
ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 004.3+004.6+539.12

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ МУЛЬТИКОМПОНЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ШАЛ НА УСТАНОВКАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НЕВОД

© 2026 г. Е. П. Хомчук^а, *, М. Б. Амельчаков^а, А. Г. Богданов^а, Д. М. Громушкин^а,
С. Ю. Жежера^а, А. Ю. Коновалова^а, С. С. Хохлов^а, И. А. Шульженко^а, Е. А. Южакова^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: EPKhomchuk@mephi.ru

Поступила в редакцию 14.07.2025 г.

После доработки 18.07.2025 г.

Принята к публикации 29.07.2025 г.

В работе представлено описание специализированной аппаратно-программной системы (АПС) для хранения и анализа данных всех установок Экспериментального комплекса (ЭК) НЕВОД. Обсуждаются заложенные в АПС принципы работы с моделированными и экспериментальными данными, а также алгоритм и результаты отбора совместных событий в установках ЭК. Приводится пример одного из таких событий, а также полученные по ним функции пространственного распределения мюонной и электронно-фотонной компоненты ШАЛ.

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни, мультикомпонентные исследования ШАЛ, комплементарный подход, большие данные, системы хранения данных, экспериментальный комплекс НЕВОД

DOI: 10.56304/S2079562926010185

ВВЕДЕНИЕ

В состав ЭК НЕВОД входит ряд научных установок для исследования различных компонент ШАЛ [1]: черенковкий водный детектор НЕВОД, система калибровочных телескопов (СКТ), координатные детекторы ДЕКОР и ТРЕК, а также ливневые установки УРАН, ПРИЗМА, НЕВОД-ШАЛ. Агрегация экспериментальных данных установок, дает возможность изучать события ШАЛ по нескольким компонентам одновременно, и, следовательно, с большей точностью определить параметры первичных космических лучей (ПКЛ). Для развития мультикомпонентных исследований ШАЛ в ЭК НЕВОД создана специализированная АПС [2] для хранения и анализа данных.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И АНАЛИЗА ДАННЫХ

Аппаратно-программная система развернута на базе центра обработки данных ЭК НЕВОД. Она создана для решения ряда задач: моделирование широких атмосферных ливней и откликов установок ЭК НЕВОД на их прохождение; обработка и анализ экспериментальных данных установок; обучение нейронных сетей для реконструкции

событий и развития новых методов и подходов к анализу экспериментальных данных; надежное хранение экспериментальных и моделированных данных детекторов и установок, а также автоматизация их резервирования, архивирования; унификация хранения и программно-технических средств анализа данных установок, имеющих достаточно сложные и сильно отличающиеся форматы исходных данных.

Аппаратная часть АПС представляет собой высокопроизводительные сервера для хранения и анализа данных, расположенные в одной телекоммуникационной стойке: два сервера баз данных (БД), два вычислительных сервера, а также один графический сервер.

Программная часть АПС основана на системе управления базами данных (СУБД) MongoDB [3], а также специализированном программном обеспечении (ПО), разработанном на языке программирования Python [4] и реализующем следующий набор функций системы: формирование баз моделированных и экспериментальных данных на серверах БД, отбор совместных событий установок комплекса, их обработка и анализ с использованием графических и вычислительных серверов,

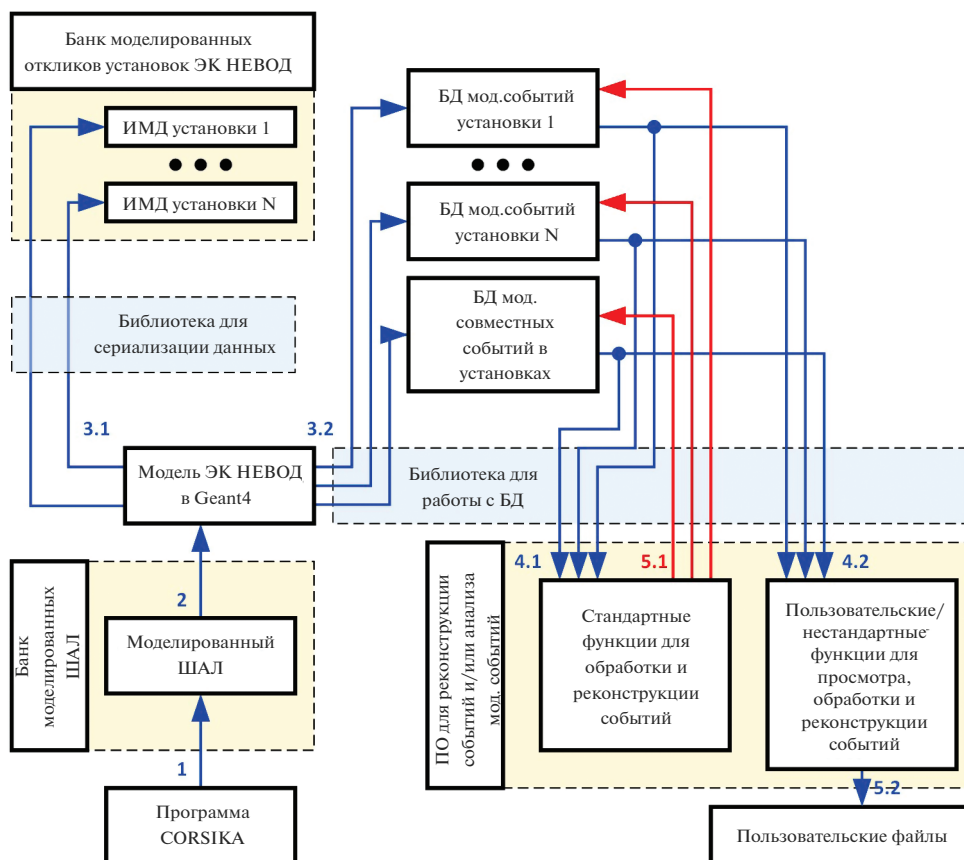


Рис. 1. Схема организации процесса работы с моделированными данными ЭК НЕВОД.

а также мониторинг критически важных параметров детекторов и установок ЭК НЕВОД.

В частности, в результате работы АПС отдельно формируются банки моделированных ШАЛ и откликов установок, а также базы экспериментальных данных. Моделированные данные необходимы для разработки методов реконструкции и интерпретации экспериментальной информации, которая используется для получения физических результатов. В АПС реализованы разные схемы организации процесса работы с моделированными и экспериментальными данными.

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗ МОДЕЛИРОВАННЫХ ДАННЫХ

Схема организации процесса работы с моделированными данными представлена на рис. 1. Процесс включает пять основных этапов:

1. Моделирование ШАЛ в программе CORSIKA [5], результаты которого (полный состав широкого атмосферного ливня на уровне наблюдения и параметры исходной частицы) записываются в банк моделированных ШАЛ.

2. Из банка информация о моделированном ШАЛ поступает на вход модели установок ЭК НЕВОД в программном пакете Geant4 [6].

3. В результате моделирования откликов установок ЭК НЕВОД в Geant4 в банке моделированных откликов установок формируются файлы исходных моделированных данных (ИМД) (подпроцесс (пп.) 3.1), а также осуществляется запись метаданных (уникальный идентификатор, конфигурация откликов детектирующих элементов, ссылка на ИМД), характеристик сигналов с детектирующих элементов и параметров исходной частицы в БД моделированных данных установок и совместных событий (пп. 3.2).

4. Проведение обработки и реконструкции моделированных событий в отдельных установках и совместных событиях. В автоматическом режиме обработка и реконструкция событий осуществляются по стандартной методике (пп. 4.1). В то же время в АПС заложена возможность считывания исследователем информации из БД как для анализа автоматически реконструированных параметров, так и для разработки новых методов обработки и реконструкции (пп. 4.2). При включении программного кода нового алгоритма обработки и реконструкции событий в библиотеку стандарт-

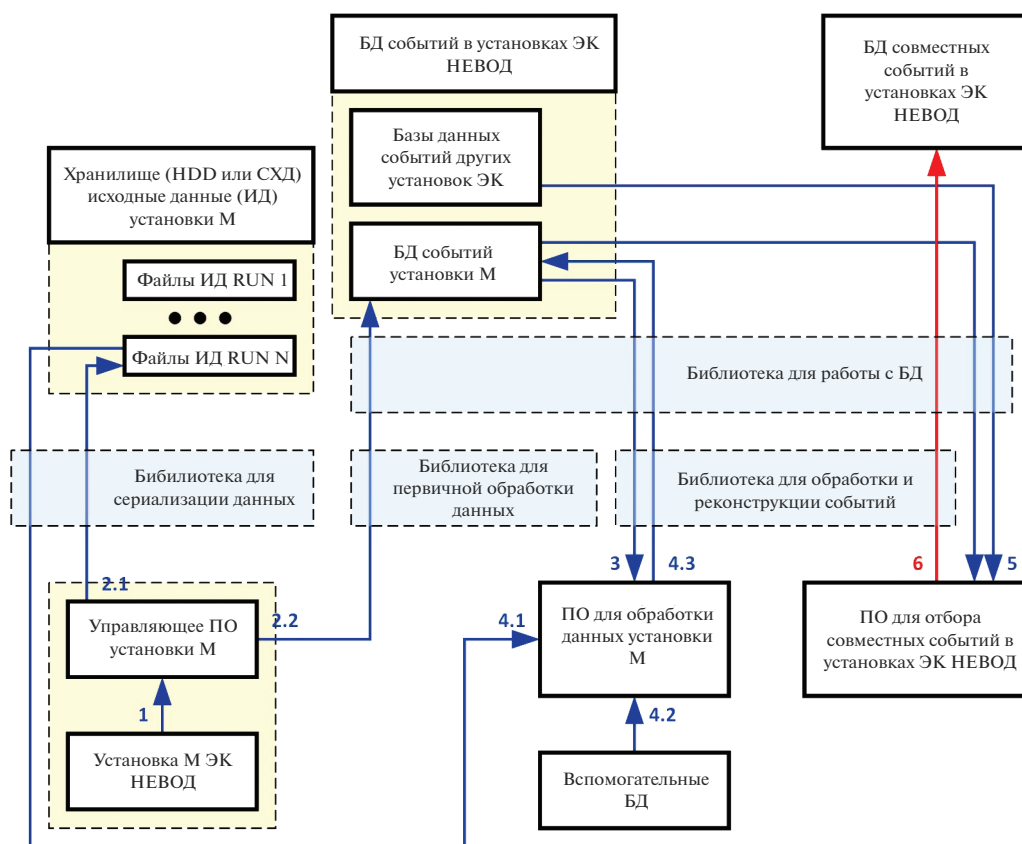


Рис. 2. Схема организации процесса работы с БД экспериментальных данных ЭК НЕВОД.

ных функций и классов запускается цикл пп. 4.1–5.1 для дополнения БД параметрами событий, обработанными и реконструированными по-новому.

5. Результаты обработки и реконструкции дописываются в базу моделированных данных установки/совместных событий (пп. 5.1) или выводятся в пользовательский файл(ы) для анализа непосредственно самим исследователем (пп. 5.2).

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Схема организации процесса работы с базой экспериментальных данных представлена на рис. 2.

Процесс включает шесть этапов, повторяющихся друг за другом с периодичностью один RUN (набор данных) в ходе работы установок:

1. При регистрации событий информационные пакеты с исходными данными (ИД) об откликах детектирующих элементов установки поступают в управляющее ПО, осуществляющее их распаковку и первичную обработку, в результате которой получается метainформация и характеристики сигналов с детектирующих элементов.

2. По мере поступления информационных пакетов управляющее ПО осуществляет запись ИД

на жесткий диск управляющей ЭВМ (пп. 2.1), а также запись метainформации и характеристик сигналов в БД экспериментальных событий установки (пп. 2.2). Записанная на этом этапе в БД информация может использоваться для мониторинга работоспособности установки в режиме реального времени.

3. После окончания RUN управляющее ПО установки создает новую коллекцию в БД и начинает записывать в нее информацию, получаемую в ходе нового набора. При этом начинается обработка экспериментальных данных завершившегося RUN.

4. Программа обработки данных осуществляет чтение ИД (пп. 4.1), загрузку дополнительной информации из вспомогательных БД, содержащих, например, значения метеопараметров, калибровочных коэффициентов и констант (пп. 4.2), а также обработку события с помощью библиотеки стандартных функций для обработки и реконструкции, при этом модифицируя и дополняя БД (пп. 4.3) конкретной установкой.

5. После обработки (процесс 4) осуществляется отбор совместных событий в установках ЭК НЕВОД (процесс 5). При этом считываются идентификаторы и времена регистрации событий

из БД установок, формируется единый отсортированный временной ряд событий и начинается процесс его анализа.

6. При анализе временного ряда по мере нахождения совпадений событий в разных установках осуществляется запись информации о совместном событии в БД (процесс 6).

АЛГОРИТМ ПОИСКА СОВМЕСТИХ СОБЫТИЙ

Процедура формирования БД экспериментальных совместных событий включает два этапа.

На первом этапе отбора совместных событий осуществляется построение единого временного ряда событий в установках комплекса для одного календарного дня их работы. При этом создается промежуточная коллекция в БД, в которую помещаются идентификатор и время регистрации события определенной установки (t). После этого промежуточная коллекция подвергается сортировке по времени регистрации средствами СУБД.

На втором этапе в БД совместных событий создается коллекция, соответствующая анализируемому календарному дню, и по временному ряду проводится поиск совпадающих событий в установках ЭК. Так как все установки ЭК НЕВОД имеют различные регистрирующие и триггерные системы со своими особенностями работы, время регистрации одного и того же события в них отличается на некоторую величину (систематическую задержку). При этом задержка не является постоянной и может варьироваться в пределах $\Delta t \approx 1$ мкс в зависимости от параметров регистрируемого события. Поиск осуществляется следующим образом. Для текущей n -й записи БД с идентификатором и временем регистрации события выполняется запрос всех записей в промежуточной коллекции, которые имеют значения t события в интервале $[t; t + \Delta t]$. В результате этого запроса СУБД возвращает $1 + m$ записей, среди которых содержится и исходная n -я запись. Если $m = 0$, значит совпадений не обнаружено. Курсор СУБД перемещается на следующую $(n + 1)$ -ю запись и описанная процедура повторяется. Если $m > 0$, значит имеется совпадение в двух или более установках ЭК. При этом в память ЭВМ-обработчика из промежуточной коллекции вычитываются записи с порядковыми номерами от n до $n + m$. В результате анализа этих записей формируется структура, содержащая в себе уникальный идентификатор совместного события, битовую маску сработавших установок, массив идентификаторов событий в сработавших установках, массив названий установок и время. Данная структура помещается в БД совместных событий и представляет собой заготовку для дальнейшего дополнения результатами реконструкции параметров соответствующего события. После этого курсор

СУБД перемещается на $m + 1$ запись вперед, и процедура повторяется. По завершении отбора совместных событий для одного календарного дня промежуточная коллекция удаляется.

ПРИМЕРЫ МУЛЬТИКОМПОНЕНТНОГО АНАЛИЗА ШАЛ

На основе экспериментальных данных, полученных на установках ЭК НЕВОД в период с 2019 по 2024 гг. сформированы 2109 коллекций, которые в общей сложности содержат около 50 млн. совместных событий с различными комбинациями установок НЕВОД-ШАЛ, УРАН и НЕВОД-ДЕКОР-СКТ.

На рис. 3 представлен пример совместного события в установках НЕВОД-ШАЛ и НЕВОД-ДЕКОР-СКТ, в котором наблюдалась группа с большой множественностью мюонов ШАЛ. В левой части рисунка показана визуализация отклика НЕВОД-ШАЛ в этом событии (уникальный идентификатор: 2019-07-26_ev_06:03:56.040.943.107). Справа представлены результаты геометрической реконструкции отклика НЕВОД-ДЕКОР-СКТ и, дополнительно, супермодулей координатно-трекового детектора ДЕКОР (2019-07-26_ne_06:03:56.040.943.410). Справа сверху показан трехмерный вид НЕВОД-ДЕКОР-СКТ. Крестики показывают сработавшие квазисферические оптические модули (КСМ) ЧВД НЕВОД, кружки соответствуют сработавшим ФЭУ КСМ. Квадраты показывают сработавшие сцинтилляционные счетчики СКТ. Цвет кружков соответствует различным грациям по амплитуде: зеленый — 1–7 ф.э.; желтый — 8–25 ф.э.; фиолетовый — 26–75 ф.э.; красный — амплитуда более 75 ф.э. Синие линии показывают треки мюонов, восстановленные по данным супермодулей (СМ) ДЕКОР. Отклики СМ ДЕКОР (X - и Y -проекции) показаны справа снизу. Для НЕВОД-ДЕКОР-СКТ указаны следующие характеристики отклика:

- для СКТ — суммарное число зарегистрированных частиц N_{part} в эквиваленте вертикального мюона, кратность срабатывания сцинтилляционных счетчиков в верхней m_{top} и нижней m_{bottom} плоскостях;

- для ЧВД НЕВОД — логарифм суммарной амплитуды сигналов с фотоумножителей (в фотоэлектронах) $\lg N_{\text{ph.e.}}$, кратность сработавших КСМ m_{qsm} и ФЭУ m_{pmt} ;

- для ДЕКОР — число (автоматически) реконструированных треков мюонов N_{track} , зенитный θ и азимутальный ϕ углы направления прихода группы мюонов.

Согласно результатам реконструкции в СМ ДЕКОР было зарегистрировано 68 треков мюонов с зенитным и азимутальным углами 44.5° и 133.7° соответственно. В этом событии СМ ДЕКОР экра-

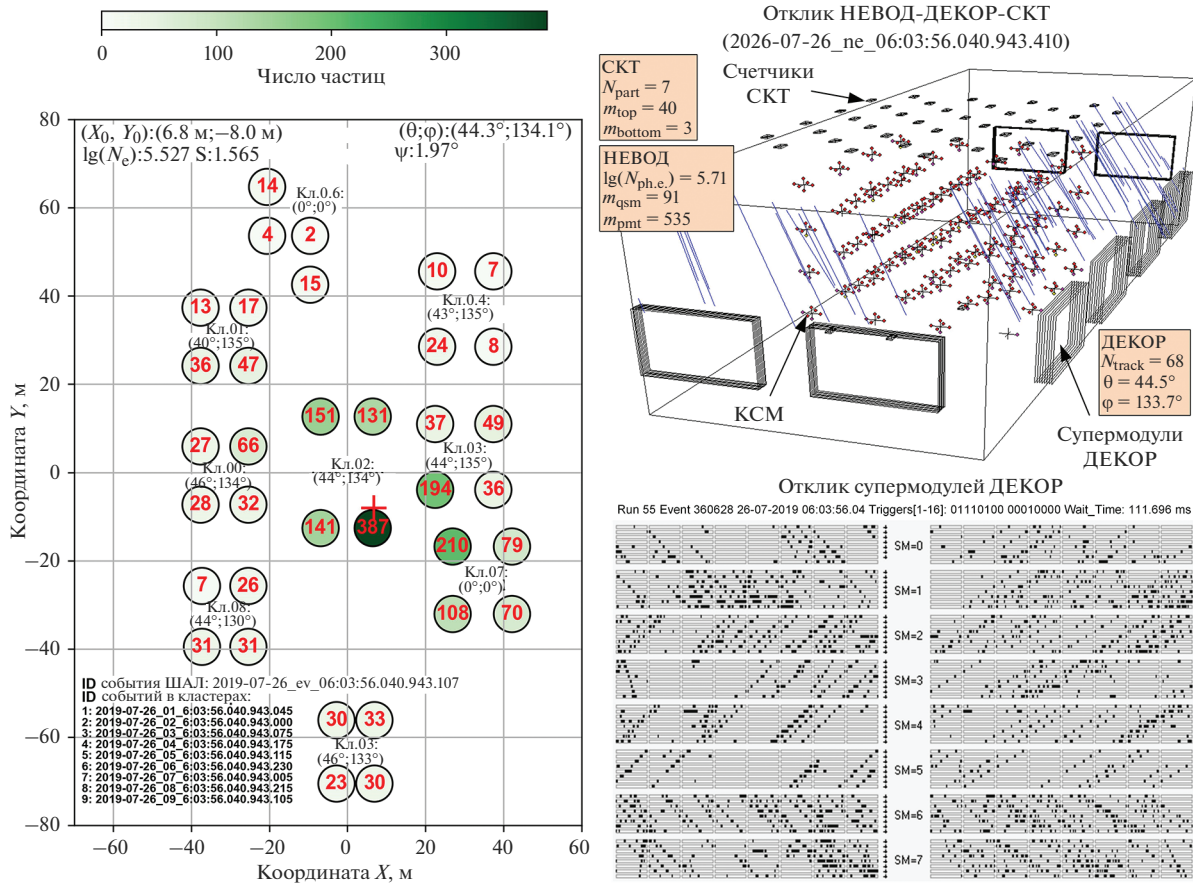


Рис. 3. Совместное событие в НЕВОД-ШАЛ (2019-07-26_ev_06:03:56.040.943.107) и НЕВОД-ДЕКОР-СКТ (2019-07-26_ne_06:03:56.040.943.410).

нированы водным объемом ЧВД НЕВОД, и треки мюонов отчетливо видны в откликах всех СМ. Направление прихода широкого атмосферного ливня, восстановленное по данным установки НЕВОД-ШАЛ ($\theta = 44.3^\circ$ и $\varphi = 134.1^\circ$), хорошо согласуется с направлением группы мюонов.

С помощью БД совместных событий был проведен анализ совпадающих событий в установках СКТ и НЕВОД-ШАЛ. По данным НЕВОД-ШАЛ для каждого ливня известны направление прихода, координаты оси, мощность и число частиц, попавших в детектирующие станции установки. Анализ отклика нижней плоскости СКТ при регистрации ШАЛ позволяет получать число прошедших через нее мюонов. Таким образом, проводя анализ событий по совместным данным этих двух установок, можно получить ФПР электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ для разных диапазонов зенитных углов направления прихода и мощностей.

На рис. 4 приведены измеренные ФПР частиц для ШАЛ в диапазоне зенитных углов прихода 10° – 20° . Левый рисунок получен для ШАЛ с мощ-

ностью 10^5 , правый — для ШАЛ с мощностью 10^6 . Квадраты соответствуют ФПР электрон-фотонной компоненты по данным НЕВОД-ШАЛ, а треугольники — ФПР мюонной компоненты ШАЛ по данным СКТ. Для ШАЛ с мощностью 10^5 число частиц электрон-фотонной компоненты, и число мюонов на всех расстояниях от оси ШАЛ меньше, чем для ливней с мощностью 10^6 . Число мюонов для ШАЛ с мощностью 10^6 вблизи оси (3 м) почти в 6 раз выше, чем число мюонов от ШАЛ с мощностью 10^5 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для развития мультикомпонентных исследований космических лучей в ЭК НЕВОД создана специализированная аппаратно-программная система для хранения и анализа данных с установок экспериментального комплекса и сформирована база данных совместных событий, включающая почти 50 млн. широких атмосферных ливней, зарегистрированных различными комбинациями установок НЕВОД-ШАЛ, УРАН и НЕВОД-ДЕКОР-СКТ.

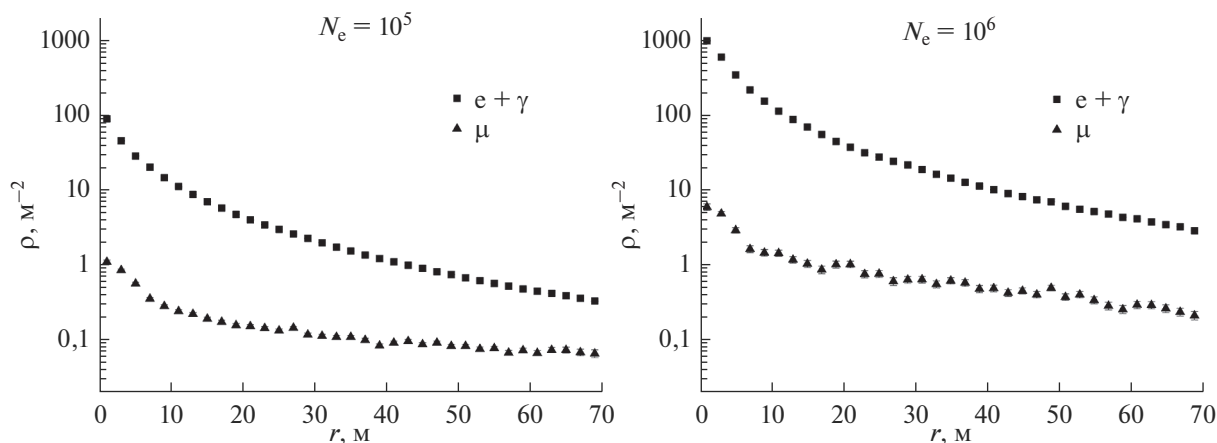


Рис. 4. ФПР электрон-фотонной и мюонной компоненты ШАЛ.

Результаты анализа совместных событий в СКТ и НЕВОД-ШАЛ свидетельствуют о возможности восстановления числа мюонов ШАЛ по СКТ с учетом параметров ливня, реконструированных по электронно-фотонной компоненте, и о возможности проведения по данным этих установок мультикомпонентных исследований ШАЛ с малыми зенитными углами направления прихода в части изучения массового состава КЛ и проверки моделей адронных взаимодействий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на Уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД” при

поддержке гранта Российского научного фонда № 22-72-10010-П, <https://rscf.ru/project/22-72-10010-П/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Петрухин А.А., Хохлов С.С. (ред.). Экспериментальный комплекс НЕВОД. 2022. Москва: НИЯУ МИФИ.
2. Khomchuk E.P., Amelchakov M.B., Gromushkin D.M., et al. // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56 (3). P. 647–651.
3. MongoDB. <https://www.mongodb.com>.
4. Python. <https://www.python.org/>.
5. CORSIKA. <https://www.iap.kit.edu/corsika/>.
6. Geant4. <https://geant4.web.cern.ch/>.

High-Performance Hardware and Software System for the Analysis of Data from Multicomponent EAS Studies at the Installations of the Experimental Complex NEVOD

E. P. Khomchuk¹, *, M. B. Amelchakov¹, A. G. Bogdanov¹, D. M. Gromushkin¹, S. Yu. Zhezhera¹, A. Yu. Konovalova¹, S. S. Khokhlov¹, I. A. Shulzhenko¹, and E. A. Yuzhakova¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: EPKhomchuk@mephi.ru

Received July 14, 2025; revised July 18, 2025; accepted July 29, 2025

Abstract—The description of a specialized hardware and software system (HSS) for storing and analyzing data from all installations of the Experimental Complex (EC) NEVOD is presented. The principles of working with simulated and experimental data embedded in the HSS, as well as the algorithm and results of selecting joint events in the EC installations are discussed. The example of one of these events, as well as the lateral distribution functions of the muon and electron-photon components of the extensive air shower obtained based on them are given.

Keywords: cosmic rays, extensive air showers, multicomponent EAS studies, complementary approach, big data, data storage system, Experimental complex NEVOD