектры отклика сцинтилляционного счетчика от фона космических лучей в разных условиях. 1 — спектр от неуправляемого счетчика для наземных станций; 2 — спектр двойных совпадений; 3 — спектр от неуправляемого счетчика, установленного в мюонном пункте. Все спектры нормированы на 1 ч измерений первичными энергиями. Линиями обозначены результаты расчетов [1], выполненных для мюонных детекторов Оже в рамках моделей адронных взаимодействий QGSJET-II.04 (сплошная линия) и EPOS-LHC (точечная линия) для первичных протонов ( $p$ ) и ядер железа ( $Fe$ ).

Такое соотношение было измерено для нескольких сцинтилляционных счетчиков, и для всех них получилось хорошее совпадение ( $\log(U_C/U_m) = 0.81$ ).

У некоторых стандартных сцинтилляционных детекторов в центре установки, как и в мюонных пунктах, нет двойных совпадений между счетчиками. Поэтому для их калибровки используются интегральные спектры событий от неуправляемых детекторов, частота которых значительно выше. В диапазоне амплитуд от 1–2 до 10 частиц такой спектр хорошо аппроксимируется степенным законом, но имеет значительно большую крутизну ( $\chi \approx 3.1$ ). Наклон главным образом формируется за счет углового распределения одиночных мюонов. За базовую фиксированную интенсивность для таких спектров было принято общее значение  $F_S = 5000$  соб./ч (рис. 7). Отношение амплитуд  $U_S$  и  $U_{MD}$ , соответствующих частоте  $F_S$ , к уровню одного вертикального мюона также

было определено в эксперименте с телескопом. Оно равно  $\log(U_S/U_m) = 0.77$  для наземных и  $\log(U_{MD}/U_m) = 0.725$  для подземных детекторов соответственно. Все спектры на рис. 7 нормированы на 1 ч измерений, хотя на практике спектр 2 набирается 2 ч, а оба спектра 1 и 3 — 30 мин. Это обеспечивает точность калибровки детекторов 10–15%. Сама калибровка осуществляется непрерывно, циклическим образом для всех детекторов.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТ ОЖЕ

#### 3.1. Измерение плотности мюонов

Методика измерения плотности мюонов в работе [1] изложена на с. 751 (8 из 19) в левом столбце самого нижнего абзаца: “The expected number of muons,  $n(R, E, \theta)$ , that hit a scintillation module located at a distance  $R$  from the impact point of a shower impinging with zenith angle  $\theta$  is then derived as:

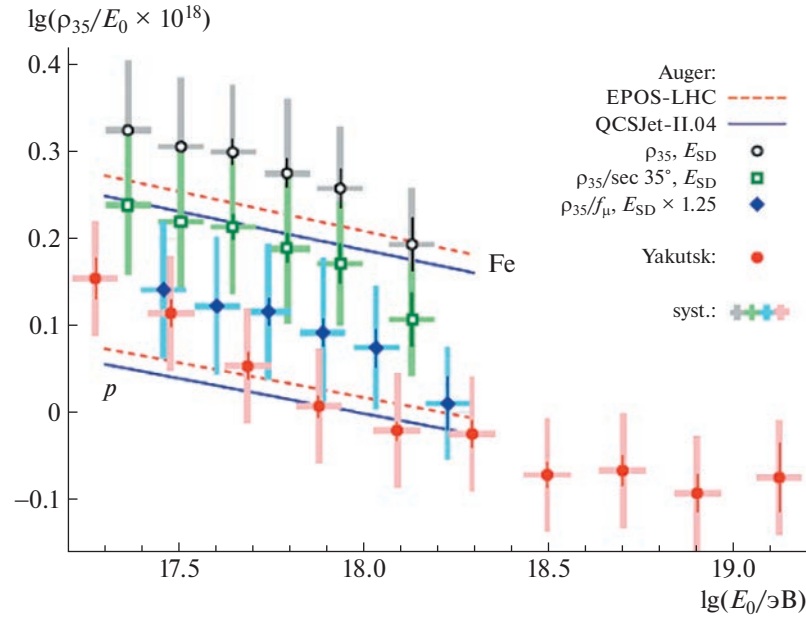
$$n(R, E, \theta) = \rho(R, E, \theta) S \cos \theta, \quad (6)$$

with  $S \cos \theta$  the projected aperture of the detectors. The observed number of muons is drawn from a Poisson process with the mean  $n$ . On an event-by-event basis, the value of  $\rho(450)$  is therefore estimated by minimizing the likelihood function consisting of the product of the likelihoods for saturated, non-saturated (or *candidate*) and non-triggered UMD stations [8]”. Из соотношения (6) следует, что плотности мюонов в работе [1] находились по формуле

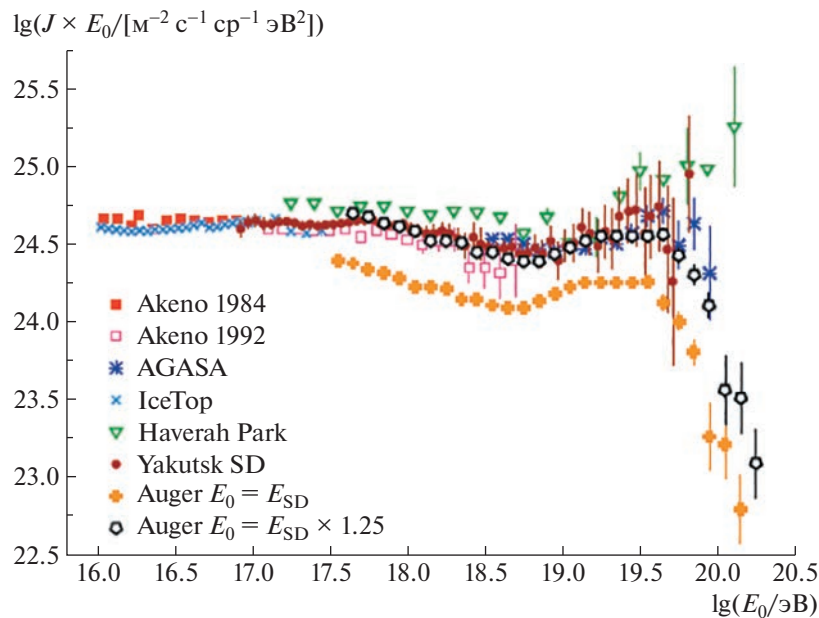
$$\begin{aligned} \rho(R, E, \theta) &= n(R, E, \theta) / S \cos \theta = \\ &= [n(R, E, \theta) / S] \sec \theta = \rho^Y(R) \sec \theta \text{ [м}^{-2}\text{]}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\rho^Y(R)$  — плотность мюонов (4) в ливнях при любых зенитных углах (см. разд. 2.3). Отсюда следует, что плотности на рис. 1 ошибочно завышены в  $\sec 35^\circ \approx 1.22$  раза. Уменьшенные на  $\log(\sec 35^\circ) \approx 0.086$  значения показаны на рис. 8 светлыми кружками.

Полученные таким образом плотности мюонов можно связать с тяжелым составом первичных частиц. В этом случае загадка мюонов (аномально большое расхождение теории с экспериментом) теряет свою остроту [2]. Оставшееся здесь разногласие зависит, на наш взгляд, от оценки первичной энергии. В работе [9] сравниваются энергетические спектры космических лучей, измеренные на Якутской установке и коллаборацией Оже. Они сильно различаются между собой. В [10] мы показали, что это разногласие можно устранить, если в эксперименте Оже увеличить первичную энергию в 1.25 раза (рис. 9). Тогда все плотности на рис. 8 после перенормировки данных Оже опустятся вниз на 25% (темные квадраты). Суммарное уменьшение



**Рис. 8.** Энергетические зависимости параметра  $\rho_{MD}(450, 35^\circ)$ , полученные коллаборацией Оже (рис. 1) и на Якутской установке [10]. Светлые квадраты — уменьшенные в  $\sec 35^\circ = 1.22$  раза плотности рис. 1. Синие ромбы — уменьшенные в  $f_\mu = 1.22 \times 1.25 = 1.525$  раза плотности рис. 1, с увеличенными в 1.25 раза первичными энергиями.



**Рис. 9.** Дифференциальный энергетический спектр КЛ по данным разных мировых установок. Точки: темные кружки — результаты Якутской установки по данным наземных сцинтилляционных детекторов [9], темные и светлые квадраты — Акено (1984, 1992) [11, 12], светлые треугольники вниз — AGASA [13], крестики — Ice Top [14], светлые треугольники вверх — эксперимент Оже [15], темные треугольники вверх — спектр Оже [15] с увеличенной в 1.25 раза первичной энергией, темные треугольники вниз — Haverah Park [16].

измеренных плотностей мюонов за счет двух одно-направленных факторов будет равно:

$$f_\mu = \langle \rho \rangle_{\text{exp}} / \langle \rho \rangle_{\text{sim}} = 1.22 \times 1.25 = 1.525, \quad (8)$$

где (exp) и (sim) — плотности мюонов, измеренные

экспериментально и вычисленные в работе [1] по модели QGSJET-II-04 от первичных протонов. Эта оценка согласуется с величиной  $f_\mu = 1.53 \pm 0.13(\text{stat})$ , полученной самими авторами [1].

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В [1] описана методика прямого измерения плотности мюонов с порогом  $E_\mu \approx 1.0 \text{ сек } \theta \text{ ГэВ}$  подземными сцинтилляционными детекторами в ливнях с энергиями  $2 \times 10^{17} - 2 \times 10^{18}$  эВ. Благодаря этой работе стала понятна одна из причин “мюонного избытка” [2]. Сравнительный анализ методов измерения плотности мюонов на Якутской установке и в эксперименте Оже показал, что формула (7) неверна. Она привела к завышению показанных на рис. 1 результатов в  $\text{сек}(35^\circ) = 1.22$  раза (рис. 8). Это стало возможно в силу того, что плотности мюонов в индивидуальных ливнях с зенитными углами  $\theta$  пересчитывались к углу  $35^\circ$  по формулам (1) и (2). Вторая причина аномально большого содержания мюонов связана с недооценкой на 25% первичной энергии ШАЛ в эксперименте Оже [10]. После ее перенормировки (увеличении в 1.25 раза) исправленные из-за формулы (7) плотности (светлые кружки) на рис. 8 опустятся дополнительно вниз и сдвинутся вправо на  $\log(1.25) = 0.1$ . Эти данные уже не требуют для решения “мюонной загадки” какого-либо пересмотра существующих моделей развития ШАЛ (см., например, [16]). Они вполне могут быть интерпретированы как “индикаторы” смешанного состава первичных частиц между протонами и ядрами железа. Мы продолжим исследование этого вопроса.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации 122011800084-7) с использованием данных, полученных на Уникальной научной установке “Якутская комплексная установка широких атмосферных ливней (ЯКУ ШАЛ) им. Д. Д. Красильникова” (<https://ckprfi.ru/catalog/usu/73611/>). Авторы выражают благодарность сотрудникам Обособленного структурного подразделения ИКФИА СО РАН ЯКУ ШАЛ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta, J. M. Albury, I. Allekotte, A. Almela, J. Alvarez Castillo, J. Alvarez-Muñiz, G. A. Anastasi, L. Anchordoqui, B. Andrada, S. Andringa, C. Aramo, P. R. Araújo Ferreira, H. Asorey, P. Assis, *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **80**, 751 (2020); <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-8055-y>
2. H. P. Dembinski, J. C. Arteaga-Velázquez, L. Cazon, R. Conceicao, J. Gonzalez, Y. Itow, D. Ivanov, N. N. Kalmykov, I. Karpikov, S. Muller, T. Pierog, F. Piehn, M. Roth, T. Sako, D. Soldin, R. Takeishi, *et al.* (for EAS-MSU, IceCube, KASCADE-Grande, NEVOD-DECOR, Pierre Auger Observatory, SUGGAR, Telescope Array, Yakutsk EAS Array), *EPJ Web Conf.* **210**, 02004 (2019); <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921002004>
3. А. В. Глушков, А. В. Сабуров, *Письма в ЖЭТФ* **100**, 793 (2014); doi: 10.1134/S0021364014230052
4. А. В. Глушков, К. Г. Лебедев, А. В. Сабуров, *Письма в ЖЭТФ* **117**, 254 (2023); arXiv: 2304.09924v1 [astro-ph.HE]; <https://doi.org/10.31857/S123456782304002X>
5. А. В. Глушков, К. Г. Лебедев, А. В. Сабуров, *ЯФ* **86**, 379 (2023); arXiv: 2304.008561v1 [astro-ph.HE]; <https://doi.org/10.31857/S004400272303011X>
6. А. В. Глушков, К. Г. Лебедев, А. В. Сабуров, *Изв. РАН. Сер. физ.* **87**, 7 (2023); arXiv: 2301.12268v1 [astro-ph.HE].
7. A. V. Glushkov, O. S. Diminstein, N. N. Efimov, N. N. Efremov, L. I. Kaganov, I. T. Makarov, and M. I. Pravdin, in *Proceedings of the 14th ICRC, Munchen, 1975*, Vol. 8, p. 2741.
8. S. Argiro, S. L. C. Barroso, J. Gonzalez, L. Nellen, T. Paul, T. A. Porter, L. Prado, Jr., M. Roth, R. Ulrich, and D. Veberic, *Nucl. Instrum. Methods A* **580**, 1485 (2007).
9. А. В. Глушков, М. И. Правдин, А. В. Сабуров, *ЯФ* **81**, 535 (2018); <https://doi.org/10.1134/S0044002718040049>; arXiv: 2301.09654v1 [astro-ph.HE].
10. А. В. Глушков, А. В. Сабуров, Л. Т. Ксенофонов, К. Г. Лебедев, *Письма в ЖЭТФ* **117**, 651 (2023); doi: 10.31857/S1234567823090033; arXiv: 2304.13095v1 [astro-ph.HE].
11. M. Nagano, T. Hara, Y. Hatano, N. Hayashida, S. Kawaguchi, K. Kamata, K. Kifune, and Y. Mizumoto, *J. Phys. G* **10**, 1295 (1984).
12. M. Nagano, M. Teshima, Y. Matsubara, H. Y. Dai, T. Hara, N. Hayashida, M. Honda, H. Ohoka, and S. Yoshida, *J. Phys. G* **18**, 423 (1992).
13. K. Shinozaki (AGASA Collab.), *Nucl. Phys. B* **151**, 3 (2006).
14. M. G. Aartsen *et al.* (Ice Cube Collab.), arXiv: 1307.3795v1.
15. A. Aab *et al.* (Pierre Auger Collab.), arXiv: 1604.03637v1 [hep-astro.IM].
16. G. Cunningham, J. Lloyd-Evans, A. M. T. Pollock, R. J. O. Reid, and A. A. Watson, *Astrophys. J.* **236**, 71 (1980).

# MUON MEASUREMENTS IN ULTRA-HIGH ENERGY EASs ACCORDING TO THE DATA OF THE YAKUT ARRAY AND THE AUGER EXPERIMENT

A. V. Glushkov<sup>1)</sup>, A. V. Saburov<sup>1)</sup>, L. T. Ksenofontov<sup>1)</sup>, K. G. Lebedev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia*

The results of direct measurements of the muon density in extensive air showers (EAS) with zenith angles  $\theta \leq 45^\circ$  and energies  $E_0 \geq 10^{17}$  eV obtained in the Auger experiment and at the Yakutsk array are considered. Muons in both cases were registered by underground scintillation detectors with the same threshold energy  $E_\mu \approx 1.0 \sec \theta$  GeV. The measured values are compared with the theoretical values calculated using the QGSJET-II-04 EAS development model from the CORSIKA software package. They differ from each other by  $1.53 \pm 0.13(\text{stat})$ . It is shown that this difference is due to the muon density overestimated by a factor of 1.22 and the primary energy underestimated by a factor of 1.25 in the Auger experiment.