

УДК 524.1-352

МУЛЬТИКОМПОНЕНТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ НА УСТАНОВКАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НЕВОД

© 2023 г. М. Б. Амелчаков¹, А. Г. Богданов¹, Д. М. Громушкин¹, А. Н. Дмитриева¹,
Р. П. Кокоулин¹, А. Ю. Коновалова¹, К. Р. Нугаева¹, А. А. Петрухин¹, А. Д. Почестнев¹,
С. С. Хохлов^{1, *}, И. А. Шульженко¹, Е. А. Южакова¹

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

*E-mail: sskhokhlov@mephi.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Анализируются параметры широких атмосферных ливней, регистрируемых установками экспериментального комплекса НЕВОД; представлены результаты их сопоставления с моделированными событиями. Обсуждаются калибровка и энергетический порог установки НЕВОД-ШАЛ, а также результаты восстановления направления осей по данным НЕВОД-ШАЛ и детектора ДЕКОР. Приводится пример события, зарегистрированного всеми установками комплекса.

DOI: 10.31857/S0367676523701703, EDN: OQLQMC

ВВЕДЕНИЕ

Проведенные ранее исследования широких атмосферных ливней (ШАЛ) выявили целый ряд необычных явлений во взаимодействиях частиц высоких и сверхвысоких энергий: в измеренном энергетическом спектре космических лучей, имеющем резко падающий степенной характер, в области около 5 ПэВ наблюдается “излом”; при энергиях выше 100 ПэВ наблюдается второй излом и избыток числа мюонов в событиях по сравнению с расчетами по всем существующим моделям (т.н. “мюонная загадка”); во многих экспериментах были зарегистрированы необычные события и явления при энергиях выше 10 ПэВ: “выстроенность”, “проникающие каскады”, “кентавры”, “антикентавры”, “гало” и др.

На данный момент нет ни одной общепризнанной модели, способной объяснить эти явления в рамках единого подхода. Ключом к их объяснению могут стать результаты мультикомпонентных исследований ШАЛ, когда в одном и том же событии детекторами разных типов регистрируются различные компоненты. По этому пути идут различные эксперименты, например TAIGA [1] в России и LHAASO [2] в Китае.

Для проведения мультикомпонентных исследований ШАЛ перспективным является комплексный подход к анализу экспериментальных данных, при котором незначимая, с точки зрения

независимого анализа, информация об одной или нескольких компонентах ливня может быть добавлена к данным по другим компонентам, что позволяет точнее определять параметры ШАЛ и, соответственно, инициировавшей его частицы.

Такие исследования и такой подход реализованы на экспериментальном комплексе НЕВОД в НИЯУ МИФИ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НЕВОД

Экспериментальный комплекс НЕВОД объединяет девять научных установок [3], в данной работе анализировались данные шести из них: ЧВК, СКТ, ДЕКОР, НЕВОД-ШАЛ, ПРИЗМА и УРАН.

Часть установок экспериментального комплекса размещена внутри одного здания и включает: черенковский водный калориметр НЕВОД [4] объемом 2000 м³, внутри которого расположена пространственная решетка из 91 квазисферического модуля. Черенковский водный калориметр позволяет измерять энерговыделение заряженных частиц. На дне и крышке черенковского водного детектора расположены плоскости сцинтилляционных детекторов системы калибровочных телескопов [5]. В состав каждой плоскости входит по 40 детекторов, которые позволяют про-

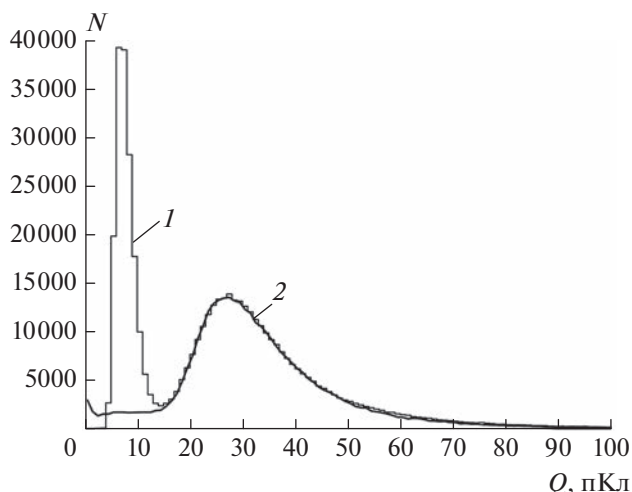


Рис. 1. Зарядовые спектры откликов детектирующей станции НЕВОД-ШАЛ в режиме самозапуска: 1 — экспериментальный спектр, 2 — моделированный.

водить калибровку ФЭУ черенковского водного детектора и исследовать электронно-фотонную и мюонную компоненты ШАЛ в диапазоне энергий 10^{14} – 10^{17} эВ. Координатно-трековый детектор ДЕКОР расположен вокруг черенковского водного калориметра и состоит из 8 вертикальных супермодулей общей площадью 70 м^2 [6], детектор позволяет регистрировать группы мюонов в наклонных ШАЛ и проводить анализ плотности частиц в этих группах.

Установка НЕВОД-ШАЛ размещена в Экспериментальном комплексе НЕВОД на крышах зданий и прилегающей территории [7] и состоит из 9 кластеров, в состав которых входит по 4 детектирующих станции. Общая площадь установки составляет 10^4 м^2 . НЕВОД-ШАЛ позволяет восстанавливать параметры широких атмосферных ливней классическим способом — по электронно-фотонной компоненте.

Установка ПРИЗМА размещена на четвертом этаже здания Экспериментального комплекса НЕВОД. Установка состоит из 2 кластеров по 16 электронно-нейтронных детекторов каждый [8], площадь установки составляет 500 м^2 . ПРИЗМА позволяет регистрировать электронно-фотонную компоненту [9] и тепловые нейтроны ШАЛ, рожденные в результате взаимодействия адронной компоненты ливня с веществом, окружающим детектор.

Установка УРАН является следующим шагом в регистрации адронов ШАЛ посредством тепловых нейтронов. Установка размещена на крыше экспериментального комплекса и соседнего лабораторного корпуса и включает 6 кластеров по 12 детекторов в каждом. Суммарная площадь установки составляет 1000 м^2 [10].

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА, ПОРОГ И УГЛОВАЯ ТОЧНОСТЬ УСТАНОВКИ НЕВОД-ШАЛ

Для восстановления параметров широкого атмосферного ливня в отдельном событии необходимо знать абсолютное значение энерговыделения в каждой детектирующей станции НЕВОД-ШАЛ, которое может быть пересчитано в количество заряженных частиц.

Для калибровки в установке НЕВОД-ШАЛ каждые 4 ч для всех 36 детектирующих станций в режиме самозапуска набираются спектры откликов, т.е. записываются заряды сигналов с каждой станции без дополнительных триггерных условий. В основном эти сигналы обусловлены прохождением через станцию одиночных мюонов. В меньшей степени они могут быть вызваны адронами, высокоэнергичными электронами и электронами от гамма-квантов.

Для энергетической калибровки в программном пакете Geant4 была создана модель детектирующей станции, учитывающая геометрию и материалы детектора, свойства сцинтиллятора и фотоумножителя. После этого проведено моделирование отклика детектирующей станции на одиночные мюоны, электроны, протоны и гамма-кванты.

При розыгрыше треков мюонов, протонов и гамма-квантов использовались близкие к реальным дифференциальные спектры, полученные с помощью моделирования в программном пакете CORSIKA для разных значений зенитного угла [11]. Для розыгрыша энергии электронов использовался дифференциальный спектр, объединяющий результаты моделирования в программном пакете CORSIKA (для кинетической энергии выше 100 МэВ) и результат расчета [12] для кинетической энергии меньше 100 МэВ .

На рис. 1 представлен экспериментальный и моделированный зарядовые спектры откликов детектирующей станции в режиме самозапуска. Левый пик в экспериментальном распределении обусловлен вкладом от электронов бета-распада и темновых шумов ФЭУ. Как видно из рисунка, форма экспериментального и моделированного спектров в области регистрации одиночных частиц отлично согласуется, а наиболее вероятное значение заряда составляет 27.5 пКл . Результаты моделирования в программном пакете Geant4 позволяют определить, что данный заряд соответствует энерговыделению внутри детектирующей станции 11.1 МэВ . Таким образом, отношение полученных значений позволяет найти калибровочный коэффициент, используемый в дальнейшем при реконструкции экспериментальных событий. В данном случае он равен 0.40 МэВ/пКл .

Для разработки и отладки методов реконструкции параметров ливней в программном па-

жете CORSIKA с использованием модели адронных взаимодействий QGSJET-II-04 + FLUKA 2020.0.3 было проведено моделирование ливней, инициированных протонами и ядрами железа в диапазоне первичных энергий 10^{14} – 10^{17} эВ и интервале зенитных углов 0° – 50° . Энергетический спектр первичных частиц имел степенную форму с показателем $\gamma + 1 = 2.7$. Моделирование отклика детектирующих станций на частицы ливня проводилось с помощью программного пакета Geant4.

Одним из наиболее важных параметров установки является энергетический порог срабатывания, для его определения анализировалась доля моделированных событий с осями вблизи центра установки, в которых сработало не менее 7 кластеров, с максимальным энерговыделением в центральном кластере установки. Кластер считается сработавшим, если в нем имеются сигналы не менее, чем от двух детектирующих станций.

На рис. 2 приведены энергетические спектры всех промоделированных ливней, инициированных протонами и ядрами железа и прошедших условия отбора. По спектрам было установлено, что 90% эффективность регистрации ливней, инициированных протонами, достигается при энергии 0.7 ПэВ. При этом ливни от протонов с энергиями выше 1 ПэВ регистрируются с эффективностью более 65%. Для ливней, инициированных ядрами железа, 50% эффективность регистрации достигается при энергии 1.4 ПэВ, а при энергии выше 1 ПэВ эффективность составляет 46%. При отборе околореконструктивных ливней (диапазон зенитных углов от 0° до 30°) эффективность регистрации при энергии выше 1 ПэВ составляет более 98% при протонном первичном составе и более 91% для ливней, инициированных ядрами железа.

Совместный анализ событий, зарегистрированных в установках НЕВОД-ШАЛ и ДЕКОР позволяет провести перекрестную оценку точности восстановления направления ливня. Точность реконструкции треков мюонов в ДЕКОР лучше 1° , поэтому углы треков мюонов в совместных событиях могут считаться эталоном для направлений, восстановленных по данным НЕВОД-ШАЛ. Для совместного анализа отбирались только те события ДЕКОР, в которых сработало не менее 3 супермодулей и было реконструировано не менее трех квазипараллельных треков мюонов. Число отобранных совместных событий за период экспозиции с 01.07.2020 г. по 08.09.2020 г. с кратностью срабатывания кластеров не менее 5 составило 2456 событий.

При анализе данных НЕВОД-ШАЛ использовалось 2 способа восстановления направления ШАЛ. В первом способе реконструкция направления проводилась сначала по данным отдельных кластеров, а итоговым вектором направления

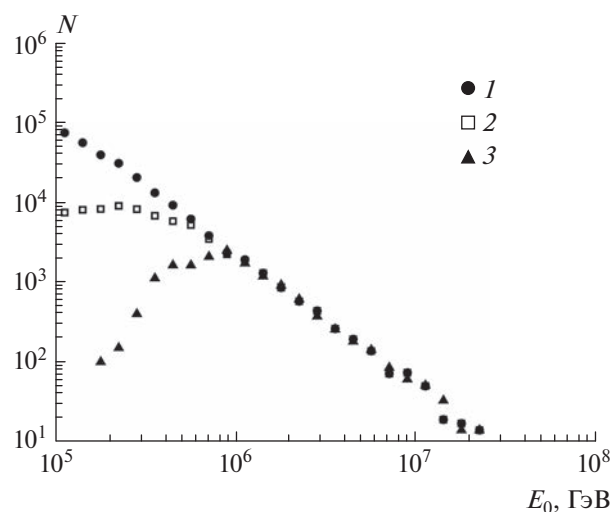


Рис. 2. Энергетические спектры: 1 – спектр первичных частиц (протонов и ядер железа); 2 – регистрируемый спектр ливней, инициированных протонами; 3 – регистрируемый спектр ливней, инициированных ядрами железа.

ШАЛ считался суммарный вектор от всех кластеров. Второй способ учитывает данные всех сработавших станций, как независимых элементов установки. В обоих вариантах использовалось приближение плоского фронта ШАЛ.

Для оценки точности восстановления направления ШАЛ определялся угол расхождения между направлением группы мюонов, зарегистрированной в ДЕКОР, и направлением ливня, восстановленным по данным НЕВОД-ШАЛ. Полученные распределения для углов расхождения приведены на рис. 3. В качестве оценки точности восстановления выбран 68-й процентиль распределения событий. Таким образом, точность восстановления по отдельным кластерам составила $5.9^\circ \pm 0.1^\circ$, а при восстановлении по всем детектирующим станциям $3.5^\circ \pm 0.1^\circ$.

В работе [7] было показано, что реконструкция направлений ливней в моделированных событиях, проведенная первым способом, дает точность лучше 5° для энергий первичной частицы выше 1 ПэВ. Таким образом, полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с моделированием.

ИССЛЕДОВАНИЕ АДРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ШАЛ

Детекторы установки УРАН способны регистрировать тепловые нейтроны, возникающие при взаимодействии адронов ствола ливня с окружающим установку веществом. На рис. 4 приведена зависимость числа нейтронов, зарегистрированных установкой УРАН в эксперимен-

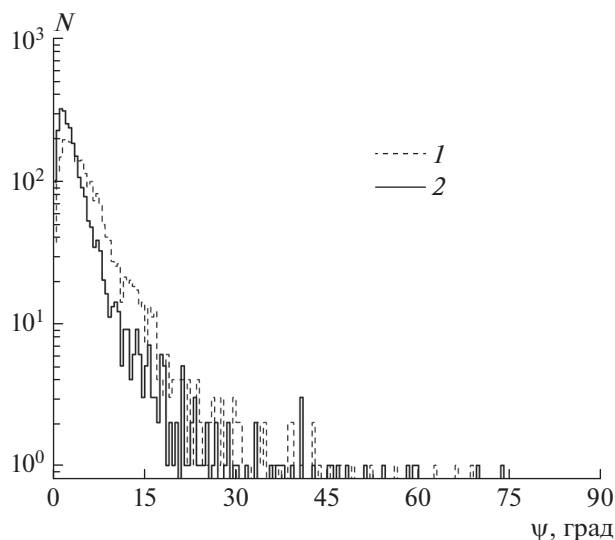


Рис. 3. Распределения по угловым отклонениям направлений ШАЛ Ψ , восстановленных НЕВОД-ШАЛ, от направления треков мюонов в детекторе ДЕКОР: 1 — по всем кластерам, 2 — по всем детектирующим станциям.

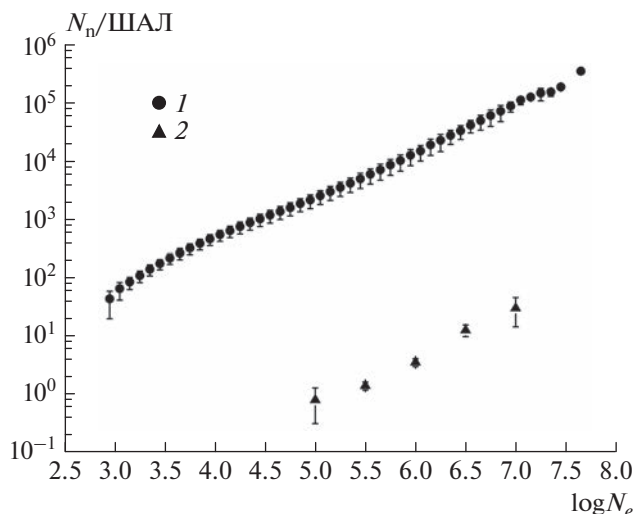


Рис. 4. Зависимость числа адронов от мощности ШАЛ: 1 — среднее число адронов на уровне наблюдения по данным модели QGSJET-II-04 + FLUKA 2020.0.3; 2 — среднее число тепловых нейтронов, регистрируемых в событиях установкой УРАН.

тальных событиях, от мощности ШАЛ [13] и зависимость числа адронов на уровне наблюдения от мощности ливня в моделированных событиях (то же моделирование, что и в предыдущем разделе).

В двойном логарифмическом масштабе обе зависимости близки к линейным, следовательно, функции имеют степенной характер. Показатель наклона (показатель степени) для экспериментальной зависимости равен $\alpha = 0.89 \pm 0.09$, для моделированных ливней показатель равен $\alpha = 0.85 \pm 0.02$. В пределах погрешности показатели совпадают. Таким образом, число тепловых нейтронов, регистрируемых установкой УРАН, прямо пропорционально числу адронов в ливне. По отношению приведенных на рис. 4 зависимостей было определено, что установка УРАН в среднем регистрирует 1 тепловой нейтрон на 3000 адронов, приходящих на уровень наблюдения. В дальнейшем это свойство установки планируется использовать при верификации моделей адрон-адронных взаимодействий.

АНАЛИЗ МУЛЬТИКОМПОНЕНТНЫХ СОБЫТИЙ

Все установки экспериментального комплекса НЕВОД объединены при помощи системы глобальной временной синхронизации, которая позволяет проводить привязку событий, регистрируемых каждой установкой, к глобальному времени с временной точностью 10 нс. Для совместного анализа информации со всех установок комплекса разработана единая база данных. На рис. 5 пред-

ставлен пример события, зарегистрированного установками экспериментального комплекса.

В левой части рисунка сверху приводится визуализация события в установке НЕВОД-ШАЛ (RUN 2018-01-05, время срабатывания 3 кластера — 12:27:39.509.021.755) с реконструкцией по данным отклика стандартных ФЭУ детектирующих станций. Снизу представлен результат геометрической реконструкции отклика детекторов НЕВОД, ДЕКОР и СКТ в этом же событии (RUN 595, № 514045, 12:27:39.509.022.094), крестиками изображены сработавшие квазисферические оптические модули черенковского водного детектора, кружками — сработавшие ФЭУ. Прямоугольниками указаны сработавшие сцинтилляционные счетчики установки СКТ. В правой части рисунка представлены результаты реконструкции откликов установок УРАН (сверху) и ПРИЗМА (снизу). Детекторы установок показаны в виде составных окрашенных кругов. Внешнее кольцо символизирует амплитуду A отклика детектора на электромагнитную компоненту ШАЛ (в кодах АЦП). Внутренний круг соответствует отклику счетчика при регистрации нейтронов ШАЛ (количество зарегистрированных нейтронов, N). Соответствующие цветовые шкалы приведены для обеих установок. Для установки ПРИЗМА амплитуда и число нейтронов в каждом детекторе дополнительно указаны цифрами в формате “ A/N ”. Для установки УРАН приводятся времена срабатывания кластеров. Для обеих установок указаны суммарные число зарегистрированных нейтронов и амплитуда отклика на электромагнитную компоненту ШАЛ.

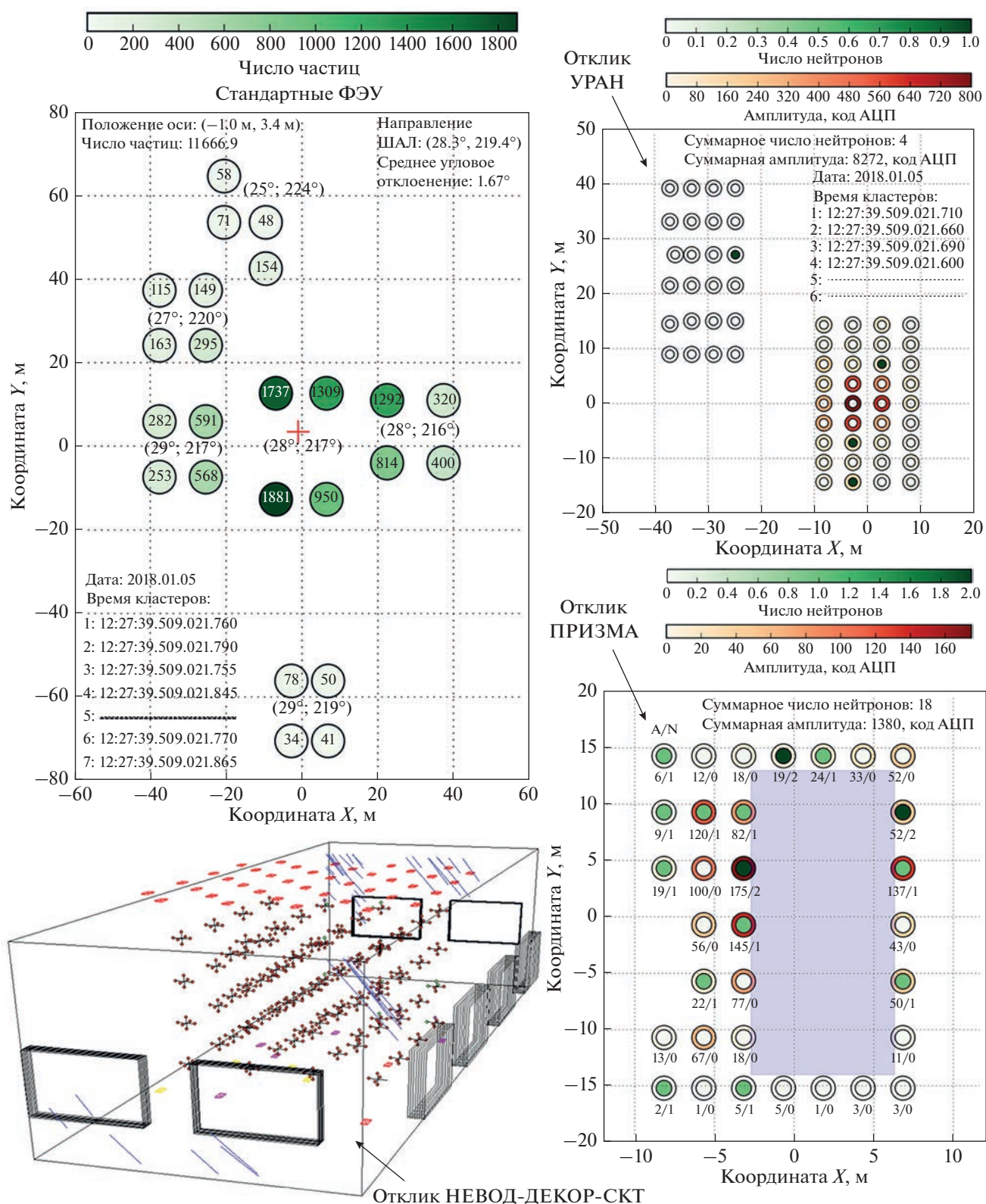


Рис. 5. Пример события, зарегистрированного всеми установками Экспериментального комплекса НЕВОД.

В этом событии, согласно оценкам по данным установки НЕВОД-ШАЛ, ось ливня попала практически в центр корпуса черенковского водного детектора, на котором расположен кластер № 3, что согласуется с распределением частиц электромагнитной компоненты и нейтронов в детекторах установок ПРИЗМА и УРАН. В детекторе ДЕКОР было зарегистрировано 36 треков мюонов, пришедших под зенитным и азимутальным углами 30° и 217° , соответственно. В установке НЕВОД-ШАЛ данное событие характеризуется результирующим направлением прихода с углами $\theta = 28^\circ$ и $\phi = 219^\circ$.

Таким образом, в данном событии представлен пример одновременной независимой регистрации электронно-фотонной, мюонной и адронной компонент широкого атмосферного ливня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование установки НЕВОД-ШАЛ показало, что наиболее вероятное энерговыделение в детектирующей станции в режиме самозапуска (положение мюонного пика) соответствует величине 11.1 МэВ, а эффективность регистрации широких атмосферных ливней с энергиями выше 1 ПэВ равна 65% для ливней от протонов и 46% для ливней, инициированных ядрами железа. Проведенное сопоставление направлений частиц в ливнях, восстановленных по данным установок НЕВОД-ШАЛ и ДЕКОР, показало, что для 68% событий разница составляет менее 3.5° . Перекрестный анализ экспериментальных и моделированных событий позволил установить, что число тепловых нейтронов, регистрируемых установкой УРАН, прямо пропорционально числу адронов в ливне. Таким образом, Экспериментальный комплекс НЕВОД позволяет проводить одновременные исследования электронно-фотонной, мюонной и адронной компонент широких атмосферных ливней.

Исследование выполнено на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс

НЕВОД” при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-72-10010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Просин В.В., Астапов И.И., Безъязыков П.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 525; *Prosin V.V., Astapov I.I., Bezzyazekov P.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 395.
2. Щеголев О.Б., Алексеенко В.В., Кулешов Д.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 548; *Shchegolev O.B., Alekseenko V.V., Kuleshov D.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 415.
3. Yashin I.I., Amelchakov M.B., Astapov I.I. et al. // J. Instrum. 2021. V. 16. Art. No. T08014.
4. Киндин В.В., Амельчаков М.Б., Барбашина Н.С. и др. // ПТЭ. 2018. № 5. С. 23; *Kindin V.V., Amelchakov M.B., Barbashina N.S. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2018. V. 61. No. 5. P. 649.
5. Амельчаков М.Б., Богданов А.Г., Задеба Е.А. и др. // ПТЭ. 2018. № 5. С. 49; *Kindin V.V., Amelchakov M.B., Zadeba E.A. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2018. V. 61. No. 5. C. 673.
6. Барбашина Н.С., Езубченко А.А., Кокоулин Р.П. и др. // ПТЭ. 2000. № 6. С. 20; *Barbashina N.S., Ezubchenko A.A., Kokoulin R.P. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2000. V. 43. No. 6. P. 743.
7. Amelchakov M.B., Barbashina N.S., Bogdanov A.G. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2022. V. 1026. Art. No. 166184.
8. Gromushkin D.M., Petrukhin A.A., Stenkin Yu.V. et al. // J. Instrum. 2014. V. 9. No. 8. Art. No. C08028.
9. Громушкин Д.М., Волченко В.И., Задеба Е.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 414; *Gromushkin D.M., Zadeba E.A., Petrukhin A.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 3. P. 380.
10. Gromushkin D.M., Bogdanov F.A., Khokhlov S.S. et al. // J. Instrum. 2017. V. 12. No. 7. Art. No. C07029.
11. Kovlyayeva A.A., Dmitrieva A.N., Tolkacheva N.V., Yakovleva E.I. // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 409. Art. No. 012128.
12. Daniel R.R., Stephens S.A. // Rev. Geophys. Space Phys. 1974. V. 12. No. 2. P. 233.
13. Богданов Ф.А., Громушкин Д.М., Избулякова З.Т. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 560; *Bogdanov F.A., Gromushkin D.M., Izhbulyakova Z.T. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 424.

Multicomponent extensive air showers studies at the installations of the experimental complex NEVOD

M. B. Amelchakov^a, A. G. Bogdanov^a, D. M. Gromushkin^a, A. N. Dmitrieva^a, R. P. Kokoulin^a,
A. Yu. Konovalova^a, K. R. Nugaeva^a, A. A. Petrukhin^a, A. D. Pochestnev^a, S. S. Khokhlov^{a,*},
I. A. Shulzhenko^a, E. A. Yuzhakova^a

^a National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: sskhokhlov@mephi.ru

Results of the analysis of the parameters of extensive air showers detected by the installations of the Experimental Complex NEVOD, as well as the results of their comparison with simulated events are presented. The calibration and energy threshold of the NEVOD-EAS air-shower array, as well as the results of reconstructing the axes direction according to the data the NEVOD-EAS and DECOR installations are discussed. An example of the event detected by all installations of the complex is given.