

**Информационно-вычислительная инфраструктура ОИЯИ
(05-6-1118-2014/2023),
включая проект
Многофункциональный информационно-вычислительный
комплекс ЛИТ ОИЯИ**

(Письменный отчет)

Руководитель темы: Кореньков В.В. – korenkov@jinr.ru

Заместитель: Стриж Т.А. – strizh@jinr.ru

Апрель, 2023

Оглавление

Введение	3
Проект МИВК	5
Сетевая инфраструктура	5
Инженерная инфраструктура	9
Грид-среда ОИЯИ (сайты Tier1 и Tier2)	11
Облачная среда	15
Гетерогенная инфраструктура.....	18
Интеграция вычислительных ресурсов	22
Система мониторинга	24
Прикладные исследования на МИВК.....	25
Информационное и программное обеспечение научно-производственной деятельности ОИЯИ	27
Образовательная программа на учебно-тестовом полигоне.....	30
Конференции	31
Публикации	32

Введение

В 2020-2023 гг. Лабораторией информационных технологий им. М. Г. Мещерякова (ЛИТ) в рамках направления «Сети, компьютеринг, вычислительная физика» проводились исследования по теме первого приоритета: 05-6-1118-2014/2023 «Информационно-вычислительная инфраструктура ОИЯИ», основной целью которой являлось дальнейшее развитие сетевой и информационно-вычислительной инфраструктуры ОИЯИ для обеспечения научно-производственной деятельности Института и стран-участниц необходимыми средствами современных информационных технологий согласно 7-летнему плану развития ОИЯИ. Особым направлением в рамках темы является развитие **Многофункционального информационно-вычислительного комплекса ЛИТ ОИЯИ (МИВК)**, представленного в виде **Проекта**. Компьютерная инфраструктура ОИЯИ включает в себя ИТ-экосистему для проекта NICA (BM@N, MPD, SPD), в которую, благодаря грид-технологиям, включены все вычислительные компоненты и системы хранения МИВК: грид-сайт Tier1 для эксперимента CMS на LHC; Tier2/ЦИВК, обеспечивающий поддержку экспериментов на NICA (BM@N, MPD, SPD), LHC (ATLAS, ALICE, CMS) и других масштабных экспериментов, а также поддержку пользователей Лабораторий ОИЯИ и стран-участниц; интегрированную облачную среду стран-участниц для поддержки пользователей и экспериментов (NICA, ALICE, BESIII, NOvA, Baikal-GVD, Daya Bay, JUNO и т.д.); платформу HybriLIT с суперкомпьютером «Говорун» как основным ресурсом для суперкомпьютерных вычислений.

Проект МИВК нацелен на:

- Развитие сетевой и информационно-вычислительной инфраструктуры для обеспечения реализации 7-летнего плана развития ОИЯИ необходимыми средствами современных информационных технологий. Создание единого пространства существующих в ОИЯИ ресурсов: вычислительных, информационных и хранения данных.
- Развитие внешней и локальной сетевых инфраструктур, обеспечивающих возможность обмена данными между подразделениями института, государствами-членами ОИЯИ и сотрудничающими с ОИЯИ международными организациями; создание сетевой инфраструктуры для приема и передачи данных между установками BM@N, MPD, SPD и on/off-line кластерами мегапроекта NICA; поддержка и развитие общих сетевых сервисов, таких как электронная почта (e-Mail), управление именами (DNS), кэширование данных (Proxu), управление ресурсами (IPDB), мониторинг (NMIS), сервис единой авторизации (SSO), система информационной безопасности.
- Модернизацию и развитие инженерной инфраструктуры МИВК, включая системы электроснабжения и бесперебойного питания, системы кондиционирования и вентиляции, комплекса противопожарной безопасности в соответствии с ростом вычислительных мощностей и объемов хранилищ данных.
- Создание на базе МИВК off-line кластера в рамках развития компьютеринга для мегапроекта NICA, единой информационно-вычислительной платформы (среды) для реализации нейтринной программы ОИЯИ.
- Нарращивание вычислительных ресурсов и систем хранения данных:
 - грид-компоненты МИВК Tier1, Tier2/ЦИВК в соответствии с 7-летним планом развития ОИЯИ, что позволит обеспечить для всех коллабораций LHC на Tier1 и Tier2 в ОИЯИ необходимый уровень ресурсов.

– облачной компоненты МИВК с целью расширения спектра услуг, предоставляемых пользователям. Создание интегрированной облачной среды с облаками государств-членов ОИЯИ.

– суперкомпьютера "Говорун" для удовлетворения потребностей пользователей из ОИЯИ и стран-участниц вычислительными ресурсами для решения задач, связанными с высокопроизводительными вычислениями (НРС). Обеспечение пользователей современными IT-решениями и сервисами в области НРС.

– создание на базе систем хранения МИВК «озера данных» (Data Lake) ОИЯИ.

- Создание информационно-аналитической интеллектуальной системы мониторинга, позволяющей агрегировать информацию с разных уровней вычислительного центра: инженерной инфраструктуры, сети, вычислительных узлов, систем запуска задач, элементов хранения данных, грид-сервисов и др., что обеспечит высокий уровень надежности МИВК.

Также ключевыми вопросами темы являются:

— **Информационное и программное обеспечение научно-производственной деятельности ОИЯИ.**

Одной из важных задач темы являются сопровождение и дальнейшее развитие сервисов, относящихся к корпоративной информационной системе и призванных упростить и оптимизировать научную и административную деятельность Института. К таким сервисам относятся: система 1С; система управления проектом NICA (APT EVM); информационно-справочная система (ИСС); система электронного визирования, хранения и поиска документов основного делопроизводства ОИЯИ, а также документов УХОиКС и СМТС; информационная система управления научными событиями Indico; информационная система для хранения и управления данными о результатах научно-исследовательской деятельности сотрудников ОИЯИ (Personal Information System (PIN)); система управленческого учета (ADB2); система электронного документооборота ОИЯИ (СЭД ОИЯИ) и т.д.

— **Развитие системы подготовки и переподготовки IT-специалистов на базе МИВК ОИЯИ и его учебно-образовательных компонент.**

Данный раздел темы нацелен на создание специального полигона на базе МИВК для проведения учебных курсов по современным IT-технологиям, включая

- ✓ специальные курсы и тренинги по новейшим НРС-технологиям, технологиям и инструментарию для решения прикладных задач на основе методов машинного и глубокого обучения для сотрудников Института, студентов и молодых ученых из стран-участниц, в том числе в рамках практик, организуемых УНЦ, в рамках конференций и школ, организуемых ОИЯИ.
- ✓ специальные курсы и тренинги в странах-участницах ОИЯИ по программам международного сотрудничества.
- ✓ специализированные учебные курсы по подготовке IT-специалистов для решения задач, связанных с обработкой и анализом данных для экспериментов класса мегасайнс, в том числе для проекта NICA.
- ✓ школы по IT-технологиям для молодых ученых и специалистов.
- ✓ создание лаборатории интеллектуальной робототехники для разработки систем когнитивного управления и проведение лабораторного практикума по робототехнике.

Проект МИВК

Основные информационно-вычислительные ресурсы ОИЯИ сосредоточены в МИВК [1], который можно рассматривать как уникальную базовую установку ОИЯИ, играющую решающую роль в исследованиях, требующих современных вычислительных мощностей и систем хранения данных. Уникальность МИВК обеспечивается сочетанием всех современных информационных технологий: сетевой инфраструктуры с пропускной способностью до 4x100 Гбит/с, распределенных вычислений и систем хранения данных на основе грид-технологий и облачных вычислений, гиперконвергентной высокопроизводительной вычислительной инфраструктуры с жидкостным охлаждением для суперкомпьютерных приложений. Многофункциональность, высокая надежность и доступность для расчетов в режиме 24x7, масштабируемость и высокая производительность, надежная система хранения данных, информационная безопасность и развитая программная среда – основные требования, которым отвечает МИВК.

Развитие МИВК включало продолжение начатой в 2019 году обширной модернизации систем охлаждения и энергообеспечения МИВК, модернизацию и развитие вычислительных ресурсов и систем хранения данных МИВК, развитие ИТ-инфраструктуры мегасайенс проекта NICA, наращивание производительности грид-компонент – Tier1 и Tier2, наращивание облачной компоненты и создание интегрированной облачной среды для экспериментов ОИЯИ, расширение гетерогенной вычислительной платформы HybriLIT, включающей суперкомпьютер (СК) «Говорун».

Продолжилось активное использование ресурсов МИВК для научно-исследовательских и прикладных задач ОИЯИ. Благодаря использованию грид-технологий (DIRAC Interware), объединивших выделенные вычислительные ресурсы всех компонентов МИВК, успешно проходили сеансы моделирования для эксперимента MPD комплекса NICA. Грид-сайт Tier1 для эксперимента CMS на LHC продолжил занимать лидирующее место среди аналогичных мировых сайтов. Tier2/ЦИВК обеспечивал обработку 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 по нейтринной программе ОИЯИ. Платформа HybriLIT, в состав которой входит основной ресурс для высокопроизводительных вычислений – суперкомпьютер «Говорун» – и учебно-тестовый полигон, активно использовалась зарегистрированными пользователями.

Ниже приведена более подробная информация о результатах, полученных в ходе выполнения Проекта МИВК за 2020-2023 гг.

Сетевая инфраструктура

За отчетный период проведена существенная модернизация сетевой инфраструктуры ОИЯИ, являющейся важнейшей компонентой ИТ-инфраструктуры ОИЯИ и МИВК. Это сложный комплекс многофункционального сетевого оборудования и специализированного программного обеспечения (ПО). Она является фундаментом для созданной и продолжающей постоянно развиваться информационно-вычислительной инфраструктуры ОИЯИ, обеспечивая доступ в Интернет, к вычислительным ресурсам, системам хранения данных как внутри ОИЯИ, так и во внешних научных организациях, сотрудничающих с ОИЯИ. Сетевая инфраструктура ОИЯИ состоит из следующих

функциональных частей: внешнего оптического телекоммуникационного канала передачи данных ОИЯИ-Москва, опорной магистрали локальной компьютерной сети ОИЯИ, локальных компьютерных сетей подразделений Института.

Реализован проект увеличения пропускной способности телекоммуникационного канала Москва – ОИЯИ со 100 Гбит/с до 4x100 Гбит/с, пропускная способность опорной магистрали локальной вычислительной сети Института увеличена до 2x100 Гбит/с, и построена распределенная вычислительная кластерная сеть между площадками ЛЯП и ЛФВЭ емкостью 400 Гбит/с с двойным резервированием для повышения надежности оптической транспортной магистрали.

В настоящий момент внешняя распределенная сеть ОИЯИ (рис. 1) представлена прямым каналом связи ОИЯИ – ЦЕРН с пропускной способностью 100 Гбит/с и резервным каналом 100 Гбит/с, проходящим через Москву и Амстердам, обеспечивающими функционирование сети LHCOPN для связи центров Tier0 (ЦЕРН) и Tier1 (ОИЯИ) и внешней наложенной сети LHCONE, предназначенной для центра Tier2 ОИЯИ, для связи с использованием технологии RU-VRF в сотрудничестве с RUHEP, сетями Национальной исследовательской компьютерной сети России и RetN [2-3]. Реализована маршрутизация IPv6 для сайтов Tier1 и Tier2. В 2021 году DWDM (Dense Wave Division Multiplexing) оборудование фирмы Nortel на трассе ВОЛС ГПКС (Дубна, Радищево, Москва) заменено на новое DWDM-оборудование фирмы Infinera, что позволило расширить пропускную способность всех каналов Дубна – Москва.

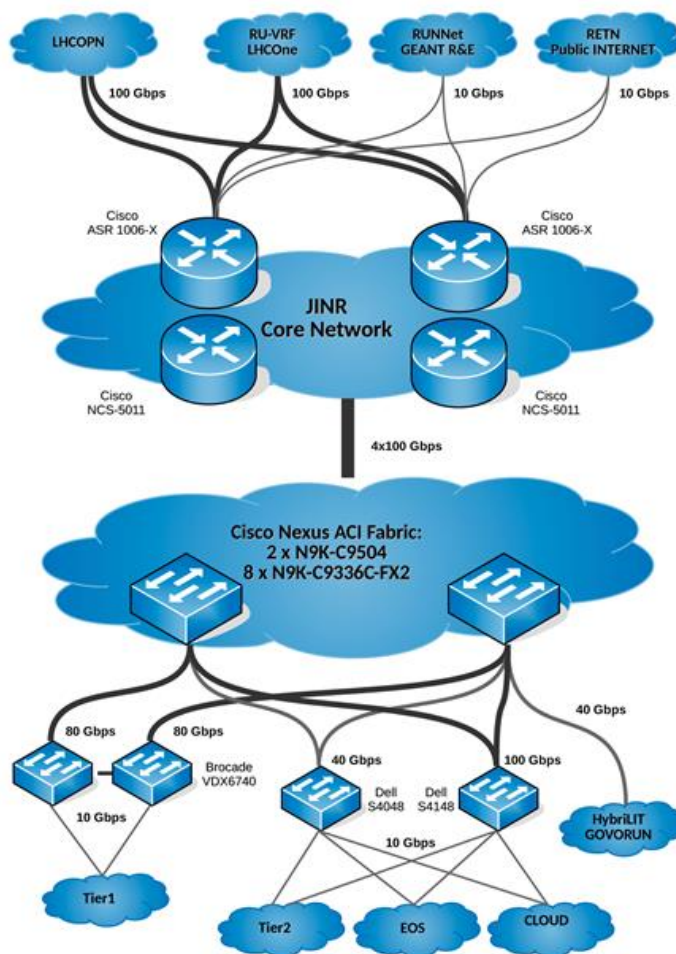


Рис. 1. Схема внешней распределенной сети ОИЯИ

Распределение входящего и исходящего трафика по подразделениям ОИЯИ в 2020-2022 гг. (превышающего по входящему трафику 25 Тб) приведено в табл.1.

Таблица 1.

Подразделение	2020		2021		2022	
	Вход., ТБ	Исход., ТБ	Вход., ТБ	Исход., ТБ	Вход., ТБ	Исход., ТБ
Лаборатория ядерных проблем	425,84	271,81	941,9	158,27	229,59	113,38
Лаборатория физики высоких энергий	208,03	130,76	280,18	160,98	430,2	209,23
Лаборатория нейтронной физики	97,7	130,15	106,46	69,34	137,05	42,05
Лаборатория информационных технологий	93,26	87,99	325,56	449,63	330,76	204,99
Гостинично-ресторанный комплекс	87,04	27,71	171,74	33,52	413,24	60,25
Университет «Дубна»	86,97	51,16	129,73	41,08	139,03	39,38
Лаборатория ядерных реакций	81,98	70,52	108,59	48,07	137,7	32,69
Узел удалённого доступа	63,91	10,89	77,75	10,44	84,88	11,84
Управление	56,09	90,55	76,42	76,51	27,63	2,94
Учебно-научный центр	31,4	10,59	29,83	6,35	84,88	11,84
Лаборатория теоретической физики	24,39	27,85	26,22	21,64	35,57	15,96

Общий входящий трафик ОИЯИ, включая сервера общего назначения, Tier1, Tier2 и вычислительный комплекс, СК «Говорун» и облачные вычисления, составил в 2020 г. – 29,91 ПБ, в 2021 г. – 33,23 ПБ, в 2022 г. – 29,56 ПБ; общий исходящий трафик в 2020 г. – 36,94 ПБ, в 2021 г. – 35,86 ПБ, в 2022 г. – 34,19 ПБ. Основным является трафик с Научно-образовательными сетями.

Локальная вычислительная сеть (ЛВС) базируется на магистральной опорной сети ОИЯИ с пропускной способностью 2x100 Гбит/с и распределенной многоузловой кластерной сети между площадками ЛЯП и ЛФВЭ (4x100 Гбит/с).

Внутренняя сеть МИВК имеет сегмент Tier1, построенный на фабрике Brocade, с пропускной способностью 80 Гбит/с. Сетевые сегменты системы хранения данных EOS, Tier2, облачных вычислений и суперкомпьютера «Говорун» построены на оборудовании Dell и Cisco. Порты 10 Гбит/с и 100 Гбит/с используются для подключения серверных компонентов к коммутаторам сетевого ядра МИВК, построенного на коммутаторах Cisco Nexus 9504 и Nexus 9336C с пропускной способностью портов N x 100 Гбит/с.

Внутренняя сеть суперкомпьютера «Говорун» состоит из трех основных частей: сети связи и транспорта, сети управления и мониторинга, сети управления задачами. Коммуникационная и транспортная сеть использует технологию Intel OmniPath 100 Гбит/с. Сеть построена по топологии «толстого дерева» на основе 48-портовых коммутаторов Intel OmniPath Edge серии 100 с полным жидкостным охлаждением. Сеть управления и

мониторинга позволяет объединить все вычислительные узлы и узел управления в единую сеть Fast Ethernet. Эта сеть построена с использованием коммутаторов Fast Ethernet HP 2530-48. Сеть управления заданиями соединяет все вычислительные узлы и узел управления в единую гигабитную сеть Ethernet. Сеть управления заданиями построена с использованием коммутаторов HPE Aruba 2530 48G.

Продолжены работы по развитию и совершенствованию сетевых компонент ИТ-инфраструктуры ОИЯИ. Введена в эксплуатацию фабрика Cisco ACI на базе оборудования Cisco Nexus 9504 и Cisco Nexus C9336C-FX2, позволяющая подключать компоненты МИВК на скоростях 100 Гбит/с и более. Сеть распределённого хранения EOS и сеть «Облачные вычисления» подключены к внешней сети RU-VRF/LHCONE. Ввод в эксплуатацию 4-го модуля в зале МИВК и его наполнение вычислительными ресурсами сопровождалось работами по настройке и подключению центральных и стоечных коммутаторов.

Продолжена модернизация сетевого кластера виртуальных сервисов сетевой службы ОИЯИ (NOC – Network Operation Center), который построен на базе открытого ПО Proxmox VE под лицензией GNU. Такой подход позволил использовать центральный кластер NOC в непрерывном режиме работы 24x7. Архитектурное решение обеспечивает организацию безостановочной работы при обновлениях как программной, так и аппаратной компонент сетевого кластера. Особо следует отметить, что виртуальные машины, работающие в центральном кластере, обслуживают все важнейшие элементы сети ОИЯИ. Кластер NOC обеспечивает работу служб NOC и ОИЯИ, таких как: DNS (система доменных имен), DHCP (протокол динамической конфигурации хоста), SMTP (простой протокол передачи почты), SNMP (простой протокол управления сетью), SSO (единый вход), регистрация (пользователи), авторизация (устройства), аутентификация (пользователи), коммутация, маршрутизация, безопасность, видеоконференцсвязь, VoIP (передача голоса по интернет-протоколу), IPDB (база данных интернет-протокола), веб-почта, maillist, ssl, сервера БД, виртуальный хостинг, мониторинг nmis, sshgate, централизованный сбор логов, телефония sip и другие.

Сетевая служба регулярно обновляет ПО на 15-20 серверах (webmail.jinr.ru, indico.jinr.ru, mail.jinr.ru, aillist.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.

Планомерно осуществлялись работы по усовершенствованию почтового сервиса mail.jinr.ru: внедрено новое программное обеспечение (Proxmox Mail Gateway), значительно сократившее количество нежелательных сообщений – спама – за счет обучения системы механизмам спам-фильтрации, подготовлен и введен в эксплуатацию новый гипервизор, разработаны скрипты, создан новый сервер adm-mail.jinr.ru для «холодной» копии mail.jinr.ru. Осуществлялась поддержка сервисов почтовых рассылок (maillist.jinr.ru), «личный кабинет», News, VPN, eduroam, Elibs, IPDB.

В 2022 году зарегистрирована зона jinr.int, почтовый сервер mail.jinr.ru адаптирован для работы с зоной jinr.int

В систему единой авторизации SSO добавлены постоянный мониторинг доступности и журналирование входов в сетевые сеансы. Добавлены возможность редактирования LDAP записей для работы во внешних сервисах и возможность регистрации не сотрудников ОИЯИ. Увеличен охват WiFi сети eduroam на территории ОИЯИ.

Расширена функциональность системы анализа сетевого трафика с помощью

написанных новых скриптов, помогающих выявлять зараженные и взломанные пользовательские компьютеры. С марта 2022 года обеспечивается усиленный режим защиты сети. Выявлено и отработано более 80 инцидентов, связанных со взломами ресурсов сети ОИЯИ, нарушениями авторских прав и т.д. В рамках сотрудничества со сторонними научными организациями обеспечен VPN-доступ в сеть более чем для 110 пользователей вычислительных ресурсов. Обеспечена система мониторинга и отслеживания состояния более чем 770 элементов сети. Введен в эксплуатацию сервис удаленного доступа sshgate. Для веб-сайтов, открываемых на доступ извне, выполняется обязательная проверка на уязвимости.

В настоящее время ЛВС ОИЯИ содержит 9291 сетевой элемент и 18044 IP-адреса, 6355 пользователей, 4477 адресов электронной почты @jinr.ru, 1455 пользователей электронных библиотек, 837 пользователей сервиса удалённого доступа и 111 пользователей сервиса EDUROAM.

Инженерная инфраструктура

Продолжены работы по совершенствованию инженерной инфраструктуры МИВК, предназначенной для обеспечения надежной, бесперебойной и отказоустойчивой работы информационно-вычислительной системы и сетевой инфраструктуры. Использование комплексного подхода к построению инженерной инфраструктуры МИВК позволило разработать алгоритмы работы оборудования и взаимодействия отдельных систем как в нормальном режиме работы, так и в аварийных ситуациях, что обеспечило бесперебойную работу независимо от внешних факторов. Система гарантированного электропитания обеспечивает гарантированное электропитание подключенных потребителей, автоматический запуск дизель-генераторных установок (ДГУ), автоматическое переключение нагрузки с основной внешней сети электропитания на ДГУ и обратно, отправку сообщений на пост диспетчера в случае возникновения чрезвычайной ситуации с ДГУ.

Вычислительные мощности МИВК размещены в одном вычислительном зале площадью 800 м² на 2-ом этаже корпуса ЛИТ. В настоящее время он состоит из восьми отдельных модулей с вычислительным оборудованием (рис. 2) общей допустимой мощностью 2 МВт:

- Модули 1 и 2: 22,55 м² каждый, 33 серверные стойки с мощностью 20 кВт на стойку;
- Модуль Tier1: площадь 29,33 м², 16 серверных стоек с мощностью 35 кВт на стойку;
- Пространство библиотеки магнитных лент: площадь 13 м², две роботизированные ленточные библиотеки IBM TS3500 и IBM TS4500 общей емкостью 50,6 ПБ;
- СК «Говорун»: площадь 1,97 м², 4 стойки, мощность 100 кВт на стойку;
- Модуль, в котором размещаются критически важные сервера стандартного типа бизнес-вычислений (административные системы, базы данных и т.д.);
- Модуль 4: площадь 36,12 м², 20 серверных стоек с мощностью 35 кВт на стойку;
- Модуль сетевого оборудования, в котором размещаются основные сетевые сервисы для МИВК, локальной и глобальной сетей.

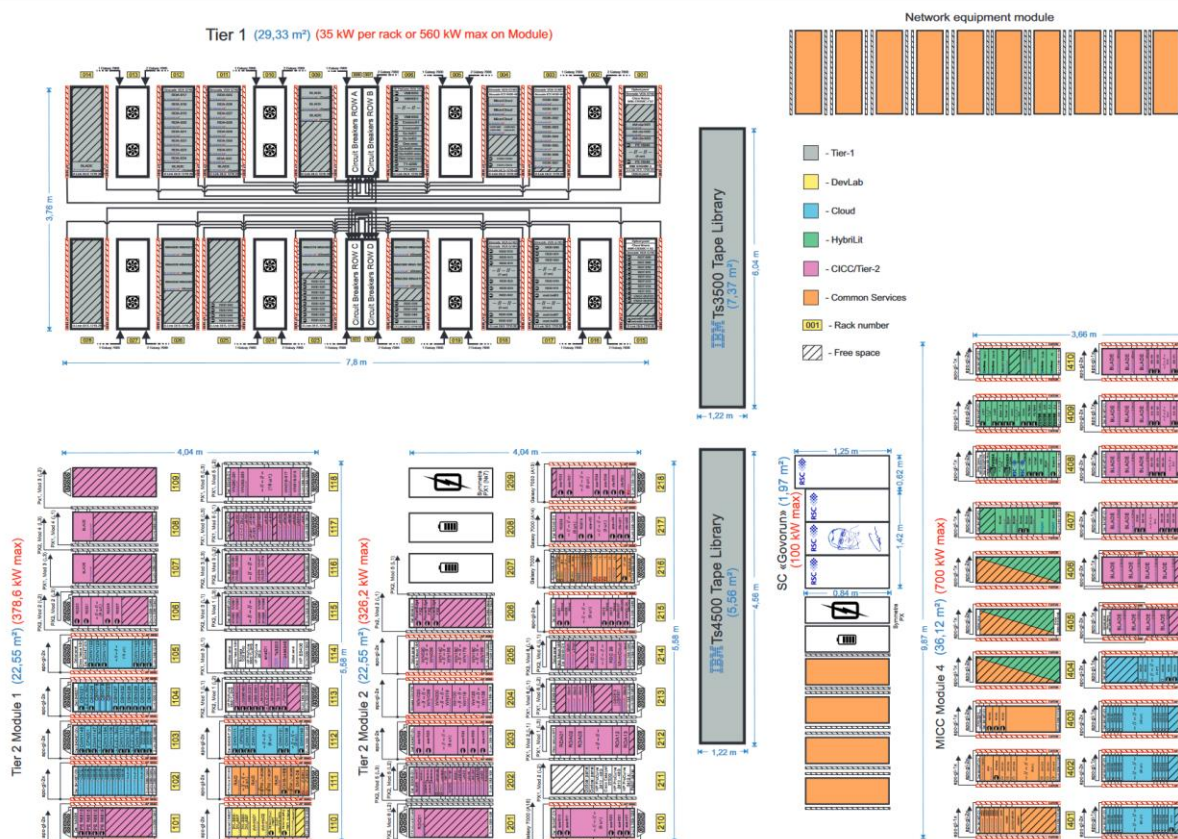


Рис. 2. Расположение устройств в серверном зале МИВК

Все стойки обеспечены питанием от источников бесперебойного питания с автономностью 10–15 мин. Стойки оснащены интеллектуальными (переключаемыми и дозируемыми) устройствами распределения электроэнергии, которые позволяют осуществлять детальный мониторинг потребления электроэнергии. В эксплуатации находятся два резервных дизельных генератора для критически важных служб.

Существующая система климатического контроля МИВК представляет собой комплекс взаимосвязанного оборудования для различных схем воздушного и жидкостного охлаждения, с помощью которых создается соответствующий температурный режим, обеспечивающий работу МИВК в режиме 24x365. Модуль Tier1 и модуль 4 имеют воздушное охлаждение с помощью встроенных межрядных кондиционеров, расположенных между серверными стойками. Модули 1 и 2 имеют воздушное охлаждение, и холодный воздух подается через большие воздуховоды под фальшполом, где он рассеивается через перфорированную плитку пола в холодные коридоры. Суперкомпьютер «Говорун» полностью охлаждается «горячей» водой, что обеспечивает плотность мощности 100 кВт на стойку и PUE = 1,06. По типу отвода тепла система климат-контроля МИВК относится к смешанному типу, который сочетает в себе системы с испарением хладагента и системы с промежуточным хладагентом.

Все технологическое оборудование, обеспечивающее как гарантированное энергоснабжение МИВК, так и системы охлаждения, расположено на первом и цокольном этажах здания. На территории, прилегающей к зданию ЛИТ, расположены только чиллеры, сухие градирни и дизель-генераторы.

Для контроля и учета оборудования зала МИВК введена в эксплуатацию система DCIM (Data Center Infrastructure Management). Это программное обеспечение позволяет

визуализировать и управлять физической инфраструктурой МИВК на основе данных об оборудовании и его расположении, занесенных в базу данных DCIM, предоставлять сервисы управления и мониторинга. На рис. 3 приведены примеры визуализации оборудования.

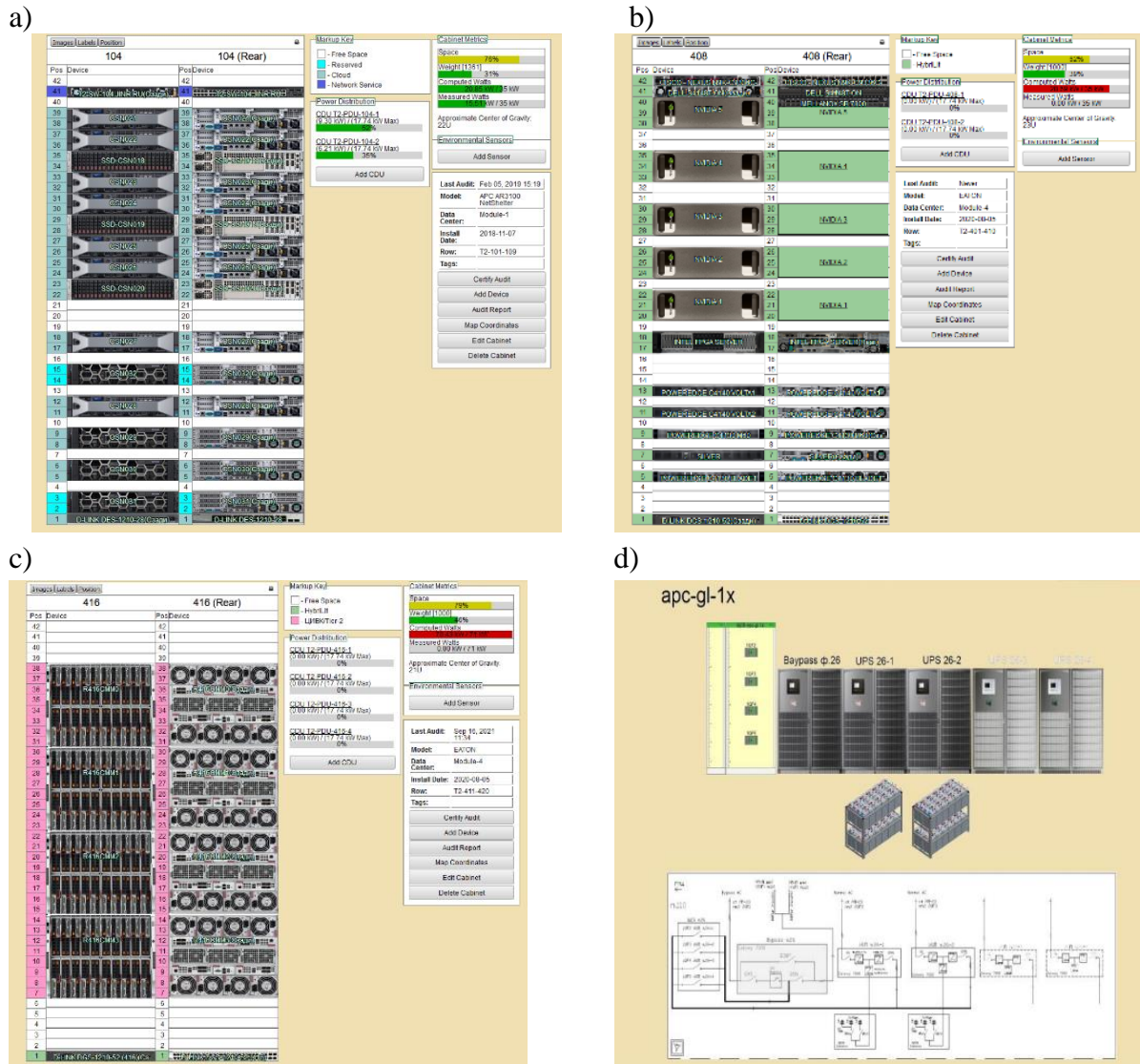


Рис. 3. Примеры системы визуализации оборудования в стойках 104 (а), 403 (б) и 416 (с) зала МИВК и системы источников бесперебойного питания (д)

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 с экспериментов NICA, LHC, BES, BIOMED, NOvA, ILC и др [4]. Оба грид-сайта ОИЯИ обеспечивают 100% доступность и надёжность сервисов.

На протяжении многих лет ресурсный центр первого уровня Tier1 использовался только для выполнения заданий эксперимента CMS на LHC в рамках участия ОИЯИ и стран-участниц в этом эксперименте. С 2021 года внедрение платформы DIRAC позволило использовать выделенные ресурсы этого центра для задач моделирования эксперимента MPD проекта NICA. Количество выделенных ресурсов регулируется запросами от коллаборации MPD.

За отчетный период система обработки данных Tier1 была увеличена до 20096 ядер, обеспечивая производительность 323820.54 HEP-SPEC06. Используемое ПО и компиляторы: CentOS Scientific Linux версии 7.9, gcc (GCC) 4.8.5, gcc-11.2.1, gcc-c++-11.2.1, gcc-gfortran-11.2.1, C++ (g++ (GCC) 4.8.5, GNU Fortran (GCC) 4.8.5, DCACHE-6.2 для хранения данных, Enstore 6.3 для ленточных библиотек и FTS. Общая полезная ёмкость дисковых серверов увеличена до 14 ПБ. В 2020 году введена в строй новая ленточная библиотека IBM TS4500 общим объёмом 40 ПБ. К настоящему моменту система долговременного хранения данных состоит из библиотек IBM TS3500 и IBM TS4500 общим объёмом 50,6 ПБ и ориентирована на обслуживание экспериментов NICA и CMS. ПО для NICA устанавливается в CVMFS с помощью GitLab самими пользователями/разработчиками ПО.

В 2020 году на Tier1 был осуществлен переход, связанный, с одной стороны, с окончанием поддержки программного обеспечения, используемого для вычислительных элементов – CREAM-CE, системы пакетной обработки заданий Torque и планировщика Maui, и, с другой стороны, с тем, что старое ПО и системы не справлялись с повышенной нагрузкой и большим количеством счётных машин. Для замены CREAM-CE был выбран ARC-CE (Advanced Resource Connector-Computing Element), который широко используется в WLCG (Worldwide LHC Computing Grid). В качестве менеджера ресурсов выбран SLURM – высокомасштабируемый отказоустойчивый менеджер кластеров и планировщик заданий для больших кластеров с открытым кодом. Он позволяет осуществлять гибкое планирование с приоритетами, справедливое распределение ресурсов между разными пользователями и оптимизацию использования счётных ресурсов. SLURM также используется на СК «Говорун».

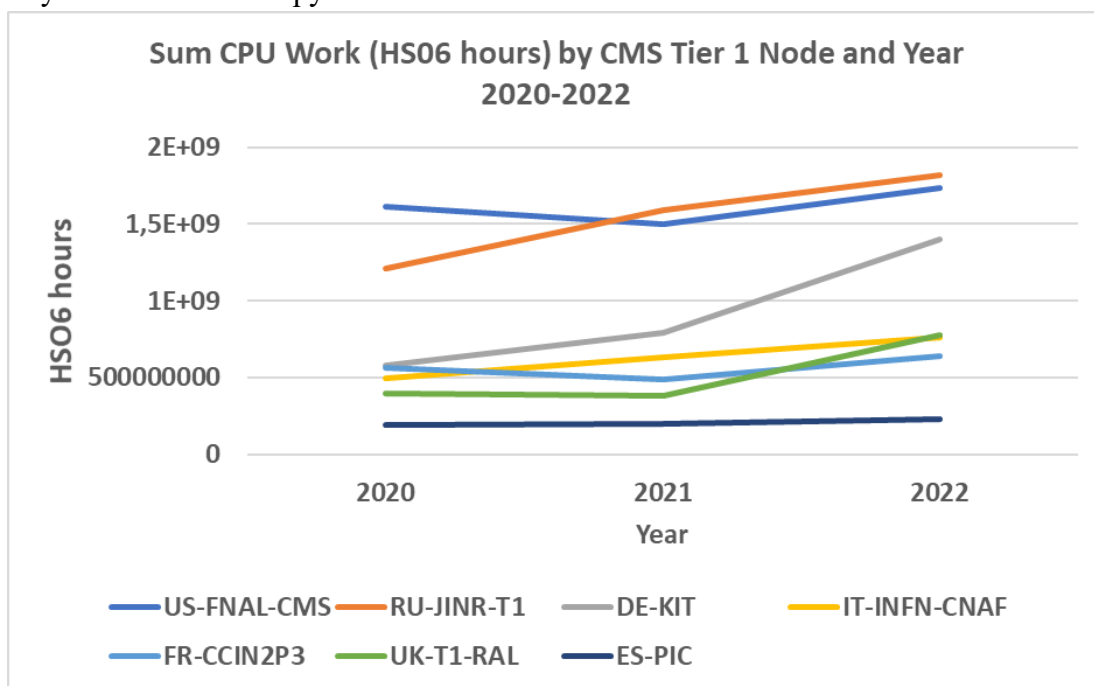


Рис. 4. Распределение по нормированному времени ЦПУ в HS06 часах для мировых Tier1 центров по обработке экспериментальных данных CMS за 2020-2022 гг.

Центр уровня Tier1 для CMS в ОИЯИ продемонстрировал стабильную работу в течение всего отчетного периода и с 2021 года по производительности занимает первое место среди других центров Tier1 для эксперимента CMS в мире (рис. 4). За 2020-2022 гг.

обработано более 890 миллионов событий, что составляет 19,6% от общего числа обработанных событий и 19,1% от общей загрузки ЦПУ всех Tier1 центров для эксперимента CMS (рис. 5).

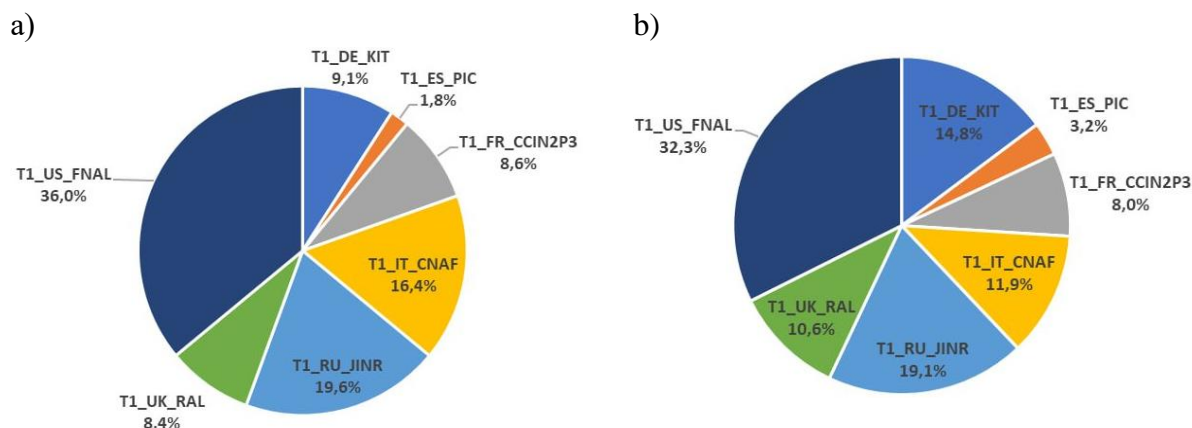


Рис. 5. Вклад мировых Tier1 центров в обработку экспериментальных данных CMS за 2020-2022 гг.: а) количество обработанных событий; б) распределение по нормированному времени ЦПУ

Вычислительные ресурсы центра Tier2 в 2020-2023 гг. были расширены до 9244 ядер, что в настоящее время обеспечивает производительность 149 938,7 HEP-SPEC06. Общая полезная ёмкость дисковых серверов составляет 4763 ТБ для ATLAS, CMS и ALICE и 140 ТБ для других виртуальных организаций. Сайт ОИЯИ Tier2 является лучшим в Российском консорциуме «Российский Грид для интенсивных операций с данными» (Russian Data Intensive Grid – RDIG). На рис. 6 приведено распределение по нормированному времени ЦПУ в HS06 часах для грид-сайтов RDIG. Более 75% общего процессорного времени в RDIG используется для вычислений на нашем сайте.

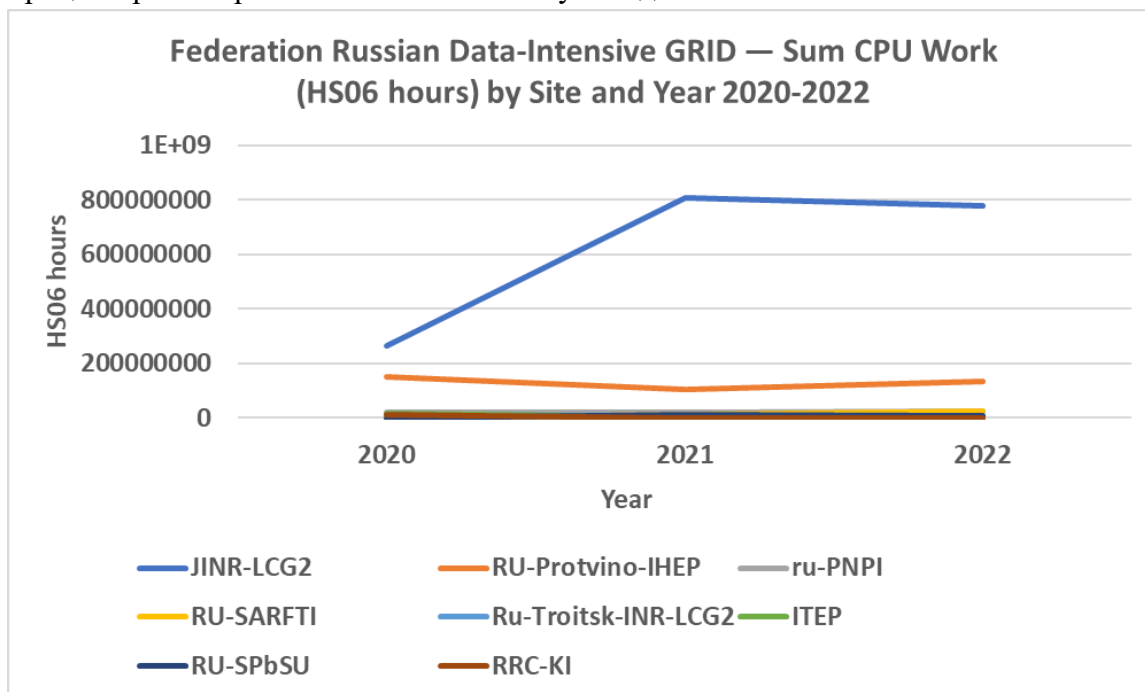


Рис. 6. Распределение по нормированному времени ЦПУ в HS06 часах для грид-сайтов RDIG

МИВК обеспечивает проведение пользователями вычислений вне рамок грид-среды. Это необходимо как некоторым экспериментам, так и локальным пользователям из Лабораторий ОИЯИ. Все вычислительные мощности доступны пользователям ОИЯИ и пользователям грид-среды через единую систему пакетной обработки заданий.

В отчетный период была расширена система хранения данных на базе ПО EOS. В настоящее время для пользователей EOS доступно 17 ПБ дискового пространства. EOS видна как локальная файловая система на рабочих узлах МИВК и позволяет авторизованным пользователям (по протоколу kerberos5) читать и записывать данные. На рис. 7 представлена статистика использования системы EOS в 2022 году.

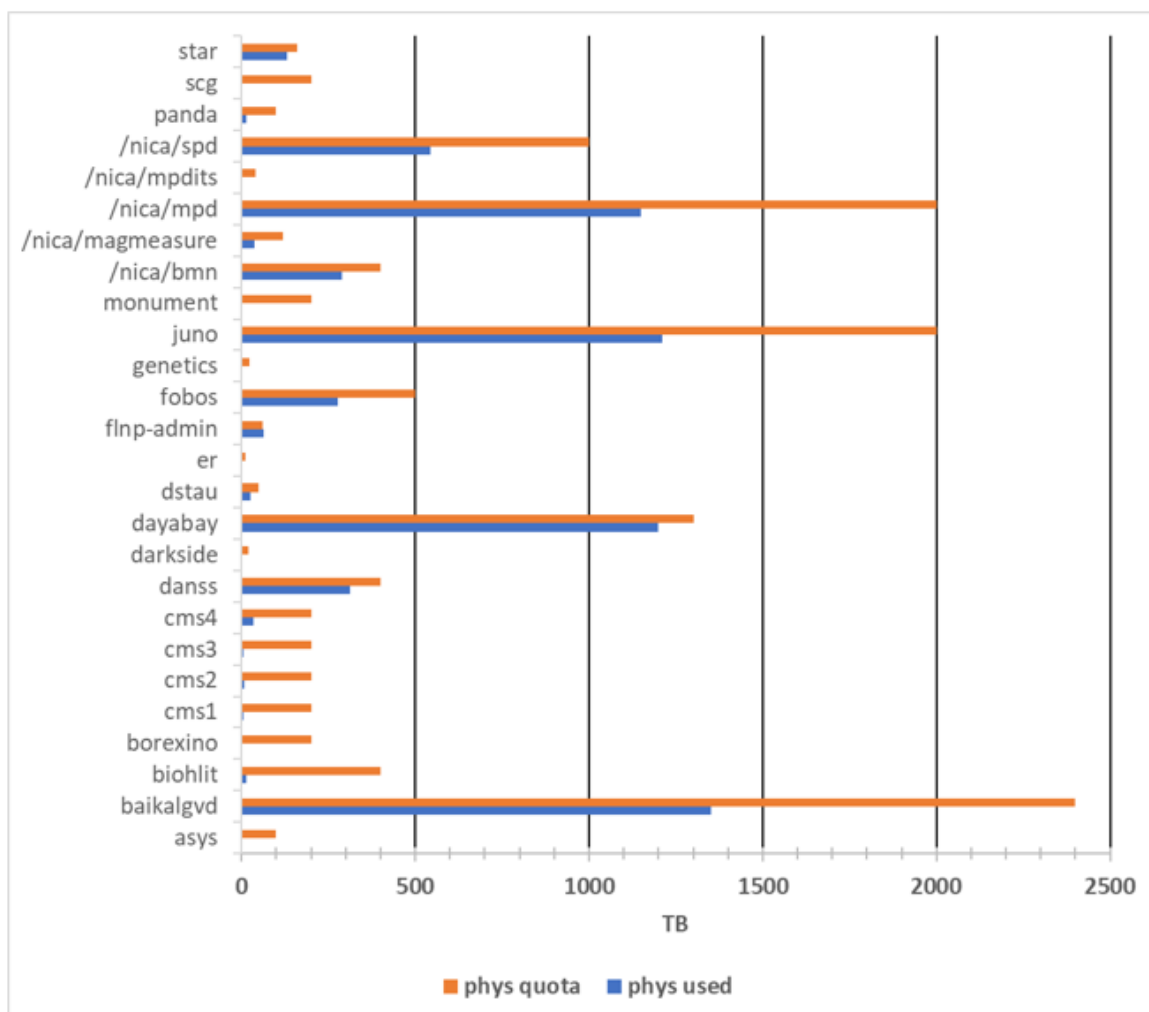


Рис. 7. Статистика использования системы EOS группами пользователей и экспериментами в 2022 году

Стабильная и эффективная работа Tier1, Tier2, систем хранения и необходимый уровень кибербезопасности кластеров обеспечивались систематическим обновлением микропрограммного обеспечения компонентов серверов, версии ядра операционной системы, микропрограммного обеспечения сервисных модулей серверов IDRAC/IPMI.

Для централизованного и своевременного технического обслуживания программного обеспечения и быстрого внедрения новых вычислительных узлов была создана служба управления жизненным циклом (LMS); ее целью является автоматизация процесса, связанного с обслуживанием программного обеспечения и вводом в эксплуатацию новых вычислительных ресурсов [5].

Облачная среда

Продолжены работы по расширению облачной среды ОИЯИ и по объединению счётных мощностей организаций стран-участниц Института в единую информационно-вычислительную среду [6].

Ресурсы облачной инфраструктуры были расширены за счёт вклада эксперимента NOvA (480 ядер ЦПУ, 2,88 ТБ ОЗУ) и ввода в эксплуатацию 2880 ядер ЦПУ с 46,08 ТБ ОЗУ, приобретённых экспериментом JUNO.

В 2021 году в дополнение к хранилищу на базе серh общего назначения с общей полной емкостью 1,1 ПБ были развернуты два новых элемента хранения: первый предназначен только для нужд эксперимента NOvA, а второй – хранилище серh на базе SSD – для набора производственных сервисов и пользователей с высокими требованиями к дисковому вводу-выводу. Основные параметры всех этих облачных систем хранения перечислены в таб. 2.

Таблица 2. Характеристики элементов облачного хранилища

	Тип диска	Потребители	Версия Серh	Полная емкость, Пиб	Реплики	Подключение
Обычное облачное хранилище	HDD	Все	14.2.21	1.1	3x	2x10GBase-T
Хранилище NOvA	HDD	NOvA	15.2.11	1.5	3x	2x10GBase-T
Быстрое облачное хранилище	SSD	Высокое требование к вводу-выводу	15.2.13	0.419	3x	4x10GBase-T + 2x100Gbps –

Общее количество ресурсов, размещённых в облачной инфраструктуре ОИЯИ, в настоящий момент составляет 5150 ядер ЦПУ, 60 ТБ ОЗУ и 3,41 ПБ сырого дискового пространства в серh-хранилище.

Был использован довольно широкий набор ПО для облачных серверов ОИЯИ и мониторинга некоторых его сервисов (Nagios, база данных временных рядов InfluxDB – TSDB, TSDB Prometheus и т.д.). На всех облачных серверах были развернуты `node_exporters` для предоставления Prometheus данных о состоянии серверов. Оповещение реализовано на уровне Prometheus. ПО Grafana используется для визуализации данных.

Облако ОИЯИ управляется в соответствии с подходом «Инфраструктура как код» (IaC), когда подготовка хоста и управление им осуществляются с помощью конфигурационных файлов. Для этого используется программное обеспечение Foreman и Puppet.

На рис. 8 приведена информация о потреблении ресурсов облачной инфраструктуры в 2022 году: основными пользователями являются нейтринные эксперименты и ЛИТ.

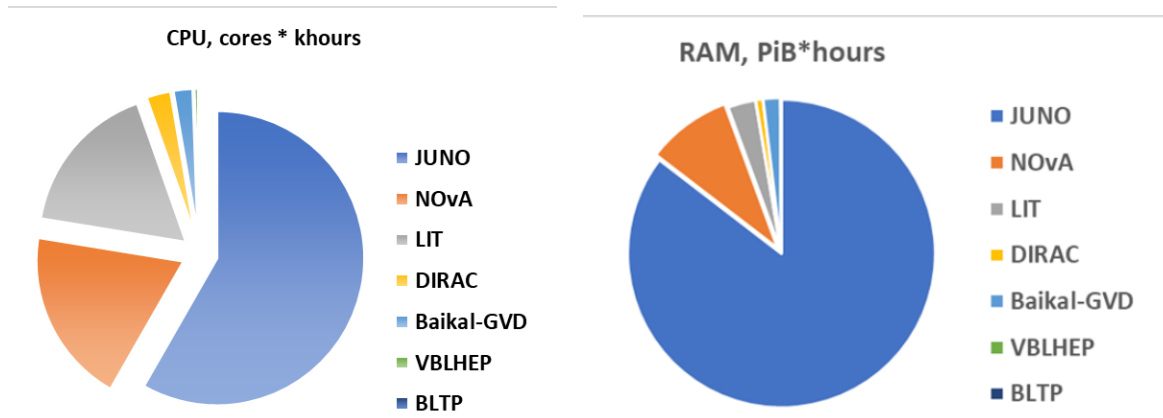


Рис. 8. Использование облачных вычислений экспериментами и подразделениями ОИЯИ в 2022 году

Продолжились работы в рамках развития и поддержки вычислительной платформы для нейтринных экспериментов. В связи с прекращением поддержки GSI-аутентификации и переходом экспериментов DUNE и NOvA на систему аутентификации с использованием токенов, кластер HTCondor облачной нейтринной платформы был обновлен до версии 9.0, в которой была реализована поддержка аутентификации по JSON web-токенам (т.н. JWT). Для эксперимента DUNE было развернуто и подключено к Open Science Data Federation (OSDF) кэширующее хранилище данных StashCache общим объемом 1 ТБ.

По запросу эксперимента JUNO разработан экспортер данных как о текущей нагрузке в батч-кластере нейтринной платформы для использования этих данных экспериментом с целью оптимизации распределения вычислительных задач в глобальной грид-инфраструктуре JUNO, так и данных об используемом экспериментом хранилище EOS и загрузке сетевых каналов ОИЯИ.

В сервисе интерактивных вычислений `jupyter.jinr.ru`, по запросу пользователей, вместо набора разных образов с различным ПО для анализа данных был подготовлен один универсальный образ на базе Datascience Notebook из набора Jupyter Docker Stacks, включающий все базовое ПО и модифицированное окружение, необходимое для корректной работы ПО ROOT.

Введён в эксплуатацию сервер с графической картой NVIDIA A100 Ampere 40 GB для пользователей нейтринной вычислительной платформы, занимающихся разработкой алгоритмов машинного обучения, а также использующих соответствующее прикладное ПО.

В облачном хранилище ОИЯИ создана дополнительная локальная реплика наборов смоделированных и реальных данных в Ближнем и Дальнем детекторе эксперимента NOvA для проведения осцилляционного анализа эксперимента полностью независимо от инфраструктурных инструментов FermiLab.

Произведено копирование порядка 60 ТБ данных экспериментаorexino из дата-центра CNAF (Италия) на EOS-хранилище в ОИЯИ. Для аутентификации и авторизации пользователя, под которым копировались данные, использовался достаточно новый подход — с помощью сервиса IAM (Identity & Access Management).

Облако ОИЯИ является одним из участников распределенной информационно-вычислительной среды (DICE) [7], основанной на ресурсах ОИЯИ и организаций его

государств-членов (рис. 9). Объем облачных ресурсов ОИЯИ, вносимых в DICE, варьируется в зависимости от ее загрузки.

В 2020 году в Северно-Осетинском государственном университете им. К.Л. Хетагурова, в Софийском университете им. Св. Климента Охридского и Институте ядерных исследований и ядерной энергии БАН были развернуты и подключены к DICE облачные инфраструктуры. В 2021 году облако Египетской национальной сети НТИ Академии научных исследований и технологий, а в 2022 году облако Института ядерной физики Академии наук Узбекистана были запущены в эксплуатацию и интегрированы в JINR DICE. Приобретено и поставлено дополнительное серверное и сетевое оборудование для облачной инфраструктуры Института ядерной физики (г. Алма-Аты, Казахстан). Идут работы по вводу данного оборудования в эксплуатацию и расширения мощностей облака данной организации. В настоящее время полностью интегрированы в JINR DICE (рис. 9): Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова (Россия), Северо-Осетинский государственный университет (Россия), Институт ядерной физики (Казахстан), Институт физики Национальной Академии наук Азербайджана, Институт ядерных исследований и ядерной энергии (Болгария), Софийский университет им. Св. Климента Охридского, Научно-исследовательский институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Институт ядерной физики (Узбекистан), Египетская национальная сеть научно-технической информации Академии научных исследований и технологий (Египет), в процессе интеграции – Грузинский технический университет.

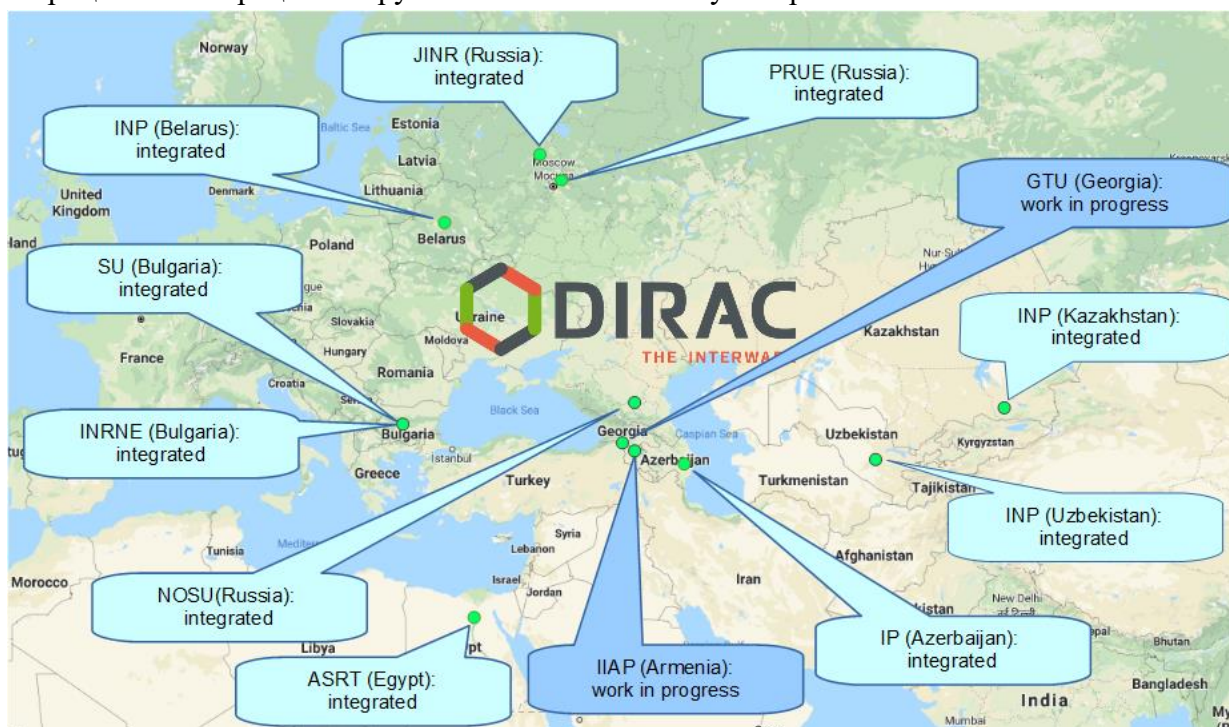


Рис. 9. Участники распределенной информационно-вычислительной среды DICE

Запущен в эксплуатацию веб-портал <http://dice.jinr.ru> с информацией об участниках JINR DICE и проведенных обучающих мероприятиях [8] по работе в JINR DICE. В 2020 году к использованию вычислительных мощностей DICE подключился эксперимент Baikal-GVD, который в настоящий момент является основным потребителем ресурсов JINR DICE (96 %, рис. 10).

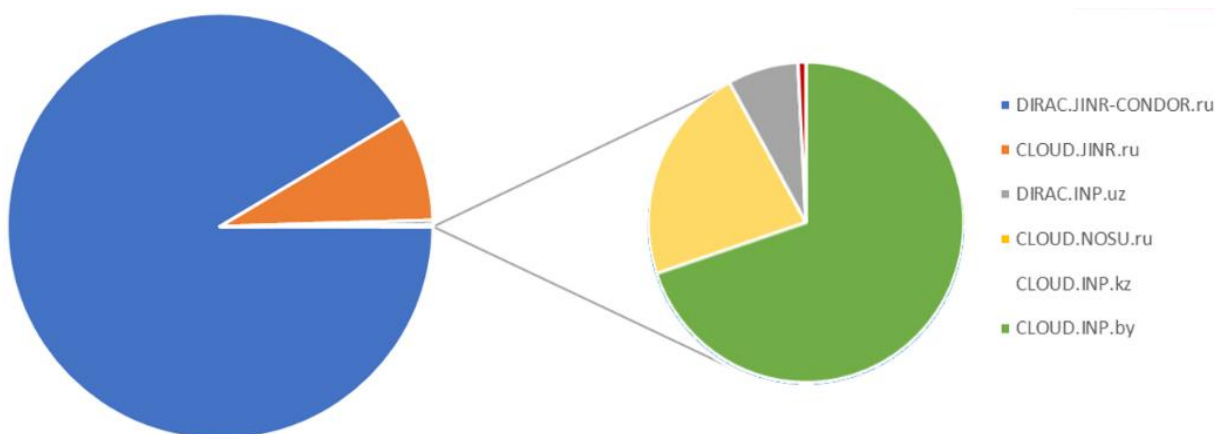


Рис. 10. Распределение количества задач, выполненных в JINR DICE, по участникам в 2022 году

Свободные от основной деятельности ресурсы DICE в 2020-2021 гг. были задействованы для проведения исследований по изучению вируса SARS-CoV-2 в рамках платформы Folding@Home.

В облаке ОИЯИ развивался и совершенствовался сервис [9], предоставляющий доступ к ресурсам МИВК для выполнения широкого спектра научных расчетов посредством проблемно-ориентированного веб-интерфейса (<https://saas.jinr.ru/>), который обеспечивает расширенные возможности для запуска задач, уведомлений пользователю о статусе задач.

Кроме этого, на базе облака ОИЯИ развернут ряд вспомогательных облачных сервисов для различных научных экспериментов ОИЯИ: несколько систем хранения документации для экспериментов и групп пользователей (ad-docs.jinr.ru для ускорительного отделения ЛФВЭ, spd-docs.jinr.ru и bmn-docs.jinr.ru для экспериментов SPD и VM@N соответственно, baikal-docs.jinr.ru для эксперимента Baikal-GVD, а также neutrino-docdb.jinr.ru для совместного использования участниками нейтринной программы ОИЯИ); для ускорительного отделения ЛФВЭ реализована и внедрена первая версия системы ведения электронных журналов ad-operations.jinr.ru.

Гетерогенная инфраструктура

Проведение ресурсоемких массивно-параллельных расчетов и работа с Большими данными обеспечиваются гетерогенной инфраструктурой МИВК ОИЯИ, представленной платформой HybriLIT. В состав платформы входят: учебно-тестовый полигон и суперкомпьютер «Говорун», объединённые единой программно-информационной средой. СК «Говорун» является основной вычислительной частью платформы HybriLIT и обладает инновационной гиперконвергентной программно-определяемой архитектурой с уникальными свойствами по гибкости настройки под задачу пользователя [10]. В состав СК «Говорун» входят GPU- и CPU-компоненты, а также иерархическая система обработки и хранения данных со скоростью чтения/записи 300 Гбит/с.

В 2020 году были завершены разработка и внедрение в среду 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 [11].

С 2021 года 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. Созданная ИВС позволяет решать задачи различных типов с различным требованием как к объему вычислительных ресурсов, так к объему данных и разной скорости доступа к ним. Непосредственно ИВС базируется на созданной на СК «Говорун» вычислительной системе по требованию, содержащей 288 физических ядер (576 логических ядер) и файловое хранилище емкостью 7 ТБ под управлением файловой системы NFS. На этой системе проводились интенсивные расчеты с использованием ПО AMS и DIRAC для расчетов электронных свойств сверхтяжелых элементов. Также с целью разработки квантовых алгоритмов, реализующихся на симуляторах квантовых вычислений, в ИВС был имплементирован ряд квантовых симуляторов (QuEST, Qiskit, CuQuantum), способных работать на различных вычислительных архитектурах.

Еще одним направлением исследований, в котором задействованы ресурсы СК «Говорун», является создание в конце 2021 года объединенной масштабируемой научно-исследовательской суперкомпьютерной инфраструктуры на базе Национальной исследовательской компьютерной сети России (НИКС). В настоящее время в эту инфраструктуру, помимо СК «Говорун», входят суперкомпьютеры Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук и Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Созданная инфраструктура 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 первую очередь для задач мегасайнс проекта NISA. В 2022 году успешно завершён первый совместный эксперимент по использованию объединенной суперкомпьютерной инфраструктуры для задач мегасайнс проекта NISA. Всего было запущено 3000 задач генерации данных методом Монте-Карло и реконструкции событий для эксперимента MPD. В результате все задачи были выполнены успешно. Сгенерировано и реконструировано порядка 3 миллионов событий. Полученные данные перемещены в ОИЯИ для дальнейшей обработки и физического анализа.

Исходя из стремительного развития IT-технологий и запросов пользователей в ноябре 2019 года была проведена модернизация суперкомпьютера – переход на новые процессоры Intel® Xeon® Scalable gen 2 (модели Intel® Xeon® Platinum 8268) и новейшие высокоскоростные твердотельные диски Intel® SSD DC P4511 с интерфейсом NVMe емкостью 2 ТБ. В результате модернизации производительность CPU-компоненты увеличилась в три раза, а совокупная пиковая производительность суперкомпьютера достигла 860 ТФлопс для операций с двойной точностью и 1,7 ПФлопс для операций с одинарной точностью, что, в свою очередь, позволило CPU-компоненте суперкомпьютера «Говорун» занять 10-е место в списке Top50 самых мощных суперкомпьютеров России и стран СНГ.

CPU-компонента суперкомпьютера реализована на высокоплотной архитектуре «РСК Торнадо» с прямым жидкостным охлаждением, которое позволяет обеспечить высокую плотность вычислительных узлов – 150 узлов на один вычислительный шкаф – и высокую энергоэффективность порядка 10 GFlop/WB. Среднегодовой показатель PUE системы, отражающий уровень эффективности использования электроэнергии, составляет менее чем 1,06.

С целью повышения эффективности решения задач пользователей, использования вычислительных ресурсов и ресурсов хранения данных на СК «Говорун» в 2020 году разработан и реализован подход к управлению вычислительными ресурсами и ресурсами хранения данных – «оркестрация ресурсов». Под этим термином подразумевается программная дезинтеграция вычислительного узла, т.е. отделение вычислительных ядер и элементов хранения данных (SSD дисков) с последующим их объединением в соответствии с требованиями задачи пользователя. Таким образом, вычислительные элементы (CPU-ядра и графические ускорители) и элементы хранения данных (SSD диски) образуют независимые поля. Благодаря оркестрации пользователь может под свою задачу аллоцировать необходимое число и тип вычислительных узлов (в том числе необходимое число графических ускорителей), необходимый объем и тип систем хранения данных. После завершения задачи вычислительные ядра и элементы хранения возвращаются в соответствующие поля и готовы к следующему использованию. Это свойство позволяет эффективно решать пользовательские задачи разных типов, повысить уровень конфиденциальности работы с данными, избежать системных ошибок, возникающих при пересечении ресурсов для различных пользовательских задач.

Для работы с Большими данными, в том числе для мегапроекта NICA, на СК «Говорун» была разработана и внедрена иерархическая система обработки и хранения данных с программно-определяемой архитектурой [12]. По скорости доступа к данным система разделена на уровни, доступные на выбор пользователя. Самый быстрый уровень иерархической системы реализован на базе новейшей технологии DAOS (Distributed Asynchronous Object Storage). DAOS был развернут на восьми узлах СК «Говорун» и продемонстрировал высокую скорость чтения/записи, заняв в 2021 году 16-е место в номинации «10 node challenge» в текущей редакции списка IO500 (<https://io500.org/list/isc21/ten>). Большие перспективы этой технологии связаны с ее использованием для проекта NICA на всех этапах работы – от приема экспериментальных данных до финального физического анализа (рис. 11).

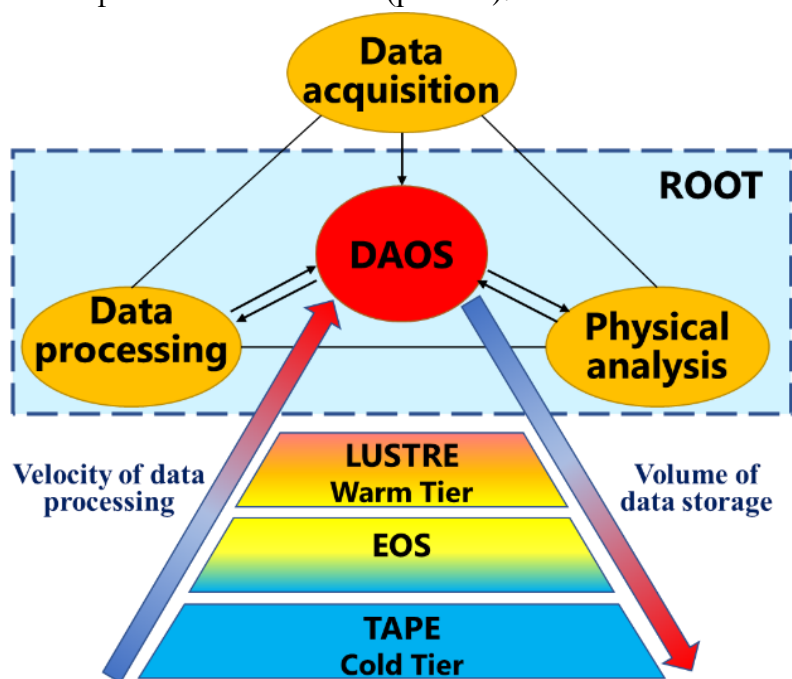


Рис. 11. Иерархическая система обработки и хранения данных СК «Говорун»

Использование DAOS для проекта NICA позволяет сохранять и читать многомерные структуры данных ТБ-масштаба в едином адресном пространстве. Технология DAOS выглядит перспективной и в применении к другим типам задач, связанных с Большими данными. Это, в первую очередь, задачи ML/DL, а также квантовые вычисления [13-14].

Эксплуатация первой очереди суперкомпьютера «Говорун» позволила провести целый ряд ресурсоемких вычислений в области квантовой хромодинамики на решетках, качественно повысить оперативность моделирования динамики столкновений релятивистских тяжелых ионов, ускорить процесс генерации и реконструкции событий для экспериментов мегасайенс проекта NICA, провести расчеты радиационной безопасности экспериментальных установок ОИЯИ, существенно ускорить исследования в области радиационной биологии и других научно-прикладных задач [15].

В ноябре 2022 года был осуществлен очередной этап модернизации СК «Говорун», связанный с расширением CPU-компоненты, реализованный в рамках гиперконвергентного подхода к построению вычислительного комплекса, положенного в основу СК «Говорун». В результате модернизации CPU-компонента была расширена на 32 гиперконвергентных вычислительных узла. Каждый узел содержит два процессора Intel Xeon Platinum 8368Q (частота 2,6 ГГц, 38 ядер, кэш 57 Мбайт, тепловыделение 270 Вт), 8 модулей оперативной памяти DDR4 – 256 ГБ, 8 модулей энергонезависимой памяти Intel Optane DC Persistent Memory – 2 ТБ, 4 твердотельных SSD диска в форм-факторе EDSFF E1.S (пулеп) с интерфейсом NVMe общей емкостью 16 ТБ, а также твердотельный диск SSD NVMe в формате M.2 емкостью 128 ГБ. Кроме того, каждый узел снабжен двумя адаптерами Intel Omni-Path с пропускной способностью 100 Гбит/с (рис. 12).

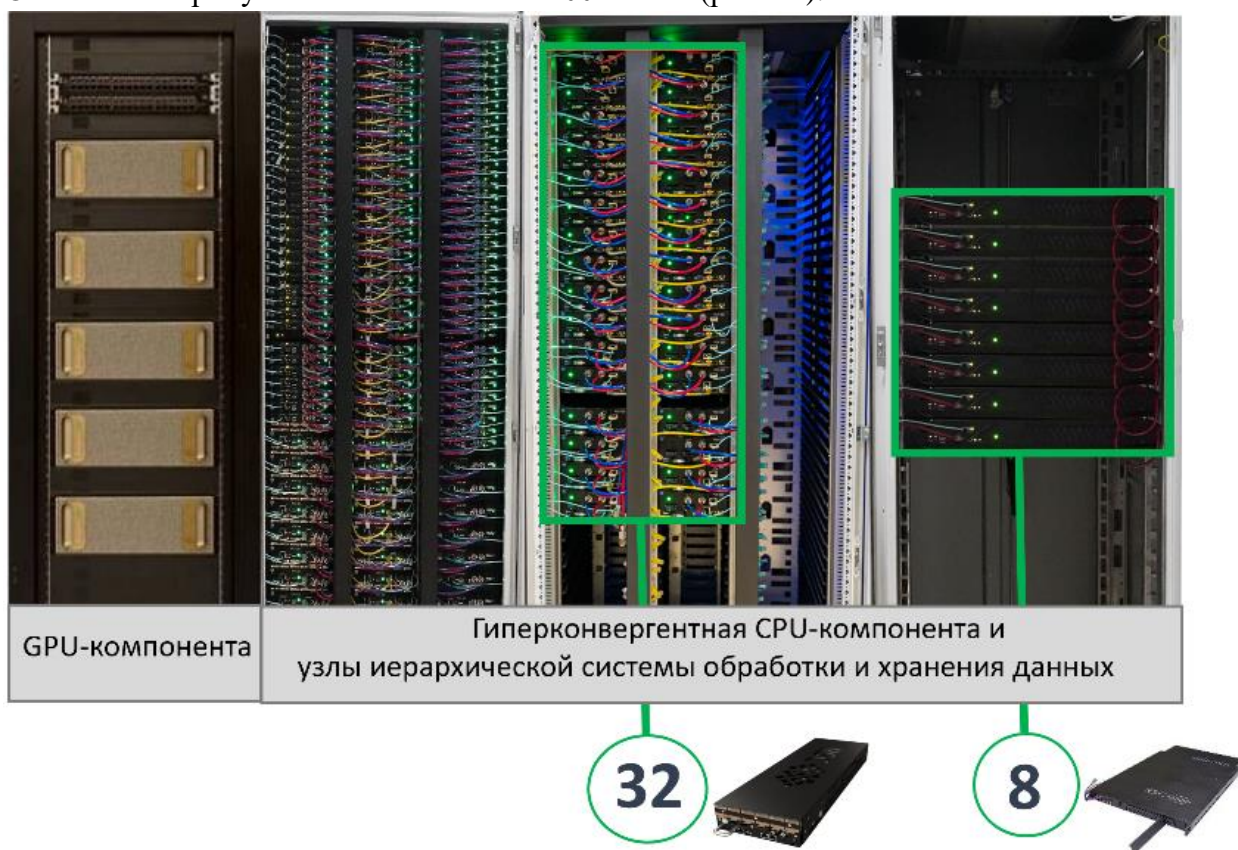


Рис. 12. Расположение новых узлов СК «Говорун»

В результате модернизации CPU-компоненты производительность СК «Говорун» возросла на 239 ТФлопс, а объем иерархической системы обработки и хранения данных СК «Говорун» вырос для слоя «очень горячих данных» DAOS на 1,6 ПБ и для слоя «теплых данных» на 8 ПБ. В итоге производительность СК «Говорун» выросла на 23,5% и достигла уровня 1,1 ПФлопс, а общая емкость иерархического хранилища выросла до 8,6 ПБ.

Гиперконвергентность новых вычислительных узлов уже позволила задействовать их для задач массовой генерации и реконструкции данных эксперимента MPD NICA. Следует отметить, что для ряда задач MPD возникла потребность в большом объеме оперативной памяти, которому удовлетворяют новые узлы. Вычислительные ресурсы и иерархическая система обработки и хранения данных СК «Говорун» были интегрированы на базе платформы DIRAC в распределенную гетерогенную среду, включающую в себя ресурсы ОИЯИ и стран-участниц.

Проведенная модернизация СК «Говорун» позволит ускорить исследования в области решеточной квантовой хромодинамики, качественно повысить эффективность моделирования динамики столкновений релятивистских тяжелых ионов, провести расчеты радиационной безопасности экспериментальных установок ОИЯИ и повысить эффективность решения прикладных задач. Обновленный СК «Говорун» даст возможность не только проводить расчеты, но и использовать суперкомпьютер как научно-исследовательский полигон для выработки программно-аппаратных и ИТ-решений для задач, решаемых в ОИЯИ.

Результаты, полученные с использованием ресурсов СК «Говорун» с момента ввода его в эксплуатацию с июля 2018 года по апрель 2023 года, отражены более, чем в 240 публикациях пользователей, при этом две из них в журнале Nature Physics.

Таким образом, опыт эксплуатации СК «Говорун» показал востребованность и результативность использования как новейших гиперконвергентных вычислительных архитектур, так и входящей в его состав иерархической системы обработки и хранения данных. В настоящее время ресурсы СК «Говорун» используются научными группами из всех Лабораторий Института в рамках 25 тем Проблемно-тематического плана ОИЯИ. Число пользователей СК «Говорун» составляет 323 человека, из них 262 являются сотрудниками ОИЯИ, а 61 - из стран-участниц. Доступ к ресурсам СК «Говорун» предоставляется только тем пользователям, которые принимают непосредственное участие в реализации ПТП ОИЯИ.

Интеграция вычислительных ресурсов

Важной особенностью созданной инфраструктуры МИВК является интеграция распределённых вычислительных ресурсов [16]. Вот уже пять лет в ОИЯИ функционирует система интеграции гетерогенных распределённых вычислительных ресурсов на основе платформы DIRAC Interware. DIRAC Interware – это продукт для интеграции гетерогенных вычислительных ресурсов и ресурсов хранения данных в единую платформу, основанный на использовании стандартных протоколов доступа к данным (xRootD, GridFTP и других) и пилотных задач.

В августе 2019 года первый пакет задач моделирования данных для эксперимента MPD был отправлен через DIRAC на ресурсы грид-кластеров Tier1 и Tier2. Далее в платформу распределенных вычислений (ПРВ) был интегрирован суперкомпьютер «Говорун» и облако ОИЯИ. Летом 2020 года были добавлены кластер NICA и кластер

Национального автономного университета Мексики (UNAM). Стоит отметить, что кластер UNAM стал первым вычислительным ресурсом, находящимся за границей Европы или Азии и включённым в инфраструктуру DIRAC в ОИЯИ. В качестве систем хранения были интегрированы системы dCache, под управлением которых находятся дисковое и ленточное хранилища, EOS и иерархическая система хранения и обработки данных СК «Говорун» [17]. В 2022 году вычислительный кластер Института математики и цифровой технологии Монгольской академии наук (IMDT MAS), а также Национальная исследовательская компьютерная сеть России были интегрированы в гетерогенную распределенную среду на базе платформы DIRAC (рис. 13).

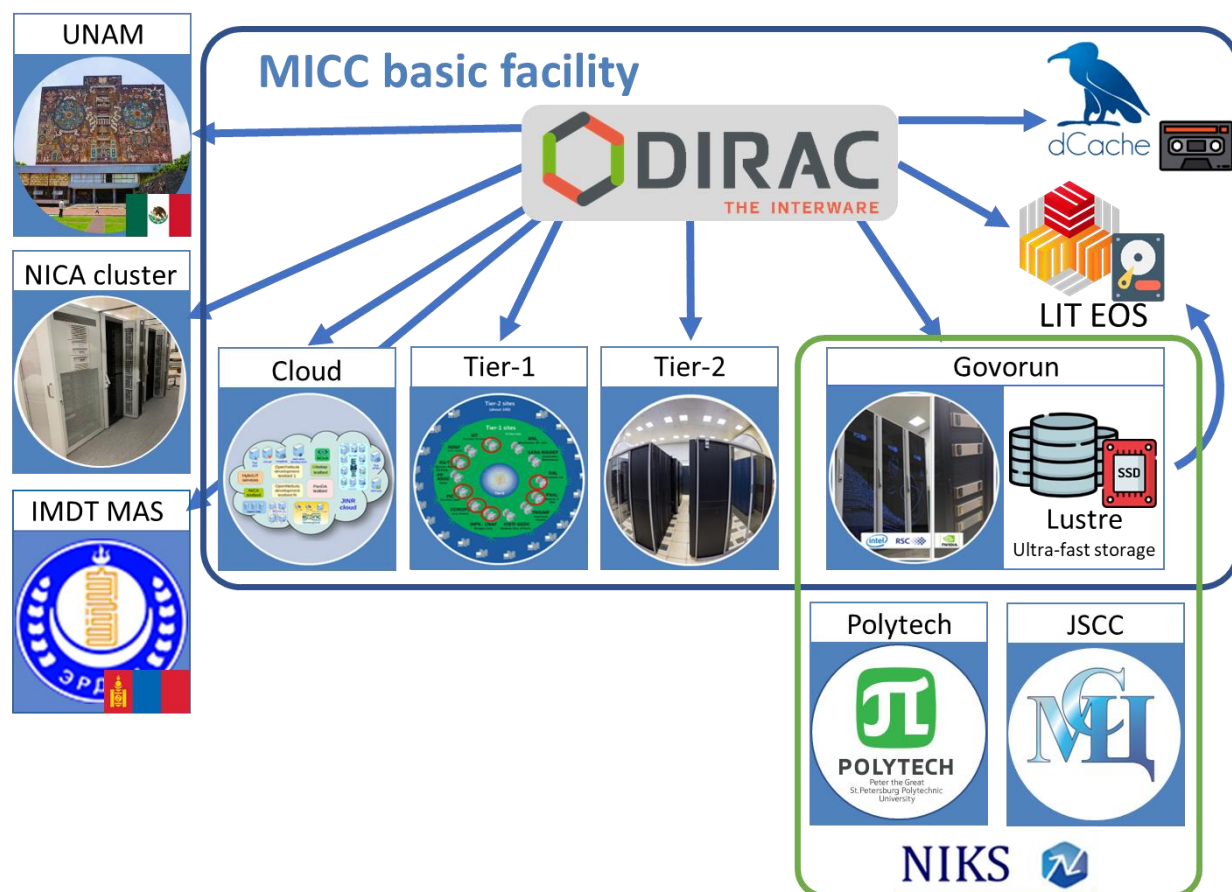


Рис. 13. Гетерогенная распределенная среда на базе платформы DIRAC

С использованием интеграции через DIRAC удалось задействовать наибольшее количество вычислительных ресурсов для централизованной генерации данных методом Монте-Карло для эксперимента MPD [18]. Практика использования различных вычислительных ресурсов ОИЯИ и других институтов коллаборации MPD показала, что на данный момент наиболее эффективным является использование ресурсов именно СК «Говорун» (см Рис. 14).

На рис. 14а представлена диаграмма использования различных компонент МИВК в распределенной гетерогенной среде на базе платформы DIRAC для задач MPD. При этом, доля тех задач, которые могут быть посчитаны только на СК «Говорун», составила в 2022 году порядка 44%, а полный вклад ресурсов СК «Говорун» в массовую генерацию и реконструкцию событий для эксперимента MPD составил порядка 56%. Рис. 14б иллюстрирует увеличение доли вычислительных ресурсов МИВК в гетерогенной среде для

задач MPD. Резкое увеличение доли СК «Говорун» связано с проведенной в 2022 году модернизацией, так на новых узлах было сгенерировано более 50 миллионов событий.

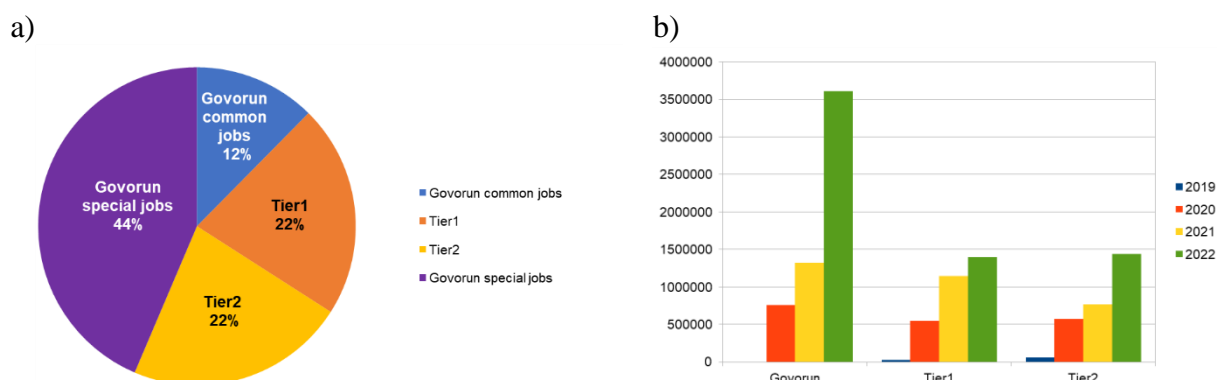


Рис. 14. Распределенная гетерогенная среда на базе платформы DIRAC для задач MPD: а) доля использования в 2022 году различных компонент МИВК; б) увеличение доли вычислительных ресурсов МИВК в нормализованных CPU HEP-SPEC06 днях

Для того, чтобы упростить доступ членов коллаборации MPD к вычислительным ресурсам, было разработано специальное приложение, позволяющее описывать задачу генерации данных в физических терминах: энергии столкновений, типа используемого генератора, материала мишени и пучка [19]. Разработанное приложение было интегрировано в веб-интерфейс платформы DIRAC в ОИЯИ и доступно всем пользователям MPD.

На сегодняшний день благодаря интеграции ресурсов с помощью DIRAC на мощностях распределенной платформы было выполнено 2,1 миллиона задач. Количество проведенных вычислений оценивается в 13,5 миллионов HEP-SPEC06 дней, что является эквивалентом 2000 лет расчетов на одном ядре центрального процессора. 90% всех расчётов проведено на суперкомпьютере «Говорун», Tier1 и Tier2, 6 % – на облачной инфраструктуре ОИЯИ, 3% – на кластере NICA.

Основным пользователем распределенной платформы является эксперимент MPD, доля которого составляет 90%. С использованием DIRAC выполняется программа сеансов массового моделирования данных эксперимента MPD. Более 1,283 миллиардов событий были успешно смоделированы с помощью UrQMD, GSM, 3 Fluid Dynamics, vHLLU-UrQMD и других генераторов, 440 миллионов событий были впоследствии реконструированы. Общий объем полученных данных превышает 1,3 ПБ. 5% вычислений были выполнены экспериментом Baikal-GVD, 2% – VM@N.

Система мониторинга

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 (рис. 15). В 2020 году к общей системе мониторинга была подключена облачная инфраструктура. В 2021 году в рамках развития системы мониторинга ресурсами грид-сайтов Tier1 и Tier2 в ОИЯИ была создана новая система аккаунтинга [20], которая позволила значительно расширить функционал оригинальной системы, сократить время получения статистических

данных за счет создания автоматической обработки данных системой визуализации, а также получить статистические данные по использованию ресурсов задачами пользователей (для любого временного интервала): астрономическое время выполнения заданий и время ЦПУ в HEP-SPEC06 часах, количество задач и эффективность использования вычислительного кластера.

Реализованный подход обеспечивает отображение статистических данных напрямую из SLURM (Simple Linux Utility for Resource Management) и позволяет осуществлять учет ресурсов и их использование как в рамках распределенной системы обработки данных, так и локально. Система визуализации предоставила мощный инструмент для анализа и составления различных отчетов, докладов и презентаций. Система аккаунтинга была интегрирована в общую систему мониторинга МИВК LITMon [21], что позволило организовать единую точку входа и объединить разрозненные аккаунтинги в единую структуру.



Рис. 15. Схема работы системы мониторинга МИВК

Прикладные исследования на МИВК

Продолжены исследования, проводимые 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 [22]. Разработано мобильное приложение, которое позволяет в соответствии со стандартами UNECE ICP Vegetation по растительности в автоматическом режиме заполнять информацию о местах отбора проб мхов. Приложение интегрировано с системой управления данными программы ICP Vegetation (DMS), созданной в ЛИТ на базе облачной платформы. DMS предоставляет участникам современную единую систему сбора, анализа и обработки данных биологического мониторинга. Комбинация спутниковых данных, измерений биомониторинга и различных технологий машинного и глубокого обучения

используется для прогнозирования загрязнений потенциально токсичными элементами. Также исследована возможность использования данных дистанционного зондирования Земли совместно с методами машинного обучения для прогнозирования загрязнения воздуха тяжелыми металлами [23]. Средняя точность моделей превысила 89%. Построены модели загрязнения алюминием, железом и сурьмой в центральном регионе России.

В рамках совместного проекта ЛИТ и ЛРБ в 2020 году на базе экосистемы ML/DL/HPC платформы HybriLIT была разработана информационная система (ИС) для задач радиационной биологии [24], предназначенная для хранения экспериментальных данных и анализа изменений в центральной нервной системе млекопитающих на основе молекулярных, патоморфологических и поведенческих изменений в головном мозге млекопитающих при воздействии ионизирующих излучений и других факторов (рис. 16).

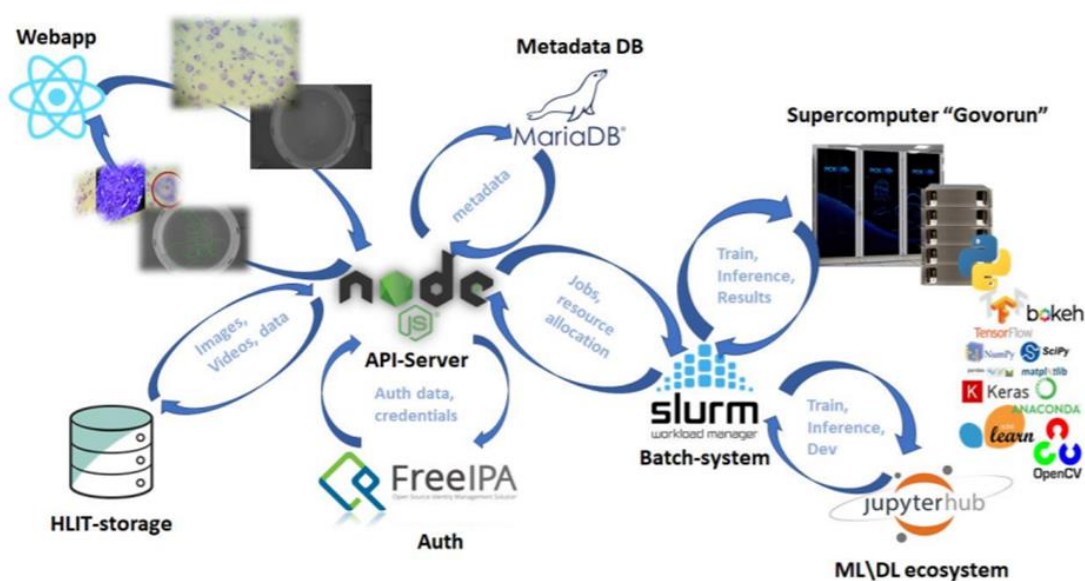


Рис. 16. Архитектура информационной системы для задач радиационной биологии

В разработанную систему внедрены алгоритмы обработки экспериментальных данных на основе методов машинного и глубокого обучения. 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 джозефсоновском ф0-переходе представлена методика разработки программных модулей на базе JupyterHub [25], позволяющих не только проводить расчеты, но и визуализировать результаты исследования и сопровождать их необходимыми формулами и пояснениями (рис. 17). Разработана 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.

Разработан программный комплекс, позволяющий моделировать распределённую вычислительную систему для сбора, хранения и обработки данных эксперимента VM@N проекта NICA при разных сценариях запуска задач [26]. Целью моделирования стало

оптимальное распределение потоков задач первичной обработки данных эксперимента VM@N на вычислительные узлы для минимизации простоев оборудования в процессе выполнения заданий. На основании результатов моделирования можно предсказать загрузку вычислительных узлов и каналов связи.

В 2022 году совместно с УНЦ разработан сервис планирования и учета экскурсий в ОИЯИ – <https://jinrex.jinr.ru> [27]. Основные функции сервиса: информация обо всех текущих, запланированных и завершенных экскурсиях; координация экскурсий; демонстрация загруженности точек посещения; сбор аналитики и демонстрация статистики.

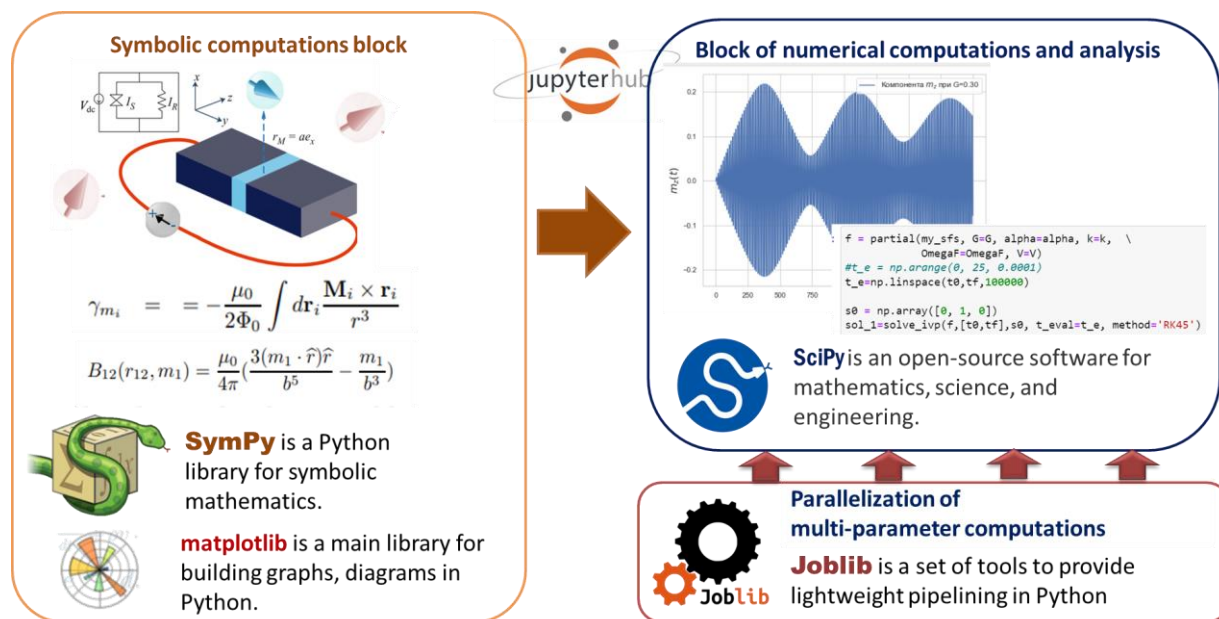


Рис. 17. Схема программных модулей для исследования систем с джозефсоновскими переходами

Информационное и программное обеспечение научно-производственной деятельности ОИЯИ

За отчетный период продолжалась традиционная работа по сопровождению и развитию библиотеки программ JINRLIB. Библиотека дополнена программами, разработанными сотрудниками ЛИТ для общего пользования: EORP 2020 – программа расчёта замкнутых равновесных орбит (авторы: И.В.Амирханов, И.Н.Киян), Split – параллельная реализация численного решения системы алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей с использованием алгоритма разбиений и технологии MPI (автор А.В.Волохова), SIR-model – простейшая модель эпидемического процесса (автор В.С.Рихвицкий), RK4-MPI – параллельная реализация численного решения задачи Коши методом Рунге-Кутты 4-го порядка с использованием технологии MPI (автор А.В.Волохова), INQSIM – программа преобразования полностью симметричных квадратурных правил типа PI на 2-,..., 6-симплексах из компактного вида в развернутый (авторы: Г.Чулуунбаатар, О.Чулуунбаатар, А.А.Гусев, С.И.Виницкий); FITTER_WEB – программа для фитирования экспериментальных данных, полученных на спектрометре малоуглового рассеяния нейтронов, реализованная в виде Web-приложения (авторы: А.Г.Соловьев, Т.М.Соловьева). В настоящее время библиотека JINRLIB насчитывает более

65 программных пакетов, большинство из которых решают задачи автоматизации обработки экспериментальных данных и вычислительной математики.

В 2020-2023 гг. выполнен ряд работ по развитию и текущему сопровождению системы электронного документооборота (СЭД) «Дубна». В частности, разработан модуль ведения плана закупок, реализована возможность подписания счетов на оплату с использованием усиленной электронной подписи, разработана подсистема автоматизированного формирования договоров поставки на основе типовых форм, разработан модуль мониторинга и архивного электронного хранения и поиска договоров поставки. Разработана и внедрена в эксплуатацию СЭД «Авансовые отчёты», предназначенная для электронной записи в Бухгалтерию ОИЯИ, чтобы получить аванс и отчитаться по командировкам и по хоз. расходам. Система обеспечивает предварительную загрузку необходимых данных для ускорения работы бухгалтерии, а также формирует ряд финансовых отчетов. Внедрены новые документы «Поручение» и «Запрос» с возможностью автоматического контроля сроков исполнения, документ «Штрабаг (КС-2, КС-3, счет на оплату)», «НИОСЭН архив» для хранения технической документации НИОСЭН ЛФВЭ. Для дальнейшего развития и оптимизации электронного документооборота программное обеспечение СЭД было настроено для процесса согласования технических заданий и заданий на проектирование для разработки проектной и/или рабочей документации по всем объектам капитальных вложений Института, для документооборота счетов и актов выполненных работ по статьям бюджета 18 «Проектные работы» и 19 «Сооружение зданий и технологических систем», для документооборота счетов и актов выполненных работ КС-2, КС-3 по статье бюджета 14 пп. а, б т.д. Выполнен ряд работ по адаптации СЭД «Дубна» к изменениям в организации закупочных процедур в ОИЯИ. Существенно усилена защита СЭД и других систем от хакерских атак за счёт использования проактивных методов диагностики атак и защиты от них.

Осуществлялись текущее сопровождение и развитие системы управления проектом АРТ EVM для NICA, в частности, реализована интеграция данных Cost Book с планом закупок в СЭД «Дубна»; а также текущее сопровождение и развитие по запросам пользователей информационных систем HR LNER, ADB2, PIN, ИСС, База документов, INDICO, Электронный фотоархив.

Разработана и запущена в эксплуатацию новая версия информационной системы CERN DB для регистрации командировок в ЦЕРН, размещения командированных по местам проживания и учёта финансовых расходов.

Продолжены работы по совершенствованию и применению платформы WALT (Web Application Lego Toolkit), представляющей собой ориентированную на шаблоны платформу, предназначенную для разработки веб-приложений различной степени сложности [28]. В отличие от многих других платформ, которые представляют собой «волшебный черный ящик», основная идея WALT заключается в предоставлении прозрачных, расширяемых и модифицируемых инструментов для решения конкретных проблем, возникающих при разработке веб-приложений. Платформа WALT используется для разработки корпоративных веб-приложений ОИЯИ, таких как ADB2, PIN, NICA EVM, СЭД и т.д. (рис. 18).

В 2020 году был разработан и запущен в эксплуатацию личный кабинет с возможностью онлайн оплаты для нанимателей жилищного фонда Института. Совместно с системой электронного документооборота была создана система обработки счетов в

электронном виде, для подписания которых был внедрён внутренний удостоверяющий центр. В кадровой системе была создана подсистема учета электронных трудовых книжек, полностью переработана система специальной оценки рабочих мест.

Была усовершенствована управленческая отчетность Института, в рамках развития проектного управления был разработан соответствующий модуль в программе 1С, позволяющий отслеживать ход исполнения работ, рисовать диаграмму Ганта, назначать финансовые ресурсы.

JINR corporate web applications developed using WALT	
ADB2	JINR's management accounting
PIN	Staff information
EDMS "Documents DB"	Electronic storage for administrative activity documents
NICA EVM	Project structure, workplans, expenses, Costbook, reports, etc.
EDMS "Dubna"	JINR electronic document management system
HR JINR	Staff administrative information
MAP JINR	Basic map of JINR's sites
Gateway	Universal gateway for data exchange between various systems
ISSC	Scientific attestation support system
CERN DB	JINR's staff at CERN: trips, accommodation, reports, etc.
EDMS "Advance reports"	Data preparation for business trip accounting reports
Checkpoint lists	Lists for access to JINR's sites in a limited access mode
DES	JINR Digital EcoSystem that integrates existing and future services

Рис. 18. Корпоративные веб-приложения ОИЯИ, разработанные с использованием платформы WALT

Осуществлялось сопровождение информационной системы научной аттестации ОИЯИ (ИСНА) – <https://dissertations.jinr.ru>, портала «Визит-центр» – <https://visitcentre.jinr.ru/>, продолжились работы по модернизации и сопровождению веб-сайта журналов ЭЧАЯ и «Письма в ЭЧАЯ» – <http://peran.jinr.ru>. Продолжены традиционная разработка, создание и поддержка веб-сайтов конференций, симпозиумов по заявкам лабораторий и других подразделений ОИЯИ.

Традиционно осуществлялось сопровождение серверов и систем общего использования: инфраструктуры хостинга сайтов (www.jinr.ru, flnph.jinr.ru, flerovlab.jinr.ru, misc.jinr.ru, mpdroot.jinr.ru и т.д.), инфраструктуры серверов административного назначения (ресурсы pin.jinr.ru, adb2.jinr.ru, sed.jinr.ru и т.п.), сервисов pm.jinr.ru (система автоматизированного управления проектами) и disk.jinr.ru (сервис облачного хранилища для сотрудников ОИЯИ).

Разработана и введена в опытную эксплуатацию «Информационно-аналитическая система сопровождения лицензий ЛИТ» (ИАЛ, <http://soft-lit.jinr.ru>) [29]. Основной задачей ИАЛ является автоматизация управления, приобретения, сопровождения и использования лицензионных программных продуктов (ЛПП), вызванных необходимостью как планирования и оптимизации закупок лицензионного программного обеспечения, так и необходимостью контроля за соблюдением правил лицензионной политики. База данных

системы содержит всю информацию по приобретенным лицензиям, на основе которой формируется личный кабинет (ЛК) пользователя. В ЛК хранятся данные о лицензиях, принадлежащих пользователю. ЛК администратора/аудитора предназначен для управления и мониторинга ЛПП. Вход в ИАЛ производится через систему аутентификации пользователей SSO-JINR. Web-интерфейс реализован в среде разработки WALT с использованием web-приложения LegoToolkit.

В 2022 году начаты работы по созданию платформы Digital JINR – Цифровой экосистемы ОИЯИ (рис. 19), основной целью которой является предоставление единой среды для создания и развития цифровых сервисов, их интеграции между собой, анализа информации о всех аспектах деятельности ОИЯИ. В цифровую экосистему будет входить широкий спектр сервисов – от ресурсов для пользователей базовых установок до оформления командировок, путевок, заказа справок и т.д. Основные группы сервисов – административные (зона ответственности ДРЦС ОИЯИ) и научные. В настоящий момент реализован прототип единой точки доступа Digital EcoSystem (<https://eco.jinr.ru>), а также ряд сетевых сервисов, телефонный справочник и некоторые другие. Доступ к системе реализован на базе службы аутентификации JINR Single Sign-On (SSO).

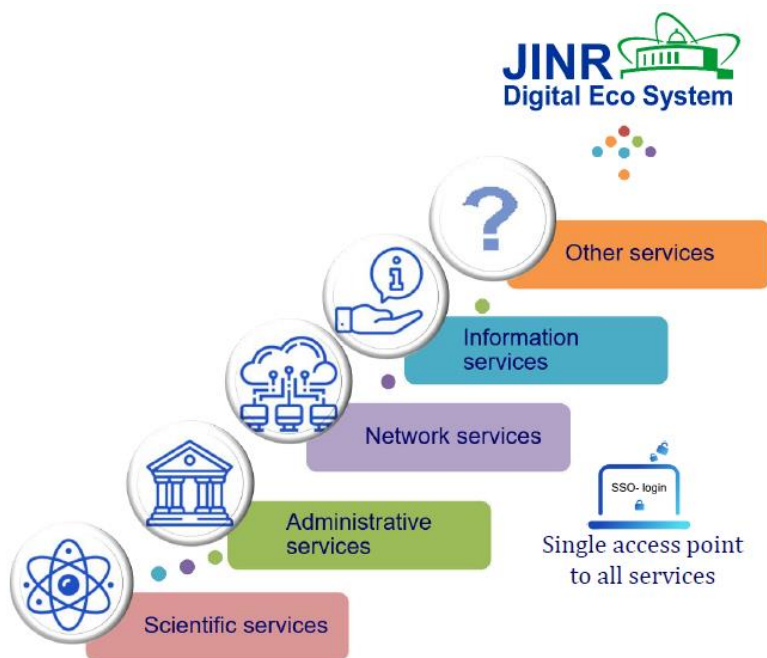


Рис. 19. Цифровая экосистема ОИЯИ

Образовательная программа на учебно-тестовом полигоне

Не менее важным аспектом деятельности, в которой задействованы ресурсы облачной платформы и платформы HybriLIT, является образовательное направление, связанное с проведением учебных курсов для сотрудников ОИЯИ и практических занятий для студентов Государственного университета «Дубна», Тверского государственного университета и других университетов. В 2020 году проведены в удалённом формате учебные курсы и мастер-классы для студентов из Чехии и Армении.

В отчетный период проводились практические занятия на платформе HybriLIT по курсам «Архитектуры вычислительных систем», «Технологии высокопроизводительных вычислений», «Современные методы анализа сложных систем», «Машинное обучение и интеллектуальный анализ данных», «Языки и технологии анализа данных»,

«Математический аппарат и инструментарий анализа данных» с использованием экосистемы для ML/DL/HPC, позволяя студентам осваивать самые современные технологии разработки параллельных алгоритмов на новейших вычислительных гибридных архитектурах и инструментарий (библиотеки и фреймворки) для задач машинного и глубокого обучения.

Помимо этого, ресурсы платформы активно использовались для подготовки ИТ-специалистов в рамках Международной школы по информационным технологиям «Аналитика больших данных» на базе Государственного университета «Дубна» [30], студенты которой задействованы в реальных научных проектах ОИЯИ. Результаты выпускных групп представлены в сборниках отчетов научно-проектной деятельности Школы [31].

С 2019 года ОИЯИ совместно с Северо-Осетинским государственным университетом проводит регулярную ИТ-Школу молодых ученых «Современные ИТ-технологии для решения научных задач». ИТ-Школа собирает более 60 студентов и преподавателей университетов Юга России (Северная Осетия, Кабардино-Балкария, Чечня). В рамках ИТ-Школы ученые из ОИЯИ читают лекции о научных проектах, о развиваемых в ОИЯИ информационных технологиях и решениях для научных задач, также проводятся мастер-классы и учебные курсы по распределенным вычислениям, виртуализации и облачным технологиям, современным алгоритмам машинного и глубокого обучения для анализа сложно структурированных данных.

Также ресурсы платформы активно использовались во время первой Осенней школы по информационным технологиям ОИЯИ, проходившей с 14 по 19 ноября 2022 года в ЛИТ. Участники школы прослушали учебные курсы по актуальным вопросам в области распределенных и высокопроизводительных вычислений, машинного обучения и искусственного интеллекта, математического моделирования, современных методов и технологий обработки и анализа данных. Во время второго этапа школы — «Весенней школы по информационным технологиям ОИЯИ» (май 2023 г.) — студенты представят результаты совместных работ с сотрудниками Института по выбранным темам ВКР.

С использованием ресурсов платформы HybriLIT за 2020-2023 гг. подготовлены **четыре** кандидатских диссертации и **36** магистерских диссертаций и бакалаврских работ.

Конференции

С 5 по 9 июля 2021 года в Лаборатории информационных технологий им. М.Г. Мещерякова в гибридном формате прошла **девятая международная конференция «Распределенные вычисления и грид-технологии в науке и образовании» (GRID'2021)**. Конференция GRID, которая проводится каждые два года, была посвящена 65-летию ОИЯИ и 55-летию образования ЛВТА (теперь ЛИТ им. М.Г. Мещерякова).

Конференция традиционно привлекла многочисленное сообщество российских и зарубежных специалистов, готовых обсудить возникающие задачи и перспективы, связанные с использованием и развитием распределенных грид-технологий, гетерогенных и облачных вычислений в различных областях науки, образования, промышленности и бизнеса. В 2021 году в тематику конференции также вошли вопросы, касающиеся квантового компьютеринга.

В работе конференции приняли участие более 270 ученых (103 – очно, более 170 – дистанционно) из научных центров Армении, Беларуси, Болгарии, Германии, Грузии,

Египта, Ирана, Италии, Китая, Молдовы, Новой Зеландии, Польши, Румынии, Словакии, Чехии, Франции, Швеции и Швейцарии. Россия была представлена участниками из 28 университетов и исследовательских центров. В рамках конференции была организована работа 10 секций, на которых обсуждались вопросы, связанные с развитием технологий распределенных вычислений, облачных технологий, гетерогенных вычислений, добровольных вычислений и аналитики больших данных, машинного обучения и квантовой обработки информации. Было представлено 23 пленарных и 140 секционных докладов.

В рамках конференции были проведены круглые столы, посвященные использованию ИТ в образовании; российскому сегменту WLCG (Worldwide LHC Computing Grid) – RDIG; суперкомпьютерным технологиям, на котором компания Intel представила свой новый продукт – высокоскоростную файловую систему Intel DAOS.

Ряд пленарных докладов на конференции сделали представители ИТ-индустрии, которые выступили спонсорами конференции. Среди них: IBS Platformix, IT Cost, Ниагара Компьютерс, Dell EMC, RSC Group, Intel, Softline.

Презентации представленных докладов и фотоматериалы размещены на сайте конференции <https://indico.jinr.ru/event/1086/>. Избранные труды конференции опубликованы в CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org) – <https://ceur-ws.org/Vol-3041/>.

С 29 по 31 марта 2022 года в ЛИТ прошла международная научная конференция **"Параллельные вычислительные технологии (ПaBT) 2022"**, шестнадцатая в серии ежегодных конференций, посвященных развитию и применению параллельных вычислительных технологий и машинного обучения в различных областях науки и техники. Организаторами конференции являются Министерство науки и высшего образования РФ и суперкомпьютерный консорциум университетов России.

В работе конференции приняли участие более 110 ученых из Белоруссии, Бразилии, Египта, Монголии, Румынии, Словакии. Россия была представлена участниками из 40 университетов, исследовательских центров, компаний ИТ-индустрии и промышленности. В рамках конференции была организована работа 9 секций, на которых обсуждались вопросы, связанные с применением облачных, суперкомпьютерных и нейросетевых технологий в науке и технике, включая приложения, аппаратное и программное обеспечение, специализированные модели, языки, библиотеки и пакеты. Было представлено 7 пленарных, 38 секционных и 10 стендовых докладов.

Во все дни работы конференции действовала суперкомпьютерная выставка, на которой компании RSC Group и ЗАО «Карма Групп» представили свои новейшие разработки в области высокопроизводительных вычислений.

Презентации представленных докладов и фотоматериалы размещены на сайте конференции <http://agora.guru.ru/pavt2022/>. Избранные труды конференции опубликованы в серии Communications in Computer and Information Science издательства Springer и в журнале «Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика».

Публикации

За период 2020-2023 гг. сотрудники ЛИТ выступили соавторами 223 публикаций коллаборации CMS, 34 публикаций коллаборации Baikal-GVD и других коллабораций,

включая NOVA, DUNE, PANDA и т.д. Опубликовано более 70 статей в реферируемых журналах. Ниже приведены избранные работы.

- [1] *Korenkov V.V.* The JINR Multifunctional Information and Computing Complex// Ядерная физика, т. 83, № 6, стр. 534–538, 2020; *V. Korenkov* // 2020 International Scientific and Technical Conference Modern Computer Network Technologies (MoNeTeC), Moscow, Russia, 2020 pp. 1-4, doi: 10.1109/MoNeTeC49726.2020.9258311
- [2] *Baginyan A., et al.* JINR Network Infrastructure for Megascience Projects // 2020 International Scientific and Technical Conference Modern Computer Network Technologies (MoNeTeC), Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5., doi: 10.1109/MoNeTeC49726.2020.9258004
- [3] *Velikhov V.E. et al.* // 2022 Intern. Sci. and Techn. Conf. “Modern Network Technologies” (MoNeTec), Moscow, 2022. P. 1–4.
- [4] *Baginyan A., et al.* Current Status of the MICC: an Overview // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 1–6.
- [5] *Baranov A., et al.* Lifecycle Management Service for the compute nodes of Tier1, Tier2 sites (JINR)// CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 429–433, 2021
- [6] *Kutovskiy N., Pelevanyuk I., Zaborov D.* Using Distributed Clouds for Scientific Computing// CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 196–201, 2021.
- [7] *Balashov N., et al.* JINR Distributed Information and Computing Environment: Participants, Features and Challenges // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 280–284, 2021.
- [8] *Balashov N., et al.* Creating a Unified Educational Environment for Training IT Specialists of Organizations of the JINR Member States in the Field of Cloud Technologies // Modern Information Technology and IT Education, V. 1201, pp. 149-162, 2020.
- [9] *Balashov N.A., Kutovskiy N.A., Sokolov I.V.,* Problem-oriented interface for MICC // AIP Conference Proceedings, V. 2377, 040002, 2021, <https://doi.org/10.1063/5.0064008>, 2021
- [10] *Belyakov D., et al.* “Govorun” Supercomputer for JINR Tasks // CEUR Workshop Proc., vol. 2772, pp. 1–12, 2020
- [11] *Zuev M.I. et al.* ML/DL/HPC Ecosystem of the HybriLIT Heterogeneous Platform (MLIT JINR): New Opportunities for Applied Research // PoS (DLCP2022). 2022. V.429. P. 027.
- [12] *Kokorev A., Belyakov D., Lyubimova M.,* Data storage systems of «HybriLIT» heterogeneous computing platform for scientific research carried out in JINR: filesystems and RAID’s performance research // CEUR Workshop Proc., vol. 3041, pp. 296-303, 2021
- [13] *Moshkin A.A., et al.* Approaches, services, and monitoring in a distributed heterogeneous computing environment for the MPD experiment // Russian Supercomputing Days: Proc. of the Int. Conf. 2021. P. 4–11.
- [14] *Kudryavtsev A.O., Podgainy D.V., Moskovsky A.A.* // ISC High Performance 2021. May 29 – June 2, 2021. Humburg. Germany (<https://www.isc-hpc.com/>); *Moskovsky A.A., Brekhov A.T., Podgainy D.V., Kudryavtsev A.O.* // Sixth International Parallel Data Systems Workshop. November 15. 2021 (<https://sc21.supercomputing.org/session/?sess=sess332>); *Val’a M., Podgainy D., Lavrenko P., Brekhov A.* High Energy Physics experiment data processing with DAOS in multi-tier storage environment based on RSC Storage on-Demand // The 5th annual DAOS User Group meetingю. November 19. 2021 (<https://daosio.atlassian.net/wiki/spaces/DC/pages/11015454821/DUG21>)
- [15] *Podgainy D., et al.* IT Solutions for JINR Tasks on the “GOVORUN” Supercomputer // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 612–618.
- [16] *Korenkov V.V., Pelevanyuk I.S., Tsaregorodtsev A.Yu.,* Integration of the JINR Hybrid Computing Resources with the DIRAC Interware for Data Intensive Applications // Communications in Computer and Information Science, V. 1223, pp. 31-46, 2020
- [17] *Pelevanyuk I.,* Performance evaluation of computing resources with DIRAC interware // AIP Conference Proceedings, V. 2377, N. 1, 040006, 2021

- [18] *Kutovskiy N., et al.* Integration of distributed heterogeneous computing resources for the MPD experiment with DIRAC Interware, PEPAN, V. 52, N. 4, pp. 999-1005, 2021
- [19] *Moshkin A., Pelevanyuk I., Rogachevskiy O.* Design and Development of Application Software for the MPD Distributed Computing Infrastructure// CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 321–325, 2021.
- [20] *Kashunin I., Mitsyn V., Strizh T.* JINR WLCG Tier1 & Tier2/CICC accounting system // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 285–290, 2021.
- [21] *Kashunin I.A., Mitsyn V.V., Strizh T.A.* Operating Principles of the Accounting System for JINR's Grid Sites // Phys. Part. Nucl. Letters., V. 19, No. 6, pp. 820–825, 2022.
- [22] *Ужвинский А.В.,* Интеллектуальная платформа экологического мониторинга // Открытые системы, Т. 2, с. 21-23, 2021
- [23] *Uzhinskiy A., Vergel K.* Central Russia heavy metal contamination model based on satellite imagery and machine learning // Computer Optics, Vol. 47, No. 1, pp. 137-151, 2023.
- [24] *Butenko Yu., Marov D., Nechaevskiy A., Podgainy D.,* Development of a Service for Conducting Radiobiological Studies on the HybriLIT Platform // CEUR Workshop Proc., V. 2743. P. 26-33, 2020
- [25] *Butenko Yu., Nechaevskiy A., Rahmonov I., Streltsova O.,* Virtual Research Environment NanoHLIT for Hybrid Nanostructures Research on the HybriLIT Platform // CEUR Workshop Proc., V. 3041. P. 407-412, 2021
- [26] *Priakhina D., Trofimov V., Ososkov G. and Gertsenberger K.* Data center simulation for the BM@N experiment of the NICA project // AIP Conference Proceedings, V. 2377, 040007, 2021
- [27] *Ilyina A.V., Pelevanyuk I.S.,* System for planning and logging excursions at JINR, Phys. Part. Nucl. Letters., 2023 (in press)
- [28] *Korenkov V., Kuniaev S., Semashko S., Sokolov I.* Walt platform for web application development // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 387–392.
- [29] *Alexandrov E., et al.* Development of an information-analytical system for the support and maintenance of licenses at MLIT JINR // Труды ИСА РАН, 2023 (in press)
- [30] *Кореньков В.В. и др.* Концепция и реализация Образовательной программы Международной школы по информационным технологиям «Аналитика больших данных» в государственном университете «Дубна» // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание, N. 3, pp. 1–7, 2020
- [31] Сборник отчетов о научно-проектной деятельности выпускников Международной школы по информационным технологиям «Аналитика больших данных», Выпуск 1-3, Редакторы: В.В. Кореньков и др., Изд.: ОИЯИ, 2020-2022