

ЛАБОРАТОРИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ им. М. Г. МЕЩЕРЯКОВА

Деятельность Лаборатории информационных технологий им. М. Г. Мещерякова в 2023 г. была сосредоточена на обеспечении надежного функционирования и развитии сетевой и информационно-вычислительной инфраструктуры (тема 05-6-1118-2014/2023 «Информационно-вычислительная инфраструктура ОИЯИ»), а также на развитии математического и программного обеспечения научно-производственной деятельности Института и научных центров государств-членов ОИЯИ (тема 05-6-1119-2014/2023 «Методы, алгоритмы и программное обеспечение для моделирования физических систем, математической

обработки и анализа экспериментальных данных») на базе Многофункционального информационно-вычислительного комплекса (МИВК) ОИЯИ. Отличительной особенностью направлений проводимых исследований является тесное сотрудничество со всеми лабораториями Института, институтами государств-членов ОИЯИ и других стран.

В 2023 г. сотрудниками ЛИТ опубликовано свыше 200 научных работ, 5 монографий, более 100 статей в рамках международных коллабораций, представлено более 150 докладов на международных и российских конференциях.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ОИЯИ

Для достижения главных целей ведущих проектов ОИЯИ необходимо обеспечивать высокую производительность, надежность и доступность в режиме $24 \times 7 \times 365$ всех компонентов Многофункционального информационно-вычислительного комплекса (МИВК) как крупного инфраструктурного проекта.

В 2023 г. были продолжены работы по модернизации и наращиванию производительности гиперконвергентного суперкомпьютера «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.

Продолжилось активное использование ресурсов МИВК для научно-исследовательских и прикладных задач ОИЯИ. Платформа HybridIT, включающая в себя суперкомпьютер (СК) «Говорун» и учебно-тестовый полигон, активно использовалась для выполнения исследований в рамках Проблемно-тематического плана ОИЯИ. С применением грид-технологий на базе DIRAC Interware удалось объединить выделенные не только вычислительные ресурсы всех компонентов МИВК, но и кластеры организаций стран-участниц. Такой подход позволил впервые в ОИЯИ осуществить полный цикл обработки

экспериментальных данных, полученных в ходе 8-го сеанса эксперимента VM@N, и успешно провести сеансы моделирования для эксперимента MPD. Грид-сайт Tier-1 для эксперимента CMS на LHC продолжил занимать лидирующую позицию среди 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 применялась главным образом для вычислений по нейтринной программе ОИЯИ.

Сетевая инфраструктура ОИЯИ

Локальная сетевая инфраструктура и телекоммуникационные каналы связи ОИЯИ являются фундаментом для продолжающей постоянно развиваться информационно-вычислительной инфраструктуры ОИЯИ, обеспечивая доступ к вычислительным ресурсам, системам хранения как внутри Института, так и во внешних научных организациях, сотрудничающих с ОИЯИ.

В 2023 г. надежно функционировали телекоммуникационные каналы связи ОИЯИ. В первую очередь была обеспечена 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 Tier-1-сайтами. 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. Для связи с российскими институтами, участвующими в обработке данных с LHC, используется технология RU-VRF. 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 Российской Федерации. Для передачи данных по внешнему оптическому телекоммуникационному каналу используется технология DWDM (Dense Wave Division Multiplexing).

Распределение входящего и исходящего трафика по подразделениям ОИЯИ в 2023 г. (превышающего по входящему трафику 25 ТБ) приведено в таблице.

Подразделение	Входящий трафик, ТБ	Исходящий трафик, ТБ
ЛИТ	639,8	519,5
ГРК	459,46	75,97
ЛФВЭ	406,14	191,04
ЛЯП	253	111,8
ЛЯР	156,41	30,47
ЛНФ	155,12	48,98
Университет «Дубна»	147,03	37,45
Управление	121,02	64,59
Узел удаленного доступа	88,18	12,76
УНЦ	52,73	9,84
ЛТФ	35,78	11,76
ЛРБ	30,98	3,8
УСИ	30,4	4,55
ОГЭ	29,59	2,08

Общий входящий трафик ОИЯИ, включая серверы общего назначения, Tier-1, Tier-2, СК «Говорун» и облачные вычисления, составил в 2023 г. 41,45 ПБ, общий исходящий — 27,28 ПБ. Трафик с научно-образовательными сетями является основным и составляет 96,21 % от общего.

Локальная вычислительная сеть (ЛВС) базируется на магистральной опорной сети ОИЯИ с пропускной способностью 2 × 100 Гбит/с и распределенной многоузловой кластерной сетью между площадками ЛЯП и ЛФВЭ (4 × 100 Гбит/с).

Сетевая служба регулярно обновляет программное обеспечение (ПО) на 20 серверах (webmail.jinr.ru, indico.jinr.ru, mail.jinr.ru, maillist.jinr.ru, mx1.jinr.ru, mx2.jinr.ru, auth-1.jinr.ru (login.jinr.ru), auth-2.jinr.ru и т. д.), что позволяет системам быть в актуальном состоянии.

В 2023 г. обработано более 1400 заявок пользователей ОИЯИ по работе сети, сервисов электронной почты, VPN, DNS, электронных библиотек, Wi-Fi, безопасности и т. д. Модернизирована база данных IPDB сетевой службы: расширена поисковая система, добавлены новые средства регистрации. Общая база содержит 40 тыс. элементов (пользователей и оборудования). Осуществлена проверка около 60 инцидентов с нарушениями сетевой безопасности ОИЯИ, проверено 25 местных веб-сайтов на наличие уязвимостей, велась поддержка работоспособности более 30 серверов и виртуальных машин сетевой службы и мониторинг свыше 800 сетевых устройств.

ЛВС ОИЯИ содержит 12 803 сетевых элемента, 21 640 IP-адресов ipv4, 1385 IP-адресов ipv6, 5750 пользователей, 4554 адреса электронной почты @jinr.ru, 1165 пользователей электронных библиотек, 854 пользователя сервиса удаленного доступа и 130 пользователей сервиса EDUROAM.

Инженерная инфраструктура МИВК

В 2023 г. продолжены работы по замене и совершенствованию инженерной инфраструктуры МИВК, предназначенной для обеспечения надежной, бесперебойной и отказоустойчивой работы информационно-вычислительных систем и ресурсов хранения данных. Система электроснабжения обеспечивается двумя трансформаторами по 2500 кВА каждый, двумя дизельгенераторными установками по 1500 кВА и системой источников бесперебойного питания (8 × 300 кВА).

Система климатического контроля грид-компонентов построена по смешанному типу и включает в себя как подпольную подачу холодного воздуха с принудительным отводом горячего вентиляционными панелями, так и охлаждение холодного коридора модуля межрядными кондиционерами. Общее потребление хладо-снабжения составляет 1400 кВт.

С учетом необходимости расширения вычислительных ресурсов и систем хранения данных были начаты работы по расширению серверного помещения за счет реконструкции машинного зала на 4-м этаже здания ЛИТ.

Для контроля и учета оборудования МИВК продолжено использование системы DCIM (Data Center Infrastructure Management).

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

В 2023 г. продолжалось успешное функционирование грид-сайтов ОИЯИ, были обеспечены их практическая 100%-я надежность и доступность [1]. Создание в ОИЯИ ускорительного комплекса в рамках мегасайенс-проекта NICA и экспериментальных установок на нем потребовало расширения функций грид-сайтов ОИЯИ с включением их ресурсов в систему моделирования,

3 октября. Делегация НАН Республики Казахстан (НАН РК) во главе с президентом правления НАН РК К. Закаръей на экскурсии в лаборатории в ходе визита в ОИЯИ



обработки и хранения данных экспериментов $BM@N$, MPD и SPD .

В настоящее время сайт Tier-1 обеспечивает:

- получение данных эксперимента CMS от сайта Tier-0 в ЦЕРН в объеме, определенном соглашением с $WLCG$ (Worldwide LHC Computing Grid);

- архивирование и ответственное хранение переданных с Tier-0 исходных экспериментальных данных;

- последовательную и непрерывную обработку данных;

- дополнительную обработку (скимминг) необработанных данных, данных $RECO$ (реконструированных) и данных AOD (данных объекта анализа);

- повторную обработку данных и запуск производственной обработки с использованием нового ПО или новых констант калибровки и выравнивания частей детектора CMS ;

- предоставление доступа к наборам данных AOD сайтам уровня Tier-1 и Tier-2, задействованным в обработке данных эксперимента CMS ;

- отправку наборов данных $RECO$ и AOD на другие сайты Tier-1/Tier-2/Tier-3 для их дублированного хранения (репликации) и физического анализа;

- получение смоделированных событий и анализ данных, записанных в ходе работы эксперимента CMS ;

- защищенное хранение смоделированных событий;

- получение смоделированных событий и анализ данных для экспериментов на $NICA$;

- получение и обработку данных эксперимента $BM@N$.

Функционирование сайта Tier-2 обеспечивает:

- обработку и анализ данных всех экспериментов на LHC и предоставление ресурсов для выполнения вычислительных задач участникам экспериментов;

- получение смоделированных данных и их анализ для всех виртуальных организаций, зарегистрированных в российском консорциуме $RDIG$ (Russian Data Intensive Grid);

- получение смоделированных данных и их анализ для экспериментов на $NICA$;

- получение и обработку данных эксперимента $BM@N$.

Ресурсы Tier-1 и Tier-2

Функционирование вычислительных ресурсов грид-сайтов ОИЯИ обеспечивается менеджером рабочей нагрузки $Slurm$. Для организации вычислений в грид-среде используется ARC (Advanced Resource Connector) — промежуточное ПО для грид-вычислений. Оно обеспечивает общий интерфейс для передачи вычислительных задач различным распределенным вычислительным системам и может включать грид-инфраструктуры различного размера и сложности.

Одним из важнейших элементов грид-инфраструктуры ОИЯИ, как и всего МИБК, является система хранения данных. Эта система построена по иерархическому принципу, и уровень хранения зависит от сроков хранения данных и их объема. Машины вычислительных кластеров имеют ограниченное дисковое пространство, предназначенное для хранения собственно операционной системы (ОС), некоторых дополнительных

утилит, временных файлов пользователей ограниченного объема. Распределенная глобальная система AFS используется для хранения данных и доступа к домашним директориям пользователей и к ПО небольшого объема. Глобально доступная система ведения и доступа к большим программным комплексам коллабораций и групп пользователей работает на основе разработанного в ЦЕРН ПО CVMFS. В качестве основных систем хранения данных используются dCache и EOS. Это системы для среднесрочного хранения данных. Последняя из них должна стать основной системой хранения данных в МИВК. EOS как система хранения очень больших объемов данных является оптимальной с точки зрения стоимости/объема хранилища, поддерживает множество протоколов доступа (POSIX при установке на компьютере пользователя, xroot и http для быстрого удаленного доступа), призвана обеспечивать высокую скорость доступа к данным благодаря параллельному копированию со многих серверов и т. д.

С началом сеансов на комплексе NICA требуется интенсивное наращивание долговременных систем хранения данных на роботизированных ленточных библиотеках. Кроме ленточного робота для эксперимента CMS в Tier-1 требуется создание долговременного хранилища данных для экспериментов на комплексе NICA, нейтрин-

ной программы и для других групп пользователей. Эта система создается на основе разработанного в ЦЕРН ПО СТА (CERN Tape Archive). Система будет полностью включена в инфраструктуру МИВК. Основная компонента СТА — EOS с добавлением инфраструктуры работы с ленточными роботами и манипуляций с метаинформацией хранимых файлов. В 2023 г. EOSСТА запущена в опытную эксплуатацию.

В настоящее время в состав Tier-1 входят 468 вычислительных узлов (20 096 ядер) производительностью 32 382,54 HEP-SPEC06. Запуск задач на обработку данных эксперимента CMS осуществляется 16-ядерными пилотами, и для них доступны все вычислительные ресурсы. Хранение данных обеспечивается системой dCache емкостью 12,4 ПБ, роботизированным ленточным хранилищем общей емкостью 51,5 ПБ. Робот TS4500 работает с ПО Enstore и dCache. Робот TS3500 применяет систему EOSСТА. Для работы с лентами используется дисковый массив для кеширования данных емкостью 2,65 ПБ.

Сайт Tier-1 ОИЯИ по производительности уступает только центру Tier-1 Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США) в рейтинге мировых Tier-1, обрабатывающих данные эксперимента CMS на LHC (рис. 1, а-з).

Сайт Tier-1 ОИЯИ участвует в выполнении задач для экспериментов на NICA (см. рис. 1, з).

Рис. 1. Вклад мировых центров Tier-1 в обработку экспериментальных данных CMS за 2023 г.: а) распределение по нормированному времени CPU в HEP-SPEC06 часах; б) количество обработанных событий; в) статистика использования центра Tier-1 ОИЯИ коллаборацией CMS по разным типам потоковой обработки данных; г) распределение по числу задач, выполненных на Tier-1 коллаборациями CMS, BM@N, MPD и SPD в 2023 г.

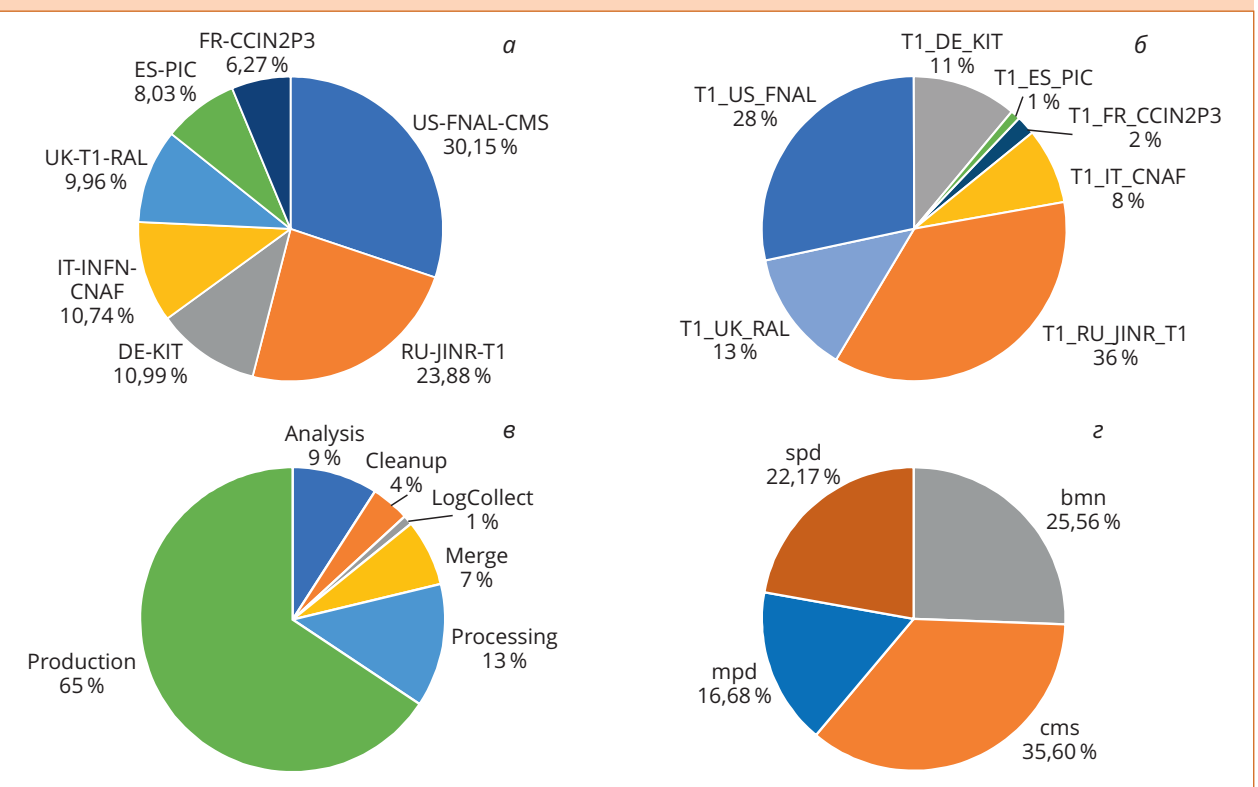


Рис. 2. Статистика использования системы EOS группами пользователей и коллаборациями

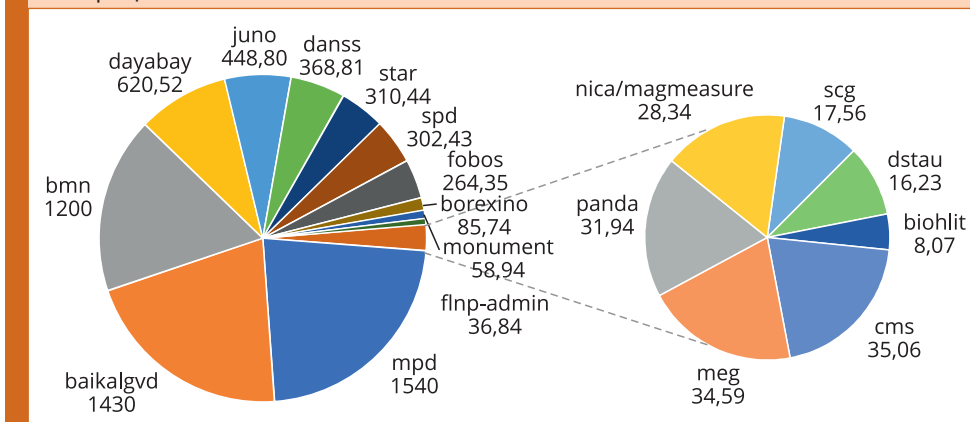
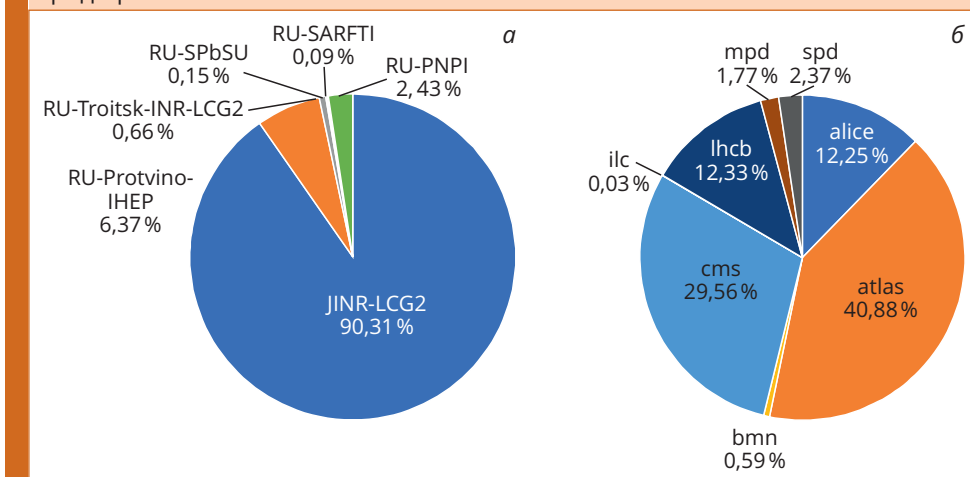


Рис. 3. а) Распределение выполненных на GRID-сайтах RDIG задач; б) использование Tier-2 ОИЯИ (JINR-LCG2) виртуальными организациями в рамках GRID-проектов



В состав сайта Tier-2 входят 486 вычислительных узлов (10 356 ядер) общей производительностью 66 788,4 HEP-SPEC06. Хранение данных обеспечивает система dCache емкостью 5,62 ПБ и EOS как общая распределенная система хранения данных для всех пользователей МИВК емкостью 23,3 ПБ (рис. 2).

Сайт Tier-2 в ОИЯИ является наиболее производительным в российском GRID-сегменте (рис. 3).

DIRAC в ОИЯИ

В настоящее время DIRAC Interware (Distributed Infrastructure with Remote Agent Control) — единственная система, которая интегрирует все компоненты МИВК. DIRAC выполняет функцию промежуточного слоя между пользователями и различными вычислительными ресурсами, обеспечивая их эффективное, прозрачное и надежное использование, предоставляя общий интерфейс к разнородным ресурсам.

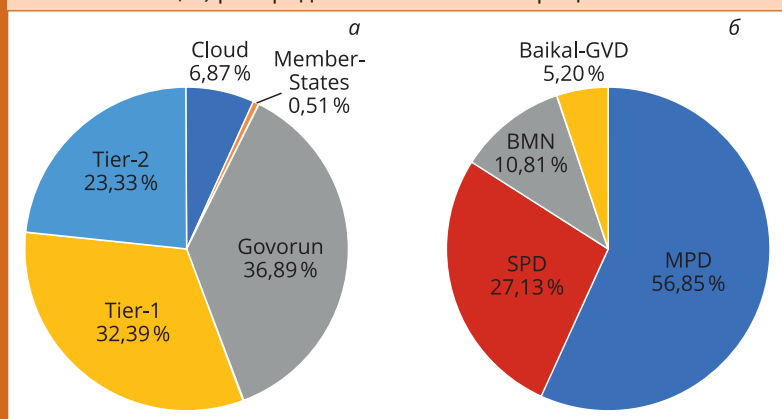
В 2023 г. DIRAC применялся для решения задач коллабораций по трем экспериментам на

ускорительном комплексе NICA, а также по нейтринному эксперименту Baikal-GVD (рис. 4).

В 2023 г. впервые в ОИЯИ на распределенной гетерогенной вычислительной инфраструктуре, объединенной с помощью платформы DIRAC, реализована полная обработка сырых данных 8-го сеанса эксперимента VM@N [2]. В ходе этого сеанса было собрано 430 ТБ данных в виде ~ 30 000 файлов. В течение года после внесения изменений в пакет VmnRoot, который используется для реконструкции данных, эта процедура применялась несколько раз для переобработки исходных данных. Всего за год были проведены 5 больших и 7 малых сеансов по реконструкции/генерации данных.

Реализован прототип критически важного веб-приложения для автоматизированной системы, собирающей и обрабатывающей данные об используемых в ОИЯИ ресурсах, объединенных в единую инфраструктуру с помощью DIRAC. Разрабатываемое приложение предоставляет ценные данные для оптимизации работы вычислительных ресурсов, интегрированных в DIRAC [3].

Рис. 4. Распределенная гетерогенная среда на базе платформы DIRAC для задач ОИЯИ по нормированному времени CPU в HEP-SPEC06 часах: а) доля использования различных компонентов МИВК; б) распределение по коллаборациям



Облачная инфраструктура

Облако ОИЯИ является одним из компонентов МИВК, и его ресурсы используются в распределенной информационно-вычислительной среде (РИВС) стран-участниц ОИЯИ [4]. Основными пользователями ресурсов облачной инфраструктуры в 2023 г. являются нейтринные эксперименты и ЛИТ.

Серверы облачной инфраструктуры ОИЯИ работают в ОС CentOS 7.9.2009, срок поддержки которой истекает в середине 2024 г. В связи с этим проведен ряд работ по отработке процедуры перевода облачных серверов и части сервисов на другой бинарно-совместимый дистрибутив, в качестве которого выбрана ОС AlmaLinux версий 8 и 9 (конкретная версия зависит от доступности для нее того или иного ПО). Выполнены работы по обновлению сервиса управления конфигурацией облачной инфраструктуры на базе программных продуктов Foreman (с версии 2.5.4 до 3.8.0) и Puppet (с версии 6 до 7). ОС на этом сервисе обновлена до AlmaLinux 8.9. Доработаны шаблоны foreman и файлы конфигурации puppet для установки на узлы облачной инфраструктуры ОС AlmaLinux 9. По этим же причинам осуществляется постепенный перевод ОС на развернутые в облаке виртуальные машины (VM), включая VM нейтринных экспериментов ЛЯП.

В рамках расширения круга предоставляемых облачных сервисов был разработан и введен в эксплуатацию сервис публикации пользовательских Docker-контейнеров в CernVM-FS [5] для обеспечения возможности их использования в системах пакетной обработки заданий нейтринной платформы, кластера NICA и всех компонентов МИВК.

Для удовлетворения увеличивающихся потребностей нейтринных экспериментов в дисковом пространстве для хранения экспериментальных данных был увеличен объем облачного хранилища нейтринной платформы с 1,5 до

3,1 ПБ сырого дискового пространства за счет приобретения нового оборудования.

По направлению РИВС на базе ресурсов организаций из стран-участниц ОИЯИ выполнены следующие работы:

- обновление ПО облачной платформы OpenNebula с версии 6.4.0.1 до 6.6.0 на облаке Института ядерной физики АН Узбекистана;
- поддержка и развитие облачной инфраструктуры в Северо-Осетинском государственном университете им. К. Л. Хетагурова (сетевая инфраструктура, хранилище);
- на веб-портал <http://dice.jinr.ru> добавлена интерактивная карта, отображающая географическое местоположение организаций-участников РИВС.

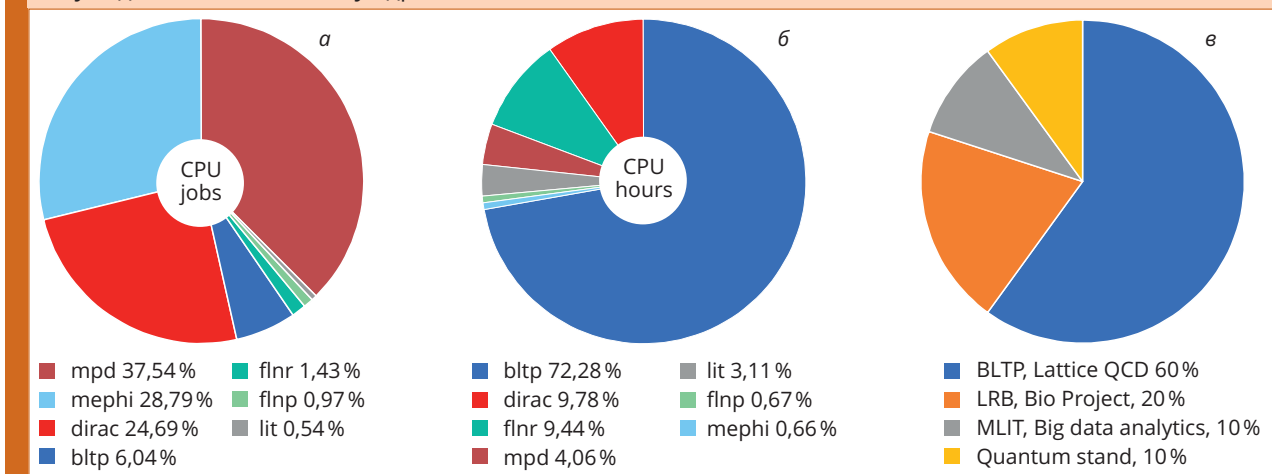
В 2023 г. успешно отработало 45 208 задач на ресурсе DIRAC.JINR-CONDOR.ru (облачные ресурсы нейтринной платформы, доступные в РИВС), что соответствует 325 056 CPU-часам. Все выполненные задачи были запущены коллаборацией Baikal-GVD.

В облаке ОИЯИ создается прототип вычислительной системы для разработки среды распределенных вычислений эксперимента SPD на базе PanDA WFMS/WMS. Развернуты сервис передачи файлов FTS и сервис управления данными Rucio.

Гетерогенная инфраструктура

В 2023 г. активно развивалась гетерогенная платформа HybriLIT, являющаяся компонентом МИВК ОИЯИ. Был осуществлен очередной этап модернизации СК «Говорун», связанный с расширением GPU-компонента. В состав СК «Говорун» вошли пять высокопроизводительных серверов, каждый из которых содержит два процессора AMD EPYC 7763 с оперативной памятью 2 ТБ и восемь графических ускорителей NVIDIA A100 с объемом памяти 40 ГБ. В результате суммарная пиковая производительность СК «Говорун» достигла 1,7 Пфлопс для операций с двойной точно-

Рис. 5. Распределение ресурсов CPU-компонента СК «Говорун» по группам пользователей: а) по количеству задач; б) по количеству ядро-часов; в) статистика использования GPU-компонента



стью (или 3,4 Пфлопс для операций с одинарной точностью), общая емкость иерархического хранилища составляет 8,6 ПБ. Расширение GPU-компонента предоставило новые возможности для решения задач решеточной квантовой хромодинамики, квантовых вычислений с использованием симуляторов, аналитики больших данных, разработки алгоритмов на основе нейросетевого подхода для анализа данных экспериментов ЛРБ, обработки и анализа данных экспериментов на ускорительном комплексе NICA.

В рамках задачи создания распределенной системы хранения и обработки данных для проекта NICA был развернут тестовый полигон, состоящий из трех распределенных файловых систем Lustre и объединяющий СК «Говорун» и вычислительный кластер NCX (ЛФВЭ). Распределенная файловая система Lustre построена с использованием дисковых ресурсов и серверов, размещенных на площадках ЛИТ и ЛФВЭ, и содержит два дисковых пула — OST0 (сервер в ЛИТ) и OST1 (сервер в ЛФВЭ), объединенных в один дисковый пул с функцией зеркалирования данных между дисковыми пулами OST0 и OST1. Данный механизм позволяет записывать данные на один пул и получать полную копию этих данных на другой пул, что существенно упрощает процедуру переноса данных с одного вычислительного ресурса на другой.

На ресурсах экосистемы ML/DL/HPC платформы HybriLIT был развернут полигон для квантовых вычислений с установленными симуляторами квантовых вычислений Cirq, Qiskit, PennyLane. Расширение полигона позволяет проводить исследования в среде Jupyter, что предоставляет возможность наглядно работать с квантовыми схемами и проводить расчеты в браузере.

В 2023 г. был осуществлен переход на новое ПО с клиентом для удаленного доступа TurboVNC сервиса HLIT-VDI, предназначенного для организации работы пользователей в графическом режиме доступа к программным пакетам COMSOL,

MAPLE, Mathematica, MatLab и др. По запросам пользователей установлено и обновлено 113 программных модулей с учетом версииности.

Общее число пользователей СК «Говорун» к настоящему времени составляет 312 человек, из них 255 являются сотрудниками ОИЯИ, 57 — из стран-участниц.

В течение 2023 г. всеми группами пользователей СК «Говорун» на CPU-компоненте была выполнена 640 861 задача, что соответствует 16 миллионам ядро-часов, а на GPU-компоненте — 7808 задач, что соответствует 45 400 GPU-часам.

На рис. 5 представлены распределения ресурсов CPU-компонента СК «Говорун» по группам пользователей. Средняя загрузка CPU-компонента составила 96,4%, а загрузка GPU-компонента — 91,2%.

Система мониторинга и аккаунтинга

Успешное функционирование МИВК обеспечивается системой мониторинга и аккаунтинга, которая должна быть актуальной и современной. Для этих целей предусматривается расширение системы мониторинга за счет интеграции в нее локальных систем слежения за системами электропитания (дизель-генераторы, распределительные узлы электропитания, трансформаторы и источники бесперебойного питания) и создание центра управления инженерной инфраструктурой (специальные информационные панели для визуализации всех статусов инженерной инфраструктуры МИВК в единой точке доступа). Переход к проектному планированию научной деятельности и планированию ресурсов по запросам пользователей требует разработки специальной системы учета по использованию ресурсов МИВК каждым проектом/пользователем. В настоящее время такая система учета (аккаунтинга) организована для групп пользователей на грид-инфраструктуре МИВК.

Для визуализации данных аккаунтинга используется система Grafana. В 2023 г. в системе мониторинга LITMon введена в эксплуатацию новая база данных для хранения отслеживаемых характеристик оборудования. Применение базы данных InfluxDB2 позволило оптимизировать процесс передачи данных в систему визуализации Grafana и организовать репликации данных для увеличения безопасности системы хранения.

Информационные сервисы

В 2023 г. интенсивно велись работы по развитию платформы Digital JINR. Осуществлялось тестирование, развертывание и интеграция программных пакетов для сервисов и базовой инфраструктуры цифровой экосистемы (ЦЭС) (планирование и управление проектами, электронная служба поддержки, авторизация, цифровые архивы, управление научной информацией и т. д.), а также подготовка программного окружения и документации для разработки цифровых сервисов и их интеграции. В рамках развития оболочки и сервисов ЦЭС реализована двусторонняя связь с системой GLPI (сопровождение проектов) для обработки заявок пользователей, осуществлена интеграция системы электронного документооборота (СЭД) и геоинформационного сервиса (ГИС) для привязки договоров ремонтно-строительных работ и капитального строительства к конкретным зданиям или помещениям, разработан встроенный сервис «Бланки», подключены к ЦЭС в виде отдельных сервисов некоторые функции СЭД, ADB2, «Базы документов» и т. д.

В рамках развития и сопровождения СЭД «Дубна» существенно модернизировано ядро СЭД: разработана подсистема архивного хранения завершенных документов в виде PDF, модернизированы подсистема определения прав доступа и система защиты от хакерских атак и несанкционированного доступа, модернизирован интерфейс пользователя, обновлен его дизайн и ускорена работа, разработаны 7 новых типов документов (корреспонденция АО «Штрабаг», технические условия для проектирования, технические решения проектных и строительных работ и т. д.) и новый модуль «Статистика», осуществлена адаптация к новой учетно-финансовой политике по проектам и активностям.

В рамках развития информационных сервисов в облачной инфраструктуре был развернут сервис для планирования мероприятий newdle.jinr.ru на базе системы Newdle (аналог популярного сервиса Doodle), в котором был реализован вход по JINR SSO.

Осуществлялись поддержка и развитие инфраструктуры хостинга сайтов: www.jinr.ru, flnph.jinr.ru, flerovlab.jinr.ru, micc.jinr.ru, mpdroot.jinr.ru и т. д. Обеспечены поддержка и развитие инфраструктуры серверов административного назначения (ресурсы pin.jinr.ru, adb2.jinr.ru, sed.jinr.ru и т. п.), сервиса pm.jinr.ru (система автоматизированного управления проектами), сервиса disk.jinr.ru (сервис облачного хранилища для сотрудников ОИЯИ).

Продолжены работы по сопровождению и модернизации центральных информационных серверов, порталов и баз данных для информационного и программного обеспечения деятельности ЛИТ (lit.jinr.ru) и ОИЯИ (wwwinfo.jinr.ru, dissertations.jinr.ru, pepan.jinr.ru и др.).

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 2023 г. первостепенное значение имели проектирование, разработка, внедрение и сопровождение удобной для пользователя вычислительной среды на гетерогенной вычислительной платформе ЛИТ, включающей кластер HybriLIT и СК «Говорун». Весьма необходимый и ценный вклад был внесен в трехмерное моделирование, необходимое для проверки магнитов NICA, в решения на самом высоком уровне конкретных задач в рамках экспериментов VM@N, MPD и SPD, а также в раз-

работку ПО системы обработки данных для эксперимента Baikal-GVD. Разработка ПО в рамках вклада ОИЯИ для экспериментов CMS и ATLAS Phase 3 в ЦЕРН суммирует лучшие результаты, полученные по обработке экспериментальных данных в рамках темы 1119.

Ниже приведена краткая информация о некоторых из полученных результатов.

Реализована современная парадигма разработки ПО через тестирование TDD (Test-Driven Development) для верификации механизма реконструкции данных MPD в фреймворке MPDRoot. Показано, что необходимые изменения в архитектуре кодовой базы, среде диагностики и анализа данных улучшают потенциал

будущих разработок механизма реконструкции. Представлены первые результаты сравнения различных модулей [6].

Получены первые результаты в рамках исследования применения машинного обучения в задаче идентификации заряженных частиц в эксперименте MPD [7]. В работе использовалась разновидность алгоритма градиентного бустинга на решающих деревьях, реализованная в библиотеке CatBoost. Сравнение алгоритма с методом n -sigma, который в настоящее время реализован в программной среде MpdRoot, показало более высокую эффективность метода бустинга при малых и больших значениях импульса. Проведение этих исследований стало возможным благодаря вычислительным ресурсам гетерогенной платформы HybriLIT.

В 2023 г. завершили первоначальное проектирование и прототипирование онлайн-фильтра эксперимента SPD. Реализована система управления нагрузкой [8] — одного из ключевых компонентов онлайн-фильтра, которая включает в себя серверный компонент, отвечающий за обработку данных путем генерации и выполнения достаточного количества задач, и агентское приложение, отслеживающее и управляющее ходом выполнения задач на вычислительном узле.

Разработана и продолжает совершенствоваться система обработки данных эксперимента Baikal-GVD. Ее преимуществами являются простота, модульность и параллельность, соответствующие физическим свойствам строящегося нейтринного телескопа. Модульная архитектура системы позволяет легко модифицировать отдельные компоненты, не нарушая целостности, и добавлять новые. Параллелизм системы состоит из нескольких уровней. Во-первых, обработка отдельных кластеров происходит параллельно на разных VM. Во-вторых, обработка одного кластера выполняется в двух последовательных рабочих процессах — быстрой и автономной обработке. В обоих рабочих процессах некоторые задачи также выполняются параллельно. Текущее состояние системы обработки уже позволило получить астрофизические результаты.

Разработано веб-приложение [9], позволяющее фитировать данные, полученные от спектрометра малоуглового рассеяния нейтронов на реакторе ИБР-2, изучать форму и размер наночастиц образцов. Процесс фитирования распараллелен с помощью неявной многопоточности и векторизации.

Предложен новый метод исследования двухчастичных корреляций поперечных импульсов (PT) в мягких адронных взаимодействиях [10]. Показано, что моделирование методом Монте-Карло в PYTHIA 6 и Geant4 FTF (FRITIOF) дает различные предсказания для предлагаемых корреляций в протон-протонных взаимодействиях. Корреляции связаны со швингеровским механизмом рождения частиц и могут быть изучены

в текущих и будущих экспериментах в области физики высоких энергий, в частности на NICA.

Изучено взаимное сокращение вкладов от каналов притяжения и отталкивания в скалярном взаимодействии в термическом пионном газе при конечных температурах [11]. Давление взаимодействующего пионного газа рассчитано с использованием подхода Бета-Уленбека к релятивистскому вириальному расширению с фазовыми сдвигами Брейта-Вигнера для σ - и ρ -мезонных резонансов. Результат исследования объясняет отсутствие σ -мезона в модели адронного резонансного газа при низких температурах и необходимость его учета в статистической модели химического фризаута в столкновениях тяжелых ионов.

Представлен обзор работ [12], посвященных моделированию процесса гидратации электрона на основе развитого авторами подхода в рамках динамической модели полярона. Сформулирована математическая постановка задачи, построены вычислительные схемы, созданы комплексы проблемно-ориентированных программ с применением технологии параллельного программирования MPI. Приведены результаты численного моделирования и расчета наблюдаемых физических характеристик изучаемого процесса гидратации электронов. Согласие полученных численных результатов с соответствующими экспериментальными данными подтверждает адекватность разработанных подходов и перспективность их дальнейшего использования и развития.

Численное моделирование накопленных в ЛНФ экспериментальных данных по взаимодействию бета-амилоидного пептида A β (25–35) с фосфолипидными мембранами ДПФХ, посвященное выяснению роли бета-амилоидного пептида как ключевого фактора болезни Альцгеймера, позволило уточнить динамические свойства липидных мембран, регулируемые добавлением мелатонина, холестерина и бета-амилоидного пептида [13].

Проведены исследования, посвященные анализу данных пион-ядерного рассеяния для ряда ядер-мишеней на основе микроскопической модели пион-ядерного потенциала [14]. Показано, что разработанный подход обеспечивает адекватное описание экспериментальных данных по пион-ядерному рассеянию в области энергий пион-нуклонного (3,3)-резонанса и позволяет исследовать влияние ядерной среды на пион-нуклонное рассеяние. Разработанный теоретический подход и процедура численного исследования адаптированы на случай протон-ядерного рассеяния.

Предложена модификация модели термического пика (МТП), базирующаяся на системе двух связанных гиперболических уравнений теплопроводности [15]. Действие лазера в электронном газе учтено посредством функции источника, выбранной в виде двойного фемтосекундного

лазерного импульса. В гиперболической МТП в отличие от параболической присутствуют дополнительные параметры, которые характеризуют времена релаксации потока тепла в электронном газе и кристаллической решетке. Проведены численные исследования решений параболического и гиперболического уравнений МТП при одинаковых физических параметрах и сравнительный анализ полученных результатов.

Разработаны оригинальный подход и алгоритм в системе Maple для решения задачи рассеяния в одноканальном приближении метода связанных каналов оптической модели, описываемой обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка с комплексным потенциалом с регулярными граничными условиями [16]. Эффективность предложенного подхода показана численным решением задачи рассеяния и расчетом эталонного сечения захвата и метастабильных состояний пары тяжелых ионов $^{16}\text{O} + ^{144}\text{Sm}$ в одноканальном приближении метода связанных каналов.

Проведено численное моделирование в рамках микроскопической статистической модели сверхтекучего квантового твердого тела, внутри кристаллической решетки которого могут существовать области беспорядка, такие как дислокационные сетки или границы зерен [17]. Такая модель дает возможность ответить на вопрос, какие реальные квантовые кристаллы могут проявлять свойство сверхтекучести, а какие нет.

С использованием специальных процедур проверки входных данных развит рекурсивный

алгоритм автоматической адаптивной квадратуры одномерных интегралов Римана на основе байесовского вывода с целью обеспечения устойчивых и надежных автоматических решений на критических этапах пути решения [18]. Байесовский алгоритм предиктор–корректор обеспечивает автоматическое решение условий подынтегральной функции на концах подынтервалов корня дерева решений. Новая стратегия разделения подынтервалов обеспечивает максимальную точность результатов.

Метод функциональной редукции для фейнмановских интегралов, разработанный в ЛИТ, применен для вычисления однопетлевых интегралов, соответствующих диаграммам с четырьмя внешними линиями [19]. Рассмотрены интегралы, возникающие в расчетах радиационных поправок к амплитудам рассеяния света на свете, расщепления фотона во внешнем поле, а также дельбрюкковского рассеяния. Для произвольного значения размерности пространства d получены новые аналитические результаты для мастерских интегралов, при $d = 4$ приведены компактные формулы в терминах дилогарифмов.

В рамках формализма фазового пространства конечномерных квантовых систем рассмотрена взаимосвязь между классичностью/квантовостью и симметрией состояний [20]. Обнаружено, что упорядоченность квантовых состояний по типу симметрии влечет за собой также упорядоченность по классичности: чем больше симметрия, тем более классическими являются квантовые состояния.

НАУЧНО-ПРИКЛАДНЫЕ РАБОТЫ

Выполнено проектирование встроенных интеллектуальных систем управления на основе нечеткой логики, нейронных сетей, генетических и квантовых алгоритмов для задачи стабилизации давления азота в криогенной системе испытательного стенда фабрики магнитов ЛФВЭ ОИЯИ. Эффективность работы системы продемонстрирована экспериментально [21].

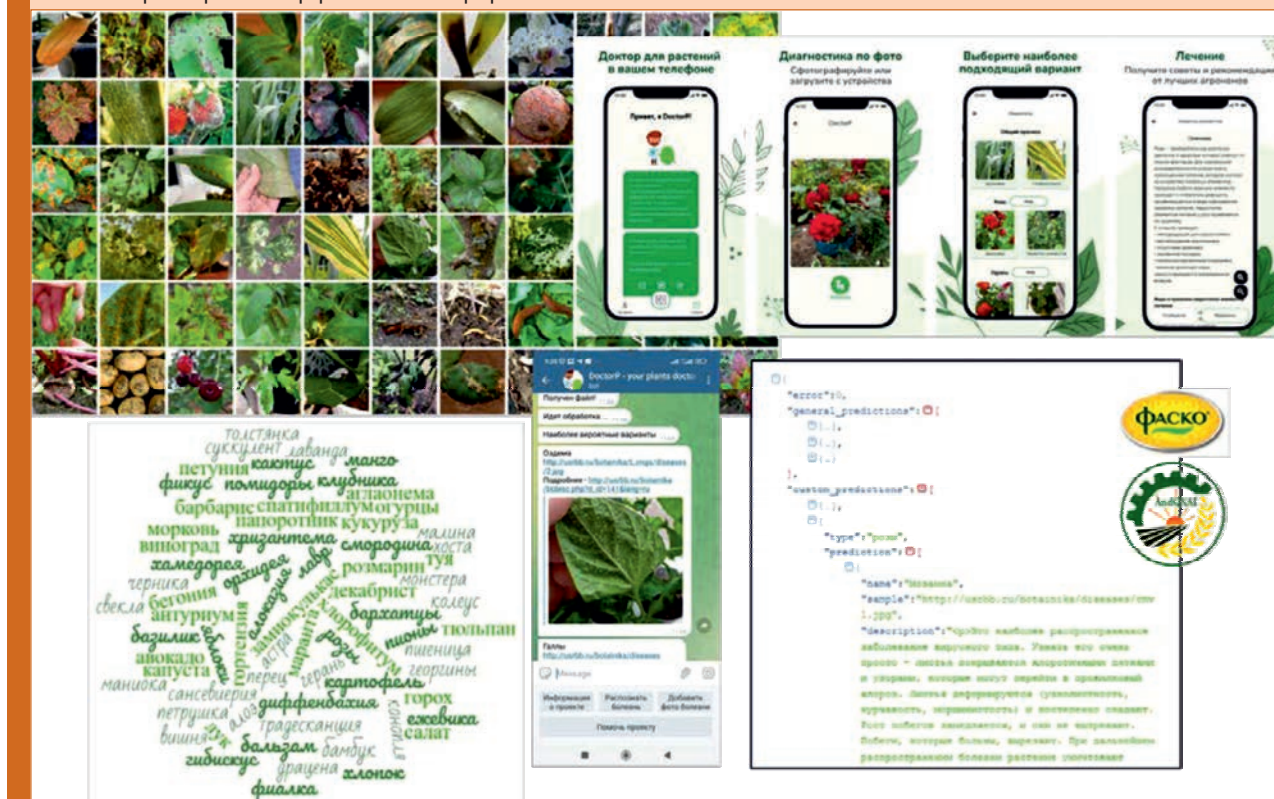
В рамках совместного проекта ВЮНЦ (ЛИТ и ЛРБ) на основе методов компьютерного зрения разработан алгоритм трекинга лабораторного животного в поведенческом тесте «Водный лабиринт Морриса». Разработаны прототипы веб-сервисов для этого теста, которые позволяют на видео отслеживать правильность создаваемой траектории и в разных представлениях формировать набор данных, и поведенческого теста «Открытое поле», функционал которого позволяет решать задачу трекинга лабораторного животного, строить тепловую карту, подсчитывать пройденные сектора и предоставлять пользователю сводную аналитику.

В 2023 г. было продолжено развитие сервиса для моделирования систем, основанных на джо-

зефсоновских переходах, в рамках совместного проекта ЛИТ и ЛТФ. Сервис пополнен материалами для моделирования динамики джозефсоновского перехода под воздействием внешнего излучения на примере перехода типа сверхпроводник–диэлектрик–сверхпроводник [22]. С использованием Python в среде Jupyter Book разработаны алгоритмы для вычисления вольт-амперной характеристики (ВАХ) джозефсоновского перехода под воздействием внешнего излучения и нахождения ширины ступеньки Шапиро на кривой ВАХ. Реализован параллельный алгоритм для расчета зависимости ширины ступеньки Шапиро от амплитуды внешнего излучения, и показана эффективность параллельной реализации.

В ЛИТ развиваются платформа и мобильное приложение DoctorP для распознавания болезней растений и вредителей [23]. Доступна как общая модель, способная идентифицировать 68 классов болезней, так и специализированные модели для 30 декоративных и сельскохозяйственных культур (рис. 6). В 2023 г. платформой было обработано более 80 тыс. запросов пользо-

Рис. 6. Примеры интерфейсов платформы DoctorP



вателей. Чтобы получить прогноз и рекомендации по лечению от опытных агрономов, нужно просто отправить фотографию, на которой будет видна проблема. Доступ к платформе могут получить сторонние приложения и сервисы. Этой возможностью уже воспользовались компании «Гарден ритейл сервис» (ранее «Фаско») и Андижанский институт сельского хозяйства и агротехнологий (Узбекистан).

Разработан и зарегистрирован в Росреестре программ для ЭВМ [24] программный комплекс для создания цифровых двойников (ЦД) распределенных центров сбора, хранения и обработки

данных (РЦОД). Уникальность данной программы в том, что создаваемые с ее помощью ЦД эффективно отслеживают работу РЦОД с точки зрения потоков данных и связанных с ними задач. ЦД РЦОД — это виртуальная копия центра обработки данных, которая показывает, как он работает при любом возможном сценарии. Проведена успешная верификация программы моделирования на примере работы вычислительной инфраструктуры реального эксперимента VM@N на ускорительном комплексе NICA во время 8-го физического сеанса в 2023 г.

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Первый в Республике Казахстан и 11-й по счету кластер облачных вычислений ОИЯИ был включен в РИВС ОИЯИ. Ресурсы облачного кластера Института ядерной физики смогут использовать сотрудники научных институтов и университетов Казахстана как в независимых исследованиях, так и в рамках сотрудничества с ОИЯИ, принимая участие в мегасайенс-проектах NICA и Baikal-GVD. Кластер, включенный в РИВС ОИЯИ и организаций стран-участниц ОИЯИ, позволяет получить доступ к большому количеству аппаратных ресурсов, чем в случае локального использования облака Института ядерной физики, что открывает перед учеными возможности получения научных результатов в более короткие сроки.

В рамках программы сотрудничества с Кейптаунским университетом в ЛИТ проведено исследование структуры и свойств сферически-симметричных, периодических по времени, пространственно-локализованных объектов конечного радиуса в модели ϕ^4 в зависимости от размера радиуса и частоты осцилляций [25]. Разработанная для повышения производительности расчетов множителей Флоке параллельная версия MatLab-скрипта позволила уменьшить время расчетов более чем в 10 раз. Вычисления проводились на платформе HybriLIT и с помощью СК «Говорун».

При активном участии сотрудников ЛИТ создан и динамично развивается каталог событий экспе-

Алматы, 11 ноября. Торжественное открытие нового кластера облачных вычислений ОИЯИ в ИЯФ (Казахстан)



рифта ATLAS (LHC) – EventIndex [26]. Сотрудники ЛИТ наиболее активно участвовали в модернизации системы: значительно улучшена система мониторинга, осуществлен переход на платформу Grafana, создана новая служба автоматического поиска и сбора событий (Event Picking Service), что позволило с наименьшими затратами ручного труда провести сбор событий для второго этапа анализа процесса рождения пар калибровочных

бозонов W при взаимодействии двух фотонов ($\gamma\gamma \rightarrow WW$).

В рамках программы сотрудничества ОИЯИ–Болгария с высокой точностью вычислены периодические приближенные решения задачи трех тел [27]. Исследования проводились на СК «Говорун» и кластере Nestum (София). Установлена высокоточная база данных из 462 орбит с тривиальной хореографией, включая 397 новых.

18–19 апреля. Весенняя школа по информационным технологиям ОИЯИ



20 октября. Осенняя школа по информационным технологиям.
Победители хакатона по параллельным вычислениям



ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА НА УЧЕБНО-ТЕСТОВОМ ПОЛИГОНЕ

Учебно-тестовый полигон платформы HybriLIT в 2023 г. активно использовался для проведения как учебных семестровых курсов, так и школ и рабочих совещаний. На базе полигона проходили учебные курсы в рамках Осенней школы по информационным технологиям ОИЯИ, рабочего совещания «Современные информационные технологии в биологии и медицине», 5-й Международной летней школы молодых ученых «Современные информационные технологии для решения научных и прикладных задач» (СОГУ), 16-й Международной стажировки молодых ученых стран СНГ, в которых приняли участие 210 слушателей. Для проведения

выездных учебных курсов и для проведения семинаров в университете «Дубна» был развернут «Мобильный кластер HybriLIT». В семестровых учебных курсах по IT-дисциплинам «Архитектура и технологии высокопроизводительных систем», «Параллельные распределенные вычисления», «Языки и технологии анализа данных», «Технологии высокопроизводительных вычислений», «Программные средства математических вычислений», проводимых в университете «Дубна» и ТвГУ, приняли участие 310 студентов. Также на базе платформы HybriLIT было подготовлено 5 бакалаврских работ и 7 магистерских диссертаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baginyan A., Balandin A., Dolbilov A., Golunov A., Gromova N., Kashunin I., Korenkov V., Mitsyn V., Pelevanyuk I., Shmatov S., Strizh T., Trofimov V., Vorontsov A., Voytishin N. JINR Grid Infrastructure: Status and Plans // Proc. of the 10th Intern. Conf. "Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education" (GRID'2023), Dubna, July 3–7, 2023; Phys. Part. Nucl. 2024. V. 55, No. 3. P. 355–359.
2. Gertsenberger K., Pelevanyuk I. BM@N Run 8 Data Production on a Distributed Infrastructure with DIRAC // Proc. of the XXVII Intern. Sci. Conf. of Young Scientists and Specialists (AYSS-2023); Phys. Part. Nucl. Lett. (submitted).
3. Champish D., Ilina A., Pelevanyuk I. System for Analysis of the Performance of Scientific Jobs in Distributed Systems // Proc. of the 10th Intern. Conf. "Distributed Computing and Grid Technologies in Science

- and Education" (GRID'2023), Dubna, July 3–7, 2023; Phys. Part. Nucl. 2024. V. 55, No. 3.
4. Balashov N., Kuprikov I., Kutovskiy N., Makhalkin A., Mazhitova Ye., Pelevanyuk I., Semenov R., Shpotya D. Changes and Challenges at the JINR and Its Member States Cloud Infrastructures // Proc. of the 10th Intern. Conf. "Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education" (GRID'2023), Dubna, July 3–7, 2023; Phys. Part. Nucl. 2024. V. 55, No. 3. P. 366–370.
 5. Balashov N. JINR Container Distribution Service // Proc. of the 10th Intern. Conf. "Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education" (GRID'2023), Dubna, July 3–7, 2023; Phys. Part. Nucl. 2024. V. 55, No. 3.
 6. Busa J., Jr., Bychkov A., Hnatič S., Krylov A., Krylov V., Rogachevsky O. MPD Data Lab: Towards the Modern Data Analysis Framework for the MPD Experiment // Proc. of the 25th Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics & Quantum Chromodynamics", Dubna, Sept. 18–23, 2023; Phys. Part. Nucl. (submitted).
 7. Papoyan V., Aparin A., Ayriyan A., Grigorian H., Korobitsin A., Mudrokh A. Machine Learning Application for Particle Identification in MPD // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 86, No. 5. P. 869–873.
 8. Greben N., Romanychev L., Oleynik D., Degtyarev A. SPD On-line Filter: Workload Management System and Pilot Agent // Proc. of the 10th Intern. Conf. "Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education" (GRID'2023), Dubna, July 3–7, 2023; Phys. Part. Nucl. 2024. V. 55, No. 3. P. 612–614.
 9. Соловьев А. Г., Соловьева Т. М., Ку克林 А. И., Балашову М. Разработка веб-приложения для фитирования данных спектрометра малоуглового рассеяния нейтронов // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2023): Короткие статьи и описания плакатов. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2023. С. 206–214.
 10. Galoyan A., Ribon A., Uzhinsky V. Towards Study of Two-Particle PT Correlations in Hadronic Interactions at NICA // MPDI Phys. 2023. V. 5, No. 3. P. 823–831.
 11. Blaschke D., Friesen A., Kalinovskiy Yu. Cancellation of the Sigma Mode in the Thermal Pion Gas by Quark Pauli Blocking // Symmetry. 2023. V. 15, No. 3. P. 711.
 12. Lakhno V. D., Amirkhanov I. V., Volokhova A. V., Zemlyanaya E. V., Puzyrin I. V., Puzyrina T. P., Rikhvitskii V. S., Bashashin M. V. Dynamic Model of the Polaron for Studying Electron Hydration // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 54, No. 5. P. 869–883.
 13. Kurakin S., Badreeva D., Dushanov E., Shutikov A., Efimov S., Timerova A., Kučerka N. Arrangement of Lipid Vesicles and Bicelle-Like Structures Formed in the Presence of A β (25–35) Peptide // BBA — Biomembranes. 2024. V. 1866, No. 1. 184237.
 14. Lukyanov V. K., Zemlyanaya E. V., Lukyanov K. V., Abdul-Magead I. Theoretical Analysis of Pion–Nucleus Scattering at Energies of the (3,3) Pion–Nucleon Resonance // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 54, No. 4. P. 734–755.
 15. Амирханов И. В., Сархадов И., Тухлиев З. К. Численные результаты тепловых процессов, возникающих в материалах при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов. Препринт ОИЯИ P11-2023-52. Дубна, 2023; Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исследования (направлена).
 16. Gusev A. A., Chuluunbaatar O., Derbov V. L., Nazmidinov R. G., Vinitsky S. I., Wen P. W., Lin C. J., Jia H. M., Hai L. L. Symbolic-Numerical Algorithm for Solving the Problem of Heavy Ion Collisions in an Optical Model with a Complex Potential // Lect. Not. Comput. Sci. 2023. V. 14139. P. 128–140.
 17. Yukalov V. I., Yukalova E. P. Statistical Model of a Superfluid Solid // Phys. Lett. A. 2023. V. 457. 128559-9.
 18. Adam G., Adam S. The Pivotal Role of Input Validation for Robust and Reliable Bayesian Automatic Adaptive Quadrature // 2023 Intern. Conf. on Advanced Sci. Comput. (ICASC), Cluj-Napoca, Romania, 2023. P. 1–6; doi: 10.1109/ICASC58845.2023.10328030.
 19. Tarasov O. V. Calculation of One-Loop Integrals for Four-Photon Amplitudes by Functional Reduction Method // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20, No. 3. P. 287–291.
 20. Khvedelidze A., Torosyan A. On the Hierarchy of Classicality and Symmetry of Quantum States // Zapiski Nauch. Seminarov POMI. 2023. V. 528. P. 238–260.
 21. Zrelou P. V., Nikiforov D. N., Reshetnikov A. G., Ulyanov S. V. Quantum Intelligent Control of Nitrogen Pressure in a Cryogenic Facility of Magnet Plant Test Bench // Phys. Part. Nucl. (submitted).
 22. Рахмонов И. Р., Рахмонова А. Р., Стрельцова О. И., Зуев М. И. Python-инструментарий для моделирования динамики джозефсоновского перехода под воздействием внешнего излучения. <http://studhub.jinr.ru:8080/jjbook>.
 23. Uzhinskiy A. Advanced Technologies and Artificial Intelligence in Agriculture // Appl. Math. 2023. V. 3, No. 4. P. 799–813.
 24. Кореньков В. В., Пряхина Д. И., Трофимов В. В. Программный комплекс для создания цифровых двойников распределенных центров сбора, хранения и обработки данных // Росреестр программ для ЭВМ. 2023. № 2023667305.
 25. Alexeeva N. V., Barashenkov I. V., Bogolubskaya A. A., Zemlyanaya E. V. Understanding Oscillons: Standing Waves in a Ball // Phys. Rev. D. 2023. V. 107. 076023.
 26. Barberis D., Aleksandrov I., Alexandrov E. et al. The ATLAS EventIndex: A BigData Catalogue for All ATLAS Experiment Events // Comput. Software Big Science. 2023. V. 7, No. 2. P. 1–21.
 27. Hristov I., Hristova R., Puzyrin I., Puzyrina T., Sharipov Z., Tukhliev Z. A Database of High Precision Trivial Choreographies for the Planar Three-Body Problem // Lect. Not. Comput. Sci. 2023. V. 13858. P. 171–180.