



ЛАБОРАТОРИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИМ. М. Г. МЕЩЕРЯКОВА

Важной составляющей деятельности лаборатории в 2021 г. являлись обеспечение надежного функционирования и развитие сетевой и информационно-вычислительной инфраструктуры, а также развитие математического и программного обеспечения научно-производственной деятельности Института и стран-участниц ОИЯИ на базе Многофункционального информационно-вычислительного комплекса (МИВК) ОИЯИ. Исследования проводились по двум темам: «Информаци-

онно-вычислительная инфраструктура ОИЯИ» и «Методы, алгоритмы и программное обеспечение для моделирования физических систем, математической обработки и анализа экспериментальных данных».

В 2021 г. сотрудниками Лаборатории информационных технологий им. М. Г. Мещерякова опубликовано свыше 200 научных работ, представлено более 150 докладов на международных и российских конференциях.

ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ОИЯИ

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 4×100 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 24×7 , масштабируемость и высокая производительность, надежная система хранения данных, информационная безопасность и развитая программная среда — основные требования, которым отвечает МИВК. Вычислительная инфраструктура ОИЯИ включает в себя ИТ-экосистему для экспериментов мегапроекта NICA (BM@N, MPD, SPD), которая благодаря грид-технологиям (DIRAC Interware) объединяет выделенные вычислительные ресурсы всех компонентов МИВК: грид-сайта Tier-1 для эксперимента CMS на LHC; грид-сайта Tier-2, обеспечивающего

обработку данных экспериментов на LHC, NICA, FAIR и других крупномасштабных экспериментов, а также поддержку пользователей лабораторий ОИЯИ и стран-участниц; интегрированной облачной среды стран-участниц для поддержки пользователей и экспериментов (NICA, ALICE, BESIII, NOvA, Baikal-GVD, JUNO и др.); платформы HybriLIT, в состав которой входит основной ресурс для высокопроизводительных вычислений — суперкомпьютер (СК) «Говорун» и учебно-тестовый полигон.

Сетевая инфраструктура ОИЯИ. Одним из важнейших компонентов ИТ-инфраструктуры ОИЯИ и МИВК, обеспечивающих доступ к интернету, вычислительным ресурсам, системам хранения данных, а также возможность обработки экспериментальных данных и вычислений, является сетевая инфраструктура. Необходимо обеспечить надежную и отказоустойчивую работу всех сетевых компонентов инфраструктуры: внешних телекоммуникационных каналов, магистральной сети ОИЯИ с многоузловой кластерной сетью и локальной сети МИВК.

В 2021 г. обеспечивалось надежное функционирование телекоммуникационных каналов связи ОИЯИ: резервированного канала Москва–ОИЯИ с пропускной способностью 3×100 Гбит/с, прямого канала связи ОИЯИ–ЦЕРН с пропускной

способностью 100 Гбит/с и резервного канала 100 Гбит/с, проходящего через Москву и Амстердам, обеспечивающих функционирование сети LHCORP для связи центров Tier-0 (ЦЕРН) и Tier-1 (ОИЯИ) и внешней наложенной сети LHCONE, предназначенной для центра Tier-2 ОИЯИ, для связи с использованием технологии RU-VRF вместе с RUHEP и сетями Национальной исследовательской компьютерной сети России и RETN. Реализована маршрутизация IPv6 для сай-

тов Tier-1 и Tier-2. В 2021 г. DWDM-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.

Распределение входящего и исходящего трафиков по подразделениям ОИЯИ в 2021 г. (превышающее по входящему трафику 25 ТБ) приведено в табл. 1.

Таблица 1

Подразделение	Входящий трафик, ТБ	Исходящий трафик, ТБ
Лаборатория ядерных проблем	941,90	158,27
Лаборатория информационных технологий	325,56	449,63
Лаборатория физики высоких энергий	280,18	160,98
Гостинично-ресторанный комплекс	171,74	33,52
Университет «Дубна»	129,73	41,08
Лаборатория ядерных реакций	108,59	48,07
Лаборатория нейтронной физики	106,46	69,34
Узел удаленного доступа	77,75	10,44
Управление	76,42	76,51
Учебно-научный центр	29,83	6,35
Лаборатория теоретической физики	26,22	21,64

Общий входящий трафик ОИЯИ, включая серверы общего назначения, Tier-1, Tier-2 и вычислительный комплекс, СК «Говорун» и облачные вычисления, составил в 2021 г. 33,23 ПБ (29,91 ПБ в 2020 г.), общий исходящий — 35,86 ПБ (36,94 ПБ в 2020 г.). Основным является трафик с научно-образовательными сетями, составляющий 97 % от общего.

Локальная вычислительная сеть (ЛВС) базируется на магистральной опорной сети ОИЯИ с пропускной способностью 2×100 Гбит/с и на распределенной многоузловой кластерной сети между площадками ЛЯП и ЛФВЭ (4×100 Гбит/с). В 2021 г. проводились плановая модернизация оборудования и обновление программной части лабораторных маршрутизаторов C9500 фирмы Cisco (с интерфейсами 100 Гбит/с) до самой последней рекомендуемой вендором версии.

Внутренняя сеть МИВК имеет сегмент Tier-1, построенный на фабрике Brocade, с пропускной способностью 80 Гбит/с. Сетевые сегменты системы хранения данных EOS, Tier-2, облачных вычислений и СК «Говорун» построены на основе оборудования Dell и Cisco. Порты с пропускной способностью 10 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 $N \times 100$ Гбит/с.

Внутренняя сеть СК «Говорун» состоит из трех основных частей: сети связи и транспорта, сети управления и мониторинга, сети управления заданиями. Коммуникационная и транспортная сеть использует технологию Intel OmniPath с пропускной способностью 100 Гбит/с. Эта сеть постро-

на 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. Эта сеть построена с использованием коммутаторов HPE Aruba 2530 48G.

В 2021 г. проведена модернизация центрального сетевого виртуального кластера сетевой службы ОИЯИ, который построен на базе открытого программного обеспечения (ПО) Proxmox VE (Virtual Environment) по лицензии GNU. Такой подход позволил использовать центральный кластер NOC в непрерывном режиме работы: 24×7 . Особо следует отметить, что виртуальные машины, работающие в центральном кластере, обслуживают все важнейшие элементы сети ОИЯИ.

На кластере электронной почты @jinr.ru внедрено новое ПО (Proxmox Mail Gateway), благодаря которому значительно сократилось количество нежелательных сообщений — спама за счет обучения системы механизмам спам-фильтрации.

В систему единой авторизации SSO добавлены постоянный мониторинг доступности и журналирование входов в сетевые сеансы. Добавлена возможность редактирования LDAP-записей для работы во внешних сервисах, а также регистрации пользователей, не являющихся сотрудниками ОИЯИ. Увеличен охват Wi-Fi-сети eduoam на территории ОИЯИ.

ЛВС ОИЯИ содержит 8768 сетевых элементов и 17602 IP-адреса, 6377 пользователей сети, 4203 пользователя сервиса mail.jinr.ru, 1419 пользователей электронных библиотек и 504 пользователя сервиса удаленного доступа.

Инженерная инфраструктура МИВК.

В 2021 г. продолжены работы по замене и совершенствованию инженерной инфраструктуры МИВК, предназначенной для обеспечения надежной, бесперебойной и отказоустойчивой работы информационно-вычислительных систем и ресурсов хранения данных.

Вычислительные мощности МИВК размещены в одном вычислительном зале площадью 800 м² на 2-м этаже корпуса ЛИТ. В настоящее время он состоит из восьми отдельных модулей с вычислительным оборудованием (рис. 1) общей допустимой мощностью 2 МВт:

- модулей 1 и 2 (площадью 22,55 м² каждый, 33 серверных стоек мощностью 20 кВт на стойку);
- модуля Tier-1 (площадью 29,33 м², 16 серверных стоек мощностью 35 кВт на стойку);
- пространства библиотеки магнитных лент (площадью 13 м², 2 роботизированных ленточных библиотек IBM TS3500 и IBM TS4500 общей емкостью 50,6 ПБ);
- СК «Говорун» (площадью 1,97 м², 4 стойки мощностью 100 кВт на стойку);

— модуля, в котором размещаются критически важные серверы стандартного типа бизнес-вычислений (административных систем и баз данных и т. д.);

— модуля 4 (площадью 36,12 м², 20 серверных стоек мощностью 35 кВт на стойку);

— модуля сетевого оборудования, в котором размещаются основные сетевые сервисы для МИВК, локальной и глобальной сетей.

Все стойки обеспечены питанием от источников бесперебойного питания с автономностью 10–15 мин и 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.

Модуль Tier-1 и модуль 4 имеют воздушное охлаждение с помощью встроенных межрядных кондиционеров, расположенных между серверными стойками. Модули 1 и 2 имеют воздушное охлаждение, холодный воздух подается через большие воздухопроводы под фальшполом, где он рассеивается через перфорированную плитку пола в холодные коридоры. СК «Говорун» полностью охлаждается «горячей» водой, что обеспечивает плотность мощности 100 кВт на стойку и PUE = 1,06.

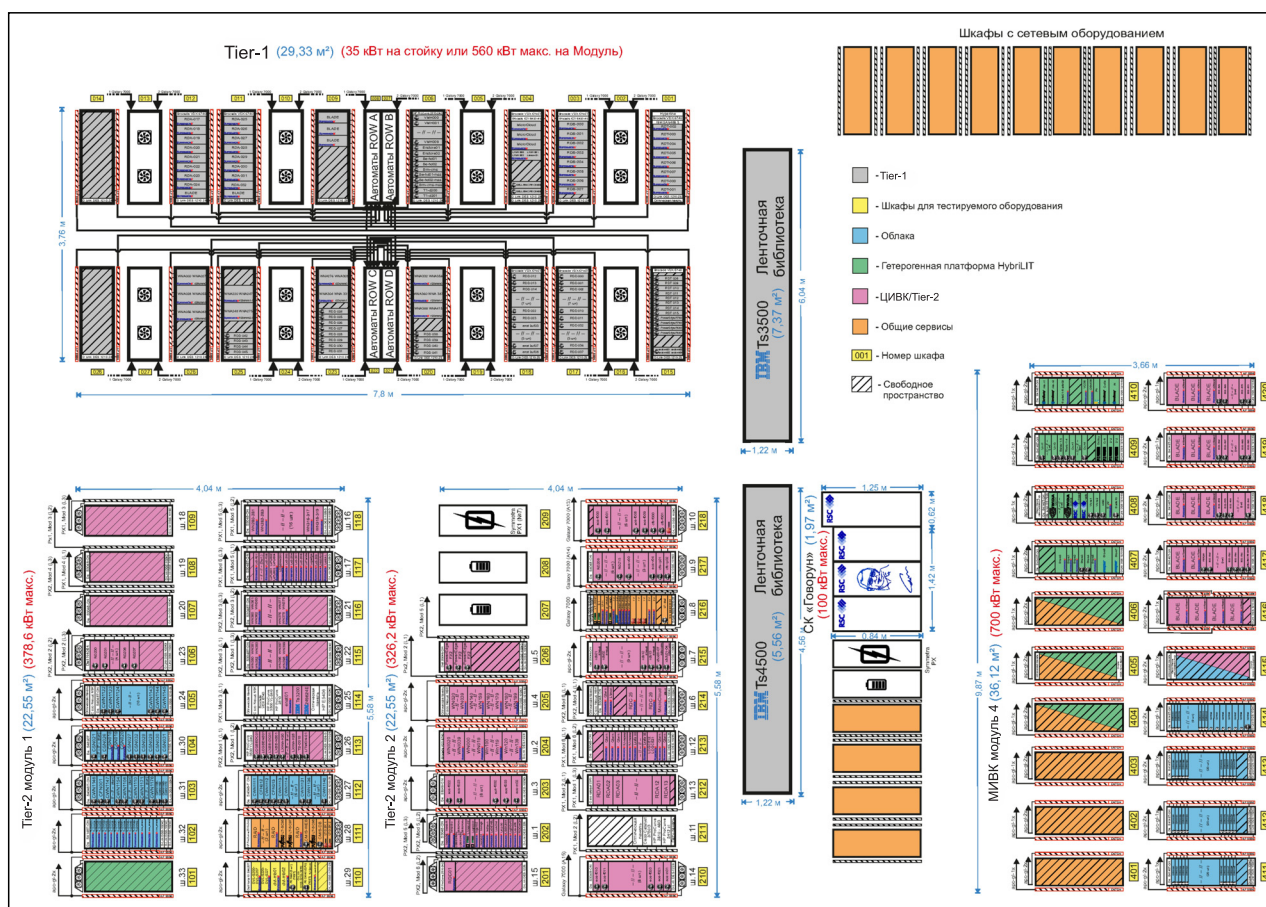


Рис. 1. Расположение устройств в серверном зале МИВК

Все технологическое оборудование, обеспечивающее как гарантированное энергоснабжение МИВК, так и системы охлаждения, расположено на 1-м и цокольном этажах здания ЛИТ. На территории, прилегающей к этому зданию, расположены только чиллеры, сухие градирни и дизель-генераторы.

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

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

Грид-инфраструктура ОИЯИ представлена центром уровня Tier-1 для эксперимента CMS на LHC и центром уровня Tier-2 для обработки данных экспериментов ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, BES, BIOMED, MPD, NOvA, STAR, ILC и др. Оба грид-сайта ОИЯИ в среднем обеспечивают 100%-ю доступность и надежность сервисов.

С 2021 г. ресурсный центр первого уровня Tier-1 используется и для выполнения задач моделирования для эксперимента MPD проекта NICA. В настоящее время в нем 16069 ядер общей производительностью 253 135,18 HEP-SPEC06. Используемое ПО и компиляторы: CentOS Scientific Linux

версии 7.9, gcc (GCC) 4.4.7, C++ (g++ (GCC) 4.4.7), GNU Fortran (GCC) 4.4.7, DCACHE-5.2 для хранения данных, Enstore 6.3 для ленточных библиотек и FTS. Для поддержки экспериментов мегапроекта NICA было установлено ПО FairSoft, FairRoot и MPDRoot. Общая полезная емкость дисковых серверов — 14 ПБ, ленточных библиотек — 50,6 ПБ. Система долговременного хранения данных на библиотеке IBM TS4500 ориентирована на обслуживание экспериментов комплекса NICA и CMS.

В 2021 г. все ресурсы грид-сайтов ОИЯИ были перенесены с CREAM-CE и Torgue-Maui на вычислительный элемент ARC-CE (Advanced Resource Connector-Computing Element) и менеджер ресурсов SLURM (адаптированный к kerberos и AFS), который также используется в СК «Говорун».

По производительности Tier-1 (T1_RU_JINR) занимает первое место в мире среди других центров Tier-1 для эксперимента CMS (рис. 2, а). В 2021 г. обработано более 321 млн событий, что составляет 18 % от общего числа обработанных событий (рис. 2, б) и 29 % от общей загрузки ЦПУ всех центров Tier-1 для эксперимента CMS.

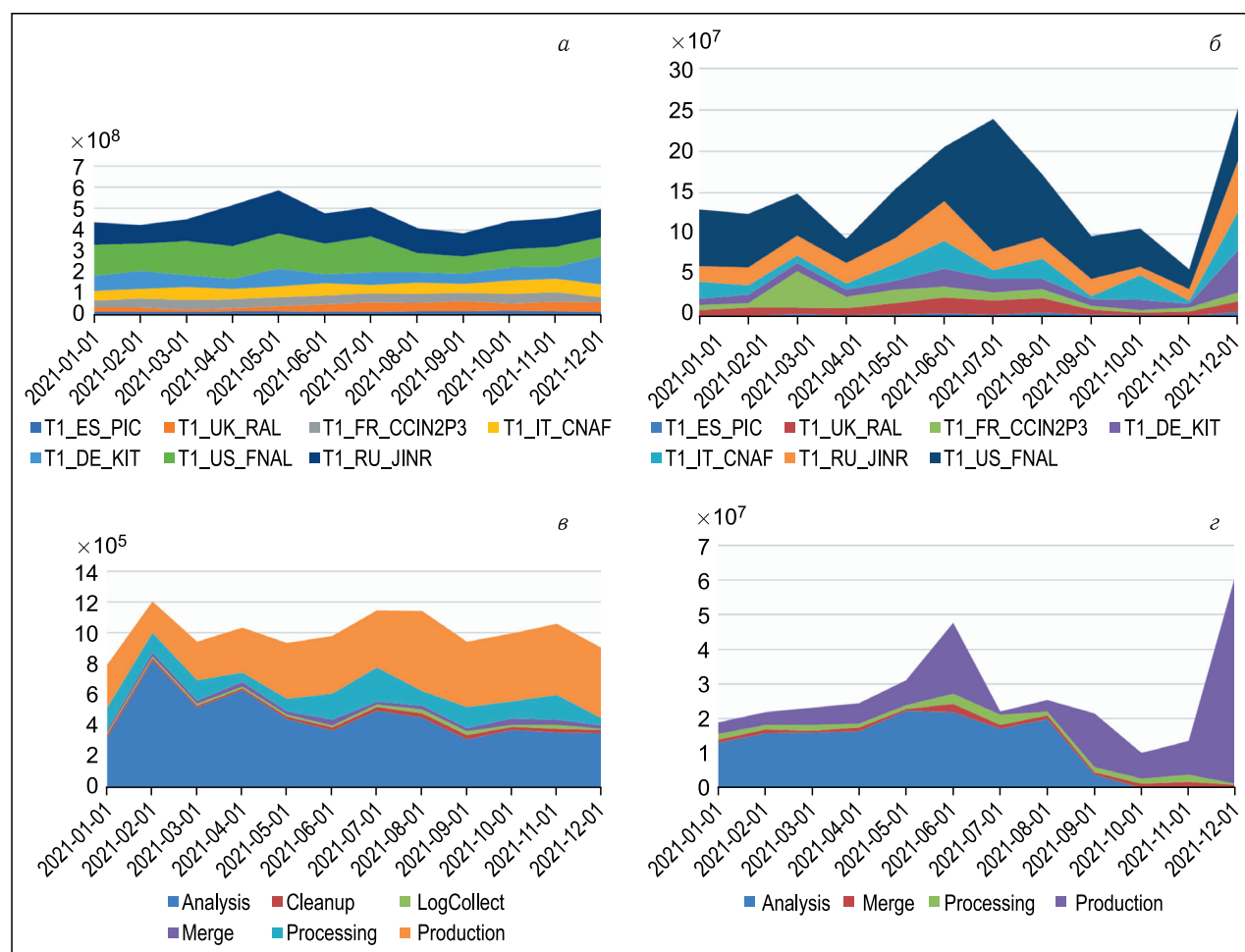


Рис. 2. Вклад мировых центров Tier-1 в обработку экспериментальных данных CMS за 2021 г.: а) распределение по нормированному времени ЦПУ в HEP-SPEC06 часах; б) количество обработанных событий. Статистика использования центра Tier-1 ОИЯИ в эксперименте CMS по разным типам потоковой обработки данных за 2021 г.: в) распределение по числу задач; г) распределение по количеству событий

На рис. 2, в, г показано распределение по числу задач и количеству событий в ОИЯИ в центре уровня Tier-1 для CMS в 2021 г. по разным типам потоковой обработки данных (реконструкция, моделирование, повторная обработка, анализ и т. д.).

Одними из основных функций Tier-1 являются обеспечение обмена данными со всеми мировыми сайтами, работающими на эксперимент CMS, и обеспечение хранения необработанных экспериментальных и моделированных данных. В 2021 г. общий объем обмена данными 210 сайтов глобальной сети WLCG обработки данных экспериментов на LHC с системой хранения на базе dCache в ОИЯИ составил более 30,5 ПБ, из них считано 24 ПБ данных и записано 6,5 ПБ новых файлов.

На рис. 3 приведена статистика обмена данными Tier-1 ОИЯИ с другими грид-центрами объемом больше 100 ТБ по исходящему трафику.

Сайт Tier-2 ОИЯИ является наиболее производительным в российском консорциуме RDIG (Russian Data Intensive Grid). Более 83 % от общего процессорного времени в RDIG используется для вычислений на нашем сайте. Вычислительные ресурсы центра Tier-2 в 2021 г. были расширены до 9272 ядер, что в настоящее время обеспечивает производительность 149 938,7 HEP-SPEC06 часов. Общая полезная емкость дисковых серверов составляет 4763 ТБ для ATLAS, CMS и ALICE и 140 ТБ для других виртуальных организаций. На рис. 4, а показано распределение выполненных

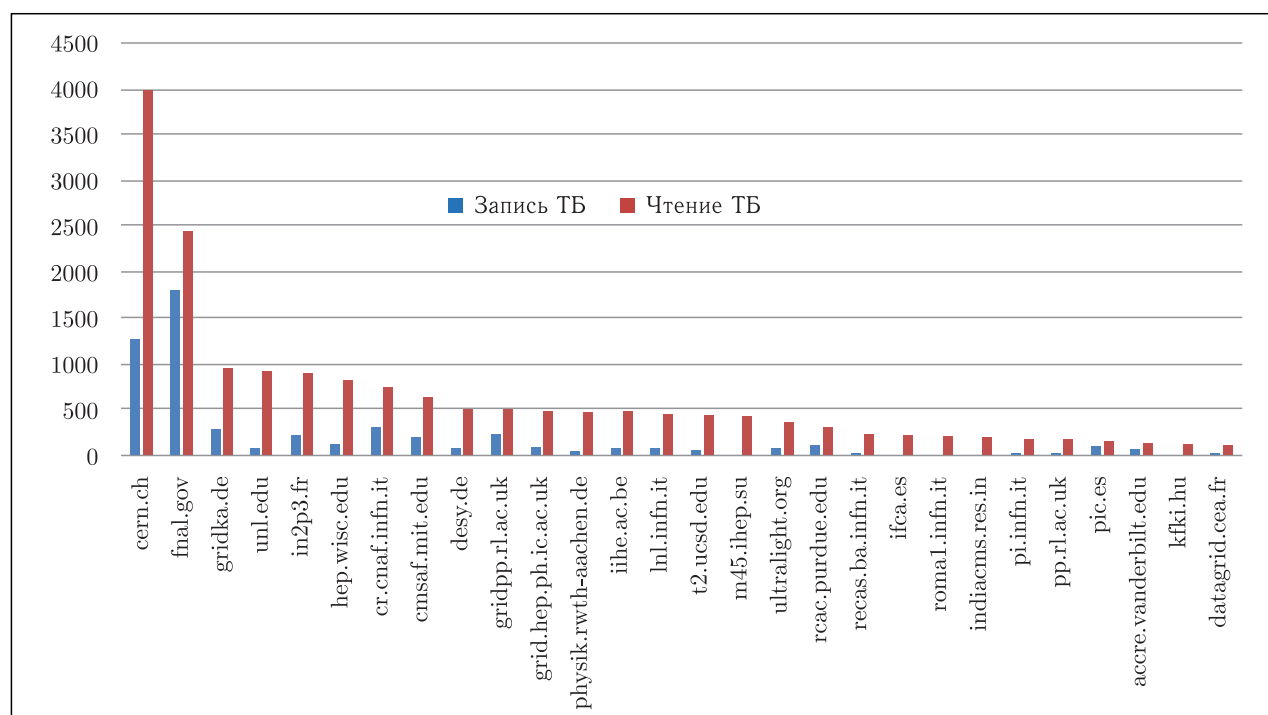


Рис. 3. Статистика обмена данными Tier-1 ОИЯИ с мировыми центрами обработки данных инфраструктуры WLCG через систему хранения данных на базе dCache

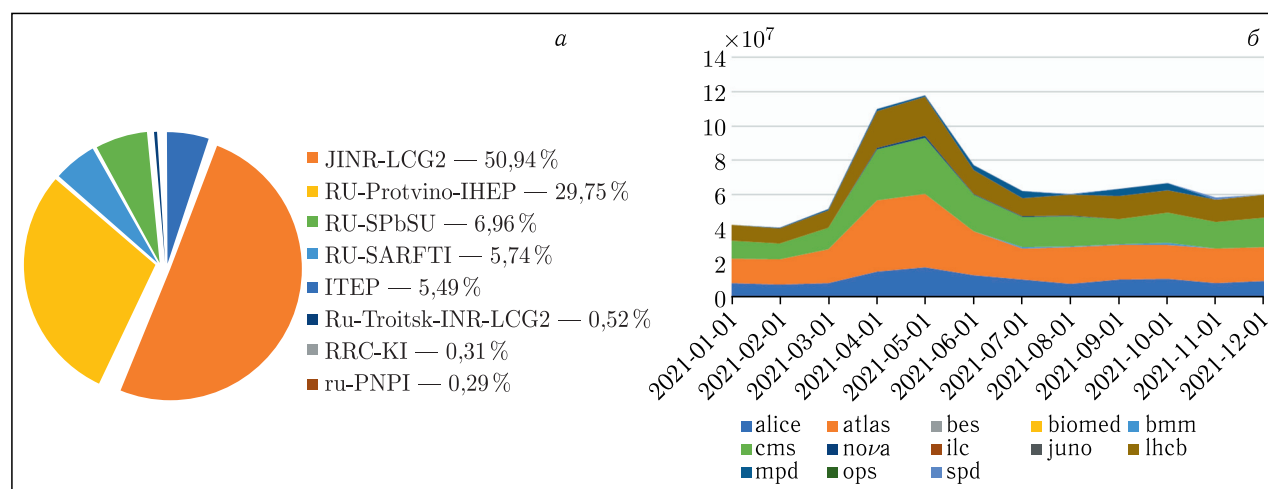


Рис. 4. Статистика работы Tier-2 ОИЯИ: а) распределение по числу задач по сайтам организаций, входящих в российский консорциум RDIG; б) данные по использованию сайта Tier-2 ОИЯИ виртуальными организациями глобальной грид-инфраструктуры (по нормированному времени ЦПУ в HEP-SPEC06 часах)

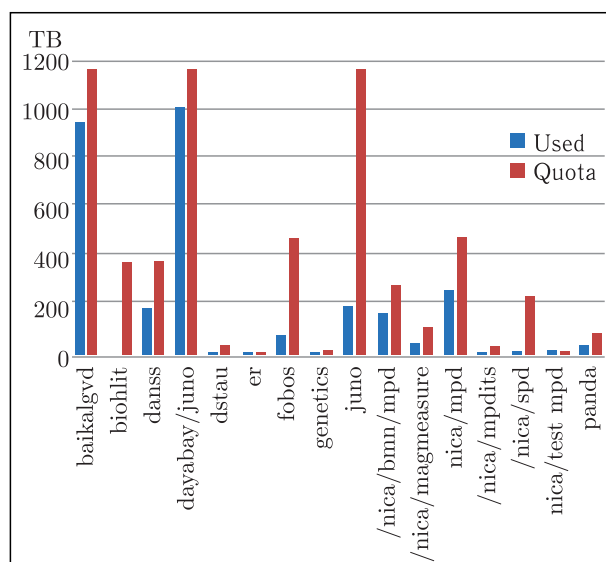


Рис. 5. Потребление ресурсов хранения в системе EOS группами пользователей и экспериментами ОИЯИ

на грид-сайтах RDIG задач. На рис. 4, 6 приведены данные по использованию сайта Tier-2 ОИЯИ (JINR-LCG2) виртуальными организациями в рамках грид-проектов в 2021 г.

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

В 2021 г. была расширена система хранения данных на базе ПО EOS до 16,7 ПБ. На рис. 5 представлена статистика использования системы EOS.

Для обеспечения гарантированной и стабильной работы инфраструктуры в условиях постоянной нагрузки требуются централизованное и своевременное техническое обслуживание ПО и быстрое внедрение новых вычислительных узлов. В качестве решения этой задачи была создана служба управления жизненным циклом (LMS), целью которой является автоматизация процесса, связанного с обслуживанием программного обеспечения и с вводом в эксплуатацию новых вычислительных ресурсов [2].

Облачная среда. 2021 г. был в основном посвящен оптимизации облачных вычислений ОИЯИ. В дополнение к хранилищу на базе серh общего назначения с общей полной емкостью 1,1 ПБ были развернуты два новых элемента хра-

нения: 1) хранилище только для нужд эксперимента NOvA; 2) 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 приведены в табл. 2.

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 той же системе. ПО Grafana использовалось 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 ПО Foreman и Puppet.

На рис. 6 приведена информация о потреблении ресурсов облачной инфраструктуры в 2021 г.

Облако ОИЯИ является одним из участников распределенной информационно-вычислительной среды (DICE), основанной на ресурсах ОИЯИ и организаций его государств-членов [3, 4]. Объем облачных ресурсов ОИЯИ, вносимых в DICE, варьируется в зависимости от его загрузки.

В 2021 г. облако египетской национальной сети НТИ Академии научных исследований и технологий было запущено в эксплуатацию и интегрирова-

Таблица 2. Основные параметры элементов облачного хранилища

Хранилище	Тип диска	Потребители	Версия серh	Полная емкость, ПБ	Реплики	Подключение
Обычное облачное	HDD	Все	14.2.21	1,1	3 ×	2 × 10GBase-T
NOvA	HDD	NOvA	15.2.11	1,5	3 ×	2 × 10GBase-T
Быстрое облачное	SSD	Пользователи с высоким требованием к вводу-выводу	15.2.13	0,419	3 ×	4 × 10GBase-T + 2 × 100Gbps –

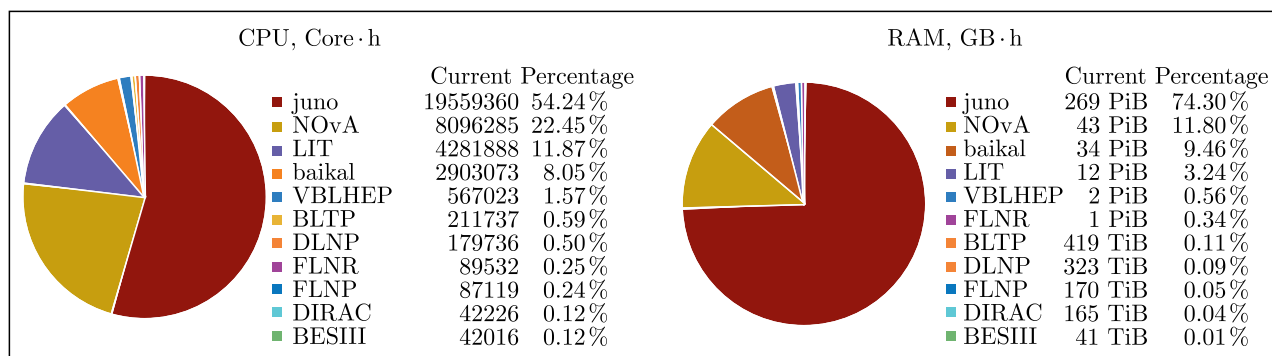


Рис. 6. Статистика использования облачных вычислений экспериментами и подразделениями ОИЯИ

но в DICE ОИЯИ. В настоящее время полностью интегрированы в DICE Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова (Россия), Северо-Осетинский государственный университет им. К. Л. Хетагурова (Россия), Астанинский филиал Института ядерной физики (Казахстан), Институт физики Национальной академии наук Азербайджана, Академия научных исследований и технологий (египетская национальная сеть НТИ), Ин-

ститут ядерных исследований и ядерной энергии (Болгария), Софийский университет им. св. Климента Охридского, Научно-исследовательский институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, в процессе интеграции — Институт ядерной физики (Узбекистан) и Грузинский технический университет.

Общее количество заданий, выполненных наиболее активными облаками DICE ОИЯИ, приведено на рис. 7.

Как и в 2020 г., свободные ресурсы DICE ОИЯИ были задействованы в исследованиях вируса SARS-CoV-2 в рамках платформы Folding@Home. На рис. 8 показан вклад каждого из ресурсных центров DICE в эти исследования.

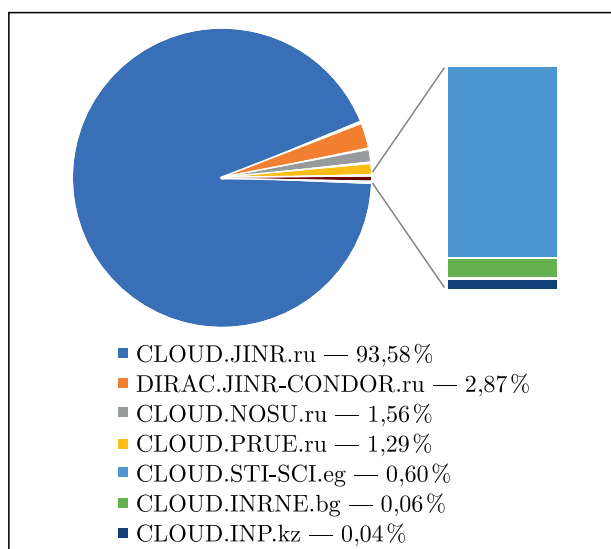


Рис. 7. Распределение заданий, выполненных в DICE ОИЯИ в 2021 г.

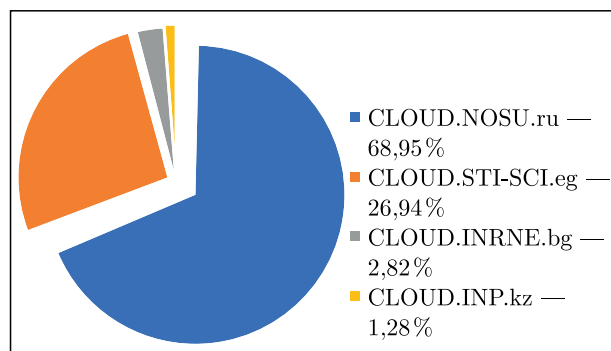


Рис. 8. Распределение вкладов участников DICE в исследование вируса SARS-CoV-2 посредством платформы Folding@Home

Гетерогенная инфраструктура. Гетерогенная инфраструктура МИВК ОИЯИ представлена платформой HybriLIT, состоящей из учебно-тестового полигона и СК «Говорун», объединенных единой программно-информационной средой. В 2021 г. на платформе интенсивно развивалась информационно-вычислительная система (ИВС) для решения задач, связанных с расчетами электронных оболочек сверхтяжелых элементов. ИВС включает в себя вычислительные ресурсы СК «Говорун» и необходимые для моделирования электронных оболочек набор ИТ-решений и ПО. Созданная ИВС позволяет решать задачи разных типов с различными требованиями к объему как вычислительных ресурсов, так и данных, а также к 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 электронных свойств сверхтяжелых элементов с использованием ПО AMS и DIRAC.

Еще одним важным направлением, связанным с развитием ИВС, является разработка квантовых алгоритмов, реализующихся на симуляторах квантовых вычислений. С этой целью в ИВС был имплементирован ряд квантовых симуляторов, способных работать на различных вычислительных архитектурах.

Для работы с большими данными, в том числе для мегапроекта NICA, была разработана и внедрена в СК «Говорун» иерархическая система обработки и хранения данных с программно-определяемой архитектурой [5]. По скорости доступа к данным система разделена на уровни, доступные по выбору пользователя. Самый быстрый уровень иерархической системы реализован на базе новейшей технологии DAOS (Distributed Asynchronous Object Storage), которая была развернута на восьми узлах СК «Говорун» и продемонстрировала высокую скорость чтения/записи, заняв 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. 9).

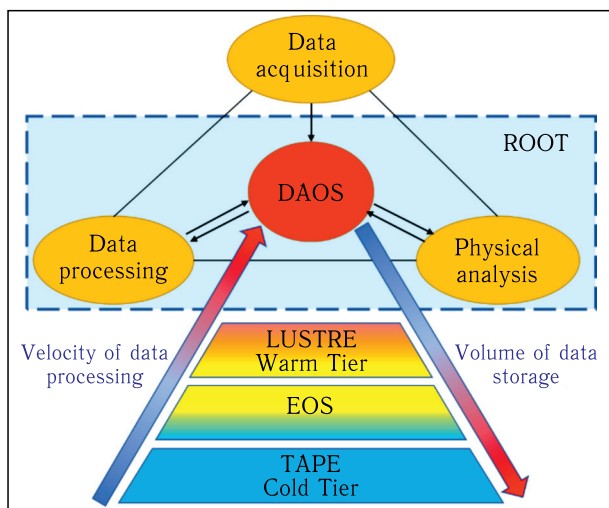


Рис. 9. Планируемое использование технологии DAOS для проекта NICA

Использование DAOS для проекта NICA позволит сохранять и читать многомерные структуры данных ТБ-масштаба в едином адресном пространстве. Технология DAOS является перспективной и в отношении применения к другим типам задач, связанных с большими данными, — это, в первую очередь, задачи ML/DL, а также квантовые вычисления [6, 7].

За 2021 г. в среду HybriLIT были внедрены и поддерживались по требованию групп пользователей актуальные версии свыше 20 программных пакетов, в частности: Quantum Espresso (ЛТФ); JAM, актуальные версии FairSoft, FairRoot с надстройками для BmnRoot и MPDRoot (NICA); AMS, FLUKA, FLAIR (ЛЯР); ORCA (ЛЯП); MAGMA, ViennaCL, Tesseract (ЛИТ) и др.

Общее число зарегистрированных пользователей СК «Говорун» к настоящему времени составляет 517 человек, из них 322 — сотрудники ОИЯИ, 195 — из стран-участниц.

В течение 2021 г. всеми группами пользователей, использующими ресурсы СК «Говорун»,

было выполнено 551 016 задач, что соответствует 40 млн ядро-часов, а на GPU-компоненте — 56 763 задачи, что соответствует 18 158 GPU-часам. Средняя загрузка CPU-компоненты составила 96,1 %, а загрузка GPU — 92,3 %.

Пользователями платформы за 2021 г. было издано 38 статей, из них 11 работ — в Q1 и 4 — в Q2, включая опубликованную коллаборацией BM@N статью в журнале Nature Physics (*BM@N Collab. Unperturbed Inverse Kinematics Nucleon Knockout Measurements with a 48 GeV/c Carbon Beam* // Nature Phys. 2021. V. 17. P. 693–699).

Интеграция вычислительных ресурсов.

Важной особенностью созданной инфраструктуры является интеграция распределенных вычислительных ресурсов. Вот уже три года в ОИЯИ функционирует система интеграции гетерогенных распределенных 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 др.) и пилотных задач. На конец 2021 г. в DIRAC были интегрированы все компоненты МИБК, облака стран-участниц ОИЯИ, кластер NICA, а также кластер Национального автономного университета Мексики (НАУМ) в рамках сотрудничества по проекту MPD. За 2021 г. были добавлены новые облака стран-участниц. На рис. 10 приведен вклад всех интегрированных в платформу DIRAC организаций в обработку данных.

Всего за 2021 г. было выполнено 614 тыс. задач (+30 % по сравнению с 2020 г.). Среднее время выполнения задачи составило 7,6 ч. Общее количество потребленных вычислительных ресурсов: 86 млн HEP-SPEC06 часов (+65 % по сравнению с 2020 г.). Запущены первые физические задачи экспериментов BM@N и SPD. Таким образом, в настоящее время распределенная инфраструктура используется следующими экспериментами: MPD, Baikal-GVD, BM@N, SPD (рис. 11).

С помощью интеграции через DIRAC удалось задействовать наибольшее количество вычислительных ресурсов для централизованной генерации данных методом Монте-Карло для эксперимента MPD. В вычислениях участвовали СК «Говорун», кластеры Tier-1 и Tier-2, кластер NICA. Успешно выполнено более 505 тыс. задач. Все данные зарегистрированы в файловом каталоге DIRAC и сохранены в системе EOS.

Для того чтобы упростить доступ членов коллаборации MPD к вычислительным ресурсам, было разработано специальное приложение, позволяющее описывать задачу генерации данных в таких физических терминах, как энергия столкновений, тип используемого генератора, материал мишени и пучка [8]. Разработанное приложение было интег-

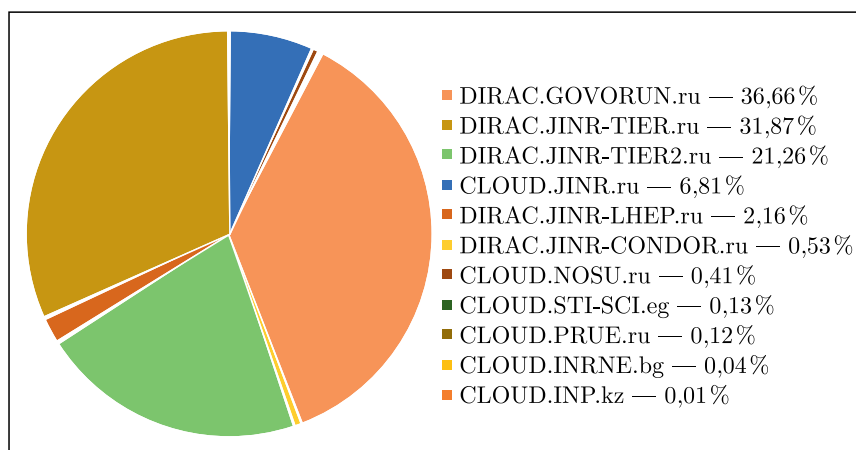


Рис. 10. Вклад всех интегрированных в платформу DIRAC организаций в обработку данных

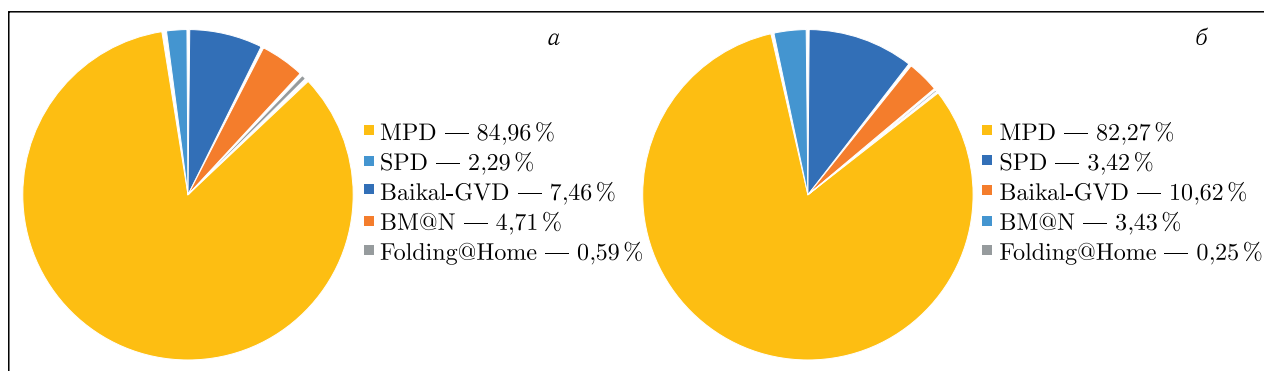


Рис. 11. Потребление ресурсов, интегрированных в DIRAC, основными пользователями: а) вычислительные ресурсы в HEP-SPEC06 часах; б) по числу задач

рировано в веб-интерфейс платформы DIRAC в ОИЯИ и доступно всем пользователям MPD.

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. В 2021 г. в общую систему мониторинга Litmon была включена новая система аккаунтинга [9], которая позволяет получать 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. Система позволяет осуществлять учет ресурсов и их использование в рамках распределенной системы обработки данных.

Информационные сервисы. В 2021 г. разработана и внедрена в эксплуатацию система электронного документооборота (СЭД) «Авансовые отчеты», предназначенная для электронной записи в бухгалтерию ОИЯИ, чтобы получить аванс и отчитаться по командировкам и хозяйственным рас-

ходам. Система обеспечивает предварительную загрузку необходимых данных для ускорения работы бухгалтерии, а также формирует ряд финансовых отчетов.

Выполнен ряд работ по развитию и текущему сопровождению СЭД «Дубна». В частности, внедрены новые документы «Поручение» и «Запрос» с возможностью автоматического контроля сроков исполнения, документ «Штрабэг (КС-2, КС-3, счет на оплату)», «НИОСЭН архив» для хранения технической документации НИОСЭН ЛФВЭ. Выполнен ряд работ по адаптации СЭД «Дубна» к изменениям в организации закупочных процедур в ОИЯИ.

Осуществлялись текущее сопровождение и развитие по запросам пользователей информационных систем АРТ EVM для NICA, CERNDB, ИСНА, HR LHEP, ADB2, PIN, ИСС, «База документов», «Электронный фотоархив».

В 2021 г. были продолжены работы по совершенствованию и применению платформы WALT (Web Application Lego Toolkit), предназначенной для разработки веб-приложений различной степени сложности. В отличие от многих других платформ, которые представляют собой «волшебный черный ящик», основная идея WALT заключается в предоставлении прозрачных, расширяемых и модифицируемых инструментов для реше-

ния 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. [10].

В целях повышения качества учета публикационной активности сотрудников ОИЯИ в 2021 г. были продолжены работы по развитию и внедрению в опытную эксплуатацию информационной систе-

мы институционального репозитория научных публикаций на базе программной платформы JOIN2 (сервер публикаций ОИЯИ — publications.jinr.ru). Для достижения данной цели ведутся работы по организации единой подсистемы ввода библиографических метаданных в информационные системы «Сервер публикаций ОИЯИ» и «Персональная информация о сотрудниках ОИЯИ» (PIN).

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

Одним из направлений деятельности ЛИТ является обеспечение математической, алгоритмической и программной поддержки экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в ОИЯИ. Ниже приведена краткая информация о важнейших полученных результатах.

Для оптимизации характеристик сверхпроводящих магнитов в рамках проекта NICA (ОИЯИ) в 2021 г. проводилось трехмерное моделирование квадрупольного магнита коллайдера, дипольного магнита вертикального вывода, линзы финального фокуса. Исследовались силы, действующие на сверхпроводящую обмотку соленоида для детектора SPD, и уровень магнитного поля в области детекторов установки BM@N.

Проведен сравнительный анализ эффективности численных расчетов статических магнитных полей методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics® в терминах как векторного, так и полного скалярного потенциала магнитостатики для моделирования магнитных систем ускорителей [11]. Для иллюстрации численных расчетов использовалась модель дипольного магнита, предназначенного для формирования магнитного поля в изохронном циклотроне SC200. Эффективность обоих методов анализируется в терминах стандартных параметров метода конечных элементов с учетом затрат вычислительных ресурсов. В частности, показано, что использование скалярного потенциала по сравнению с его векторным аналогом значительно уменьшает число степеней свободы, затраты компьютерной памяти и времени при относительно одинаковой погрешности вычислений.

Проведена детальная настройка моделирования для дрейфовых камер установки BM@N с учетом всех типов данных, набранных во время сеансов в 2018 г., для более точной идентификации результирующих частиц. Показано, что результаты моделирования полностью совпадают с экспериментальными данными. Получены эффективности реконструкции для всех типов данных и частиц [12].

Разработаны геометрическая и программная модели детекторов трековой системы (GEM, Forward Silicon и CSC) для эксперимента

BM@N [13]. Реализованы алгоритмы реалистичного монте-карло-моделирования и реконструкции пространственных координат точек пролета заряженных частиц через плоскости детекторов.

Продолжены исследования по разработке алгоритмов на основе глубоких нейронных сетей для реконструкции треков элементарных частиц в экспериментах BM@N, SPD и BESIII. Усовершенствованы алгоритмы локального (TrackNETv2) и глобального (RDGraphNet) слежения и LOOT [14–16]. Все разработанные модели глубоких нейронных сетей успешно внедрены в Ariadne — библиотеку для трекинга частиц методами глубокого обучения, разрабатываемую авторами.

Разработана система метаданных событий [17] для экспериментов проекта NICA, представляющая собой базу данных, содержащую сводные данные о событиях столкновения частиц и ссылки на место их хранения в распределенном хранилище, что обеспечивает быстрый поиск и отбор требуемого набора событий по хранимым метаданным для их дальнейшей обработки и физического анализа. Она включает в себя базу метаданных событий, веб-сервис для просмотра метаданных и отбора событий, программный интерфейс для автоматизированной записи новых метаданных во время обработки событий и запроса требуемых событий согласно заданным критериям для физического анализа в ПО эксперимента. Система метаданных событий была интегрирована вместе с базой данных условий (Condition DB), в разработке которой также принимали участие сотрудники ЛИТ.

Проведено моделирование, описывающее структуру адронов в рамках сильнокоррелированной кварковой модели. Показано, как свойства мезонов и барионов могут меняться в плотной ядерной среде: нуклоны преобразуются в дельта-изобары, гипероны и их возбужденные состояния, а мезоны рождаются преимущественно через векторные резонансы. Кроме того, свойства векторных мезонов, состоящих из легких кварков, меняются кардинально: ширина распада растет, а масса уменьшается [18]. Подобные модификации в ядерной среде, особенно в диапазоне энергий ме-

гасайенс-проекта NICA, могут приводить к таким наблюдаемым эффектам, как усиление странности, «эффект рога» и усиление дилептонных инвариантных спектров масс в диапазоне 0,2–0,7 ГэВ.

Систематически исследован и применен разработанный ранее метод конструкции фазового перехода в ядерной материи при экстремальных условиях, образующихся в ядрах нейтронных звезд [19]. Конструкция позволила моделировать уравнения состояния ядерной материи, допускающей фазовый переход даже в случаях, когда отсутствует точка равновесия фаз в физически обоснованной области плотностей. Показаны применимость данной конструкции и ее ограничения.

Разработан алгоритм разграничения перекрывающихся сигналов от двух заряженных частиц в детекторе CSC (Cathode Strip Chambers) для эксперимента CMS. Для CSC-камер специальной геометрии ME1/1, разработанных и собранных в ОИЯИ, проведена настройка реконструкции в проблемных зонах [20]. Разработанные алгоритмы позволили более точно и качественно реконструировать хиты и сегменты в мюонной системе CMS в общем и в ME1/1-камерах в частности. Авторский программный код внедрен в официальное ПО CMS и будет использоваться по умолчанию, начиная с набора данных на LHC Run3.

В рамках развития ПО для подготовки к Run3 в эксперименте ATLAS проведена модернизация компоненты Resource Manager в соответствии с новыми правилами по поддержке безопасности [21]. Разработан новый сервис EventPicking для проекта ATLAS EventIndex, автоматизирующий процедуру поиска местоположения событий с помощью EventIndex и отправки заданий в PANDA для получения запрошенных событий [22]. Сервис использовался для второго этапа анализа событий $\gamma\gamma \rightarrow WW$. Продолжены работы по конвертированию данных из старого формата в CREST и по совершенствованию соответствующего инструментария.

Совместно с физиками из ЛЯР ОИЯИ разработана компьютерная модель тонкой структуры, найденной в ходе экспериментов с трансурановым элементом калифорнием [23]. Для проверки гипотезы о том, что найденная структура объективно существует, а не является шумовым артефактом, применена глубокая сверточная нейронная сеть в качестве бинарного классификатора. Предварительные результаты применения разработанного нейроклассификатора показывают перспективность предложенного подхода.

Проведено моделирование рассеивания загрязняющих веществ в воздухе на основе регрессионной модели землепользования (LUR). Тестирование проводилось в регионе Tritia. Рассмотрены два набора факторов загрязнения воздуха — данные о выбросах и результаты модели дисперсии. Проведено сравнение регрессии на основе нейронных сетей с линейной регрессией. Регрессия на основе нейронной сети показала значительно более высо-

кие результаты. Было доказано, что она оказывает положительное влияние на качество моделей LUR, поскольку лучше отражает общий нелинейный характер рассеивания загрязняющих веществ [24].

Трехчленная функция потерь была успешно использована для значительного повышения точности в задачах распознавания, связанных с растительностью [25]. Первая задача — обнаружение болезней растений на 25 классах пяти культур (виноград, хлопчатник, пшеница, огурцы и кукуруза). Вторая задача — определение видов мха (на 5 классах). В обеих задачах использованы самостоятельно собранные авторами базы данных изображений. Сиамская нейросеть с трехчленной функцией потерь и MobileNetV2 в качестве базовой архитектуры показали точность 97,8% при обнаружении болезней растений и 97,6% при классификации видов мха.

В 2021 г. библиотека JINRLIB пополнилась разработанной сотрудниками ЛИТ программой RK4-MPI — параллельной реализацией численного решения задачи Коши методом Рунге–Кутты 4-го порядка с использованием технологии MPI (<http://wwwinfo.jinr.ru/programs/jinrlib/rk4-mpi/indexe.html>).

В сотрудничестве с ЛНФ с помощью метода разделенных формфакторов проведен анализ спектров малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН), измеренных с помощью спектрометра ЮМО на полидисперсных популяциях однослойных везикул фосфолипидной транспортной наносистемы и нанопрепарата Indolip в тяжелой воде при трех концентрациях. Основные структурные параметры этих везикулярных систем, полученные при компьютерном анализе спектров МУРН, в целом согласуются с соответствующими результатами обработки данных малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР). В то же время метод МУРН оказывается менее чувствительным, чем МУРР, в части детального учета особенностей строения бислоя оболочки везикул [26].

Методом молекулярной динамики исследованы образцы меди, железа и никеля со структурой реальных кристаллов с заданными дефектами типа пор, облученные нанокластерами меди с энергией 1–100 эВ/атом [27]. Моделирование и тестирование проводились с помощью модифицированного пакета LAMMPS, установленного на кластере HybriLIT. В рамках численного моделирования исследовано влияние ударных волн на дефектные структуры типа пор в мишени. Получены пороговые значения энергии облучения нанокластерами меди, при которых меняется структура дефекта в мишенях. Полученные результаты показывают большую устойчивость дефектов типа пор в железной мишени к воздействию ударной волны по сравнению с образцами меди и никеля.

Разработаны и численно реализованы новые эффективные алгоритмы расчета нормированного мотовского дифференциального сечения рассеяния релятивистских электронов с использованием ку-

лоновского потенциала, а также расчета суммарной поправки Мотта–Блоха к формуле Бете для ионизационных потерь энергии тяжелыми ионами на основе предложенного представления точного сечения Мотта в терминах моттовских парциальных амплитуд [28]. Показаны неприменимость известных приближенных методов расчета сечения для тяжелых элементов и предпочтительность использования разработанного алгоритма для расчета нормированного сечения Мотта в области высоких и средних значений энергии электронов.

Вычислены релятивистские энергии основного состояния двухцентровых задач для уравнения Дирака с точностью 8–9 знаков при межъядерном расстоянии $2/Z$ до $Z = 121$ [29]. В расчетах использовались орбитали слэтеровского типа (до орбитали $g_{9/2}$, максимальное число базисных функций 62) и метод минимакса. Основное преимущество этого метода состоит в том, что условия кинетического баланса не используются для исключения ложного решения, тем самым значительно повышается скорость сходимости по числу базисных функций.

Предложен метод, позволяющий экстраполицию асимптотических рядов на конечные значения параметров связи, а также на их бесконечные пределы [30]. Метод основан на применении автомоделных фактор-аппроксимаций, позволяющих экстраполицию значений функций на произвольные значения параметров связи при известных только разложениях этих функций по малым параметрам связи. Эффективность метода проиллю-

стрирована несколькими задачами квантовой теории поля.

Проведены расчеты спектра вибрационно-ротационных связанных, метастабильных состояний и состояний рассеяния димера бериллия в основном состоянии $X^1\Sigma_g^+$ [31]. Задача решена с использованием разработанного авторского программного пакета KANTBP 5M, реализующего метод Ньютона и метод конечных элементов высокого порядка точности. Впервые получен спектр ротационно-вибрационных метастабильных состояний димера бериллия с комплексными собственными значениями энергии. Представленный подход, реализованный в виде комплекса программ, является полезным инструментом для исследования слабосвязанных состояний с собственными значениями энергии, близкими к порогу диссоциации, и процессов приповерхностной диффузии двухатомных молекул.

Продолжены исследования, связанные с анализом квантового информационного ресурса конечномерных квантовых систем с помощью метода квазираспределений в фазовом пространстве [32]. Введены меры квантовости, позволяющие количественно описать степень отличия квантовых состояний от соответствующего классического аналога. С учетом свойств отрицательности соответствующего квазираспределения Вигнера вычислен индикатор квантовости базовых систем, кубитов и кутритов для различных метрик (Гильберта–Шмидта, Буреса и Боголюбова–Кубо–Мори), заданных на пространстве квантовых состояний.

НАУЧНО-ПРИКЛАДНЫЕ РАБОТЫ

На основе объединения суперкомпьютеров ОИЯИ, Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук и Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого создана масштабируемая исследовательская инфраструктура нового уровня. Такая инфраструктура востребована для задач мегасайенс-проекта NICA, к настоящему времени на ней было запущено 3000 задач генерации и реконструкции событий для эксперимента MPD. В результате было сгенерировано и реконструировано порядка 3 млн событий. Полученные данные перемещены в Дубну для дальнейшей обработки и физического анализа.

Разработан прототип «Информационно-аналитической системы сопровождения лицензий ЛИТ» (ИАЛ, <http://soft-lit.jinr.ru>). 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 контроля за соблюдением правил ли-

цензионной политики. База данных системы содержит всю информацию по закупленным 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. Веб-интерфейс реализован в среде разработки WALT.

В рамках совместного проекта ЛИТ и ЛРБ продолжает развиваться информационная система (ИС) для задач радиационной биологии BIO-HLIT (<https://bio.jinr.ru/>). Алгоритмический блок ИС основан на методах машинного и глубокого обучения, а также компьютерного зрения. В 2021 г. разработаны алгоритмы автоматизированной разметки и отслеживания поведения лабораторного животного с построением качественной траектории его движения и точной разметки экспериментальной установки (рис. 12). Разработаны компоненты визуализации результатов анализа данных [33].

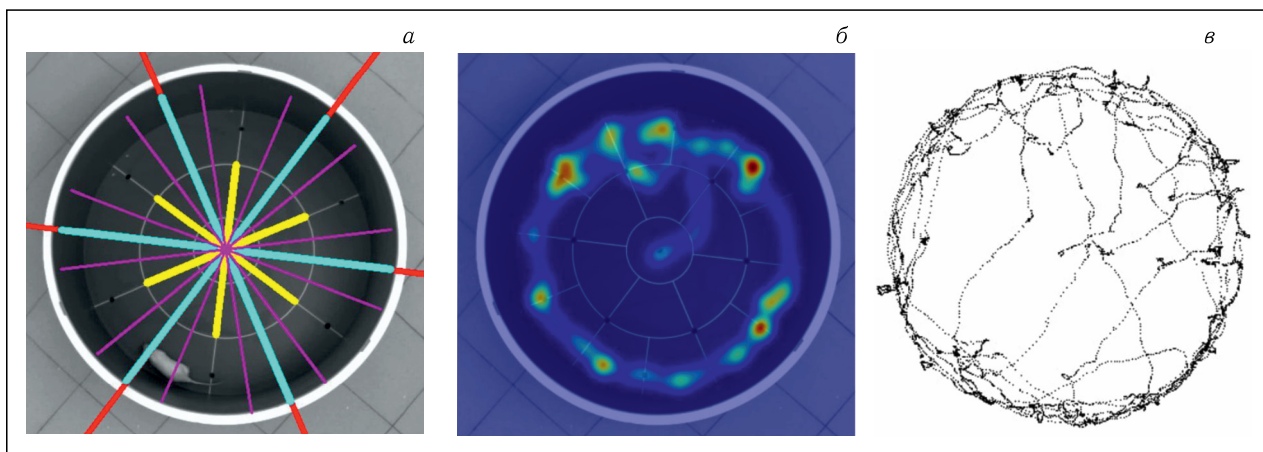


Рис. 12. а) Автоматизированная разметка и уточненные центры секторов экспериментальной установки «Открытое поле»; б) тепловая карта перемещений лабораторного животного в экспериментальной установке; в) покадровая траектория перемещений животного

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

В сотрудничестве с ЛТФ и Каирским университетом рассчитаны сечения упругого рассеяния заряженных пи-мезонов на ядрах ^{28}Si , ^{40}Ca , ^{58}Ni , ^{208}Pb в диапазоне энергии от 130 до 290 МэВ [34]. Расчеты проводились в рамках двух моделей микроскопического оптического потенциала (ОП): фолдинговой модели ОП и локальной модифицированной модели ОП Кисслингера. Сечения пион-нуклонного рассеяния получены на основе численного решения уравнения Клейна–Гордона. Для обеих моделей ОП результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными. На основе фитирования параметров элементарной $\pi \pm N$ -амплитуды в фолдинговом ОП к экспериментальным данным $\pi \pm A$ -рассеяния исследовано влияние ядерной среды на механизм пион-нуклонного рассеяния.

В результате сотрудничества ЛИТ, ЛТФ и Китайского института атомной энергии (СИАЕ) разработаны новый теоретический подход к методу связанных каналов, стабильные вычислительные схемы, алгоритмы и новая модифицированная про-

грамма KANTBP 3.1, реализующая метод конечных элементов высокого порядка точности [35]. Рабочая версия данной программы использовалась для расчета сечений слияния тяжелых ионов $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$, $^{64}\text{Ni} + ^{64}\text{Ni}$, $^{64}\text{Ni} + ^{100}\text{Mo}$, $^{28}\text{Si} + ^{64}\text{Ni}$, $^{36}\text{S} + ^{48}\text{Ca}$. Результаты проведенных расчетов этих сечений и астрофизического S -фактора хорошо согласуются с доступными экспериментальными данными.

В рамках совместного гранта ОИЯИ с Румынией разработан прототип системы IFA Database для управления исследовательскими программами. Предполагается, что система будет основным инструментом организации конкурсного финансирования исследований в Румынии. Прототип системы IFA Database реализован на основе платформы WALT, разрабатываемой сотрудниками ЛИТ, и включает в себя следующие модули: регистрацию и вход в систему различных пользователей, подачу заявки на грант, панель администратора, регистрацию и валидацию организаций в системе.

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА НА УЧЕБНО-ТЕСТОВОМ ПОЛИГОНЕ

В 2021 г. на платформе HybriLIT проводились учебные курсы и практические занятия по направлениям «Высокопроизводительные вычисления и суперкомпьютерные технологии» и «Машинное обучение и интеллектуальный анализ данных». На учебно-тестовом полигоне зарегистрированы 780 студентов государственного университета «Дубна» и более 300 студентов и аспирантов из других университетов России и стран-участниц ОИЯИ. С использованием ресурсов платформы HybriLIT за 2021 г. подготовлено 9 магистерских диссертаций и бакалаврских работ.

Продолжает реализовываться программа международной школы по информационным технологиям «Аналитика больших данных» на базе государственного университета «Дубна», студенты которой задействованы в реальных научных проектах ОИЯИ. Результаты выпускной группы представлены в сборнике отчетов научно-проектной деятельности школы: <http://itschool.jinr.ru/discipline.html#science-project>.

В 2021 г. в Северо-Осетинском государственном университете прошло рабочее совещание «Распределенные вычисления и наука о данных»,

в рамках которого студенты прослушали учебный курс «Распределенные вычисления, машинное и глубокое обучение для решения прикладных задач», а также состоялась 3-я ИТ-школа молодых ученых «Современные ИТ-технологии для решения научных задач», в которой приняли участие более 60 студентов и преподавателей университетов Юга России (из Северной Осетии, Кабардино-Балкарии, Чечни) и Юго-Осетинского государ-

ственного университета им. А. А. Тибилова. Прочитаны лекции о научных проектах ОИЯИ, о развиваемых в ОИЯИ информационных технологиях и решениях для научных задач, проведены мастер-классы и учебные курсы по распределенным вычислениям, виртуализации и облачным технологиям, алгоритмам машинного и глубокого обучения для анализа сложноструктурированных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baginyan A. et al.* // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 1–6.
2. *Baranov A. et al.* // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 429–433.
3. *Balashov N. et al.* // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 280–284.
4. *Kutovskiy N., Pelevanyuk I., Zaborov D.* // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 196–201.
5. *Podgainy D. et al.* // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 612–618.
6. *Moshkin A. A. et al.* // Russian Supercomputing Days: Proc. of the Intern. Conf. 2021. P. 4–11.
7. *Kudryavtsev A. O., Podgainy D. V., Moskovsky A. A.* // ISC High Performance 2021, Hamburg, Germany, May 29 – June 2, 2021; <https://www.isc-hpc.com/>;
Moskovsky A. A., Brekhov A. T., Podgainy D. V., Kudryavtsev A. O. // Sixth Intern. Parallel Data Systems Workshop, Nov. 15, 2021; <https://sc21.supercomputing.org/session/?sess=sess332>;
Val'a M., Podgainy D., Lavrenko P., Brekhov A. // 5th Annual DAOS User Group Meeting, Nov. 19, 2021; <https://daosio.atlassian.net/wiki/spaces/DC/pages/11015454821/DUG21>.
8. *Moshkin A., Pelevanyuk I., Rogachevskiy O.* // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 321–325.
9. *Kashunin I., Mitsyn V., Strizh T.* // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 285–290.
10. *Korenkov V., Kuniaev S., Semashko S., Sokolov I.* // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 387–392.
11. *Chervyakov A.* // Intern. J. Engin. Systems. 2021. V. 4. P. 1–17.
12. *Palichik V., Voytishin N.* // Phys. Part. Nucl. Lett. (submitted).
13. *Baranov D.* // AIP Conf. Proc. 2021. V. 2377. P. 060002.
14. *Shchavelev E. et al.* // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 218–222.
15. *Nikolskaya A. et al.* // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 332–337.
16. *Rezvaya E. et al.* // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 138–142.
17. *Alexandrov E. et al.* // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 439–444.
18. *Musulmanbekov G.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2021. V. 18, No. 5. P. 548–558.
19. *Ayriyan A. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2021. V. 57, No. 318. 18 p.
20. *Palichik V., Voytishin N.* // Programme Advisory Committee for Particle Physics, Jan. 24, 2022.
21. *Kazarov A. et al.* // Eur. Phys. J. Web Conf. 2021. V. 251. P. 04019.
22. *Alexandrov E. et al.* // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 223–228.
23. *Ососков Г. А., Пятков Ю. В., Руденко М. О.* // Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 5(237). С. 430–447.
24. *Bitta J., Svozilik V., Svoziliková Krakovská A.* // Atmosphere. 2021. V. 12, No. 4. P. 452.
25. *Uzhinskiy A. V. et al.* // Comp. Optics. 2021. V. 45, No. 4. P. 608–614.
26. *Киселев М. А. и др.* Препринт ОИЯИ РЗ-2021-49. Дубна, 2021;
Киселев М. А. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования (в печати).
27. *Шарипов З. А. и др.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования (в печати).
28. *Kats P. B., Halenka K. V., Voskresenskaya O. O.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2021. V. 18, No. 3. P. 277–283.
29. *Chuluunbaatar O. et al.* // Chem. Phys. Lett. 2021. V. 784. P. 139099-1–139099-9.
30. *Yukalov V. I., Yukalova E. P.* // Phys. Rev. D. 2021. V. 103. P. 076019.
31. *Derbov V. L. et al.* // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2021. V. 262. P. 107529.
32. *Abgaryan V., Khvedelidze A., Torosyan A.* // Phys. Lett. A. 2021. V. 412, No. 7. P. 127591.
33. *Stadnik A. et al.* // CEUR Workshop Proc. 2021. V. 3041. P. 348–352.
34. *Lukyanov V. K. et al.* // Nucl. Phys. A. 2021. V. 1010. P. 122190.
35. *Wen P. W. et al.* // Phys. Rev. C. 2021. V. 103. P. 054601.