

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ УНУ НЕВОД

Е. П. Хомчук, М. Б. Амельчаков, Д. М. Громушкин,
С. Ю. Жежера, А. Ю. Коновалова, С. С. Хохлов,
И. А. Шульженко, Е. А. Южакова*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

В настоящее время на уникальной научной установке (УНУ) «Экспериментальный комплекс НЕВОД» создается аппаратно-программная система (АПС) для хранения и анализа больших объемов данных детекторов, регистрирующих космические лучи сверхвысоких энергий. В статье подробно описываются задачи и особенности АПС, ее состав и архитектура, обсуждается схема хранения информации и приводится структура баз экспериментальных и моделированных данных отдельных установок и всего комплекса.

A hardware and software system (HSS) is being created at the Unique Scientific Facility (USF) “Experimental Complex NEVOD” for storing and analyzing large volumes of data from detectors recording ultra-high-energy cosmic rays. The article describes in detail the tasks and the features of HSS, its composition and architecture, discusses the information storage scheme, and provides the structure of the data bases of experimental and simulated events in individual installations and in the entire complex.

PACS: 96.50.S–; 96.50.sd

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день космические лучи (КЛ) являются единственным инструментом, позволяющим проводить исследование ядро-ядерных взаимодействий при энергиях в сотни тераэлектронвольт в системе центра масс. Исследования КЛ высоких энергий проводятся путем регистрации вторичных частиц широких атмосферных ливней (ШАЛ), образующихся при взаимодействии первичных частиц с атмосферой Земли.

Проведенные ранее исследования 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 10^{17} эВ в событиях наблюдается избыток числа мюонов по сравнению с расчетами по всем существующим моделям

* E-mail: EPKhomchuk@mephi.ru

(так называемая «мюонная загадка») [1, 2]; во многих экспериментах были зарегистрированы необычные события и явления [3]: «выстроенность», «проникающие каскады», «кентавры» [4], «антикентавры», «гало» и др. Нет ни одной общепризнанной модели, способной объяснить эти явления в рамках единого подхода.

Ключом к объяснению данных явлений могут стать результаты мультikomпонентных исследований ШАЛ, проводимых в рамках комплементарного подхода к анализу экспериментальных данных. Такие исследования и такой подход реализуются в экспериментальном комплексе (ЭК) НЕВОД [5] (НИЯУ МИФИ, Москва), объединяющем шесть установок, которые позволяют исследовать одни и те же события сразу по трем компонентам: электронно-фотонной, мюонной и адронной.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НЕВОД

Экспериментальный комплекс НЕВОД функционирует с 1994 г. и объединяет в своем составе несколько самостоятельных детекторов для регистрации различных компонент ШАЛ. ЭК НЕВОД позволяет проводить фундаментальные исследования в области физики частиц и астрофизики, а также прикладные исследования в сфере мониторинга и прогнозирования состояния околоземного пространства.

В состав комплекса входят: черенковский водный детектор (ЧВД) НЕВОД объемом 2000 м^3 с пространственной решеткой из 91 оптического модуля (ОМ) для измерения энерговыделения стволы ШАЛ и групп мюонов; система калибровочных телескопов (СКТ) для калибровки ОМ, состоящая из 80 сцинтилляционных счетчиков (по 40 счетчиков на крышке и дне ЧВД) для исследования электронно-фотонной компоненты (по верхней плоскости СКТ) и мюонной компоненты (по нижней); координатно-трековые детекторы ДЕКОР и ТРЕК для высокоточной реконструкции треков групп мюонов наклонных ШАЛ; ПРИЗМА-32, состоящая из 32 детекторов, расположенных на площади 450 м^2 , и УРАН, состоящая из 72 детекторов, расположенных на площади 10^3 м^2 , для регистрации электронно-фотонной и нейтронной компонент ШАЛ; НЕВОД-ШАЛ, включающая 36 сцинтилляционных детектирующих станций, расположенных на площади 10^4 м^2 , для регистрации электронно-фотонной компоненты.

ЧВД, СКТ и ДЕКОР объединены общей триггерной системой, в которую в одностороннем порядке поступает триггер установки ПРИЗМА-32. Сопоставление событий ЧВД-СКТ-ДЕКОР-ПРИЗМА с событиями установок НЕВОД-ШАЛ и УРАН осуществляется по временным меткам системы глобальной временной синхронизации (СГВС) ЭК НЕВОД. Система СГВС обеспечивает точность временной привязки регистрируемых ШАЛ до 25 нс.

Основные параметры ШАЛ (положение и наклон оси, возраст и мощность) могут быть восстановлены по отклику установки НЕВОД-ШАЛ

с возможным использованием откликов установок УРАН, ПРИЗМА-32 и верхней плоскости СКТ. Координатно-трековые детекторы ДЕКОР, ТРЕК и нижняя плоскость СКТ дают информацию о мюонной компоненте. Данные по тепловым нейтронам, полученные с установок УРАН и ПРИЗМА-32, а также результаты измерений энерговыделений стволов ШАЛ дают информацию об адронной компоненте ливня.

ДАННЫЕ УСТАНОВОК ЭК НЕВОД

При непрерывной работе ЭК НЕВОД суммарный годовой объем экспериментальной информации, поступающей со всех установок комплекса, регистрирующих миллионы событий в сутки, составляет ~ 3 ТБ (таблица). При этом для решения различных расчетных задач в целях верификации получаемых экспериментальных результатов и разработки новых методов необходим внушительный банк моделированных ШАЛ и откликов установок, полученных в программных пакетах Geant4 [6] и CORSIKA [7].

Объемы экспериментальных данных установок ЭК НЕВОД

Установка	Объем данных, ГБ/год	Количество событий, тыс. событий/год
НЕВОД-ШАЛ	1400	250 000
НЕВОД-ДЕКОР-СКТ	800	380 000
УРАН	500	> 500
ПРИЗМА-32	12	> 12

Поэтому для хранения и эффективного анализа экспериментальных и моделированных событий установок с целью развития комплементарного подхода к анализу данных в ЭК НЕВОД создается высокопроизводительная вычислительная аппаратно-программная система хранения и анализа больших объемов данных.

СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ МИРОВЫХ УСТАНОВОК

Для проведения эффективного многостороннего анализа ШАЛ с применением, в том числе, алгоритмов обработки больших объемов данных необходимы оптимизация и унификация подходов к структурированию и хранению информации отдельных установок, входящих в состав крупных экспериментов. Универсального решения этой задачи не существует, но, благодаря развитию информационных технологий, имеется множество готовых программных инструментов для работы с данными, широко используемых учеными в области неускорительной физики высоких энергий.

Коллаборация KASCADE-Grande [8] в рамках проекта KASCADE Cosmic-ray Data Centre (KCDC) [9] хранит экспериментальные данные в NoSQL-базах данных (БД) [10], что обеспечивает гибкость при расширении числа событий или компонентов детектора без необходимости изменения фиксированной схемы БД. Для повышения производительности используется система управления базами данных (СУБД) MongoDB [11] на шардированном кластере. Вся система KCDC функционирует на сервере Nginx [12] и взаимодействует с сервером базы данных и рабочими узлами. На каждом рабочем узле, который управляется и мониторируется приложениями, реализованными с помощью фреймворка Django [13] с использованием расширения Celery [14] и языка программирования Python [15], осуществляется обработка пользовательских запросов. Данные размещены на FTP-сервере, откуда пользователи могут их скачать через HTML-ссылку, предоставляемую после успешного завершения обработки их запроса. Предварительные выборки и результаты моделирования доступны зарегистрированным пользователям по протоколу FTP.

В эксперименте IceCube [16] информация записывается в специализированное хранилище данных (Data Warehouse, DWH), развернутое в Университете Висконсин-Мэдисон. В то же время существуют проекты размещения метаданных в едином файловом каталоге, доступном для всех приложений, реализуемых в рамках IceCube. Функционал этих проектов дает возможность искать необходимую информацию, сохраняя вычислительные ресурсы для обработки данных. Для реализации файлового каталога в IceCube (IceCube File Catalog) [17] также используется СУБД MongoDB.

СТРУКТУРА ДАННЫХ УСТАНОВОК ЭК НЕВОД

Главными целями внедрения БД для хранения моделированных и экспериментальных событий в установках ЭК НЕВОД являются: унификация хранения программных средств анализа данных нескольких установок, имеющих достаточно сложные и сильно отличающиеся форматы исходных данных; упрощение и ускорение процесса выделения из общей массы событий только тех, которые удовлетворяют определенным критериям и подходят для решения конкретных технических и физических задач.

БД разработана на основе документо-ориентированной NoSQL СУБД MongoDB. В СУБД данные хранятся в виде наборов JSON-подобных динамически расширяемых документов, которые легко читаются человеком, а также легко разбираются и генерируются программами.

Разработанная БД (рисунок) представляет собой совокупность из нескольких баз, реализующих разделение данных ЭК и отдельных установок на три информационных уровня (ИУ). Связь между ИУ обеспечивается в БД с помощью уникальных идентификаторов событий.

Первый информационный уровень БД содержит результаты анализа откликов детектирующих элементов составных частей установок (например, параметры кластеров: амплитуда, заряд, временная метка); второй — событий в установках, которые являются объединением совпавших по времени кластерных событий (конфигурации отклика, результаты реконструкции этого события по данным установки), третий — совместные события нескольких установок ЭК НЕВОД (параметры событий, реконструированные в результате мультикомпонентного анализа).

Для удобства обращения и снижения нагрузки на СУБД при выполнении запросов данные во всех БД, вне зависимости от их информационного уровня, разбиты на коллекции. Каждая коллекция соответствует одному календарному дню работы установок ЭК НЕВОД и имеет имя, совпадающее с датой, например 2023-02-05.

БД за 2019–2023 гг. для установок НЕВОД-ШАЛ, ПРИЗМА-32, УРАН содержит более 1431 млн событий; НЕВОД-ДЕКОР-СКТ более 1965 млн событий. При этом общий объем БД 6,9 ТБ. Сформирован банк моделированных ШАЛ объемом 42,7 ТБ, включающий 930 000 событий. Сформированы банк и БД моделированных откликов установок ЭК НЕВОД, имеющих объемы 8,4 и 4 ГБ соответственно и включающих около 700 000 совместных событий ШАЛ в установках НЕВОД-ШАЛ и НЕВОД-ДЕКОР-СКТ, около 940 000 событий с группами мюонов в установках НЕВОД и ДЕКОР, около 230 000 откликов ЧВК НЕВОД на одиночные мюоны, электроны, протоны, π - и K -мезоны.

АПС ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

АПС разворачивается на базе центра обработки данных ЭК НЕВОД, в котором обеспечены все необходимые условия для ее работы. Система интегрирована в локальную вычислительную сеть (ЛВС) ЭК НЕВОД по высокоскоростному каналу передачи данных. Для моделирования, обработки данных и разработки новых методов их анализа, а также организации хранения и доступа к научной и технической информации, получаемой с детекторов, установок и других систем ЭК НЕВОД, используются высокопроизводительные серверы.

Аппаратная часть АПС состоит из: *двух серверов БД и сетевого хранилища данных (СХД)* для надежного хранения экспериментальных и моделированных данных детекторов и установок, а также автоматизации их резервирования и архивирования, унификации хранения программных средств анализа данных установок, имеющих достаточно сложные и сильно отличающиеся форматы исходных данных; *двух вычислительных серверов* для сбора и экспресс-анализа данных с систем технического обслуживания ЭК НЕВОД и метеоданных, а также результатов моделирования ШАЛ, процессов прохождения КЛ в гелиосфере и околоземном пространстве, откликов детекторов и установок ЭК НЕВОД; *графического сервера* для обучения нейронных сетей ре-

конструкции событий и развития новых методов и подходов к анализу экспериментальных данных.

На серверах используется система виртуализации Proxmox Virtual Environment [18], которая позволяет один физический компьютер разбить на несколько изолированных друг от друга виртуальных машин. Такое разбиение позволяет каждой виртуальной машине работать со своим набором логических ресурсов (процессорных, оперативной памяти, устройств хранения), что сокращает риск поломки всей системы при неполадках в одном из компонентов, тем самым формируется высокая отказоустойчивость всей АПС.

На *серверах БД* развернута программная часть, которая включает в себя:

- первичный узел базы данных на основе СУБД MongoDB, развернутый на основном сервере и управляющий исходной БД установок ЭК НЕВОД;

- вторичный узел базы данных на основе СУБД MongoDB, развернутый на резервном сервере и управляющий репликой исходной БД установок ЭК НЕВОД;

- набор программ на резервном сервере АПС для архивирования БД и выполнения других служебных операций согласно заданному расписанию, который включает инструмент Celery, реализующий выполнение задач, «сформулированных» с помощью резидентной СУБД Redis [19].

На виртуальных машинах *первого вычислительного сервера (общего назначения)* установлено специализированное программное обеспечение (ПО): для сбора данных с технических систем, обслуживающих ЭК; для получения метеоданных, а также для трансляции данных с некоторых установок на официальном сайте ЭК НЕВОД [20]; для обработки экспериментальных и моделированных данных установок.

На *втором вычислительном сервере* установлены программа CORSIKA для моделирования образования и развития ШАЛ в результате взаимодействия первичных КЛ с атмосферой Земли, а также программный пакет Geant4 для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием метода Монте-Карло.

На виртуальных машинах *графического сервера* установлен язык программирования Python с библиотеками, необходимыми для обучения нейронных сетей и проведения расчетов с использованием графического процессора на видеокартах.

Серверы БД собраны на базе платформы Gigabyte R162-ZA1 и включают:

- процессор AMD EPYC 7313 с базовой частотой 3,0 ГГц, 16 ядрами и 32 потоками;

- 16 модулей оперативной памяти с суммарным объемом 1 ТБ;

- два SSD Samsung PM1735 с интерфейсом PCI-E, емкостью 1,6 ТБ каждый, скоростью чтения и записи 7000 и 2400 МБ/с соответственно,

включенных по схеме RAID1 для обеспечения наилучшей отказоустойчивости ПО сервера;

– 4 SSD Samsung PM9A3 с интерфейсом PCI-E, емкостью 7,68 ТБ каждый, скоростью чтения 6700 МБ/с и записи 4000 МБ/с, включенных по схеме RAID5, обеспечивающей сохранность информации при поломке одного из накопителей;

– 6 SSD Samsung PM883 с интерфейсом SATA, емкостью 1,92 ТБ каждый, скоростью чтения 550 МБ/с и записи 520 МБ/с, включенных по схеме RAID5.

Вычислительные серверы на базе платформы Gigabyte R282-Z90 включают:

– 2 процессора AMD EPYC 7713 с базовой частотой 2,0 ГГц, 64 ядрами и 128 потоками каждый;

– 32 модуля оперативной памяти суммарной емкостью 1024 и 2048 ГБ;

– один SSD Samsung PM1735 с интерфейсом PCI-E, емкостью 3,2 ТБ, скоростью чтения 8000 МБ/с и записи 3800 МБ/с;

– 10 жестких дисков Western Digital Ultrastar DC HC550 с интерфейсом SATA, емкостью 18 ТБ каждый, включенных по схеме RAID5.

Графический сервер на базе платформы Gigabyte G242-Z12 включает:

– процессор AMD EPYC 7713 с базовой частотой 2,0 ГГц, 64 ядрами и 128 потоками;

– 8 модулей оперативной памяти с суммарным объемом 1 ТБ;

– два SSD Samsung PM1735 с интерфейсом PCI-E, емкостью 3,2 ТБ каждый, скоростью чтения и записи 8000 и 38 000 МБ/с, включенных по схеме RAID5;

– два SSD Samsung PM9A3 с интерфейсом PCI-E, емкостью 7,68 ТБ каждый, скоростью чтения 6700 МБ/с и записи 4000 МБ/с, включенных по схеме RAID5;

– 4 SSD Samsung PM893 с интерфейсом SATA, емкостью 7,68 ТБ каждый, скоростью чтения 550 МБ/с и записи 520 МБ/с, включенных по схеме RAID5;

– 4 графических ускорителя NVIDIA Tesla A40 с интерфейсом PCI-E, емкостью 48 ГБ GDDR6 каждый и пропускной способностью 696 ГБ/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день разработаны структуры БД для установок НЕВОД-ШАЛ, ПРИЗМА, УРАН, НЕВОД-ДЕКОР-СКТ, ТРЕК; введен в эксплуатацию сервер БД и СХД; сформированы БД кластерных событий и событий ШАЛ в установках НЕВОД-ШАЛ, ПРИЗМА-32 и УРАН, а также БД событий НЕВОД-ДЕКОР-СКТ за период с 2019 по 2023 гг.; проводится реконструкция параметров событий в установках ЭК НЕВОД; отобраны совместные события в установках ЭК НЕВОД за период с 2019

по 2023 г., заполнены БД совместных событий; сформирован банк моделированных ШАЛ и БД моделированных откликов установок ЭК.

Заложенный в АПС функционал обеспечит развитие комплементарного подхода к анализу информации в физике КЛ высоких энергий, который может быть использован не только для решения научных задач ЭК НЕВОД, но и других исследовательских организаций, работающих в данной области науки.

Благодарности. Авторы благодарят д-ра физ.-мат. наук, руководителя ЭК НЕВОД Анатолия Афанасьевича Петрухина за предоставление возможности реализации новых проектов, советы и конструктивную критику.

Финансирование. Работа выполнена на уникальной научной установке «Экспериментальный комплекс НЕВОД» при поддержке гранта Российского научного фонда №22-72-10010, <https://rscf.ru/project/22-72-10010>.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов А. Г. и др. Исследование характеристик потока и взаимодействия космических лучей сверхвысоких энергий с помощью метода спектров локальной плотности мюонов // ЯФ. 2010. Т. 73. С. 1904–1920.
2. Aab A. et al. (Pierre Auger Collab.). Muons in Air Showers at the Pierre Auger Observatory: Mean Number in Highly Inclined Events // Phys. Rev. D. 2012. V. 91. P. 032003.
3. Петрухин А. А., Богданов А. Г. Тяжелые частицы на LHC и в космических лучах // ЭЧАЯ. 2017. Т. 48, вып. 5. С. 694–700.
4. Slavatinsky S. A. Results of Emulsion Chamber Experiments with Very High-Energy Cosmic Rays Which Are Difficult to Explain in the Framework of the Standard Model // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2003. V. 122. P. 3–11.
5. Экспериментальный комплекс НЕВОД / Под ред. А. А. Петрухина, С. С. Хохлова. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. 260 с.
6. Официальный сайт Geant4. <https://geant4.web.cern.ch/>.
7. Официальный сайт CORSIKA. <https://www.iap.kit.edu/corsika/>.
8. Apel W. D., Arteaga J. C., Badea F. et al. A New Method to Measure the Attenuation of Hadrons in Extensive Air Showers // Phys. Rev. D. 2009. V. 80. P. 022002.
9. Haungs A., Blumer J., Fuchs B. et al. KCDC — The KASCADE Cosmic-Ray Data Centre // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 632.
10. Jing Han, Haihong E., Guan Le et al. Survey on NoSQL Database // Proc. of the 6th Intern. Conf. on Pervasive Computing and Applications. 2011. P. 363–366.
11. Официальный сайт СУБД MongoDB. <https://www.mongodb.com>.
12. Официальный сайт СУБД Nginx. <https://nginx.org/ru/>.
13. Официальный сайт Django. <https://www.djangoproject.com/>.

14. Официальный сайт Celery. <https://docs.celeryq.dev/en/stable/index.html>.
15. Официальный сайт Python. <https://www.python.org/>.
16. *Aartsen M. G. et al. (IceCube Collab.)*. The IceCube Neutrino Observatory: Instrumentation and Online Systems // J. Instrum. 2017. V.12, No.03. P. P03012.
17. *Brik V., Meade P., Merino G. et al.* IceCube File Catalog // Eur. Phys. J. Web Conf. 2019. V.214. P.04055.
18. Официальный сайт Proxmox Virtual Environment. <https://www.proxmox.com/en/proxmox-virtual-environment/overview>.
19. Официальный сайт Redis. <https://redis.io>.
20. Официальный сайт НОЦ НЕВОД. www.nevod.mephi.ru.