

УДК 524.1

МУЛЬТИКОМПОНЕНТНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ШАЛ

© 2019 г. М. Б. Амельчаков¹*, Н. С. Барбашина¹, А. Г. Богданов¹, Д. М. Громушкин¹,
Е. А. Задеба¹, В. В. Киндин¹, Р. П. Кокоулин¹, К. Г. Компаниец¹, А. Кьявасса^{1,2}, Дж. Маннокки³,
О. И. Ликий¹, А. А. Петрухин¹, Ю. В. Стенькин^{1,4}, Дж. Тринкоро³, С. С. Хохлов¹,
И. А. Шульженко¹, В. В. Шутенко¹, К. О. Юрин¹, И. И. Яшин¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

²Туринский университет, Турин, Италия

³Туринская астрофизическая обсерватория Национального института астрофизики, Турин, Италия

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: MVAmelchakov@mephi.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Созданный в НИЯУ МИФИ экспериментальный комплекс НЕВОД включает в себя несколько установок для исследования электронно-фотонной, мюонной и адронной компонент ШАЛ в энергетическом диапазоне от 1 ПэВ до 1 ЕэВ. В данной работе приводятся первые результаты за два месяца совместной работы пяти установок: НЕВОД-ШАЛ, ЧВД, СКТ, ПРИЗМА-32 и ДЕКОР. Рассматриваются вопросы синхронизации работы установок и отбора совместных событий. Приводится анализ экспериментальных данных этих установок по разным компонентам ШАЛ в пересекающихся энергетических диапазонах.

DOI: 10.1134/S0367676519080039

ВВЕДЕНИЕ

Исследование космических лучей (КЛ) является фундаментальной задачей современной физики. Низкая интенсивность КЛ с энергией $E_0 > 1$ ПэВ затрудняет их прямую регистрацию детекторами, установленными на аэростатах и космических спутниках. Поэтому исследования высокоэнергичных КЛ проводятся по измерениям широких атмосферных ливней (ШАЛ) с помощью крупномасштабных установок, которые состоят из множества детекторов, распределенных на большой площади, таких как KASCADE-Grande [1], TibetAS γ [2], Якутск [3], ШАЛ МГУ [4]. К сожалению, информация, полученная от таких установок, касается в основном данных по электронно-фотонной составляющей ливней. Мюонные и адронные детекторы также входят в состав некоторых установок в качестве дополнительных элементов, но при этом имеют ограниченные возможности. Поэтому известный энергетический спектр [5] для первичных КЛ был восстановлен в основном по данным об электронно-фотонной компоненте ШАЛ на поверхности Земли.

Экспериментальный комплекс НЕВОД является уникальной научной установкой, объединя-

ющей несколько полнофункциональных детекторов, на которых проводится регистрация электронно-фотонной, мюонной и адронной компонент ШАЛ. Совместная работа этих детекторов позволяет исследовать КЛ в широком интервале зенитных углов и в диапазоне энергий первичных частиц от 10^{15} до 10^{18} эВ.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НЕВОД

Основой экспериментального комплекса НЕВОД является черенковский водный детектор (ЧВД) объемом ~ 2000 м³ [6]. ЧВД работает в режиме калориметра и позволяет измерять энерговыделение групп мюонов и стволы широких атмосферных ливней, а также каскадов, генерируемых одиночными мюонами в водном объеме в широком динамическом диапазоне. В качестве единицы измерения используется величина, равная числу всех фотоэлектронов, возникающих на внутренних поверхностях фотокатокаэнодов ФЭУ, установленных в оптических модулях ЧВД, при их засветке черенковским светом от проходящих через водный объем заряженных частиц.

Система калибровочных телескопов (СКТ) [7] создана для контроля параметров спектрометрических трактов ЧВД. СКТ и включает в себя две плоскости сцинтилляционных счетчиков. Сорок счетчиков расположены на крышке бассейна (верхняя плоскость) и сорок на дне водного резервуара (нижняя плоскость). Благодаря плотному расположению счетчиков в плоскостях и наличию между плоскостями водного объема СКТ позволяет регистрировать отдельно электронно-фотонную и мюонную компоненты ШАЛ, а также измерять спектры их локальных плотностей [8] в интервалах энергий ПКЛ от 10^{14} до 10^{15} эВ и от 10^{16} до 10^{18} эВ соответственно.

Координатно-трековый детектор ДЕКОР [9] располагается в галереях вокруг ЧВД и предназначен для изучения космических лучей на поверхности Земли под большими зенитными углами вплоть до горизонтальных направлений. Детектор ДЕКОР состоит из восьми вертикально расположенных супермодулей общей площадью ~ 70 м². Детектор обеспечивает пространственную точность восстановления трека мюона лучше 1 см, а угловую $\sim 0.7^\circ$. Двухтрековое разрешение супермодулей составляет ~ 3 см. Хорошие пространственно-угловые характеристики детектора ДЕКОР позволяют не только с высокой точностью реконструировать направление прихода групп мюонов наклонных ШАЛ, но и определять множественность и плотность мюонов в группе [10] в интервалах энергий ПКЛ от 10^{15} до 10^{18} эВ.

Установка ПРИЗМА-32 [11, 12] состоит из двух независимо работающих кластеров по 16 эн-детекторов, позволяющих регистрировать электронную (э) и нейтронную (н) компоненты, и размещена над водным бассейном ЧВД. Общая площадь установки составляет около 450 м². Диапазон измерений по заряженным частицам составляет от 20 до 75000 частиц на детектор, диапазон по нейтронам от 1 до 1000 нейтронов на один детектор.

Установка НЕВОД-ШАЛ [13] предназначена для детектирования классическим методом электронно-фотонной компоненты широких атмосферных ливней в энергетическом диапазоне от 10^{15} до 10^{17} эВ. Ее детектирующие элементы размещаются на крышах корпусов университета и на поверхности Земли вокруг здания, в котором размещены все вышеуказанные детекторы. Разновысотность расположения детектирующих элементов НЕВОД-ШАЛ определяет кластерную организацию ее регистрирующей системы. Соответственно, формирование событий установки НЕВОД-ШАЛ проводится на основе измерения временной задержки между сработавшими кластерами внутри временных ворот 500 нс.

Таблица 1. Распределение числа срабатываний установок в совместных событиях

№	Установка	Число событий	Доля, %
1	ЧВД	197469	99
2	СКТ	125967	63
3	ПРИЗМА-32	8463	4
4	ДЕКОР	164407	82

2. ОТБОР СОВМЕСТНЫХ СОБЫТИЙ

Для анализа отбирались события, в которых сработало не менее 5 кластеров в установке НЕВОД-ШАЛ, и при этом среди них должен быть кластер № 3, размещенный на крыше здания экспериментального комплекса. В период с 29.12.2017 по 08.02.2018 г. было зарегистрировано 244825 таких событий, среди которых проводился поиск совместных событий с другими установками. Все установки, расположенные внутри здания экспериментального комплекса, объединены единой триггерной системой (ЕТС). События считались совместными, если сигнал с ЕТС попал внутрь временного диапазона от 0 до 770 нс относительно времени срабатывания третьего кластера НЕВОД-ШАЛ. Используя данный критерий, мы отобрали 199284 совместных событий. Распределение по числу срабатываний установок в совместных событиях приведено в табл. 1. Отклик различных установок на одно из совместных событий визуализирован на рис. 1. Ось ШАЛ находится в стороне от здания экспериментального комплекса, вблизи первого кластера НЕВОД-ШАЛ. Численные параметры отклика приведены рядом с каждой установкой. Высота столбиков в местах расположения сцинтилляционных счетчиков установок НЕВОД-ШАЛ и ПРИЗМА-32 указывает на относительное количество зарегистрированных в них частиц. Отклик для установки ПРИЗМА-32 приведен в верхнем правом углу рис. 1 отдельно для электронно-фотонной и нейтронной компонент. В нижнем правом углу показан совместный отклик трех установок ЧВД, СКТ и ДЕКОР. Светлыми прямоугольниками показаны сработавшие счетчики в двух плоскостях СКТ, а темные кружки указывают на ФЭУ, сработавшие в ЧВД. Восстановленные треки мюонов, зарегистрированных в ДЕКОР, показаны прямыми линиями. Зарегистрированные треки заряженных частиц в супермодулях ДЕКОР приведены в левом нижнем углу рис. 1.

3. АНАЛИЗ ДАННЫХ СОВМЕСТНЫХ СОБЫТИЙ

В совместных событиях параметры ливней восстанавливались классическим способом по данным установки НЕВОД-ШАЛ с использованием

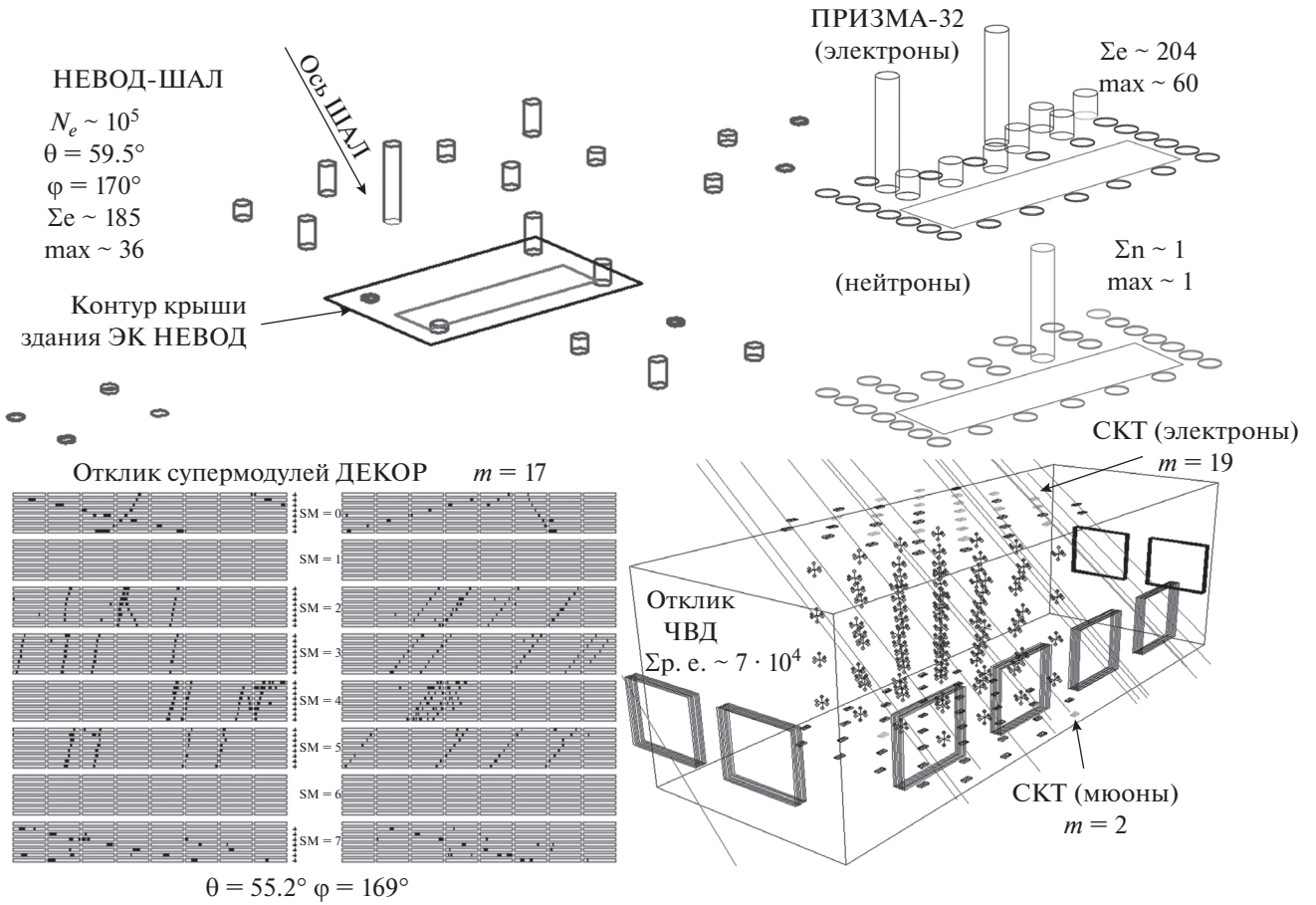


Рис. 1. Визуализация совместного события, зарегистрированного на пяти установках экспериментального комплекса НЕВОД (см. описание в тексте).

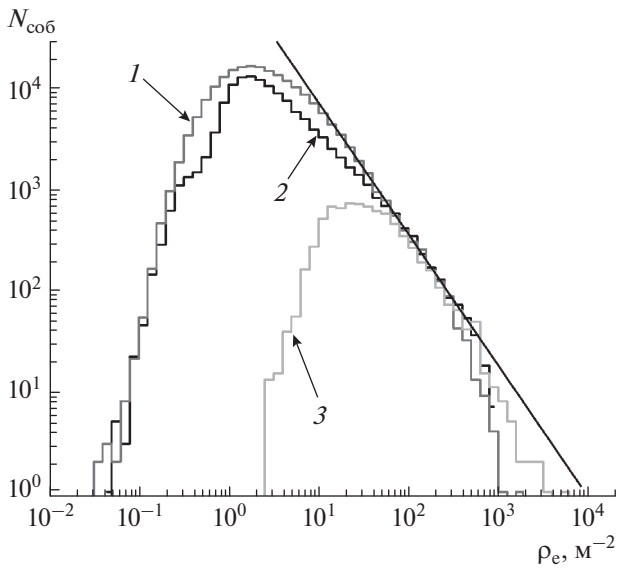


Рис. 2. Распределения плотности электронов в совместных событиях для третьего кластера НЕВОД-ШАЛ (1), верхней плоскости СКТ (2) и установки ПРИЗМА-32 (3).

функции пространственного распределения заряженных частиц Нишимуры–Каматы–Грейзена [14].

Три установки (НЕВОД-ШАЛ, СКТ, ПРИЗМА-32) имеют в своем составе сцинтилляционные детекторы и регистрируют электромагнитную компоненту ШАЛ классическим способом, но в разных энергетических диапазонах. Распределения по числу заряженных частиц, зарегистрированных на этих установках в совместных событиях, приведены на рис. 2. В области пересечения диапазонов регистрации от 70 до 200 частиц/м² эти распределения имеют примерно одинаковый наклон с интегральным показателем $\gamma \sim -1.3$.

Если ось ливня проходит вблизи здания, то из-за большой плотности заряженных частиц на детекторе ДЕКОР становится невозможным их количественный анализ, а также определение направления их прихода. Если плотность зарегистрированных заряженных частиц при зенитном угле более 35° не превосходит ~2–3 мюона на м², то для большинства таких событий относительное

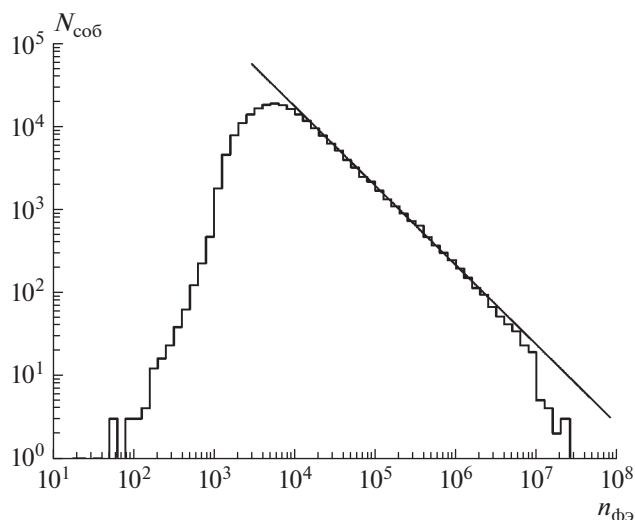


Рис. 3. Распределение числа фотоэлектронов в отклике ЧВД на совместные события.

отклонение направлений, восстанавливаемых установками НЕВОД-ШАЛ и ДЕКОР, составляет менее 2.5° .

ЧВД, как калориметр, регистрирует энерговыделение от всех компонент ШАЛ. Распределение отклика ЧВД на совместные события (рис. 3) имеет степенной характер в диапазоне от 10^4 до 10^7 фотоэлектронов (ф. э.) с показателем наклона дифференциального спектра ~ -1.9 (линия на рис. 3).

Данные по адронной компоненте пока имеют ограниченную статистику, т.к. для ее регистрации необходимо прохождение оси ливня вблизи установки ПРИЗМА-32.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданный в НИЯУ МИФИ экспериментальный комплекс с пятью различными установками позволяет решать множество различных задач современной физики космических лучей в широком диапазоне энергий первичных частиц:

- исследование ШАЛ в диапазоне энергий от 1 до 100 ПэВ;
- исследование области излома спектра в разных компонентах ШАЛ (электронно-фотонной, мюонной и адронной);

- проверка моделей взаимодействия частиц при сверхвысоких энергиях;

- исследование анизотропии первичных КЛ.

Работа выполнена на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД” при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Программа повышения конкурентноспособности НИЯУ МИФИ, проект 02.а03.21.0005), а также гранта РФФИ № 16-29-13028-офи_м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Apel W.D., Arteaga-Velázquez J.C., Bekk K. et al.* // *Astropart. Phys.* 2012. V. 36. P. 183.
2. *Atenomori M., Bi X. J., Chen D. et al.* // *Astrophys. J.* 2008. V. 678. № 2. P. 1165.
3. *Egorova V.P., Glushkov A.V., Ivanov A.A. et al.* // *Int. J. Mod. Phys. A.* 2005. V. 20. № 29. P. 6878.
4. *Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Kalmykov V.N. et al.* // *Proc. 28th ICRC. (Tsukuba, 2003).* V. 1. P. 119.
5. *Tanabashi M. et al. (Particle Data Group)* // *Phys. Rev. D.* 2018. V. 98. Art. № 010001.
6. *Петрухин А.А.* // *УФН.* 2015. № 5. С. 521; *Petrukhin A.A.* // *Phys. Usp.* 2015. V. 58. № 5. P. 486.
7. *Амельчаков М.Б., Богданов А.Г., Задеба Е.А. и др.* // *ПТЭ.* 2018. № 5. С. 1; *Amelchakov M.B., Bogdanov A.G., Zadeba E.A. et al.* // *Instr. Exper. Tech.* 2018. V. 61. № 5. P. 673.
8. *Amelchakov M.B., Bogdanov A.G., Zadeba E.A. et al.* // *Phys. Proc.* 2015. V. 74. P. 449.
9. *Барбашина Н.С., Езубченко А.А., Косолин Р.П. и др.* // *ПТЭ.* 2000. № 6. С. 20; *Barbashina N.S., Ezubchenko A.A., Kokoulin R.P. et al.* // *Instr. Exper. Tech.* 2000. № 6. P. 743.
10. *Яшин И.И., Барбашина Н.С., Богданов А.Г. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2007. Т. 71. № 4. С. 573; *Yashin I.I., Barbashina N.S., Bogdanov A.G. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2007. V. 71. № 4. P. 556.
11. *Stenkin Yu. V.* // *Nucl. Phys. B.* 2009. V. 196. P. 293.
12. *Gromushkin D.M., Alekseenko V.V., Petrukhin A.A. et al.* // *J. Instr.* 2014. V. 9. № 8. P. C08028.
13. *Amelchakov M.B., Ampilogov N.V., Astapov I.I. et al.* // *J. Instr.* 2017. V. 12. № 6. P. C06033.
14. *Grieder P. K. F.* *Extensive air showers: high energy phenomena and astrophysical aspects – a tutorial, reference manual and data book.* V. 1. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 199 p.