

ЛАБОРАТОРИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ им. М. Г. МЕЩЕРЯКОВА

Деятельность Лаборатории информационных технологий им. М. Г. Мещерякова в 2024 г. была сосредоточена на обеспечении надежного функционирования и развития сетевой и информационно-вычислительной инфраструктуры в рамках крупного инфраструктурного проекта 06-6-1118-2014/2030 «Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс (МИВК)», а также развитии математического и программного обеспечения (ПО) научно-производственной деятельности Института и государств-членов ОИЯИ (тема 06-6-1119-2014 «Методы, алгоритмы и программное обеспечение для моделирования

физических систем, математической обработки и анализа экспериментальных данных»). Отличительной особенностью направлений проводимых исследований является тесное сотрудничество со всеми лабораториями Института, институтами государств-членов ОИЯИ и других стран.

В 2024 г. сотрудниками ЛИТ опубликовано свыше 200 научных работ, 4 монографии, более 100 статей в рамках международных коллабораций, представлено более 150 докладов на международных и российских конференциях.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ОИЯИ

Развитие научных исследований в ОИЯИ определяет требования к вычислительной инфраструктуре. Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс является ключевым звеном этой инфраструктуры и играет определяющую роль в научных исследованиях, для проведения которых требуются современные вычислительные мощности и системы хранения данных. МИВК рассматривается как крупный инфраструктурный проект, представляющий собой совокупность аппаратно-программных комплексов, систем и подсистем, к которым относятся: грид-центры обработки данных уровня Tier-1 и Tier-2, облачная инфраструктура, платформа HybriLIT и суперкомпьютер (СК) «Говорун», хранилище данных, система передачи данных, сетевая инфраструктура, инженерная инфраструктура и система мониторинга. Для достижения главных целей ведущих проектов ОИЯИ необходимо обеспечивать высокую производительность, надежность и доступность в режиме 24 × 7 × 365 всех компонентов МИВК.

В 2024 г. были продолжены работы по модернизации и наращиванию производительности гиперконвергентного СК «Говорун», систем распределенных вычислений и хранения данных на основе грид-технологий, облачных вычислений. Эти работы базировались на надежных инженерных компонентах и современной сетевой

инфраструктуре с пропускной способностью до 4 × 100 Гбит/с.

Грид-сайт Tier-1 для эксперимента CMS на LHC продолжил занимать лидирующее место среди семи аналогичных мировых сайтов. Tier-2/ЦИВК обеспечивал обработку и анализ данных всех экспериментов на LHC, NICA и других крупномасштабных экспериментов, а также поддержку пользователей лабораторий ОИЯИ и стран-участниц. Облачная среда ОИЯИ и стран-участниц использовалась главным образом для вычислений в рамках нейтринной программы ОИЯИ.

Сетевая инфраструктура ОИЯИ

Развитие информационных технологий и проекта МИВК напрямую связано с дальнейшим развитием сетевой инфраструктуры ОИЯИ, без которой немыслимо создание распределенных систем обработки и хранения данных в рамках научно-исследовательской программы ОИЯИ. Сетевая инфраструктура в рамках проекта МИВК обеспечивает внешние телекоммуникационные каналы связи, связь между пользователями МИВК через локальную сеть ОИЯИ, связь и обмен данными через локальную сеть МИВК. Сетевая инфраструктура — это сложный комплекс многофункционального сетевого оборудования и специализированного ПО, который является



2 апреля. Научная секция международной конференции «Математика в созвездии наук»

фундаментом для созданной и продолжающей постоянно развиваться информационно-вычислительной инфраструктуры ОИЯИ. Она состоит из следующих функциональных частей: внешнего оптического телекоммуникационного канала передачи данных, опорной магистрали локальной компьютерной сети ОИЯИ, локальных компьютерных сетей подразделений Института и локальной сети МИВК.

В 2024 г. обеспечено функционирование телекоммуникационных каналов связи ОИЯИ. В первую очередь это надежная работа резервированного канала до Москвы с пропускной способностью 4×100 Гбит/с. Для работы грид-сайта уровня Tier-1 необходимо быть полноценным участником сети LHCOPN для связи с Tier-0 (ЦЕРН) и другими сайтами Tier-1. Эту связь обеспечивают прямой канал связи ОИЯИ–ЦЕРН 100 Гбит/с и резервный канал 100 Гбит/с, проходящий через Москву и Амстердам. Связность Tier-2 ОИЯИ обеспечена внешней наложенной сетью LHCONE, предназначенной для грид-сайтов второго уровня. Национальная исследовательская компьютерная сеть (НИКС) России, созданная в результате интеграции федеральной университетской компьютерной сети RUNNet (Russian UNiversity Network) и сети организаций Российской академии наук RASNet (Russian Academy of Science Network), обеспечивает связь с научными и образовательными организациями РФ, интеграцию с отдельными зарубежными научно-об-

разовательными сетями (National Research and Education Networks, NREN) и с Интернетом.

Распределение входящего (превышающего 25 ТБ) и исходящего трафика по подразделениям в 2024 г. приведено в табл. 1.

Таблица 1

Подразделение	Входящий трафик, ТБ	Исходящий трафик, ТБ
ЛИТ	1240,0	227,1
ГРК	502,25	90,35
ЛФВЭ	465,3	228,01
ЛЯП	292,28	130,73
ЛНФ	177,07	69,03
ЛЯР	176,82	36,16
Университет «Дубна»	163,33	44,18
Управление	127,81	76,6
Серверы общего доступа	106,57	97,64
Узел удаленного доступа	88,4	12,57
МСЧ-9	63,81	11
УНЦ	60,39	12,23
ЛТФ	38,66	24,67
УСИ	35,04	6,38
ЛРБ	30,65	2,85
ОГЭ	26,65	1,96

Общий входящий трафик ОИЯИ, включая серверы общего назначения, Tier-1, Tier-2, суперкомпьютер «Говорун» и облачные вычисления,

составил в 2024 г. 42,53 ПБ, общий исходящий — 20,62 ПБ. Трафик с научно-образовательными сетями является основным и составляет 94,05 % от общего.

Локальная вычислительная сеть (ЛВС) базируется на магистральной опорной сети ОИЯИ с пропускной способностью 2×100 Гбит/с и распределенной многоузловой кластерной сети между площадками ЛЯП и ЛФВЭ (4×100 Гбит/с) для обеспечения надежной передачи физических данных, полученных от основных узлов вычислительного оборудования комплекса NICA, для их обработки и анализа на компонентах МИВК.

За год почтовой службой обработано 4 млн входящих сообщений и 850 тыс. исходящих. Среднее время обработки сообщения составляет 3 с.

В 2024 г. обработано более 1700 заявок пользователей ОИЯИ, касающихся работы сети и сервисов. Настроено/проверено/установлено более 140 единиц различного оборудования. Выявлено и обработано порядка 70 инцидентов с нарушением сетевой безопасности, около 130 случаев нарушения авторских прав.

ЛВС ОИЯИ содержит 13496 сетевых элементов, 22 538 IP-адресов IPv4, 1422 IP-адреса IPv6, 5718 пользователей (из них 5586 сотрудников ОИЯИ), 4773 адреса электронной почты @jinr.ru, 1153 пользователя электронных библиотек, 899 пользователей сервиса удаленного доступа и 147 пользователей сервиса EDUROAM. В процедуры регистрации добавлена поддержка новых категорий пользователей — ассоциированного персонала и студентов.

Инженерная инфраструктура МИВК

В 2024 г. продолжены работы по замене и совершенствованию инженерной инфраструктуры МИВК [1], предназначенной для обеспечения надежной, бесперебойной и отказоустойчивой работы информационно-вычислительных систем и ресурсов хранения данных.

В МИВК на протяжении года выполнялись работы по установке новых серверов: 12 $\times$ Asus, 2 $\times$ Huawei, 30 $\times$ СИЛА – CP2-1627, 6 $\times$ СИЛА – CP1-1626 и 2 сетевых коммутаторов СИЛА СКЗ-630A-32Q. В рамках развития дискового хранилища облачного компонента МИВК (для эксперимента JUNO) установлено 8 $\times$ ASUS – RS720-E10-RS12.

В 2024 г. были проведены важные работы по модернизации системы электропитания в модулях МИВК. Осуществлен переход на бесперебойное трехфазное питание в модулях Tier-2. Установлены и введены в эксплуатацию шкафы чистого питания от ИБП Galaxy 7000. В связи с тем, что стандартное оборудование не подходит под задачи МИВК ввиду типоразмера и мощности, осуществлены разработка, сборка, монтаж и подключение специальных модулей распределения питания. Также разработаны и собраны специальные горизонтальные устройства для распределения питания в стойках.

Грид-среда ОИЯИ (сайты Tier-1 и Tier-2)

В 2024 г. продолжалось успешное функционирование грид-сайтов ОИЯИ. Оба грид-сайта обеспечивали как обработку и анализ данных в рамках участия ОИЯИ в проектах LHC в ЦЕРН, так и решение задач по моделированию, обра-



Модули распределения питания (PDM), разработанные в ЛИТ и установленные в МИВК

ботке и хранению данных экспериментов BM@N, MPD и SPD на ускорительном комплексе NICA.

Инфраструктура и сервисы сайтов Tier-1 (JINR-T1) и Tier-2 (JINR-LCG2) обеспечивают вычисления, хранение данных, сервис поддержки грид, передачу данных, системы управления распределенными вычислениями, информационные службы (мониторинг, информационные сайты).

Одной из основных функций сайта Tier-1 является получение и ответственное хранение уникальных данных эксперимента CMS, переданных от сайта Tier-0 в ЦЕРН. Кроме того, сайт обеспечивает последовательную и непрерывную обработку данных, их повторную обработку с использованием нового ПО или новых констант калибровки и предоставление доступа к различным наборам данных сайтам уровня Tier-1 и Tier-2, задействованным в обработке данных эксперимента CMS, и т. д. Для комплекса NICA на грид-сайтах выполняются задачи моделирования для экспериментов MPD и SPD. В эксперименте BM@N возможно проводить полную обработку экспериментальных данных с использованием грид-инфраструктуры ОИЯИ.

Для организации вычислений в грид-среде используются Advanced Resource Connector (ARC) — промежуточное ПО для грид-вычислений и менеджер рабочей нагрузки Slurm.

В 2024 г. осуществлялась постоянная поддержка сервисов нижнего уровня, которые важны для надежного функционирования как грид-сайтов, так и всего МИВК в целом. Следует отметить, что без бесперебойной работы этих сервисов рабо-

та МИВК и IT-инфраструктуры ОИЯИ невозможна в принципе. К ним относятся: DNS и IPDB — сервисы регистрации и разрешения адресов и имен сетевых элементов, сервис синхронизации времени на всех машинах ОИЯИ, Kerberos и LDAP — сервисы регистрации пользователей IT-инфраструктуры и аутентификации и авторизации пользователей (в частности и сервис SSO), AFS — распределенная файловая система, хранилище домашних директорий пользователей, CVMFS и GIT — системы распределенного доступа и организации версий ПО коллабораций и групп пользователей, EOS — система хранения и доступа к большим объемам данных, ряд сервисов для грид в ОИЯИ и международных коллабораций.

В 2024 г. выполнен большой объем работ по переходу Tier-1 и Tier-2 на операционную систему (ОС) AlmaLinux 9 в связи с окончанием жизненного цикла ОС CentOS 7.

Одним из важнейших элементов грид-инфраструктуры ОИЯИ, как и всего МИВК, является система хранения данных. В качестве основных систем хранения данных используются системы dCache и EOS для дисковых хранилищ, а для ленточных — Enstore и СТА. В 2024 г. выполнен ряд работ, связанных с техническим перевооружением, установкой и наладкой уникального оборудования и программного обеспечения для МИВК ОИЯИ, с эксплуатацией и развитием системы хранения данных dCache-Enstore. Значительные работы выполнены по модификации Enstore. В их числе — конверсия кода с Python2 на Python3, организация параллельного выпол-



Март. Научная школа для учителей физики. Ознакомительная экскурсия в лабораторию

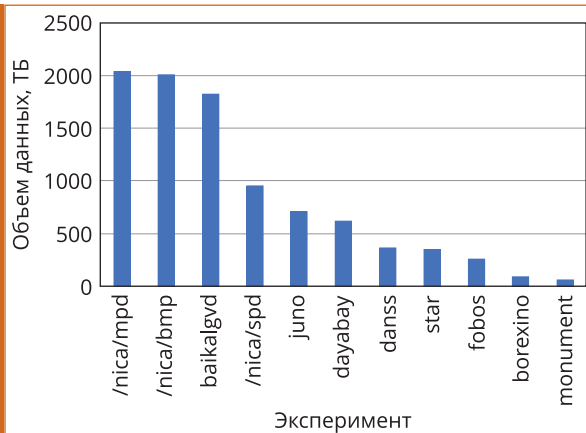


Рис. 1. Использование системы хранения EOS в экспериментах на декабрь 2024 г. (объем данных, превышающий 50 ТБ)

нения запросов на монтирование/размонтирование лент в магнитофонах, что значительно улучшило время этих операций, повышение пропускной способности обработки большого потока запросов на передачу данных.

EOS рассматривается как общая распределенная система хранения данных для всех пользователей МИВК с полной емкостью 23,3 ПБ. Система EOS используется для 32 экспериментов / групп пользователей в качестве хранилища данных. Распределение по объему данных, хранящихся в системе на декабрь 2024 г. (превышающему 50 ТБ), приведено на рис. 1.

Осуществлена настройка системы хранения EOS-CTA робота TS3500 для хранения данных экспериментов, не входящих в WLCG (Worldwide LHC Computing Grid). К системе EOS-CTA подключен эксперимент Baikal-GVD.

В настоящее время в состав Tier-1 входят 468 вычислительных узлов (20 096 ядер) производительностью 32,4 kHS23. Запуск задач на обработку данных эксперимента CMS осуществляется 16 ядерными пилотами, для которых доступны все вычислительные ресурсы Tier-1. Хранение данных обеспечивается системой dCache емкостью 12,4 ПБ, роботизированным ленточным хранилищем общей емкостью 90 ПБ. Робот TS4500 работает с ПО Enstore и dCache. Для работы с лентами используется дисковый массив для кэширования данных емкостью 2,65 ПБ.

В 2024 г. сайт Tier-1 ОИЯИ занял первое место по суммарному нормированному процессорному времени (HS23 час), затраченному на обработку данных, в рейтинге мировых сайтов Tier-1, обрабатывающих данные эксперимента CMS на LHC (табл. 2), по статистике на портале <https://accounting.egi.eu>.

В состав сайта Tier-2 входят 485 вычислительных узлов (10 356 ядер) общей производительностью 166,8 kHS23. Хранение данных обеспечивает система dCache емкостью 5,62 ПБ. Роботизированная ленточная библиотека TS3500 емкостью

11 ПБ работает с ПО CTA и используется для резервного хранения данных локальных экспериментов.

Сайт Tier-2 в ОИЯИ является наиболее производительным в российском грид-сегменте. В 2024 г. на нем выполнено 2 892 483 заданий, что составило 90,7 % от суммарного процессорного времени российского сегмента WLCG (Российский ГРИД для интенсивных операций с данными — Russian Data Intensive GRID, RDIG).

Программное обеспечение грид-сайтов МИВК и систем хранения регулярно обновляется до последних версий. В их число входят: EOS, CVMFS, RUCIO, ALICE VObox, XROOTD, UMD, VOMS, WLCG standard program stack, ARC-CE, BDII top, BDII site, openafs, CentOS Scientific Linux, Alma Linux, GCC: gcc (GCC), C++: g++ (GCC), GNU Fortran (GCC), dCache, Enstore, CTA.

Для более простого и надежного обновления различного системного ПО МИВК подключены и настроены тестовые установки для большинства ключевых компонентов, включая систему пакетной обработки Slurm, dCache, EOS, CTA. Это позволяет быстро и без существенных проблем в основных установках проводить необходимые обновления ПО.

Ключевым моментом в организации распределенных гетерогенных вычислительных инфраструктур является связующее промежуточное программное обеспечение (платформа), позволяющее осуществлять совместную работу различных информационно-вычислительных систем. На сегодня основным вариантом такого ПО в ОИЯИ является DIRAC Interware — инструмент для интеграции гетерогенных вычислительных ресурсов и ресурсов хранения данных в единую платформу. Интеграция ресурсов основана на использовании стандартных протоколов доступа к данным (xRootD, GridFTP и др.) и пилотных задач. Благодаря этому пользователю предоставляется единая среда, в которой можно запускать задачи, управлять данными, выстраивать процессы и контролировать их выполнение.

В 2024 г. продолжилось использование DIRAC для решения задач коллабораций всех трех экспериментов на ускорительном комплексе NICA. Совместно с разработчиками платформы DIRAC

Таблица 2

Tier-1	Суммарное время CPU (kHS23 час)	Суммарное фактическое время (kHS23 час)
RU-JINR-T1	1 888 913,532	2 432 207,483
US-FNAL-CMS	1 665 321,019	3 979 538,749
UK-T1-RAL	1 132 299,978	1 341 419,038
DE-KIT	1 096 517,306	1 349 110,949
FR-CCIN2P3	807 778,212	859 384,319
ES-PIC	671 670,217	701 553,254
IT-INFN-CNAF	618 136,609	692 168,453

предложен и реализован метод использования предустановленного в CVMFS пилота DIRAC. Реализация данного метода потребовала внести изменения в исходный код платформы DIRAC и создать в ОИЯИ программу конфигурации пилота с использованием предустановленной в CVMFS версии. Благодаря этому значительно сократилась нагрузка на локальные хранилища вычислительных ресурсов. Разработан метод оценки целостности файлов под управлением платформы DIRAC. Метод основан на добавлении к файлам поля метаданных, относящихся к статусу проверки целостности. Использование данного подхода позволило проверить все файлы экспериментов BM@N и MPD. Пиковое значение скорости передачи данных составило 12 ГБ/с. Следует отметить, что в инфраструктуру DIRAC был интегрирован доступ к ленточному роботу на базе СТА. Это позволило организовать резервирование на ленте данных, полученных во время 8-го сеанса эксперимента BM@N. Кроме того, для эксперимента MPD начато резервирование некоторых наиболее критических наборов данных.

Гетерогенная инфраструктура

В 2024 г. активно развивалась программно-информационная среда платформы HybriLIT, являющаяся компонентом МИВК ОИЯИ для проведения массивно-параллельных и ресурсоемких расчетов [2, 3]. Осуществлено расширение иерархической системы обработки и хранения данных суперкомпьютера «Говорун». В его состав вошли два высокопроизводительных сервера, каждый из которых содержит 2 процессора Intel Xeon Platinum 8458P с оперативной памятью 512 ГБ и 32 твердотельных накопителя SSD NVMe RULER емкостью 30,72 ТБ, что позволило обеспечить расширение объема подсистемы хранения «теплых данных» на 2 ПБ. В результате общая ем-

кость иерархического хранилища СК «Говорун» достигла 10,6 ПБ.

Продолжились работы по развитию полигона с географически распределенной параллельной файловой системой Lustre в качестве системы одновременной обработки данных для вычислительных кластеров, размещенных на площадках ЛИТ и ЛФВЭ. Для полигона, схема которого представлена на рис. 2, были задействованы физические узлы гетерогенной платформы HybriLIT, кластера NCX ЛФВЭ и суперкомпьютера «Говорун» с общим дисковым пространством 2,1 ПБ.

Данный прототип состоит из двух сегментов, использующих разные типы сетевых подключений (Omni-Path, Ethernet), объединенных в общую сеть Lustre network с помощью сервиса LNET Router. Управляющие сервисы MGS/MDS запущены на двух серверах в режиме High Availability. Раздел хранения данных MGS/MDS собран на RAID-массиве (mirror), состоящем из пары локальных дисков и пары сетевых дисков, подключенных по протоколу NVMe-over-Fabric (TCP). Серверы хранения данных OSS распределены территориально, два из них находятся в сетевом сегменте СК «Говорун» (OSS0 и OSS1 на рис. 2), три других подключены к вычислительному кластеру NCX. Были выполнены ряд нагрузочных тестов и исследование производительности созданного полигона, в том числе с помощью инструмента Interleaved or Random (IOR) Benchmark совместно с технологией MPI [4]. Полученные результаты показали увеличение производительности решения задач на 30 % с использованием созданного полигона по сравнению с использованием локальных FS Lustre, находящихся в ЛИТ и ЛФВЭ, с последующим обменом данных между ними.

В рамках модернизации экосистемы методов искусственного интеллекта и высокопроизводительных вычислений ML/DL/HPC для обеспечения работ по совместному проекту ЛИТ

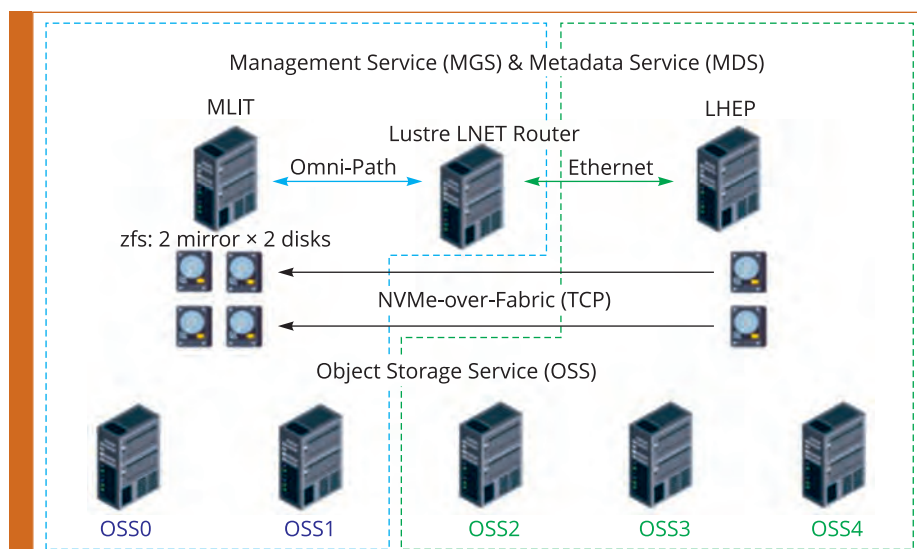
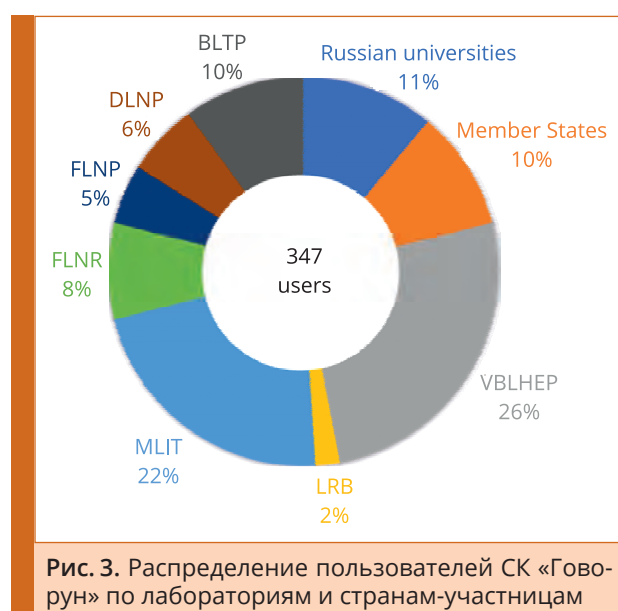


Рис. 2. Географическая распределенная параллельная файловая система Lustre, размещенная в ЛИТ и ЛФВЭ

и ЛРБ BIO-HLIT была подготовлена среда для разработки нейросетевых алгоритмов. Она развернута на сервере с 8 графическими ускорителями NVIDIA A100 и операционной системой AlmaLinux 9.4. Разработанная среда включает в себя JupyterHub 4.0.11 (для совместной разработки программ на языке программирования Python), фреймворк Mercury 2.4.3 (для публикации web-приложений на основе Jupyter Notebook и языка программирования Python), набор инструментов Writer AI 0.7.5 (для быстрой разработки web-приложений на языке программирования Python) и доступна по адресу <https://mostlit.jinr.ru>.

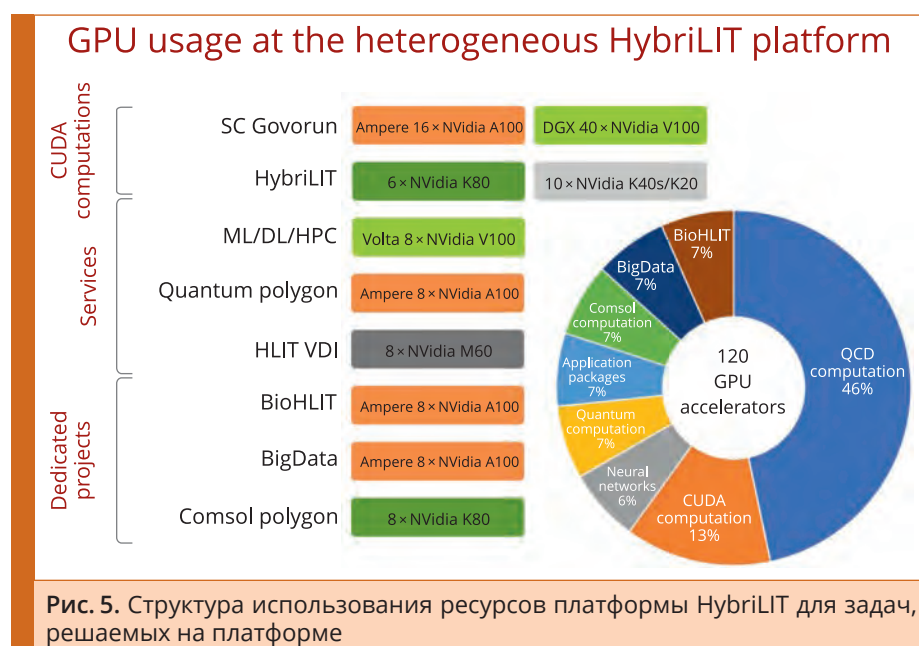
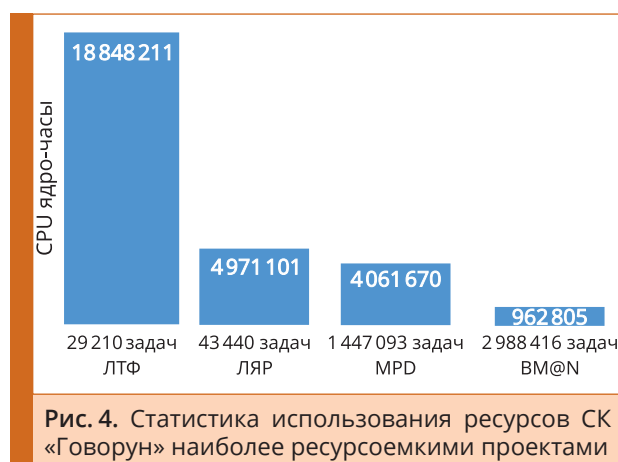
Общее число пользователей СК «Говорун» к настоящему времени составляет 347 человек. Распределение пользователей по лабораториям показано на рис. 3.



В течение 2024 г. всеми группами пользователей СК «Говорун» на CPU-компоненте было выполнено более 6,2 млн задач, что соответствует 32 млн ядро-часов, распределение по наиболее ресурсоемким проектам представлено на рис. 4.

GPU-компонент платформы HybriLIT используется для решения высокопроизводительных задач с использованием технологии CUDA, например, для расчетов в области квантовой хромодинамики на решетках, разработки квантовых алгоритмов и проведения расчетов с использованием квантовых симуляторов, разработки нейросетевых алгоритмов и аннотирования данных, обучения нейросетевых моделей, разворачивания GPU-ориентированных веб-сервисов, использующих нейросетевой подход [3, 5]. Структура использования графических ускорителей платформы HybriLIT представлена на рис. 5.

В 2024 г. пользователями гетерогенной платформы HybriLIT опубликовано 54 работы, из них 9 в журналах Q1, 5 в Q2 и 8 в Q3.



Облачная инфраструктура

В 2024 г. на серверах облачной инфраструктуры выполнено обновление операционных систем с CentOS 7.9.2009 до AlmaLinux 9.5, а также обновление облачного ПО с 5.12.0.4 Community Edition (CE) до стабильной версии OpenNebula 6.10.0 CE. Выполнено обновление ОС на части облачных виртуальных машин пользователей и сервисов.

Произведена чистка облачных хранилищ от утративших актуальность данных и образов виртуальных машин (ВМ), а также завершен перевод ВМ из выводимой из эксплуатации подсети в вы-

деленную сетевой службой частную маршрутизируемую подсеть для облачной инфраструктуры.

В рамках расширения круга облачных сервисов развернут новый сервис для анализа посещаемости веб-сайтов, основанный на платформе Matomo, — webanalytics.jinr.ru. Сервис был создан в качестве замены Google Analytics, который ранее использовался на сайте ОИЯИ. Он обеспечивает конфиденциальное хранение всех собранных данных в локальных хранилищах Института и не требует создания сторонних учетных записей. Новый сервис может быть использован для сбора статистики посещений любых сайтов ОИЯИ. Например, к нему уже был подключен сервис GitLab ОИЯИ. Кроме того, он был интегрирован с системой единого входа ОИЯИ, что обеспечивает централизованный доступ к веб-интерфейсу системы.

В 2024 г. на ресурсах нейтринной вычислительной платформы (НВП), являющейся сегментом облачной инфраструктуры ОИЯИ, было потреблено 12 125 668 CPU-часов. Информация по основным потребителям приведена на рис. 6.

По направлению распределенной информационно-вычислительной среды (на базе ресурсов организаций из стран-участниц ОИЯИ) основные работы связаны с поддержанием работоспособности и доступности этих ресурсов. Помимо этого на техническом обслуживании ЛИТ находились ресурсы Института ядерной физики (Казахстан), Северо-Осетинского государственного университета им. К. Л. Хетагурова и Института ядерной физики (Узбекистан).

Система мониторинга

В рамках перехода на операционную систему AlmaLinux 9 скрипты сбора данных для системы мониторинга были переписаны на python 3. Для реализации мониторинга системы элек-

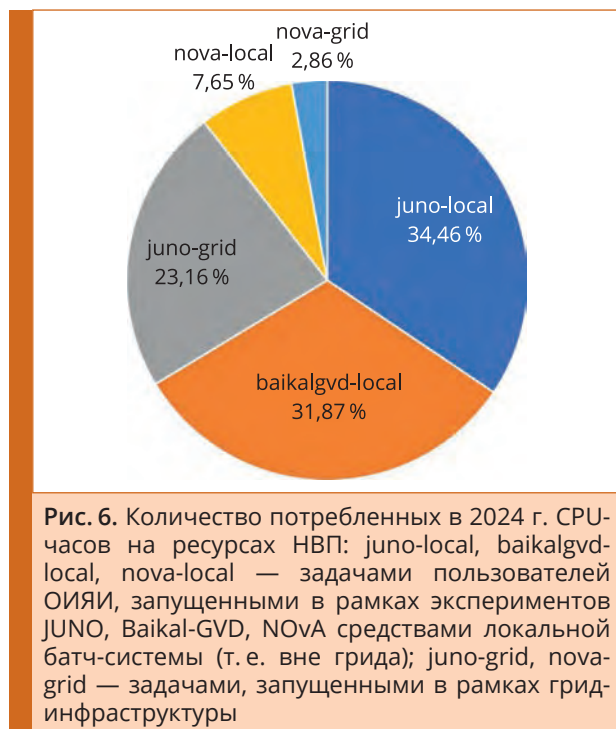


Рис. 6. Количество потребленных в 2024 г. CPU-часов на ресурсах НВП: juno-local, baikalgvd-local, nova-local — задачами пользователей ОИЯИ, запущенными в рамках экспериментов JUNO, Baikal-GVD, NOvA средствами локальной батч-системы (т. е. вне грида); juno-grid, nova-grid — задачами, запущенными в рамках грид-инфраструктуры

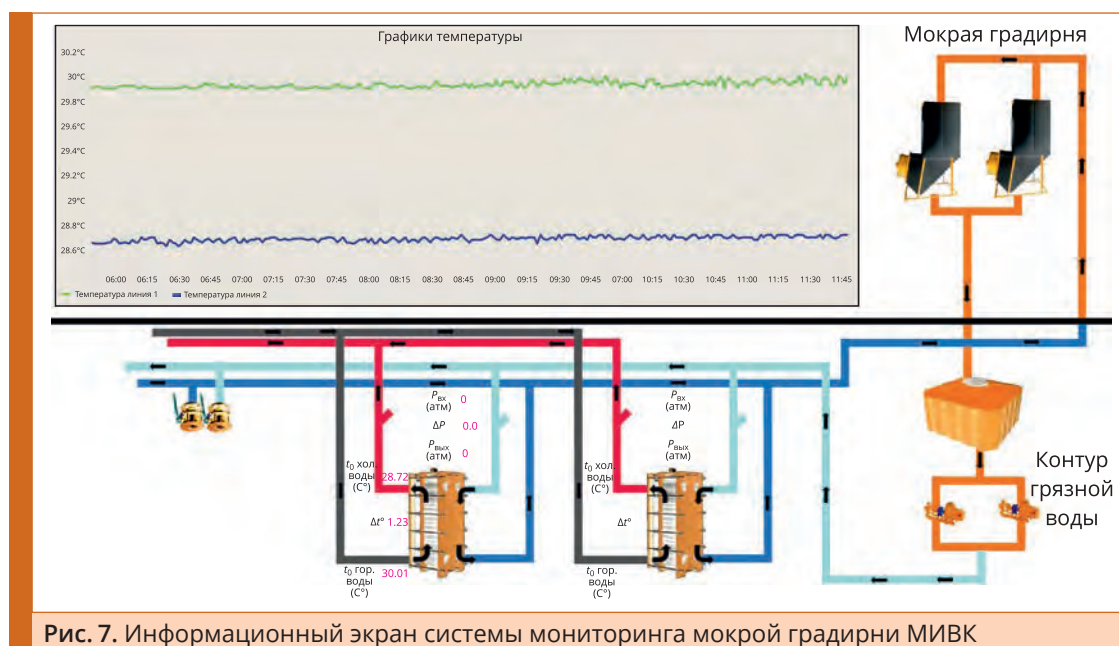


Рис. 7. Информационный экран системы мониторинга мокрой градирни МИВК

тропитания разработано специализированное программное обеспечение для сбора данных: входного напряжения, силы тока, потребляемой мощности для контроллера РП-23 помещения 110; сбора данных с ГРЩ помещения 110а; со-

здана информационная панель для операторов МИВК, визуализирующая основные параметры систем электропитания. Аналогичный подход реализован и для мониторинга работы мокрой градирни (рис. 7).

МНОГОЦЕЛЕВАЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ ПЛАТФОРМА АНАЛИТИКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

В 2024 г. велись работы по созданию вычислительного компонента платформы интеллектуального анализа Больших данных на базе исследовательской инфраструктуры, содержащей вычислительные ресурсы на основе аппаратных ускорителей нескольких моделей (Nvidia A100, V100, T4). В рамках созданного окружения были развернуты вычислительные полигоны на Apache Spark и Dask, использующие программную экосистему RAPIDS; подтверждена их работоспособность для практических вычислений. В частности, проведено исследование производительности и масштабируемости инструмента декларативного анализа RDataFrame пакета ROOT в распределенной среде Apache Spark.

В рамках исследовательской инфраструктуры на виртуальных серверах с GPU были настроены программные среды и оболочки для работы с открытыми большими языковыми моделями (LLM). Планируется использовать LLM для анализа и реферирования научных статей, извлечения ключевых идей, формирования тематических дайджестов и бюллетеней, а также разработки рекомендательных систем, интерфейсов API и создания различных ИИ-помощников ЦЭС (навигатор по публикациям и научным результатам ОИЯИ, помощник по нормативным и финансовым документам, договорам, формулирование заявок по закупкам, поддержка пользователей ЦЭС и т. д.).

ЦИФРОВАЯ ЭКОСИСТЕМА ОИЯИ

В 2024 г. в рамках развития Цифровой экосистемы (ЦЭС) ОИЯИ были введены в эксплуатацию несколько общеинститутских цифровых сервисов: сервис управления разработкой документов, календарь для совместной работы и т. д. Создан прототип корпоративной шины данных для объединения цифровых сервисов и управления потоками информации. Часть существующих цифровых сервисов активно развивалась, была проведена их интеграция друг с другом и с базовыми сервисами ЦЭС. Введенные в эксплуатацию сервисы доступны через интерфейс ЦЭС <https://digital.jinr.ru>.

Выполнен переход на глубоко переработанную ПИН-2, в которой реализована новая функциональность, дополнительная информация о сотруднике (например, идентификаторы в системах цитирования), перенесены данные из предыдущей версии ПИН. Для аутентификации пользователей при доступе из зарубежных сетей подключен функционал двухфакторной авторизации, реализованный в системе единого входа ОИЯИ — JINR SSO.

Введен в пилотную эксплуатацию репозиторий публикаций сотрудников ОИЯИ [6]. Автоматический сбор информации о публикациях производится из трех основных источников: ELibrary, INSPIRE HEP и Scopus. Публикации привязываются к профилям пользователей — сотрудников ОИЯИ. Информация о них доступна

как через веб-интерфейс репозитория, так и в новой ПИН-2. В настоящее время в репозитории имеются данные о 1890 публикациях за 2024 г. и о 9074 публикациях с 2020 г.

Для организации совместной работы над документами разработана программная платформа SciDocsCloud, предназначенная для замены устаревшей системы DocDB.

В системе управления конференциями Indico настроен функционал резервирования залов и комнат для совещаний, конференций и других мероприятий.

Продолжаются работы по текущему развитию и сопровождению следующих сервисов: СЭД «Дубна», ИСНА, оболочка ЦЭС, «База документов», «Авансовые отчеты», СЭД «Сотрудники ОИЯИ в ЦЕРН», ADB2, NICA EVM, шлюз обмена данными. Разработана система обнаружения хакерских атак, она внедрена в тестовую эксплуатацию для сервисов СЭД «Дубна», ПИН, ПИН-2, «Авансовые отчеты», «CERN DB», ИСНА, оболочка ЦЭС.

МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ, МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Обеспечение математической, алгоритмической и программной поддержки экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в ОИЯИ, является одним из основных направлений деятельности ЛИТ. В 2024 г. в рамках темы 1119 был проведен ряд работ и исследований, направленных на разработку и развитие математических методов и программного обеспечения для моделирования физических процессов и экспериментальных установок, обработки и анализа данных экспериментов в области физики элементарных частиц, ядерной физики, физики нейтрино, радиобиологии и др. Весьма необходимый и ценный вклад был внесен в решения конкретных задач в рамках проектов BM@N, MPD и SPD на комплексе NICA, проектов CMS и ATLAS на LHC, проектов нейтринной программы ОИЯИ (Baikal-GVD и JUNO).

Ниже приведена краткая информация о некоторых из полученных результатов.

Разработка и развитие алгоритмов реконструкции физических событий и методов идентификации частиц

На основе анализа данных сеансов эксперимента BM@N Run 8 (2022–2023) разработано программное обеспечение для детального описания геометрии координатных детекторов. Развита алгоритмы моделирования реалистичных откликов трековых детекторов и реконструкции пространственных координат на микростриповых плоскостях [7].

Для устранения ложных измерений при реконструкции треков заряженных частиц в эксперименте SPD предложена архитектура нейронной сети на основе трансформера (рис. 8). Показано эффективное использование слоя внимания для моделируемых данных с помощью процедуры вокселизации [8]. Для распутывания перекрывающихся в одном временном срезе

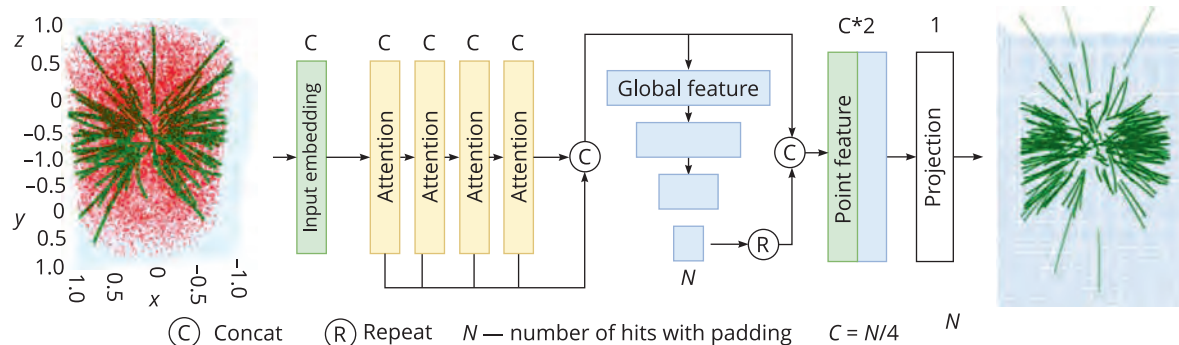


Рис. 8. Архитектура нейронной сети на основе трансформера, используемая для реконструкции трека частицы

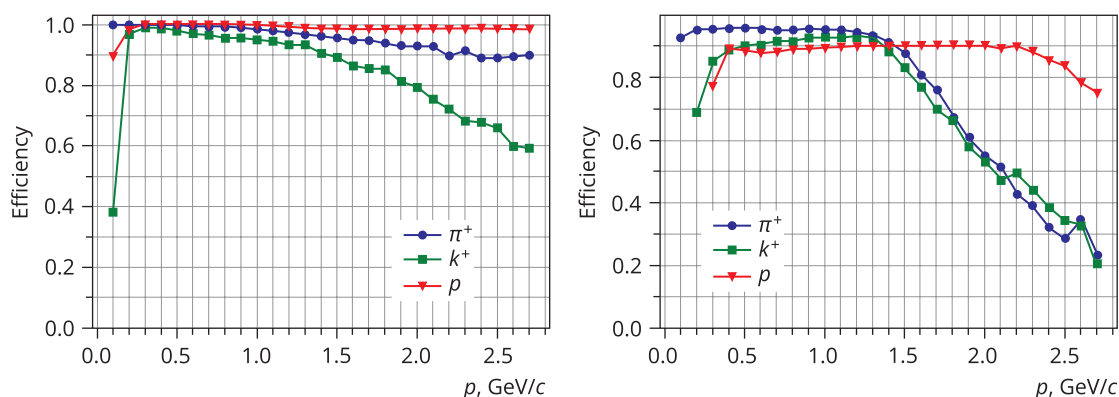


Рис. 9. Эффективность идентификации заряженных частиц в эксперименте MPD. Слева — методом градиентного бустинга (XGBoost), справа — методом n -сигма



27–28 мая. Рабочее совещание по математическим проблемам квантовых информационных технологий (MPQIT-2024)

событий разработан подход на основе глубокой сиамской нейронной сети [9] с функцией потерь в виде триплетов.

На основе алгоритма градиентного бустинга на решающих деревьях (GBDT) разработан метод идентификации заряженных частиц, образующихся при взаимодействии ядер висмута при $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$ ГэВ, в эксперименте MPD [10]. Использование библиотеки XGBoost показало преимущество перед традиционным n -сигма подходом, особенно для частиц с высоким импульсом (рис. 9). Метод принят коллаборацией MPD для интеграции в MPDROOT для решения задач идентификации частиц.

Разработка и развитие методов моделирования физических процессов и анализа данных

В 2024 г. было продолжено развитие генераторов взаимодействий для моделирования процессов ядерных столкновений при энергиях NICA и LHC. При анализе данных NA61/SHINE [11] о рождении $\pi^\pm$, $K^\pm$, протонов и антипротонов в $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ взаимодействиях при $P_{\text{lab}} = 13\text{--}150$ АГэВ/с выявлено, что модель Geant4 FTF существенно недооценивает выходы мезонов. Предложен новый алгоритм учета дифракционной диссоциации в FTF, что позволило повысить множественность мезонов и успешно описать

данные. Этот подход дает хорошие результаты в применении к данным BM@N о выходах π^+ -мезонов в аргон-ядерных взаимодействиях при энергии 3,2 ГэВ.

С использованием данных Монте-Карло проанализированы предсказания двух моделей темной материи: расширение двухдублетной хиггсовской с дополнительным скалярным и аксиальным хиггсовским синглетом. Проведено полное моделирование отклика детекторов CMS (Geant4) при $\sqrt{s} = 13,6$ ТэВ для событий с Z -бозоном и парой b -кварков, ассоциированных с большой долей потерянной поперечной энергии [12]. Определены основные фоновые процессы и оптимальные кинематические ограничения для максимального соотношения сигнал/фон.

В рамках развития систем анализа данных эксперимента ОЛВЭ-HERO проведена Монте-Карло оценка годовой статистики данных, собранных на орбите Земли для протонов (1–45 ГэВ) с использованием сферического детектора радиусом 1,25 м [13]. Было установлено, что добавление 1–5 % бора в сцинтиллятор не влияет на регистрацию энергопотерь от протонов (1, 10, 100, 1000 ГэВ). Для 5 % добавки оценено энергетическое разрешение в диапазоне 1–100 ТэВ.

В рамках межлабораторной рабочей группы (совместный проект ЛИТ, ЛРБ, ЛФВЭ, ЛНФ и ОРБ) проведены исследования по оценке радиационной обстановки в помещениях времен-

ной пультовой ускорительного комплекса NICA: построена детальная 3D-модель ускорительного комплекса в формате Geant4, осуществлена настройка аппаратного и программного обеспечения для проведения расчетов на СК «Говорун», и получены оценки мощности эффективной дозы и спектров нейтронов для модельного источника [14]. Для обеспечения дозиметрии нейтронов высоких энергий разработаны два метода восстановления спектра нейтронов по показаниям многослойного спектрометра Боннера: 1) на основе разложения спектра по полиномам Лежандра и численного решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода с применением регуляризации Тихонова, с учетом «веса» детектора, 2) на основе алгоритма машинного обучения «случайный лес».

Разработка систем обработки данных, создание и развитие информационно-вычислительных систем для поддержки исследовательских проектов ОИЯИ

Для эксперимента SPD развернут прототип распределенной системы обработки и анализа данных, интегрирующей ресурсы ОИЯИ и НИЦ КИ ПИЯФ. На подготовленной платформе в 2024 г. обрабатывались задачи Монте-Карло моделирования: сгенерировано 200 млн событий общим объемом 100 ТБ [15]. В рамках создания комплекса промежуточного программного обеспечения для системы отбора событий реального времени (SPD Online Filter) реализована большая часть функциональных требований к программному комплексу, выполнены работы по формализации и реализации нефункциональных требований. Совместно с коллегами из ЛЯП создан и введен в эксплуатацию стенд для разработки и отладки

компонентов системы сбора данных установки SPD (рис. 10). Стенд предоставляет возможность проводить разработку и долговременные испытания программно-аппаратных комплексов и включает в себя «холодную зону» для размещения аппаратной части.

В рамках участия сотрудников ЛИТ в эксперименте ATLAS в ЦЕРН были внесены улучшения в менеджер ресурсов — компонент ядра TDAQ. Проведена модернизация всех компонентов сервиса ATLAS Event Picking [16], и создан личный кабинет пользователя сервиса. Полученный опыт и знания в разработке баз данных для эксперимента ATLAS были применены для экспериментов ускорительного комплекса NICA. Выполнены работы по созданию, модернизации и поддержке информационных систем и баз данных эксперимента BM@N [17] — развиты конфигурационная (введена в промышленную эксплуатацию) и геометрическая (готова к опытной эксплуатации) информационные системы. В рамках эксперимента MPD продолжены работы по созданию и внедрению Conditional DB и других БД эксперимента.

Развитие методов вычислительной физики

На основе результатов исследований в области прикладной математики и вычислительной физики опубликованы три монографии. Монографии [18] и [19] посвящены методам и программам для решения систем уравнений различных типов с использованием метода конечных разностей, метода конечных элементов (МКЭ) высокого порядка и итерационных схем на основе непрерывного аналога метода Ньютона. В [20] рассматриваются основные понятия, общие при-

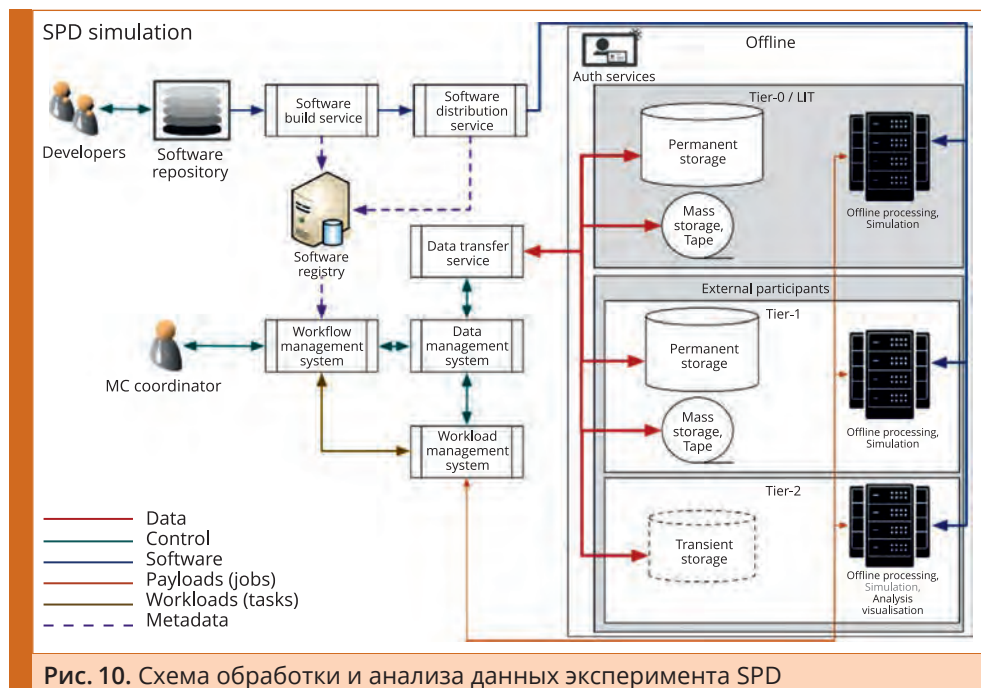


Рис. 10. Схема обработки и анализа данных эксперимента SPD



Ереван (Армения), 21–25 октября. 11-я Международная конференция «Математическое моделирование и вычислительная физика», приуроченная к 80-летию со дня рождения академика А. Н. Сисакяна.
 Фото: <https://indico.jinr.ru/event/4467/page/2192-photos>

емы и методы работы с матрицами, включая вычисление определителей различных порядков.

В рамках программы сотрудничества с Кейптаунским университетом проведено исследование сферически-симметричных периодических по времени стоячих волн модели φ^4 в шаре конечного радиуса, рассматриваемых как аппроксимация слабоизлучающих осциллонов. Для 3D-случая найдены сосуществующие типы стоячих волн, исследована зависимость энергии и интервалов устойчивости волн от радиуса и частоты. Расчеты проводились на платформе HybriLIT и суперкомпьютере «Говорун». Определен интервал частот, где вариационный метод обеспечивает точное описание $(1 + 1)$ -мерного осциллона [21].

Методами молекулярной динамики проведено моделирование взаимодействия бета-амилоидного пептида 25–35 с фосфолипидными мембранами DMPC в присутствии в растворе большого количества ионов K^+ и Cl^- . Полученные результаты позволяют извлечь информацию о возможных процессах, происходящих при разрушении мембраны в присутствии пептидов [22].

Для описания коллективной квадрупольной модели атомного ядра и расчета ротационно-вибрационных спектров и вероятностей квадрупольных переходов разработана программа GCMFEM решения краевых задач для системы двумерных эллиптических дифференциальных уравнений со смешанными производными [23]. Для изотопов ^{190}Os и ^{154}Gd полученные результаты согласуются с экспериментальными данными.

В рамках микроскопической модели оптического потенциала проведен анализ данных протон-ядерного рассеяния при энергиях 200–1000 МэВ. Сделаны оценки влияния ядерной среды на амплитуду рассеяния в зависимости от энергии налетающего протона и атомной массы ядра-мишени [24].

Предложен метод уточненного расчета разброса энергетических потерь в кристаллических решетках при облучении тяжелыми ионами с релятивистскими энергиями, который имеет преимущество в точности по сравнению с существующими подходами в случае облучения высокозарядными ионами [25].

Проведено моделирование доменов переворота в SFS-модели φ_0 -перехода со слабой диссипацией в зависимости от параметров, регулирующих действие внешнего тока. Параллельная реализация позволила уменьшить время вычислений до 30 раз [26].

Разработан инструментарий для моделирования физических свойств сверхпроводникового квантового интерферометра (СКВИД) с двумя джозефсоновскими переходами [27]. Реализованы с применением библиотеки Numba алгоритмы вычисления вольт-амперных характеристик СКВИД под воздействием внешнего магнитного поля.

Предложена и реализована схема параллельного численного интегрирования трехмерного нестационарного уравнения Шрёдингера в представлении дискретной переменной, обеспечивающая значительное сокращение време-



15–16 апреля. Весенняя школа по информационным технологиям

ни вычислений для таких задач с большим числом сеточных узлов [28].

Предложена комбинированная процедура [29] на основе МКЭ, позволяющая снизить вычислительные затраты без потери точности при решении 3D-задач магнитостатики со сложной геометрией с использованием магнитного векторного потенциала.

Разработанное и развернутое на облачной инфраструктуре веб-приложение FITTER_WEB [30] адаптировано для исследования структуры фосфолипидных везикулярных систем различного типа по данным малоуглового рассеяния нейтронов и рентгеновских лучей на основе модели разделенных формфакторов.

Предложен метод экстраполяции пертурбативных разложений по степеням асимптотически малых параметров на область конечных или бесконечных значений переменных [31]. Экстраполяция осуществляется с помощью автомодельных фактор-аппроксимантов. В ряде случаев метод позволяет точно восстановить искомые функции по их асимптотическим разложениям слабой связи.

Разработан квантово-химический кластерный метод с целью количественного обоснования эффективных спиновых моделей для различных кристаллических структур магнитных оксидов переходных металлов [32]. Метод применим для широких семейств новых магнитных материалов со сложным химическим составом.

Проведено тестирование квантового аппроксимационного оптимизационного алгоритма на примере поиска основного состояния в модели Изинга с внешним магнитным полем на квантовом полигоне, развернутом на платформе HybriLIT. Проведены сравнительные расчеты на центральном и графическом процессорах с помощью пакетов CUDA и cuStateVec, подтвердившие эффективность пакета cuStateVec [5, 33].

Продолжены исследования в области использования нейросетевых моделей для классификации изображений в условиях малой обучающей выборки [34]. Развиваются программные и аппаратные решения для организации автоматизированного контроля и учета в тепличных комплексах. Разрабатываются методы и средства организации мобильных комплексов отслеживания объектов.

На основе машинного обучения разработан web-сервис (<https://mostlit.jinr.ru>), позволяющий проводить автоматический анализ двунитевых разрывов ДНК (ДР ДНК) в ядрах клеток млекопитающих и человека, опираясь на подсчет радиационно-индуцированных фокусов (РИФ), представляющих скопления репарационных белков в сайте ДР ДНК. Путем обработки серии флуоресцентных изображений ядер клеток сервис предоставляет аналитическую информацию о ключевых параметрах РИФ, таких как среднее количество РИФ на ядро клетки, площадь РИФ и интенсивность.

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ

В рамках образовательной активности в 2024 г. проведены Весенняя и Осенняя школы по информационным технологиям (ИТ-школы) ОИЯИ, в которых приняли участие 90 студентов из разных вузов РФ. По результатам проведения серии ИТ-школ, начиная с 2022 г., сотрудниками ОИЯИ стали 18 человек. Под руководством и при научном консультировании сотрудников ЛИТ в 2024 г. подготовлено и защищено более 40 квалификационных работ аспирантов, магистров

и бакалавров, более 20 студентов не выпускных курсов ведут работы над проектами ОИЯИ и приезжают на практики. Учебно-тестовый полигон платформы HybriLIT в 2024 г. активно использовался как для проведения учебных семейственных курсов, так и в рамках школ и рабочих совещаний. В семестровых учебных курсах по ИТ-дисциплинам «Архитектура и технологии высокопроизводительных систем», «Параллельные распределенные вычисления», «Языки и техно-



7–11 октября. Осенняя школа по информационным технологиям

логии анализа данных», «Технологии высокопроизводительных вычислений», «Программные средства математических вычислений», проводимых в университете «Дубна» и ТвГУ, приняли участие 457 студентов. Также на базе платформы HybriLIT было подготовлено 4 бакалаврские работы и 2 магистерские диссертации. Разработана и пролицензирована образовательная магистерская программа «Методы и технологии обра-

ботки данных в гетерогенных вычислительных средах», подготовлены учебный план и рабочие программы дисциплин по направлению 01.04.02 «Прикладная математика и информатика» для филиала МГУ в Дубне. В целях развития сотрудничества проведены семинары для студентов и учащихся МГУ им. М. В. Ломоносова, РЭУ им. Г. В. Плеханова, Экономического лица РЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронцов А. С., Евланов А. В., Долбилов А. Г., Гавриш А. П. Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс ОИЯИ. Инженерная инфраструктура // Материалы Всерос. конф. с междунар. участием «ИТТММ 2024». 2024. С. 281–287.
2. Anikina A., Belyakov D., Bezhanian T. et al. Capabilities of the Software and Information Environment of the HybriLIT Heterogeneous Computing Platform for JINR Tasks // Distributed Computer and Communication Networks. 2024. P. 244–249; <https://2024.dccn.ru/papers/2628>.
3. Любимова М. А., Аникина А. И., Беляков Д. В. и др. Программно-информационная среда Гетерогенной вычислительной платформы HybriLIT // Материалы Всерос. конф. с междунар. участием «ИТТММ 2024». 2024. С. 315–321.
4. Кокорев А. А., Беляков Д. В., Подгайный Д. В., Мошкин А. А., Пелеванюк И. С. Распределенная параллельная файловая система Lustre для обработки и анализа данных экспериментов физики высоких энергий // Intern. Sci. Conf. «Russian Supercomputing Days 2024», Moscow, 23–24 Sept. 2024; https://russianscdays.org/files/2024/pdf/HPCCenters/3_AKokorev.pdf.
5. Беляков Д. В., Боголюбская А. А., Зувев М. И., Палий Ю. Г., Подгайный Д. В., Стрельцова О. И., Янович Д. А. Полигон для квантовых вычислений на гетерогенной платформе HybriLIT // Материалы Всерос. конф. с междунар. участием «ИТТММ 2024». 2024. С. 303–309.
6. Filozova I., Shestakova G., Kondratyev A., Bondyakov A., Zaikina T., Nekrasova I. DSpace Software Platform for Digital Repository of JINR Publications // Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. V. 21, No. 4. P. 797–799.
7. Baranov D. Detailed Simulation of the Response of Inner Tracker Detectors for the First Physics Run in the BM@N Experiment // Phys. Part. Nucl. 2024. V. 55, No. 4. P. 1055–1060.

8. *Nikolskaya A., Goncharov P., Ososkov G., Rusov D., Starikov D.* Point Cloud Transformer for Elementary Particle Signals Segmentation // *Phys. Part. Nucl.* 2024. V. 55, No. 3. P. 458–460.
9. *Borisov M., Goncharov P., Ososkov G., Rusov D.* Unraveling Time-Slices of Events in the SPD Experiment // *Phys. Part. Nucl.* 2024. V. 55, No. 3. P. 453–455.
10. *Papoyan V., Aparin A., Ayriyan A., Grigorian H., Korobitsin A.* Gradient Boosted Decision Tree for Particle Identification Problem at MPD // *Phys. Part. Nucl. Lett.* (submitted).
11. *Galoyan A., Uzhinsky V.* Tuning the Geant4 FTF Model Using Experimental Data of the NA61/SHINE Collaboration // *Phys. Part. Nucl.* 2024. V. 55, No. 4. P. 962–967.
12. *Hayrapetyan A. A., Savina M. V., Tumasyan A. R., Shmatov S. V.* Search for Dark Matter Produced in Association with Standard Model Higgs Boson in pp Collisions at 13 TeV in the CMS (LHC) Experiment // *Phys. Part. Nucl.* 2024. V. 55, No. 1. P. 132–136.
13. *Караташ Х., Сатышев И., Шолтан Е.* Монте-Карло моделирование орбитального эксперимента ОЛВЭ-HERO // *ЭЧАЯ.* 2025. Т. 56, вып. 2. С. 159–166.
14. *Chizhov K., Beskrovnaya L., Chizhov A.* Neutron Spectra Unfolding from Bonner Spectrometer Readings by the Regularization Method Using the Legendre Polynomials // *Phys. Part. Nucl.* 2024. V. 55, No. 3. P. 532–534.
15. *Abazov V. et al. (SPD Collab.).* Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA // *Natural Sci. Rev.* 2024. No. 1. 1; arXiv:2404.08317.
16. *Gallas E.J., Alexandrov E., Alexandrov I. et al.* Deployment and Operation of the ATLAS EventIndex for LHC Run3 // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2024. V. 295. 01018.
17. *Alexandrov E., Alexandrov I., Chebotov A. et al.* Development of the Online Data Processing System for the BM@N Experiment at NICA // *Phys. Part. Nucl. Lett.* V. 21, No. 4. P. 789–792.
18. *Vandandoo U., Zhanlav T., Chuluunbaatar O., Gusev A., Vinitsky S., Chuluunbaatar G.* High-Order Finite Difference and Finite-Element Methods for Solving Some Partial Differential Equations. Springer Nature, 2024. 114 p.
19. *Zhanlav T., Chuluunbaatar O.* New developments of Newton-Type Iterations for Solving Nonlinear Problems. Springer Nature, 2024. 281 p.
20. *Калиновская Л. В., Калиновский Ю. Л.* Матрицы и определители. М.: Инфра-инженерия, 2024. 164 с.
21. *Alexeeva N. V., Barashenkov I. V., Dika A., De Sousa R.* The Energy-Frequency Diagram of the $(1 + 1)$ -Dimensional Φ^4 Oscillon // *J. High Energy Phys.* 2024. V. 10. 136.
22. *Kurakin S., Badreeva D., Dushanov E. et al.* Arrangement of Lipid Vesicles and Bicelle-Like Structures Formed in the Presence of A β (25–35) Peptide // *Biochimica et Biophysica Acta. Biomembranes.* 2024. V. 1866, Iss. 1. 184237.
23. *Batgerel B., Vinitsky S.I., Chuluunbaatar O. et al.* Schemes of Finite Element Method for Solving Multidimensional Boundary Value Problems // *J. Math. Sci.* 2024. V. 279. P. 738–755.
24. *Abdul-Magead I. A. M., Lukyanov V. K., Zemlyanaya E. V., Lukyanov K. V.* Analysis of the Proton Amplitude of Scattering on Bounded Nuclear Nucleons Based on Proton-Nucleus Scattering Data // *Intern. J. Mod. Phys. E.* 2024. 2441012; <https://doi.org/10.1142/S021830132441012X>.
25. *Kats P. B., Kudravets A. V., Rimashevskaya A. S., Voskresenskaya O. O.* Comparative Study of Some Rigorous and Approximate Methods for Calculating The Energy Loss Straggling // *Radiat. Phys. Chem.* 2024. V. 222. 111860.
26. *Bashashin M., Zemlyanaya E., Rahmonov I.* Simulation of the Magnetization Reversal Effect Depending on the Current Pulse Duration within the $\phi 0$ Josephson Junction Model Using mpi and openmp Parallel Computing Techniques // *Phys. Part. Nucl.* 2024. V. 55, No. 4. P. 498–501.
27. *Рахмонов И. Р., Рахмонова А. Р., Стрельцова О. И., Зуев М. И.* Python-реализация алгоритмов и инструментарий для моделирования динамики сверхпроводникового квантового интерферометра с двумя джозефсоновскими переходами (СКВИД постоянного тока). <http://studhub.jinr.ru:8080/jjbook/DC-SQUID.html>
28. *Айриян А. С., Буша Я. (мл.), Мележик В. С.* Распараллеливание вычислительной схемы, основанной на двумерном DVR-базисе, для интегрирования нестационарного трехмерного уравнения Шрёдингера // *Письма в ЭЧАЯ.* 2025. Т. 22, вып. 3. С. 617–621.
29. *Chervyakov A. M.* On Finite-Element Modeling of Large-Scale Magnetization Problems with Combined Magnetic Vector and Scalar Potentials // *Phys. Part. Nucl. Lett.* V. 21, No. 5. P. 1074–1083.
30. *Соловьев А. Г., Соловьева Т. М., Лукьянов К. В., Земляная Е. В.* Веб-интерфейс на базе облачной инфраструктуры ОИЯИ для фитирования экспериментальных данных малоуглового рассеяния с использованием инструментов пакета ROOT // *Современные информ. технологии и ИТ-образование.* 2024. Т. 20, № 3.
31. *Yukalov V. I., Yukalova E. P.* Strong-Coupling Limits Induced by Weak-Coupling Expansions // *Ann. Phys. (N. Y.).* 2024. V. 467. 169716.
32. *Сюракшина Л., Юшанхай В.* Анизотропные спиновые модели для оксидов иридия: обоснование в кластерном квантово-химическом подходе // *Изв. РАН. Сер. физ. (в печати).*
33. *Палий Ю. Г., Боголюбская А. А., Янович Д. А.* Моделирование работы алгоритма QAOA на симуляторе квантовых вычислений Cirq. Препринт ОИЯИ P11-2024-57. Дубна, 2024.
34. *Ососков Г. А., Ужинский А. В., Нечаевский А. В.* Применение методов глубокого обучения для решения различных задач в сельском хозяйстве // *Государственный университет «Дубна». 30 лет в науке: Сб. ст. Дубна, 2024. С. 289–302.*