



**ИЗБРАННЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В 2017–2023 ГГ.**

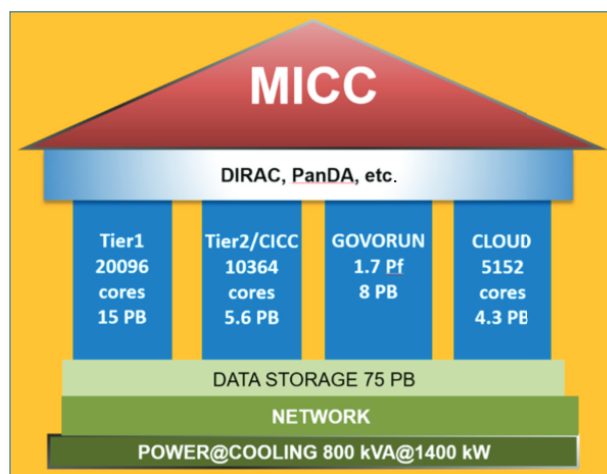
Дубна 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.	3
УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС NICA	4
ФАБРИКА СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	8
КОМПЛЕКС ЦИКЛОТРОНА У-400М	11
РЕКОНСТРУКЦИЯ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА У-400(Р).	12
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.	14
ФИЗИКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ	21
ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ	24
ФИЗИКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ	28
ФИЗИКА НЕЙТРИНО И АСТРОФИЗИКА	29
НЕЙТРОННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА.	35
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД.	38
РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСА СПЕКТРОМЕТРОВ ИБР-2	41
РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	43
ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И НАУКИ О ЖИЗНИ	50
СЕТИ, КОМПЬЮТИНГ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА.	53
ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА ОИЯИ	61
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	68

СЕТИ, КОМПЬЮТИНГ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

Одним из основных направлений Семилетнего плана в 2017–2023 гг. являлось плановое развитие в ЛИТ многофункционального информационно-вычислительного комплекса (МИВК) мирового уровня, включающее в себя: развитие и совершенствование телекоммуникационной и сетевой инфраструктуры ОИЯИ, модернизацию инженерной инфраструктуры МИВК, модернизацию, развитие и создание новых компонентов МИВК для хранения, обработки и анализа данных, развитие IT-инфраструктуры проекта NICA, наращивание производительности и объема систем хранения данных грид-компонентов — Tier1 и Tier2, наращивание ресурсов облачной инфраструктуры и создание интегрированной облачной среды для стран-участниц ОИЯИ, расширение гетерогенного вычислительного комплекса HybriLIT. Все задачи были выполнены [153, 154].



Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс ОИЯИ

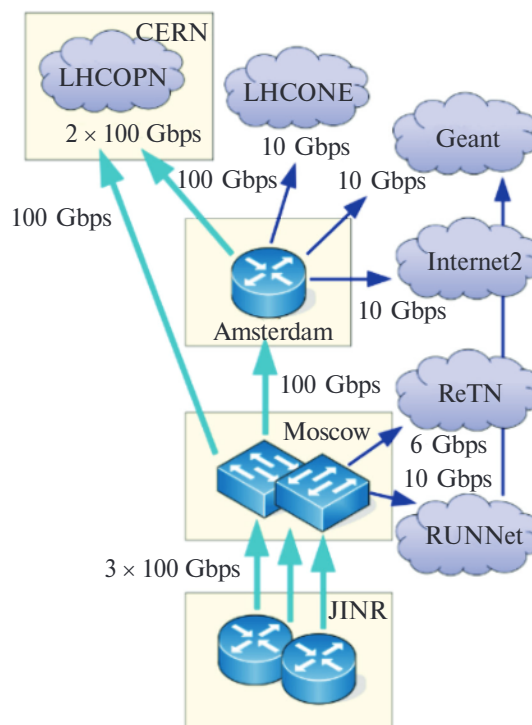
Сетевая инфраструктура ОИЯИ. На новый технологический уровень вышла сетевая инфраструктура ОИЯИ. Пропускная способность телекоммуникационного канала Москва–ОИЯИ увеличена со 100 до 3×100 Гбит/с, магистральной вычислительной сети Института — с 10 до 2×100 Гбит/с, а также создана распределенная вычислительная кластерная сеть между площадками ЛЯП и ЛФВЭ пропускной способностью до 400 Гбит/с, что отвечает требованиям мегапроекта NICA.

Инженерная инфраструктура МИВК. Согласно проекту МИВК выполнялись работы по модернизации инженерной инфраструктуры ЛИТ.

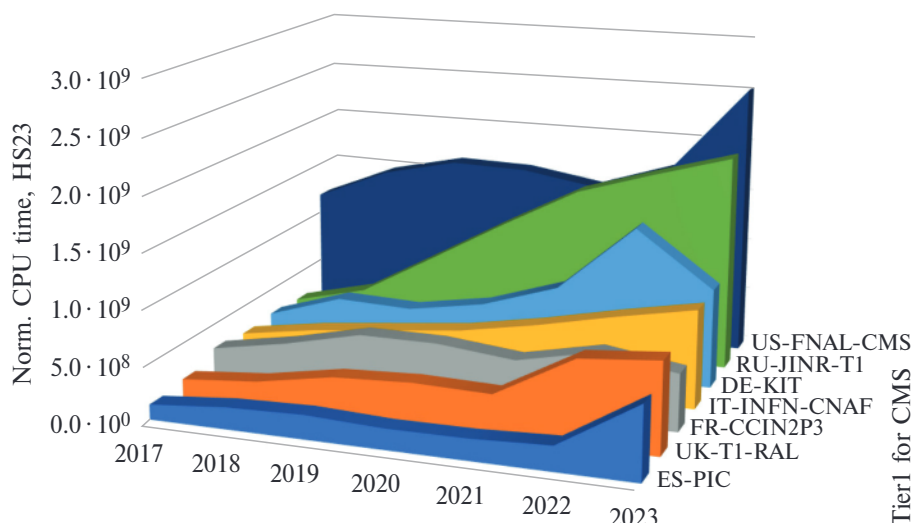
Создан комплекс инженерных систем, состоящий из источников бесперебойного питания и двух дизель-генераторных установок, представляющий собой систему электропитания, которая обеспечивает полную энергетическую независимость информационно-вычислительной системы и сетевой инфраструктуры от внешней сети электропитания. Модернизированная система климатического контроля МИВК представляет собой комплекс взаимосвязанного оборудования различных схем воздушного и жидкостного охлаждения, с помощью которых создается необходимый температурный режим, обеспечивающий работу МИВК в режиме 24×365 [155].

Грид-среда ОИЯИ (сайты Tier1 и Tier2). Грид-инфраструктура ОИЯИ представлена центром уровня Tier1 для эксперимента CMS на LHC и центром уровня Tier2 для обработки данных экспериментов NICA, LHC, BES, BIOMED, NOvA, ILC и др. Оба грид-сайта ОИЯИ обеспечивали 100%-ю доступность и надежность сервисов.

Система обработки данных Tier1 для CMS была увеличена согласно планам с 3600 до 20096 ядер, обеспечивая в настоящее время произво-



Сетевая инфраструктура ОИЯИ



Вклад мировых центров Tier1 в обработку экспериментальных данных CMS за 2017–2023 гг.: распределение по нормированному времени CPU в HS23 часах

дительность 32 382,54 HS06. Расширена система хранения. Общая полезная емкость дисковых серверов увеличена с 4 до 15 ПБ, ленточных библиотек IBM TS3500 и IBM TS4500 с 5,4 до 51 ПБ. По своей производительности Tier1 занимает одно из лидирующих мест среди других центров Tier1 для эксперимента CMS. С 2021 г. ресурсы центра Tier1 используются также для моделирования и обработки данных экспериментов NICA.

Вычислительные ресурсы центра Tier2 были по плану увеличены с 2470 до 10364 ядер, что обеспечивает производительность 66 788,4 HS06. Общая полезная емкость дисковых серверов составляет 5,6 ПБ. Сайт ОИЯИ Tier2 является лучшим в Российском консорциуме RDIG (Russian Data Intensive Grid — российский грид для интенсивных операций с данными). С 2017 по 2023 г. вклад Tier2 ОИЯИ в производительность RDIG увеличился с 42 до 90 %.

Распределенная система хранения EOS (так называемое «озеро данных») успешно интегрирована в структуру МИВК и используется для хранения и доступа к большим массивам информации. Для пользователей EOS доступно 23,3 ПБ дискового пространства. Участники экспериментов на NICA, Нейтринной программы и другие пользователи хранят данные на EOS согласно квотам [156].

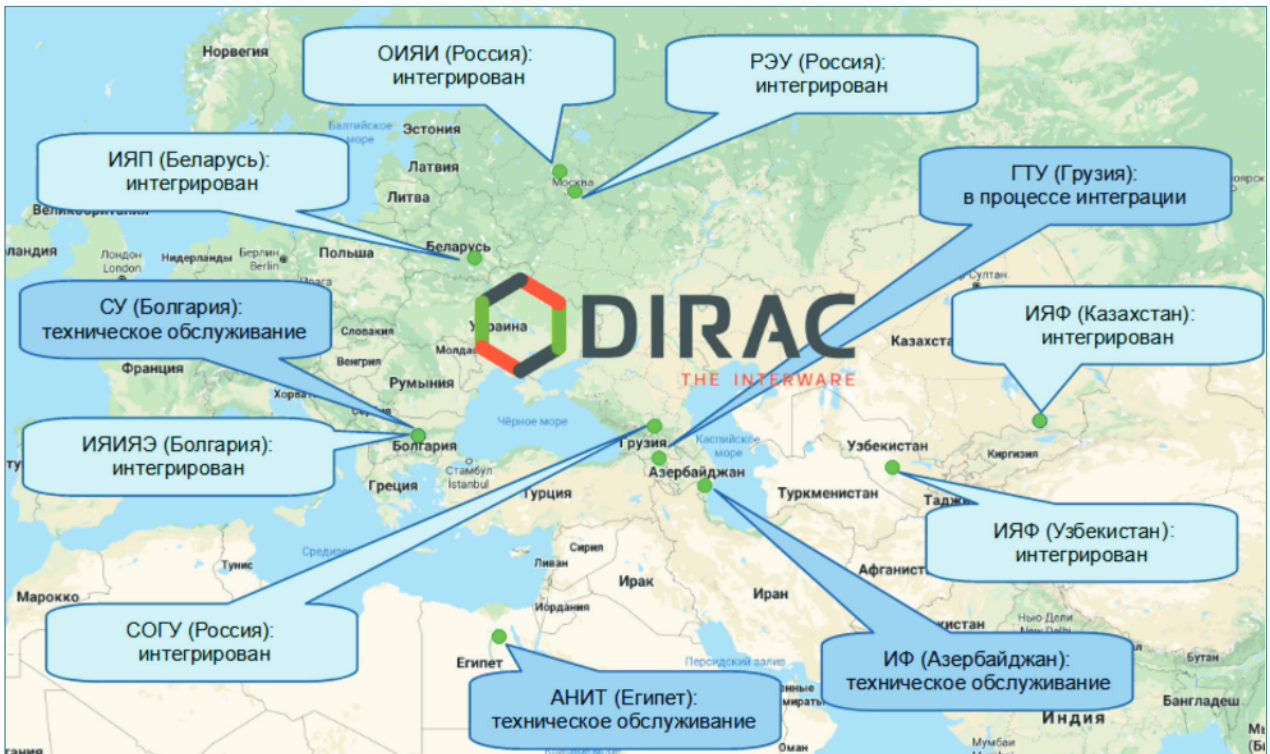
Облачная инфраструктура. Ресурсы облачной инфраструктуры были увеличены с 330 до 5152 ядер ЦПУ и с 840 ГБ до 61,5 ТБ общего объема ОЗУ. Общий объем дискового пространства в программно-определяемом хранилище на базе

серв увеличен до 4,3 ПБ. Расширение ресурсов облачной инфраструктуры было профинансировано в рамках экспериментов NOvA/DUNE, JUNO, Baikal-GVD (ЛЯП), научные группы которых являются основными пользователями облачной инфраструктуры.

За отчетный период активно велись работы по интеграции облачных структур стран-участниц ОИЯИ в распределенную платформу на основе DIRAC.

Выполнена интеграция облачных инфраструктур Института ядерной физики Казахстана, Научно-исследовательского института ядерных проблем Белорусского государственного университета, Российского экономического университета им. Г.В.Плеханова, Северо-Осетинского государственного университета им. К.Л.Хетагурова, Института ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук, Института ядерной физики Узбекистана, Института физики Национальной академии наук Азербайджана, Египетской академии научных исследований и технологий, Софийского университета им. святого Климента Охридского. Прорабатывается техническое решение для создания облачной инфраструктуры Грузинского технического университета. Во время пандемии коронавируса в 2020–2022 гг. свободные от основной деятельности ресурсы РИВС были задействованы для проведения исследований по изучению вируса SARS-CoV-2 в рамках платформы Folding@Home [157, 158].

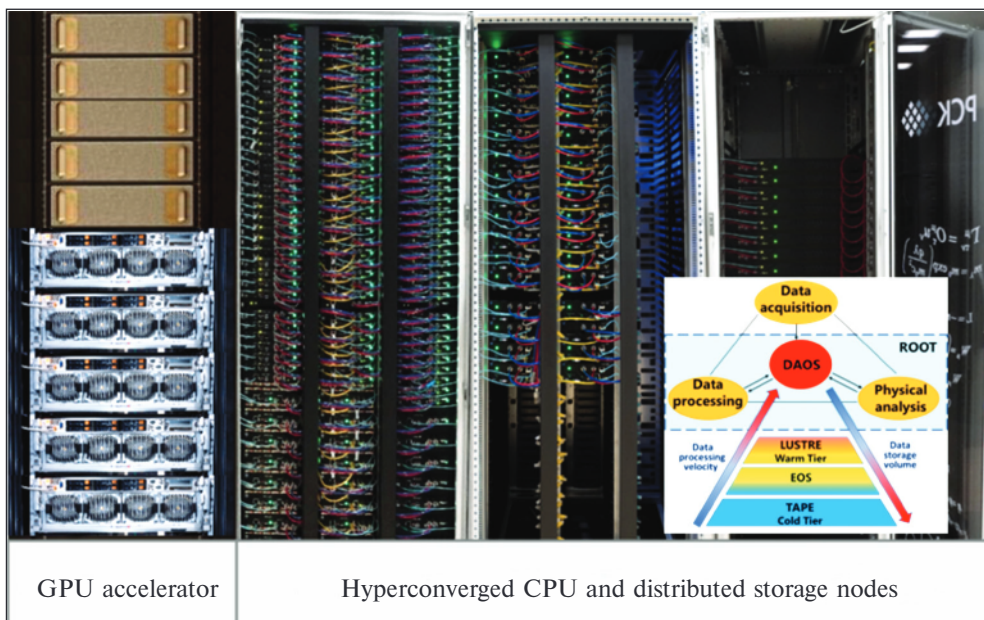
Гетерогенная инфраструктура. Суперкомпьютер «Говорун» был создан в 2018 г. на основе



Облака организаций, интегрированные в распределенную информационно-вычислительную среду (РИВС)

опыта, накопленного при эксплуатации гетерогенного кластера HybriLIT, входящего в состав МИВК ОИЯИ. HybriLIT показал свою востребованность при решении задач КХД на решетках, радиационной биологии, в прикладных исследованиях и др. Постоянный рост числа пользователей и расширение круга решаемых

задач потребовали не просто существенно нарастить вычислительные возможности кластера, а разработать и внедрить новые технологии, что привело к созданию новой вычислительной системы — суперкомпьютера (СК) «Говорун». СК «Говорун» создавался как высокопроизводительная масштабируемая система с жидкостным



GPU accelerator

Hyperconverged CPU and distributed storage nodes

Суперкомпьютер «Говорун»

охлаждением, обладающая гиперконвергентной и программно-определяемой архитектурой.

СК «Говорун» обладает уникальными свойствами по гибкости настройки под задачу пользователя, обеспечивая максимально эффективное использование вычислительных ресурсов суперкомпьютера. В состав СК «Говорун» входят GPU- и CPU-компоненты, а также иерархическая система обработки и хранения данных со скоростью чтения/записи 300 Гбит/с, что является крайне удобным инструментом для обработки больших массивов данных, в том числе для мегапроекта NICA. По скорости доступа к данным система хранения разделена на уровни: очень горячие данные — наиболее востребованные данные, к которым в настоящий момент требуется обеспечить самый быстрый доступ, горячие данные и теплые данные. Каждый уровень разработанной системы может использоваться как самостоятельно, так и в составе рабочих процессов обработки данных. За высокоскоростную систему обработки и хранения данных СК «Говорун» получил престижную премию Russian DC Awards 2020 в номинации «Лучшее IT-решение для центров обработки данных».

Общая производительность СК «Говорун» с момента его презентации выросла с 0,5 до 1,7 Пфлопс для операций с двойной точностью,

а общая емкость иерархического хранилища — с 288 ТБ до 8,6 ПБ.

В 2020 г. были завершены разработка и внедрение в платформу HybriLIT экосистемы для машинного/глубокого обучения и высокопроизводительных вычислений (Экосистема ML/DL/HPC), которая активно используется для создания алгоритмов на базе нейросетевых подходов для решения прикладных задач.

С 2021 г. на платформе HybriLIT интенсивно развивается информационно-вычислительная система (ИВС) для решения задач, связанных с расчетами электронных оболочек сверхтяжелых элементов. ИВС включает в себя вычислительные ресурсы СК «Говорун» и набор IT-решений и ПО, необходимых для моделирования электронных оболочек. На основе этой системы проводились интенсивные расчеты с использованием ПО AMS и DIRAC для изучения электронных свойств сверхтяжелых элементов. Также с целью разработки квантовых алгоритмов в ИВС был развернут полигон для квантовых вычислений с установленными симуляторами квантовых вычислений Cirq, Qiskit, PennyLane, способными работать на различных вычислительных архитектурах.

В конце 2021 г. на основе объединения суперкомпьютеров ОИЯИ, МСЦ РАН и СПбПУ была создана масштабируемая исследователь-

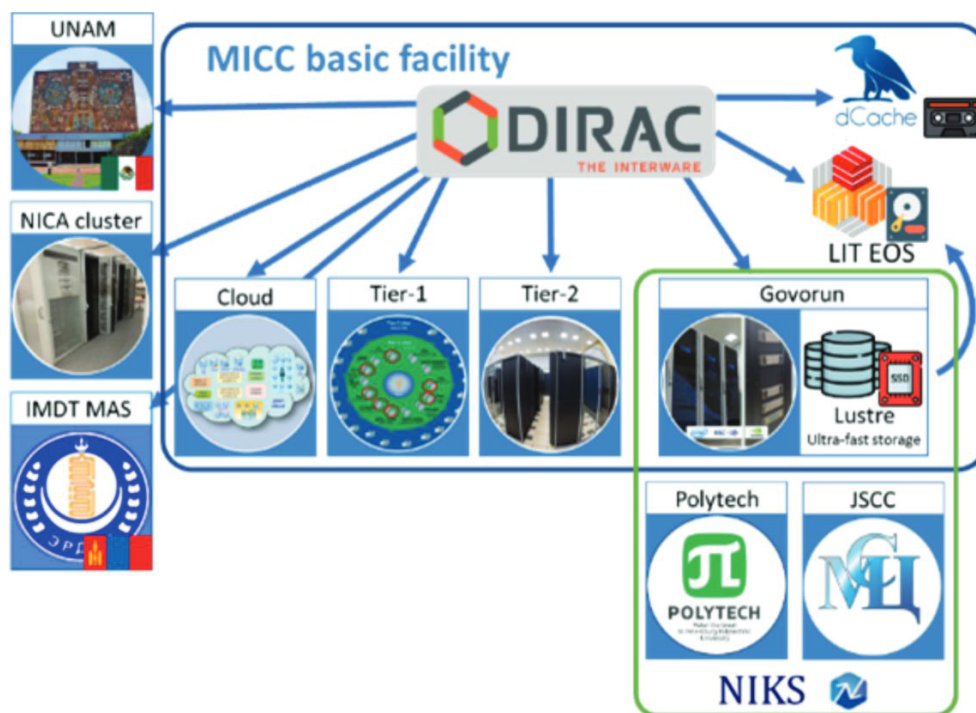


Схема интеграции географически распределенных гетерогенных ресурсов на основе DIRAC Interware

ская инфраструктура нового уровня. Она позволяет участникам расширять свои локальные вычислительные мощности, обеспечивать доступ к средствам хранения и обработки больших объемов данных, к распределенным хранилищам данных (датахабам), а также использовать мощности друг друга в случаях пиковых нагрузок. Такая инфраструктура востребована в том числе для задач мегасайенс-проекта NICA.

Ресурсы СК «Говорун» используются научными группами из всех лабораторий Института. Общее число пользователей СК «Говорун» к настоящему времени составляет 312 человек, из них 255 являются сотрудниками ОИЯИ, 57 — из стран-участниц. Доступ к ресурсам СК «Говорун» предоставляется только тем пользователям, которые принимают непосредственное участие в реализации ПТП ОИЯИ. Результаты, полученные с использованием ресурсов платформы HugiLIT, включая СК «Говорун», учебно-тестовый полигон и ML/DL/HPC экосистему [159–162], отражены более чем в 300 публикациях пользователей, при этом две из них — в журнале Nature Physics.

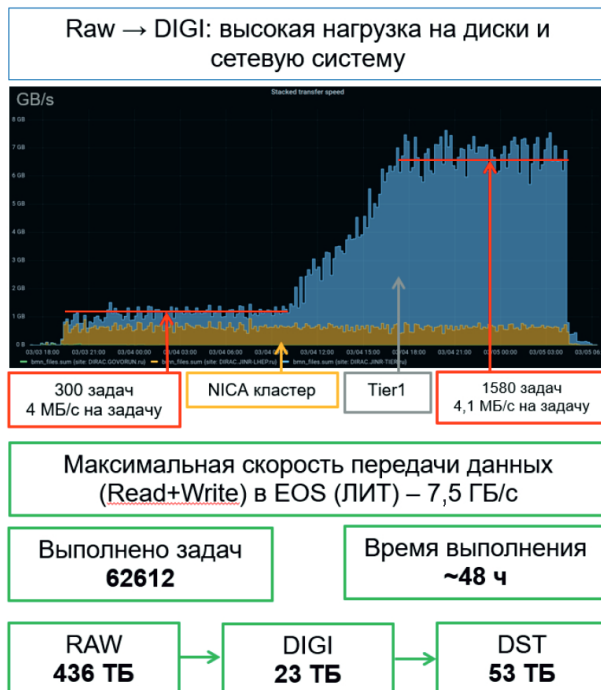
Интеграция вычислительных ресурсов. В рамках выполнения семилетнего плана с помощью промежуточного программного обеспечения Interware DIRAC (Distributed Infrastructure with Remote Agent Control) были объединены

вычислительные ресурсы Tier1/Tier2, суперкомпьютера «Говорун», облачных сред ОИЯИ и организаций его стран-участниц, кластера NICA, кластера Национального автономного университета Мексики (UNAM), кластера Института математики и цифровой технологии Монгольской академии наук (IMDT MAS), Национальной исследовательской компьютерной сети России и ресурсы хранения: dCache, EOS и сверхбыстрая система хранения данных Lustre.

Основными пользователями распределенной платформы являются научные группы экспериментов MPD, SPD, VM@N, Baikal-GVD. 8-й физический сеанс VM@N стал первым случаем в ОИЯИ, когда вся вычислительная инфраструктура, объединенная DIRAC, использовалась для полной реконструкции необработанных экспериментальных данных [163, 164].

Система мониторинга и аккаунтинга. Для обеспечения надежной работоспособности МИВК создана и расширяется многоуровневая система мониторинга и аккаунтинга, которая работает в режиме 24×365.

Система осуществляет более 16 000 проверок для более чем 1800 элементов, включенных в мониторинг. Разработанная комплексная система мониторинга МИВК позволяет получать информацию от различных компонентов вычислительного комплекса: инженерной инфраструктуры, сети, вычислительных узлов, систем запуска задач, элементов хранения данных, грид-сервисов, что гарантирует высокий уровень надежности МИВК [165].



Интенсивность обработки данных 8-го сеанса эксперимента VM@N с помощью DIRAC



Система мониторинга МИВК



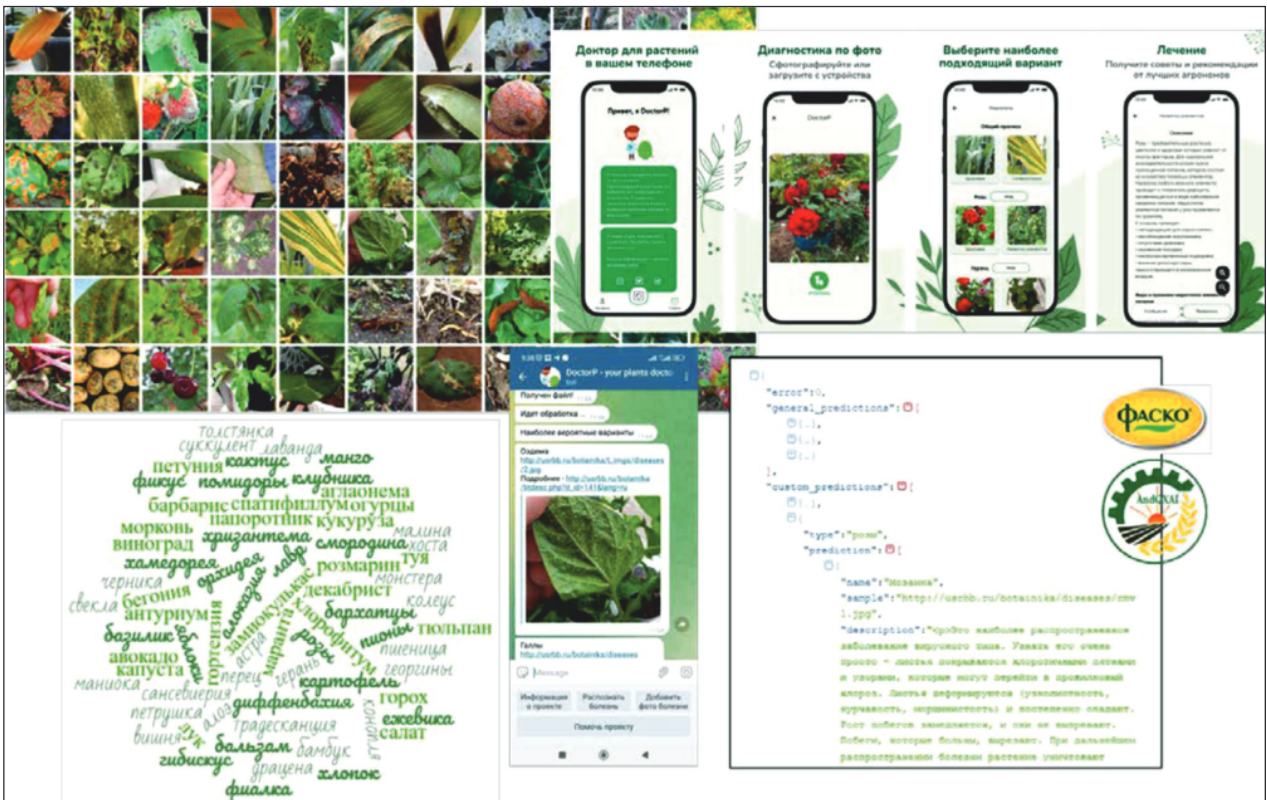
Интерфейс единой точки доступа Digital EcoSystem

Цифровая экосистема ОИЯИ. С 2022 г. ведутся работы по созданию платформы Digital EcoSystem JNR — «Цифровая экосистема ОИЯИ», основной целью которой является предоставление единой среды для создания и развития цифровых сервисов, их интеграции друг с другом, анализа информации о всех аспектах деятельности ОИЯИ. В цифровую экосистему входит широкий спектр сервисов — от ресурсов для пользователей базовых установок до оформления командировок, путевок, заказа справок и т.д. Основные группы сервисов — административные (зона ответственности Департамента развития цифровых сервисов ОИЯИ) и научные. Доступ к системе реализован на базе службы аутентификации JNR Single Sign-On (SSO) через единую точку доступа Digital EcoSystem [166].

Методы, алгоритмы и программное обеспечение для моделирования физических систем, математической обработки и анализа экспериментальных данных. Одним из важных направлений деятельности ЛИТ в рамках выполнения Семи-летнего плана также являлось обеспечение математической, алгоритмической и программной поддержки экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в ОИЯИ, во многих из которых важным средством для получения значимых научных результатов выступают вычислительные ресурсы. Ниже приведены некоторые из важных результатов.

Впервые удалось алгоритмизировать классическую проблему, поставленную выдающимся норвежским математиком Софусом Ли в 1883 г. и состоящую в проверке линеаризуемости точечными преобразованиями нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, разрешенных относительно старшей производной. Разработанный алгоритм позволяет не только установить, линеаризуемо ли заданное уравнение, но и получить систему дифференциальных уравнений для линеаризующего преобразования, решение которой дает явную форму такого преобразования. На мировом симпозиуме по символьным и алгебраическим преобразованиям (ISSAC-2017, Кайзерслаутерн, Германия, 25–28 июля 2017 г.) работа была признана лучшей из представленных на симпозиуме и удостоена приза Американской компьютерной ассоциации.

В апреле 2020 г. в Nature Physics была опубликована работа международной исследовательской группы, в которой, в рамках международного сотрудничества ОИЯИ, участвовали сотрудники ЛИТ (О. Чулуунбаатар) и ЛТФ (Ю. В. Попов). Было проведено кинематически полное экспериментальное измерение характеристик комptonовского рассеяния на свободных атомах с помощью высокоэффективного метода ионной импульсной спектроскопии с холодной мишенью (COLd Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy, COLTRIMS). Теоретическое опи-



Примеры интерфейсов платформы DoctorP

сание данного явления базируется на расчетах, проведенных на СК «Говорун».

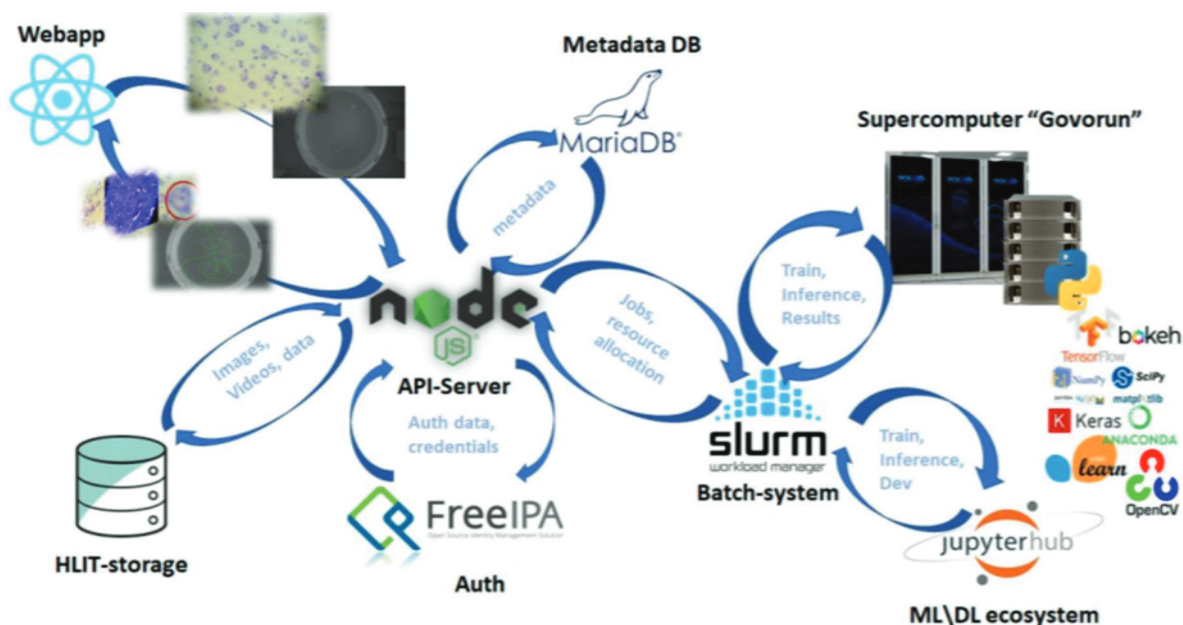
Разработана и опубликована в Библиотеке программ журнала СРС программа KANTBP 3.1 для расчета значений энергии, матриц отражения и прохождения и соответствующих волновых функций в подходе адиабатических связанных каналов. Преимуществом этой программы по сравнению с широко используемой программой CCFULL для расчета сечения реакций слияния и деления тяжелых ионов является тщательная обработка граничных условий для решения системы связанных уравнений Шредингера, что позволяет сохранить высокую точность расчетов, учитывающих большое количество связанных каналов. Теоретически полученные с помощью программы KANTBP 3.1 сечения хорошо описывают экспериментальные данные для различных реакций слияния и деления тяжелых ионов.

В ходе исследований, проводимых совместно с ЛНФ в рамках международной программы UNECE International Cooperative Program (ICP) Vegetation по мониторингу и прогнозированию процессов загрязнения воздуха в странах Европы и Азии, в ОИЯИ была разработана облачная платформа для управления данными мониторинга. Для обеспечения надежного хранения,

анализа, обработки и коллективного использования данных мониторинга были применены современные методы программного управления, статистики и машинного обучения, что позволило также использовать данные спутниковых изображений для прогнозирования атмосферного загрязнения некоторыми тяжелыми металлами в ряде европейских регионов.

Развиты платформа и мобильное приложение (DoctorP) для распознавания болезней растений и вредителей. Доступна как общая модель, способная распознавать 68 классов болезней, так и специализированные модели для 30 декоративных и сельскохозяйственных культур. В базе собрано свыше 6000 изображений. 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 агротехники (Узбекистан).

Разработана программно-аппаратная платформа на основе встраиваемых в контур управления квантовых нечетких регуляторов для решения задачи управления давлением и расхо-



Архитектура информационной системы для задач радиационной биологии

дом жидкого азота сверхпроводящих магнитов криогенной системы ускорительного комплекса NICA. Многоуровневая система управления включает существующий нижний исполнительный уровень, основанный на системе Tango Controls, и новый уровень, на котором управляющие воздействия формируются с помощью квантового нечеткого регулятора. При этом обеспечиваются оптимальные параметры качества управления, такие как температура, расход азота, быстродействие, требуемый уровень давления и минимальная сложность реализации управления. Экспериментально продемонстрированы работоспособность и эффективность разработанной интеллектуальной системы дистанционного управления технологическим процессом охлаждения сверхпроводящего магнита с гарантированным достижением устойчивой зоны сверхпроводимости. Проектирование квантовых нечетких регуляторов основано на квантовых информационных технологиях и осуществляется с помощью разработанного сотрудниками ЛИТ ОИЯИ программного инструментария QSCIT (Quantum Soft Computational Intelligence Toolkit).

С 2020 г. на базе экосистемы ML/DL/HPC развивается совместный проект ЛИТ и ЛРБ по созданию информационной системы (ИС) для анализа поведенческих и патоморфологических изменений в центральной нервной системе при исследовании воздействия ионизирующего излучения и других факторов на биологические

объекты. В разработанную систему внедрены алгоритмы обработки экспериментальных данных на основе методов машинного и глубокого обучения и компьютерного зрения. В ИС входят надежные современные средства аутентификации и иерархического разграничения доступа к данным, система хранения данных, а также компоненты удобной работы и визуализации результатов анализа данных.

В рамках экосистемы ML/DL/HPC на примере решения конкретной задачи по изучению динамики намагниченности в джоузефсоновском ϕ^0 -переходе представлена методика разработки программных модулей на базе JupyterHub, позволяющих не только проводить расчеты, но и визуализировать результаты исследования и сопровождать их необходимыми формулами и пояснениями. Разработаны параллельная реализация алгоритма для проведения расчетов при различных значениях параметров модели на основе Python-библиотеки Joblib, а также модули с интеграцией Matlab-кода в Jupyter Notebook, позволяющие эффективно проводить прикладные расчеты для анализа изображений.

В 2017–2023 гг. в рамках исследований, проводимых сотрудниками ЛИТ, опубликовано свыше 1300 научных работ, более 700 публикаций в рамках международных коллабораций, представлено около 800 докладов на международных и российских конференциях. Все проводимые исследования соответствуют заявленным в плане результатам [167–174].