

# ЛАБОРАТОРИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ им. М. Г. МЕЩЕРЯКОВА

Деятельность Лаборатории информационных технологий им. М. Г. Мещерякова в 2025 г. была сосредоточена на обеспечении надежного функционирования и развития сетевой и информационно-вычислительной инфраструктуры в рамках крупного инфраструктурного проекта 06-6-1118-1-2014/2030 «Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс (МИВК)», а также развитии математического и программного обеспечения (ПО) научно-производственной деятельности Института и государств-членов ОИЯИ (проект 06-6-1119-1-2014/2026 «Математические методы, алгоритмы и программное обеспечение для моделирования физических процессов и экспериментальных установок, обработки и анализа экспериментальных данных» и проект 06-6-1119-2-2024/2026 «Методы вычислительной физики для исследования сложных

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

В 2025 г. сотрудниками ЛИТ было опубликовано свыше 200 научных работ, 4 монографии, более 150 статей в рамках международных коллабораций, представлено более 150 докладов на международных и российских конференциях.

ЛИТ провела два важных мероприятия, посвященных памятным датам основателей лаборатории: 115-летию со дня рождения М. Г. Мещерякова, а также 95-летию со дня рождения Н. Н. Говоруна, к этому событию был приурочен выпуск книги-альбома о Н. Н. Говоруне. Также прошли 11-я Международная конференция «Распределенные вычисления и грид-технологии в науке



17 сентября. Заместитель научного руководителя ЛИТ Т. А. Стриж выступает с докладом на мемориальном семинаре в честь 115-летия со дня рождения М. Г. Мещерякова

и образовании» (GRID'2025), рабочее совещание по квантовым вычислениям и машинному обучению (QCMML), научно-практический семинар HybriLIT-2025 «На пути к эффективным научным

вычислениям» и традиционная IT-школа ОИЯИ, при участии ЛИТ прошла Международная конференция по физике высоких энергий (СНЕР-Yerevan'2025).

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ОИЯИ

Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс является ключевым звеном вычислительной инфраструктуры и играет определяющую роль в научных исследованиях, требующих значительных вычислительных мощностей и системы хранения данных. МИВК представляет собой сложный аппаратно-программный комплекс, основными элементами которого являются инженерные системы энергообеспечения и климат-контроля, сетевая инфраструктура, система передачи и хранения данных, грид-центры обработки данных уровней Tier-1 и Tier-2, облачная инфраструктура, платформа HybriLIT, в состав которой входит суперкомпьютер (СК) «Говорун», и система мониторинга всех компонентов комплекса. Для достижения главных целей ведущих проектов ОИЯИ в 2025 г. обеспечивались высокая производительность, надежность и доступность в режиме  $24 \times 7 \times 365$  всех компонентов МИВК.

Грид-сайт Tier-1, предназначенный для экспериментов CMS на LHC, занял второе место среди семи аналогичных мировых центров. Tier-2/ЦИВК обеспечивал комплексную обработку и анализ данных, полученных в ходе экспериментов на LHC, NICA и в других крупномасштабных научно-исследовательских проектах. Особое внимание уделялось поддержке пользователей из лабораторий ОИЯИ и стран-участниц: им предоставлялись необходимые вычислительные ресурсы и инструментарий для работы с данными. Облачная инфраструктура ОИЯИ и стран-участниц была преимущественно задействована для проведения вычислительных задач в рамках нейтринной программы ОИЯИ, что позволяло эффективно решать сложные задачи, связанные с анализом нейтринных данных. Суперкомпьютер «Говорун» был задействован как для проведения массивно-параллельных и ресурсоемких расчетов, так и для вычислений, в которых используются методы искусственного интеллекта в рамках экосистемы ML/DL/HPC.

### Сетевая инфраструктура ОИЯИ

Сетевая инфраструктура, развернутая в рамках проекта МИВК, является ключевым элементом, обеспечивающим внешние телекоммуникационные каналы связи, взаимодействие пользователей МИВК посредством локальной сети ОИЯИ, а также обмен данными в рамках локальной сети МИВК.

В 2025 г. обеспечена надежная работа резервированного канала до Москвы с пропускной способностью  $4 \times 100$  Гбит/с. Для функционирования грид-сайта уровня Tier-1, соответствующего самым высоким стандартам производительности и надежности, требуется полноценное участие в сети LHCOPN (Large Hadron Collider Optical Private Network) для бесперебойной коммуникации с Tier-0 (ЦЕРН) и другими сайтами Tier-1. Данная связь обеспечивается высокоскоростным прямым каналом связи ОИЯИ-ЦЕРН пропускной способностью 100 Гбит/с, а также резервным каналом 100 Гбит/с, проходящим через Москву и Амстердам, обеспечивающим отказоустойчивость и непрерывность передачи данных. Связность Tier-2 ОИЯИ эффективно поддерживается внешней наложенной сетью LHCOPE (LHC Open Network Environment), специально разработанной для грид-сайтов второго уровня и оптимизированной для их потребностей в передаче данных. Связь с научными и образовательными организациями Российской Федерации, а также в интеграции с отдельными зарубежными научно-образовательными сетями NRENs (National Research and Education Networks) и глобальной сетью Интернет осуществляется через национальную исследовательскую компьютерную сеть (НИКС) России.

В 2025 г. общий входящий трафик составил 64,14 ПБ, что на 51% больше трафика 2024 г., исходящий трафик увеличился на 13% по сравнению с прошлым годом. Это увеличение связано с ростом передачи данных на обработку и хранение данных на Tier-1. Трафик с научно-образовательными сетями является основным и составляет 88% от общего. Распределение входящего и исходящего трафика по подразделениям в 2025 г. (превышающего по входящему трафику 25 ТБ) приведено в табл. 1.

Локальная вычислительная сеть (ЛВС) построена на базе магистральной опорной сети ОИЯИ ( $2 \times 100$  Гбит/с) и распределенной многоузловой кластерной сети между площадками ЛЯП и ЛФВЭ ( $4 \times 100$  Гбит/с). Это обеспечивает надежную передачу физических данных от комплекса NICA для их последующей обработки и анализа на компонентах МИВК.

За год почтовой службой обработано 4,7 млн входящих и 950 тыс. исходящих сообщений. Среднее время обработки одного сообщения составляет 3,4 с.

Таблица 1

Подразделение	Входящий трафик, ТБ	Исходящий трафик, ТБ
ЛИТ	1070,0	180,46
ЛФВЭ	558,29	223,37
ГРК	520,92	145,28
ЛЯП	353,25	120,38
Управление	190,1	89,69
ЛНФ	187,27	59,71
ЛЯР	185,47	35,43
Университет «Дубна»	160,59	55,93
МСЧ-9	20,28	18,7
Серверы общего доступа	95,52	94,89
Узел удаленного доступа	78,64	11,56
УНЦ	75,93	10,48
ЛТФ	44,85	29,85
УСИ	39,71	8,06
ЛРБ	39,16	3,33
ОГЭ	29,42	2,62

В 2025 г. обработано более 1600 заявок пользователей ОИЯИ, касающихся работы сети и сервисов. Значительно усилена проверка безопасности входящей электронной почты домена @jinr.ru, добавлены сотни новых фильтров. Велись поддержка работоспособности ~30 серверов и виртуальных машин, мониторинг свыше 820 сетевых устройств. Выявлено и обработано порядка 50 инцидентов с нарушением сетевой безопасности.

ЛВС ОИЯИ содержит 14 328 сетевых элементов, 23 746 IP адресов ipv4, 1490 IP адресов ipv6, 5933 пользователя (из них 5376 — сотрудники ОИЯИ), 5083 адреса электронной почты

@jinr.ru, 1151 пользователя электронных библиотек, 1021 пользователя сервиса удаленного доступа и 171 пользователя сервиса EDUROAM. В процедуры регистрации добавлена поддержка новых категорий пользователей — ассоциированный персонал и студенты.

### Инженерная инфраструктура МИВК

В 2025 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. На протяжении года выполнялись работы по установке новых серверов различных конфигураций и сетевых коммутаторов.

В настоящее время вычислительные мощности МИВК размещены в единственном вычислительном зале площадью 900 м<sup>2</sup> на 2-м этаже здания ЛИТ. В 2025 г. была проведена существенная модернизация инженерной инфраструктуры двух модулей, связанная с переходом в них на охлаждение холодного коридора межрядными кондиционерами.

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

В 2025 г. продолжалось успешное функционирование грид-сайтов ОИЯИ. Оба грид-сайта обеспечивали как обработку и анализ данных в рамках участия ОИЯИ в проектах LHC в ЦЕРН, так и решение задач по моделированию, обработке и хранению данных экспериментов VM@N, MPD и SPD на ускорительном комплексе NICA.



Вид сверху на модернизированные модули 1 и 2, переведенные на охлаждение холодного коридора межрядными кондиционерами, в машинном зале МИВК

Грид-среда ОИЯИ в составе грид-сайтов Tier-1 (T1\_RU\_JINR) и Tier-2 (JINR-LCG2) обеспечивает функционирование вычислительного комплекса, системы хранения данных, сервисов грид, сервиса передачи данных и информационного сервиса (мониторинг серверов, хранилищ, передачи данных, информационных сайтов).

Ключевой задачей стала миграция вычислительных ресурсов Tier-1 и Tier-2 на операционную систему (ОС) AlmaLinux 9.6 в связи с окончанием жизненного цикла ОС CentOS 7. Для массового перевода счетных узлов был разработан и внедрен полностью автоматизированный конвейер переустановки. За октябрь-ноябрь успешно переведено 629 из 920 узлов. Дополнительно создан инструмент для выгрузки и валидации конфигураций узлов.

В 2025 г. производительность Tier-1 была увеличена на 32 %, и в настоящее время он содержит 468 вычислительных узлов (23 360 ядер) производительностью 427,92 kHS23. Хранение данных обеспечивается системой dCache емкостью 15,0 ПБ и роботизированным ленточным хранилищем общей емкостью 100 ПБ. Для работы с лентами используется дисковый массив для кэширования данных емкостью 2,24 ПБ.

В 2025 г. сайт Tier-1 ОИЯИ занял второе место по числу обработанных событий (рис. 1) и суммарному нормированному процессорному и фактическому времени, затраченному на обра-

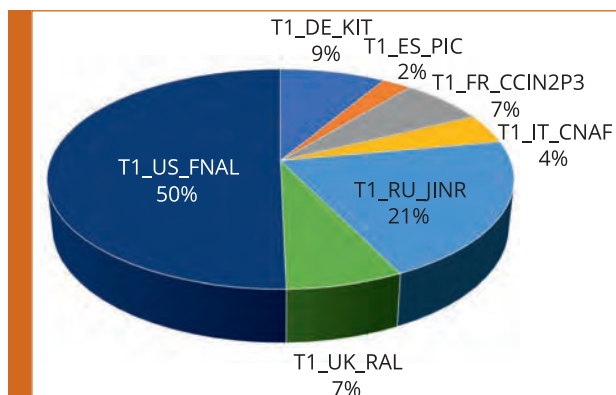


Рис. 1. Распределение обработанных в 2025 г. событий на мировых сайтах Tier-1 эксперимента CMS на LHC

Таблица 2

Tier-1	Суммарное время CPU (kHS23 час)	Суммарное фактическое время (kHS23 час)
T1_US_FNAL	4 089 705,009	4 920 606,964
T1_RU_JINR	2 106 701,086	2 871 833,526
T1_UK_RAL	1 347 308,725	1 671 293,034
T1_DE_KIT	1 247 756,876	1 448 471,493
T1_ES_PIC	1 232 820,775	1 266 032,136
T1_FR_CCIN2P3	943 818,023	1 066 548,004
T1_IT_CNAF	642 358,043	900 642,478

ботку данных, в рейтинге мировых сайтов Tier-1, обрабатывающих данные эксперимента CMS на LHC (табл. 2) по статистике на портале <https://accounting.egi.eu>.

Как и в предыдущие годы, сайт Tier-1 ОИЯИ выполнял задачи моделирования и обработки данных экспериментов BM@N, MPD и SPD на NICA (рис. 2).

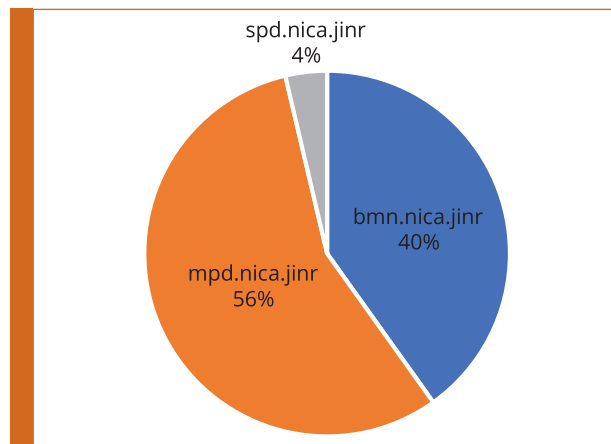
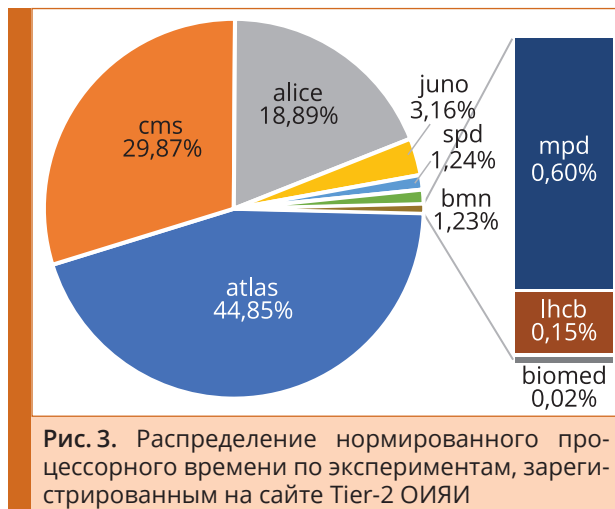


Рис. 2. Распределение нормированного процессорного времени по задачам экспериментов BM@N, MPD и SPD на сайте Tier-1 ОИЯИ

В состав сайта Tier-2 входят 485 вычислительных узлов (10 356 ядер) общей производительностью 166,8 kHS23. Хранение данных обеспечивают система dCache для экспериментов CMS и ATLAS емкостью 4,84 ПБ и система EOS-Alice емкостью 1,5 ПБ.

На сайте Tier-2, который в 2025 г. остался практически единственным, получающим задачи российского грид-сегмента (РДИГ), выполнено более 5 млн заданий, что составило 99,92 % от суммарного процессорного времени РДИГ (рис. 3).

Развивается прототип распределенной среды моделирования, обработки и анализа данных эксперимента SPD на базе ПО PANDA. Основной вклад в обеспечение функционирования распределенной среды хранения и обработки данных эксперимента SPD вносит МИВК ОИЯИ в виде ресурсов Tier-1/Tier-2, удостоверяющего центра, хранилища EOS и машин облачного сервиса, на которых размещены все управляющие сервисы эксперимента [1]. В 2025 г. к вычислениям подключились два новых центра: в СамГУ и СПбГУ. В течение года сгенерировано более 1 млрд Монте-Карло событий общим объемом около 500 ТБ. Для управления формированием централизованных заданий на обработку была разработана и введена в эксплуатацию специализированная система, содержащая интерфейс для отправки заданий в распределенную вычислительную среду. В 2025 г. для эксперимента выделена система хранения EOS объемом 7 ПБ, на которую в течение лета были перенесены все его данные. Введены в эксплуатацию системы мониторинга виртуальных машин, системы обработ-



ки и управления данными, произведена интеграция сервиса авторизации IAM (Identity and Access Management) с системами хранения данных, проверена работа нового способа аутентификации пользователей с помощью токенов JWT (JSON Web Token) без использования сертификатов X.509.

Продолжаются работы по созданию специализированной вычислительной системы SPD OnLine Filter [2]. Сформирована и реализована методика интеграционных тестов промежуточного ПО, при которой все системы, входящие в программный комплекс, работают совместно друг с другом. Разработана система, позволяющая достаточно эффективно эмулировать поступление данных от системы сбора данных SPD (SPD DAQ Emulator).

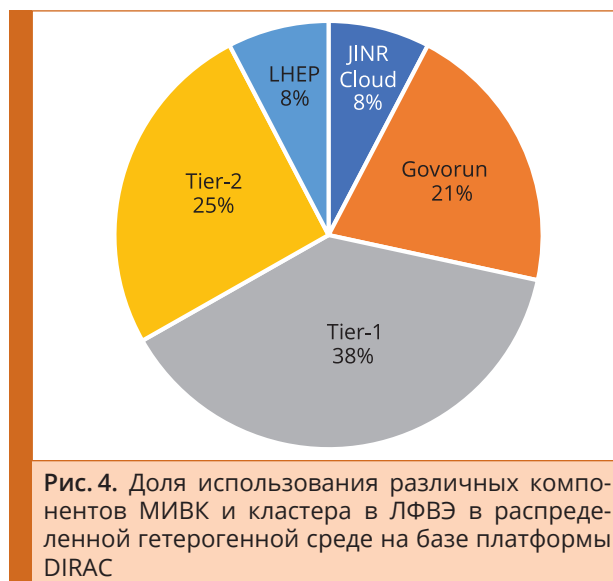
С 2019 г. функционирует распределенная гетерогенная вычислительная среда, основанная на платформе DIRAC. Интеграция ресурсов в рамках данной среды основана на использовании стандартных протоколов доступа к данным (xRootD, GridFTP и др.) и использовании пилотных задач. Благодаря этому пользователю предоставляется единая среда, в которой можно запускать задачи, управлять данными, выстраивать процессы и контролировать их выполнение.

В 2025 г. реализована система массовой передачи данных с помощью задач DIRAC. Разработанный подход позволил достигнуть скорости передачи до 10 ГБ/с и передавать данные на системы хранения, доступные исключительно локально. Проведена интеграция FTS (File Transfer Service) в платформу DIRAC, благодаря чему появилась возможность перемещать большие объемы данных между хранилищами и эффективно копировать данные с лент CTA (CERN Tape Archive) на диски.

Разработан набор инструментов для анализа соответствия между файловым каталогом DIRAC и системами хранения, доступными по протоколу root. Этот инструментариий подразумевает автоматизированное удаление файлов и директорий,

информация о которых отсутствует в файловом каталоге. Также благодаря ему можно приводить в соответствие структуры файлов и директорий между файловым каталогом и локальными системами хранения. Реализован новый подход к визуализации структуры директорий и файлов экспериментов, использующих файловый каталог DIRAC.

Всего за 2025 г. было выполнено 600 тыс. вычислительных задач общей длительностью 408 лет астрономического времени или 3,68 MHS06 дней. Вычислительные ресурсы в 2025 г. в DIRAC в основном использовались для экспериментов BM@N и MPD (рис. 4). С выключением сервиса VOMS для эксперимента SPD в ОИЯИ перестал быть доступным DIRAC.



## Гетерогенная инфраструктура

В 2025 г. активно развивалась платформа HybriLIT, являющаяся компонентом МИВК ОИЯИ, предназначенным для проведения массивно-параллельных и ресурсоемких расчетов, а также исследований с использованием методов и подходов искусственного интеллекта [3]. Был проведен очередной этап модернизации суперкомпьютера «Говорун». Вычислительные ресурсы GPU-компонента суперкомпьютера были расширены за счет интеграции двух новых вычислительных узлов на основе уникального серверного решения «РСК Экзастрим ИИ» на жидкостном охлаждении. Эти узлы были созданы специально для СК «Говорун» с учетом его архитектурных особенностей. Каждый узел содержит восемь графических ускорителей NVIDIA H100. В результате пиковая производительность компонента СК «Говорун» на графических ускорителях (GPU) выросла на 36 %, достигнув 1,4 Пфлопс для операций с двойной точностью, а совокупная мощность всего СК «Говорун» составила 2,2 Пфлопс для вычислений



17 сентября. Визит делегации кафедры ИЯФиТ МИФИ в ОИЯИ для обсуждения подготовки кадров в интересах лабораторий и научных проектов Института

с двойной точностью и 58 Пфлопс для вычислений с половинной точностью для задач искусственного интеллекта.

В 2025 г. программно-информационная среда платформы HybriLIT пополнилась новым сервисом, предназначенным для оценки эффективности использования вычислительных ресурсов суперкомпьютера ([http://hlit.jinr.ru/accounting\\_and\\_statistics\\_processing\\_systems/](http://hlit.jinr.ru/accounting_and_statistics_processing_systems/)). Сервис позволяет осуществлять мониторинг производительности, накопление и анализ статистики использования вычислительных ресурсов различными группами пользователей, а также выявлять тенденции в использовании ресурсов. Для управления сортировкой в элементах системы доступны селекторы, которые позволяют сортировать данные по годам и счетным очередям или одновременно по обоим параметрам (рис. 5). Новый сервис разработан на основе Busi-

ness Intelligence системы Yandex DataLens. Источником данных для сервиса является база данных планировщика задач SLURM.

В рамках совместного проекта ЛИТ, ЛТФ ОИЯИ и ФБУЗ МСЧ № 9 ФМБА России на базе экосистемы ML/DL/HPC развернут полигон для работы с медицинскими данными компьютерной, магнитно-резонансной и функциональной магнитно-резонансной томографии для форматов DICOM и Nifti в среде JupyterLab (<http://hlit.jinr.ru/polygon-ct-mri/>). Для визуализации медицинских данных на полигоне установлены библиотеки PyDicom, Nipype, PySurfer, позволяющие строить 3D-изображения человеческого мозга. Полигон развернут для апробации различных программных пакетов визуализации и разработки программного обеспечения для внедрения нового математического подхода реконструкции изображений.

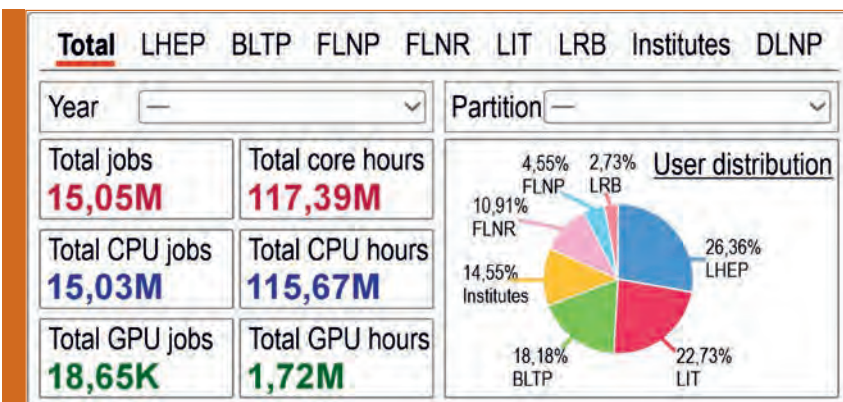


Рис. 5. Система аккаунтинга суперкомпьютера «Говорун». Элемент главной страницы



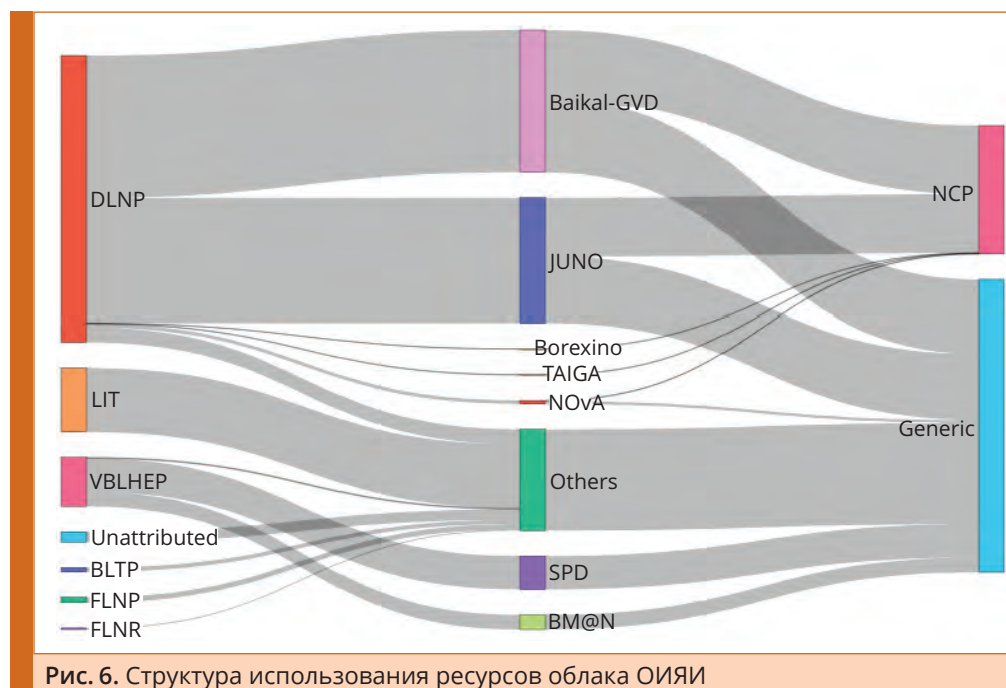
25–26 ноября. Рабочее совещание HybriLIT

Проводилось регулярное техническое обслуживание всех компонентов платформы HybriLIT, включая суперкомпьютер «Говорун». Для счетных очередей СК «Говорун» для различных групп пользователей осуществлялись переконфигурирование очередей под текущие нужды пользователей, создание и изменение систем хранения данных Storage-on-Demand, поддержание очередей в рабочем состоянии, т. е. проверка и оперативное восстановление работы вычислительных узлов и сервисов. Также в рамках перехода платформы на ОС AlmaLinux 9.6 выполнены работы по установке и конфигурированию программного продукта XCAT, предназначенного для быстрого разворачивания и настройки операционной системы на вычислительном узле, и подготовлены настройки для виртуальных машин (поль-

зовательских интерфейсов платформы). Общее число пользователей СК «Говорун» к настоящему времени составляет 357 человек. В течение 2025 г. было выполнено порядка 6,8 млн задач, что соответствует 34 млн ядро-часов.

### Облачная инфраструктура

В 2025 г. продолжались работы по развитию облачной инфраструктуры ОИЯИ, являющейся универсальным компонентом МИВК, предназначенным для предоставления вычислительных ресурсов и размещения информационных и вычислительных сервисов. Основными и наиболее ресурсоемкими потребителями этих ресурсов являлись научные проекты Института, в частности нейтринный эксперимент Baikal-GVD, а также эксперименты проекта NICA (рис. 6). В течение



года ресурсы предоставлялись более чем ста активным пользователям и обеспечивали функционирование 857 виртуальных машин, суммарно использующих 5472 процессорных ядра. В облачной инфраструктуре эксплуатировались и сопровождалась батч-кластер HTCondor с рядом грид-сервисов, составляющих нейтринную вычислительную платформу (NCP), сервис коллективной разработки программного обеспечения git.jinr.ru, среда интерактивного программирования jupyter.jinr.ru, а также информационные и прикладные веб-сервисы newdle.jinr.ru, webanalytics.jinr.ru и docs.jinr.ru.

Одним из важнейших направлений работ в отчетном периоде стала модернизация системы мониторинга облачной инфраструктуры. Начат переход к использованию штатных средств мониторинга, входящих в состав облачной платформы. В рамках этих работ развернуты штатные сборщики метрик и интегрированы соответствующие панели визуализации в сервис мониторинга mon-service.jinr.ru. Для текущего периода тестовой эксплуатации развернут отдельный экземпляр СУБД временных рядов VictoriaMetrics, и сбор метрик осуществляется параллельно в ранее используемой и новой базах данных.

В рамках распределенной информационно-вычислительной среды (РИВС) на базе облачных ресурсов организаций из стран-участниц ОИЯИ основная деятельность была связана с поддержанием работоспособности и доступности этих ресурсов.

### Системы хранения данных МИВК

Одним из важнейших элементов МИВК является система хранения данных (СХД). В качестве основных СХД используются системы dCache и

EOS для дисковых хранилищ, а для ленточных — Enstore и СТА.

В 2025 г. значительные работы были проведены по доработке, модификации, поддержке и сопровождению системы хранения и транспортировки данных на магнитных лентах на базе системы Enstore, связанные с переходом на ОС AlmaLinux 9.6. Проведена существенная работа по оптимизации записи на ленты, продиктованная увеличившимся потоком данных в 2025 г. В результате оптимизации кода время передачи сократилось примерно на 25 %, а с введением в эксплуатацию дистрибутива системы на python3 скорость записи/чтения приблизилась к теоретически возможной: 400 МБ/с на одно ленточное устройство.

В рамках работ по организации на базе МИВК регионального центра обработки и хранения данных эксперимента JUNO разработана СХД, архитектура которой основана на ПО dCache [4].

В дополнение к выделенным для экспериментов MPD и SPD системам EOS, емкостью по 7 ПБ каждая, в МИВК организована общая система хранения на базе EOS, которая рассматривается как общая распределенная система хранения данных для всех пользователей МИВК и имеет емкость 20,5 ПБ. В общей системе EOS зарегистрированы как одиночные пользователи, так и группы пользователей/экспериментов. Распределение по объему данных, хранящихся в системе на декабрь 2025 г. (превышающему 50 ТБ), приведено на рис. 7.

### Система мониторинга

В 2025 г. осуществлялись поддержка в актуальном состоянии и развитие системы мониторинга LITmon, которая является основным инструментом для дежурных операторов МИВК и позволяет

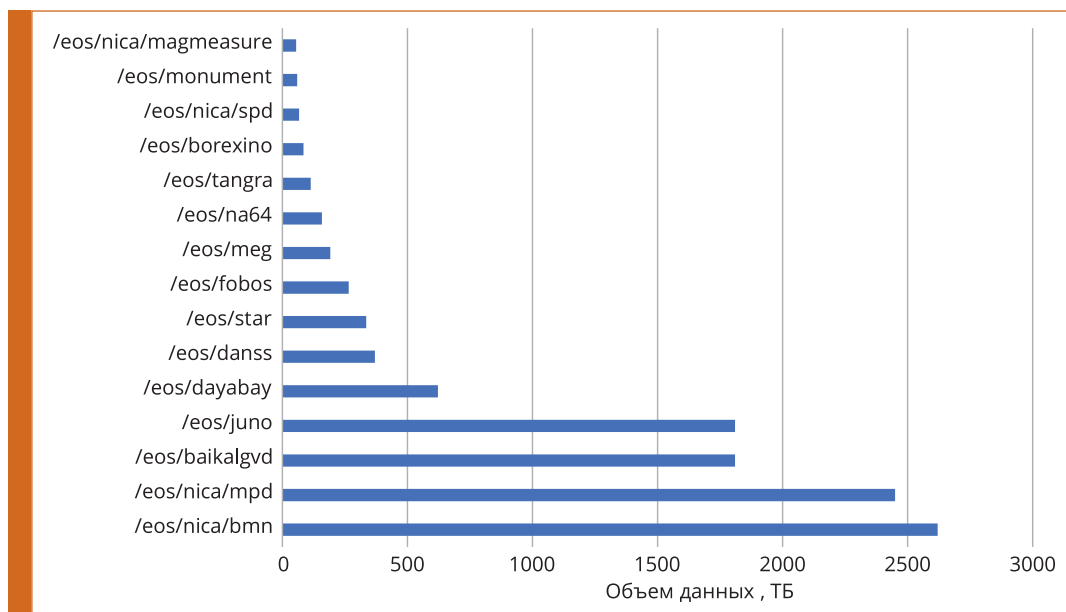


Рис. 7. Распределение по объему данных, хранящихся в системе на декабрь 2025 г. (превышающему 50 ТБ)



Рис. 8. Общий информационный экран системы аккаунтинга задач CMS-грид-сайта Tier-1

получать актуальную информацию о состоянии всех инженерных систем комплекса. В общую систему мониторинга включена система аккаунтинга (рис. 8), благодаря которой можно получить статистические данные по применению ресурсов для задач пользователей. Система позволяет осуществлять учет ресурсов и их использование как в рамках распределенной системы обработки данных, так и локально.

Для повышения уровня надежности МИВК путем заблаговременных предупреждений о воз-

можных аварийных ситуациях в рамках развития системы мониторинга предложена концепция нейромодели LSTM (Long Short-Term Memory) для автоматизации процедуры классификации сообщений системных журналов, необходимой для последующего предсказания появления возможных аппаратно-программных сбоев важных составляющих вычислительного комплекса. Разработаны программы сбора и обработки данных, а также интерфейс их анализа.

## МНОГОЦЕЛЕВАЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ ПЛАТФОРМА АНАЛИТИКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

В рамках задачи создания пользовательской инфраструктуры Больших данных на базе вычислительных ресурсов CPU и аппаратных ускорителей GPU с использованием программных средств организации вычислений, библиотек инструментов анализа, моделирования и визуализации с открытым исходным кодом был создан пул серверов с локально установленными и настроенными различными моделями искусственного интеллекта, доступными пользователям посредством веб-сервера Open WebUI через API или как ассистент в средах разработки ПО (таких как Visual Studio Code).

Выполнена разработка механизма мониторинга и анализа безопасности сетевых подключений к ресурсам, размещенным в облачной среде ЛИТ ОИЯИ. Реализована нейросетевая модель, обеспечивающая реконструкцию нормальных паттернов URL-структур, где значительное

отклонение между исходным и реконструированным запросом служит индикатором потенциальной угрозы. В отличие от традиционных методов нейросетевые модели, обученные на нормальном трафике, могут обнаруживать неизвестные кибератаки без предварительного изучения вредоносных образцов. Данный подход актуален в задаче обнаружения аномальных запросов к веб-сервисам, размещенным в сети ОИЯИ. Экспериментальные результаты демонстрируют эффективность предложенной нейросетевой архитектуры: достигнута точность реконструкции нормального трафика 98 %, точность детектирования аномалий составила 97,6 %. Полученные результаты и модели планируется использовать в программных средствах обеспечения безопасности сайтов и цифровых сервисов ОИЯИ (Web Applications Firewall).

## ЦИФРОВАЯ ЭКОСИСТЕМА ОИЯИ

В 2025 г. продолжались работы по сопровождению и развитию общеинститутских научных и административных сервисов, их интеграция между собой и в цифровую экосистему ОИЯИ.

Запущена в эксплуатацию система ПИН-2, выполнена ее доработка по результатам опытной эксплуатации. Введена в тестовую эксплуатацию электронная система обучения персонала, первоначальной задачей которой является организация дистанционного тестирования по радиационной безопасности для сотрудников Института. Сервис разработки и управления документами DocMS полностью введен в эксплуатацию и используется как подразделениями Института, так и коллаборациями (свидетельство № 22025690887 о государственной регистрации программы для ЭВМ «Платформа управления документами DocMS»).

В рамках поддержки административных сервисов в зоне ответственности ЛИТ развивались СЭД «Дубна», ИСНА, оболочка ЦЭС, HR JINR, ГИС ОИЯИ, «База документов», СЭД «Авансовые отчеты», «Сотрудники ОИЯИ в ЦЕРН», ADB2, NICA EVM, шлюз обмена данными. Выполнен перенос перечисленных сервисов на новые серверы, введен мониторинг их функционирования и повышена защищенность от атак.

В СЭД «Дубна» для обеспечения параллельно-последовательного согласования документов модернизировано ядро системы, в результате чего среднее время согласования прямых закупок по статьям 5 и 6 для ЛФВЭ и ЛЯП сократилось примерно в 2,5 раза. Интерфейс пользователя СЭД «Дубна» модернизирован с учетом современных представлений об эргономике и дизайне.

Проведена подготовка к поэтапному переносу функционала системы «База документов» в СЭД «Дубна», разработан ряд модулей для перевода согласования приказов по ОИЯИ в СЭД.

Продолжено развитие репозитория публикаций ОИЯИ (свидетельство № 202569021 о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программный комплекс для управления цифровыми объектами репозитория научных публикаций ОИЯИ»). Модернизирована программная база, выполнены улучшения пользовательского интерфейса и визуализации данных (в частности, математических формул). Реализованы автоматизация и интеграция метаданных публикаций из eLIBRARY (в том числе ранее не привязанных к ОИЯИ), а также специализированного списка публикаций ЛНФ ОИЯИ. Выполнены работы по повышению качества метаданных, разработаны алгоритмы исправления аннотаций и привязки авторов к статьям. С целью повышения скорости и безопасности работы системы переработана архитектура сервисов.

В рамках геоинформационной системы ОИЯИ реализованы механизмы импорта и редактирования данных для ввода внешних контуров и поэтажных планов зданий. В ГИС введена информация о различных корпусах, помещениях и рабочих местах в них для ЛФВЭ, ЛРБ и ЛИТ. Введена в эксплуатацию подсистема для анализа и отчетности по размещению сотрудников ОИЯИ по корпусам, комнатам и подразделениям. Разработан и введен в эксплуатацию функционал резервирования рабочих мест и помещений для сотрудников и подразделений.

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

Обеспечение математической, алгоритмической и программной поддержки экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в ОИЯИ, является одним из основных направлений деятельности ЛИТ. В 2025 г. в рамках темы 1119 был проведен ряд работ и исследований, направленных на разработку и развитие математических методов и ПО для моделирования физических процессов и экспериментальных установок, обработки и анализа данных экспериментов в области физики элементарных частиц, ядерной физики, физики нейтрино, радиобиологии и др. Особо стоит подчеркнуть весомый вклад в программу исследований проектов VM@N, MPD и SPD, разработку программного обеспечения системы обработки данных и реконструкции физи-

ческих объектов для проектов Baikal-GVD, JUNO, ATLAS, CMS. Продолжено активное участие в физическом анализе данных эксперимента CMS.

Ниже приведена краткая информация о некоторых из полученных результатов.

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

В рамках развития систем обработки и анализа данных эксперимента Baikal-GVD проведены рефакторинг и распараллеливание ключевых C++ программ [5].

В 2025 г. завершена работа по поиску и устранению узких мест в программном пакете SpdRoot [6]. Предложенные исправления, такие как оптимизация работы с памятью и устранение неопределенного поведения функций, привели к сокращению среднего времени реконструкции событий в SPD.

В рамках участия сотрудников ЛИТ в эксперименте ATLAS в ЦЕРН были продолжены работы по развитию системы TDAQ ATLAS и сервиса Event Picking системы EventIndex [7]. Полученный опыт и знания в разработке баз данных для эксперимента ATLAS были применены для эксперимента ускорительного комплекса NICA. На основе анализа соответствующих систем в четырех экспериментах LHC разработан дизайн системы мониторинга данных (DQM) эксперимента BM@N [8].

В веб-приложение FITTER\_WEB, разработанное для обработки данных, полученных с малоуглового спектрометра ЮМО в ЛНФ, интегрирован AI-ассистент, использующий большую языковую модель LLM DeepSeek. Показана корректность автоматической генерации C++ кода для ряда функций, применяемых при фитинге данных в нейтронной физике [9].

## Разработка и развитие алгоритмов реконструкции физических событий и методов идентификации частиц

Разработана и реализована детальная геометрия трековых детекторов (CSC, GEM, FSD, VSP, SiBT, SiProf) для актуальной конфигурации физической установки предстоящего сеанса (Run 9) эксперимента BM@N, которая используется для моделирования в среде BMNROOT [10]. Геометрические модели значительно проработаны на основании обновленных схем и чертежей.

Начата разработка модели нейронной сети для разделения восстановленных треков заряженных частиц по событиям в отдельных временных срезах для эксперимента SPD. За основу взята графовая нейронная сеть с механизмом внимания (GANN), которая была использована для кластеризации треков частиц по событиям во временных срезах SPD. Анализ результатов модели показывает, что GANN демонстрирует высокую эффективность кластеризации, достигая 98,5 % точности и более 95 % полноты.

Исследована проблема влияния сдвига данных в задаче идентификации частиц методами машинного обучения в эксперименте MPD [11]. Сформирована и апробирована методология оценки сдвига данных.

Разработана инновационная модель графовой нейронной сети GATNN с механизмом внимания и двухэтапной агрегацией для восстановления траекторий частиц после обучения на данных Монте-Карло, моделирующих измерения детектора TPC эксперимента MPD. Модель про-

демонстрировала высокую производительность, достигнув точности в 96,2 %, при этом метрики чистота и эффективность достигли 92,6 %. Эффективность восстановления треков составила более 90 % при 80%-м пороге для целостности треков. Модель продемонстрировала беспрецедентную скорость обработки событий (~ 80 мс/событие) в сравнении с классическими методами [12].

Разработана архитектура сетей Колмогорова-Арнольда (Enhanced KAN) для анализа и реконструкции данных физических экспериментов [13]. Решена проблема неустойчивого обучения KAN методами семейства Adam путем установления весов предложенных базисных функций, близких к нулю. Показана эффективность KAN в задаче разрешения мультигауссовых сигналов. Также был реализован метод быстрой аппроксимации магнитного поля в детекторной установке, использующий Enhanced KAN, и продемонстрирована его эффективность на примере магнитного поля в BM@N.

В рамках работы по реконструкции мюонов в калориметре высокой гранулярности (HGCal) эксперимента CMS смоделирован пролет космических мюонов через тестовую установку, предназначенную для тестирования слоев детектора. Процедура реконструкции была реализована на основании аппроксимации откликов на одном слое прямой линией и поиска кластеров, а затем треков в HGCal.

Создана рабочая Монте-Карло модель прототипа орбитального детектора OLVE-HERO, реализованы процедуры генерации первичного пучка и обработки событий, сформирован набор данных для анализа отклика детектора. Отдельно расширена и улучшена упрощенная Монте-Карло модель калориметра, используемая для расчета фоновых условий [14].

## Разработка и развитие методов моделирования физических процессов и анализа данных

Завершена работа по исследованию превышения числа событий, обнаруженных в эксперименте CMS на данных Run 2 в спектре масс димюонов в области инвариантных масс 28 ГэВ в классе событий с присутствием хотя бы одной  $b$ -струи [15].

На данных Run 3 (2022 и 2023 гг.) эксперимента CMS выполнены исследования по поиску бозона Хиггса, рожденного в процессе слияния векторных бозонов. Использовалась мода распада на два  $b$ -кварка. Вычислены коррекционные коэффициенты для триггера высокого уровня, сформулированы требования, и оптимизированы критерии отбора процесса слияния векторных бозонов и событий с двумя  $b$ -струями.

Завершено исследование по поиску темной материи в рамках инертной дублетной модели на данных полной статистики Run 2 и первых

данных Run 3 эксперимента CMS, соответствующих интегральной светимости  $136$  и  $36 \text{ фб}^{-1}$ .

Проведено исследование многочастичных корреляций методом факториальных моментов в  $pp$ -взаимодействиях при энергии  $13 \text{ ТэВ}$  LHC (Run 2). Разработан метод восстановления зависимости факториальных моментов по множественности в интервалах псевдобыстроты от размера этого интервала с учетом аппаратной функции детектора.

В качестве альтернативного подхода к моделированию откликов на считывающих элементах GEM-детектора эксперимента BM@N предложена и реализована идея применения алгоритмов машинного обучения, в частности, условной генеративно-сопоставительной сети (Conditional Generative-Adversarial Network, C-GAN) [16].

### Развитие методов вычислительной физики

Для решения уравнений в рамках метода связанных каналов с комплексными потенциалами, описывающих ядерные реакции с массивными ядрами, разработаны комплексы программ, реализующие метод конечных элементов (МКЭ) высокого порядка. Показано, что МКЭ и метод  $R$ -матрицы более стабильны, чем часто используемый модифицированный метод Нумерова, и позволяют включать больше колебательных и вращательных связей. Расчеты реакций  $^{48}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$  и  $^{51}\text{V} + ^{248}\text{Cm}$  показали, что многофононные и высокоспиновые состояния значительно сглаживают распределения барьеров, улучшая согласие с экспериментальными данными [17]. Разработаны новые схемы МКЭ третьего и четвертого порядков с многомерными интерполяционными полиномами Эрмита  $d$ -мерного гиперкуба для решения краевых задач (КЗ) для эллиптического уравнения со смешанными частными производными на гиперпараллелепипедах сетках. Тестовые расчеты КЗ подтверждают заявленный порядок точности разработанных схем МКЭ [18].

В сотрудничестве с ЛЯР и ЛТФ проведено исследование реакции рассеяния  $^7\text{Li} + ^{10}\text{B}$  и реакции  $^7\text{Li} + ^{10}\text{B} \rightarrow ^6\text{Li} + ^{11}\text{B}$  при энергии пучка  $E_{\text{LAB}} = 58 \text{ МэВ}$  на основе экспериментальных данных, полученных в ЛЯР ОИЯИ. Результаты указывают на наличие протон-нейтронного гало в структуре возбужденного состояния  $^6\text{Li}_{0+}$  ( $3,56 \text{ МэВ}$ ) [19]. На основе транспортно-статистического подхода исследовано отношение выходов изотопов, полученных в реакциях с налетающим ионом  $^{18}\text{O}$  при энергии  $35 \text{ МэВ}$  с тяжелой ( $^{181}\text{Ta}$ ) и легкой ( $^9\text{Be}$ ) мишенями.

Программный пакет TANGELO для моделирования квантовых вычислений дополнен с учетом релятивистских поправок к кулоновским взаимодействиям при расчетах химических соединений с участием сверхтяжелых элементов. Вычислительный алгоритм основан на гибридной квантово-классической схеме adapt-VQE и реализован

с целью квантово-химического вычисления волновых функций и энергий основного состояния монооксидов тяжелого свинца и сверхтяжелого флеровия [20].

В сотрудничестве с Университетом Кейптауна проведено численное исследование влияния параметров частоты и радиуса на структуру и свойства стоячих волн в шаре конечного радиуса, аппроксимирующих 3D-осциллоны в модели  $\varphi^4$  [21].

В сотрудничестве с Софийским университетом разработан численный метод высокой точности для поиска новых решений задачи трех тел равных масс в условиях отсутствия столкновений и наличия центральной симметрии. Метод основан на ньютоновской итерационной схеме, дополненной процедурой вычисления начальных приближений путем сеточного поиска [22].

В сотрудничестве с ЛНФ и ИБМХ РАН проведено исследование структуры везикул фосфолипидной транспортной наносистемы и лекарств на ее основе по данным малоуглового рассеяния нейтронов. Проанализировано влияние наличия примесей и других факторов на размеры везикул и их структуру [23].

В сотрудничестве с ЛФВЭ и ЛЯП выполнены работы по трехмерному компьютерному моделированию магнитной системы циклотрона МСЦ-230 с токовой обмоткой на  $4,5 \text{ кА}$ , учитывающему новый вариант ее намотки [24].

Рассмотрен операторный подход для стохастических систем, в рамках которого основное кинетическое уравнение представляется в форме уравнения шредингеровского типа с гамильтонианом, зависящим от операторов рождения и уничтожения. Для процесса чистого рождения получены приближенные значения вероятностей нахождения в первом и втором состояниях [25].

Развита потенциальная модель с нелокальным взаимодействием, в рамках которой сформулирована система уравнений для описания спектра векторных мезонов. Используемый феноменологический выбор вершины векторного мезона будет достаточным для описания процессов рождения и диссоциации тяжелых кваркониев  $J/\psi$  ( $\Upsilon$ ) при энергиях соударения тяжелых ионов в эксперименте NICA [26].

Предложен метод эффективного описания запутанности двухкубитной системы с использованием специально выбранной системы координат в заданном сечении пространства запутанности, упрощающий расчеты нелокальных характеристик. Метод позволяет описать класс сепарабельных состояний в виде полуалгебраического множества [27]. Проведено сравнение четырехмерной квантовой системы и системы двух кубитов в рамках обобщенного формализма соответствия Стратоновича-Вейля. На основе численного анализа показано, как информация о возможной реализации виртуальной двухуровневой подсистемы кодируется в свойствах функ-

ции Вигнера состояний соответствующей четырехуровневой системы.

Метод углов Тэйта–Брайана, являющийся модификацией известного метода углов Эйлера, описывающего вращение ортогонального репера в трехмерном евклидовом пространстве, обобщен на случай пространств произвольной конечной размерности. Разработанная система элементарных унитарных вращений позволяет вести удобную параметризацию грассманианов и параметризацию алгебраически открытых подмножеств классов сопряжения эрмитовых матриц [28].

Построены регуляризирующие корреляционные функции для квантовых статистических систем,

состоящих из атомов или молекул и взаимодействующих друг с другом посредством сингулярных неинтегрируемых потенциалов [29].

Проведено компьютерное моделирование контролируемого переворота намагниченности в цепочке  $\varphi_0$ -переходов, вызванного переменным напряжением. Показано, что, приложив переменный внешний импульс напряжения с частотой, совпадающей с собственной частотой LCR-контура, можно реализовать переворот намагниченности в выбранном  $\varphi_0$ -переходе, т. е. продемонстрирована возможность управляемого переворота намагниченности [30].

## ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

В рамках образовательной деятельности в 2025 г. проведены Весенняя и Осенняя школы по информационным технологиям (IT-школы) ОИЯИ, в которых приняли участие 86 студентов из разных вузов России, Беларуси, Казахстана и Узбекистана. По результатам проведения серии IT-школ, начиная с 2022 г., сотрудниками ОИЯИ стали 28 человек. Под руководством и при научном консультировании сотрудников ЛИТ в 2025 г. подготовлено и защищено более 50 квалификационных работ аспирантов, магистров и бакалавров, более 70 студентов не выпускных курсов ведут работы над проектами ОИЯИ и приезжали на практики. Учебно-тестовый полигон платформы HybridLIT в 2025 г. активно использовался как для проведения учебных семестровых курсов,

так и в рамках школ и рабочих совещаний. В семестровых учебных курсах по IT-дисциплинам, проводимых в университете «Дубна» и филиале МГУ им. М. В. Ломоносова в Дубне, приняли участие более 400 студентов. Также на базе платформы HybridLIT было подготовлено 11 бакалаврских работ и 1 магистерская диссертация. В 2025 г. состоялся первый набор студентов в магистратуру филиала МГУ в Дубне по направлению 01.04.02 «Прикладная математика и информатика». 13 человек успешно прошли вступительные испытания и приступили к освоению образовательной программы «Методы и технологии обработки данных в гетерогенных вычислительных средах».



6–10 октября. Осенняя школа по информационным технологиям ОИЯИ

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Petrosyan A., Oleynik D., Zhemchugov A. et al. Production System of the SPD Experiment // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. P. 1576–1580; <https://doi.org/10.1134/S1063779625700893>.
2. Greben N., Oleynik D., Romanychev L. Workload Management System for SPD Online Filter // Phys. Part. Nucl. Lett. 2025. V. 22. P. 1044–1047; <https://doi.org/10.1134/S1547477125701067>.
3. Anikina A., Belyakov D., Bezhanyan T. et al. Structure and Features of the Software and Information Environment of the HybriLIT Heterogeneous Platform // Lect. Notes Comput. Sci. 2025. V. 15460. P. 444–457; [https://doi.org/10.1007/978-3-031-80853-1\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-031-80853-1_33).
4. Баранов А. В., Балашов Н. А., Махалкин А. Н. и др. GitOps-управляемое распределенное хранилище данных dCache для нейтринного эксперимента JUNO в инфраструктуре ОИЯИ // ЭЧАЯ. 2026. Т. 57, вып. 4.
5. Соловьев А. Г. (от имени коллаб. Baikal-GVD). Многопоточность для базового программного фреймворка Baikal-GVD // Там же.
6. Didorenko A., Voytishin N. Search for Bottlenecks in SpdRoot Code // Phys. Part. Nucl. 2026. V. 57, No. 4.
7. Александров Е. И., Александров И. Н., Барберис Д., Яковлев А. В. Методы автоматизации обработки ошибок в Event Picking Service эксперимента ATLAS // ЭЧАЯ. 2026. Т. 57, вып. 4.
8. Александров Е. И., Александров И. Н., Чеботов А. И., Герценбергер К. В. Проектирование системы мониторинга качества данных для эксперимента BM@N // Там же.
9. Соловьев А. Г., Соловьева Т. М., Лукьянов К. В. Генерация C++ кода моделей фитирования в FITTER\_WEB на основе ИИ // Там же.
10. Afanasiev S. et al. (BM@N Collab.). Production of Protons, Deuterons and Tritons in Argon-Nucleus Interactions at 3.2 A GeV // JHEP. 2025. V. 2025. P.95; [https://doi.org/10.1007/JHEP08\(2025\)095](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2025)095).
11. Papoyan V. Data Shift Problem in Particle Identification // Phys. Part. Nucl. 2026. V. 57, No. 4.
12. Talochka Y., Ososkov G., Voytishin N. Graph Neural Network with Attention and Two-Stage Aggregation for Particle Track Reconstruction in the TPC MPD of the NICA Accelerator Complex // Comp. Soft. Big. Sci. 2025. V. 9. P. 22; <https://doi.org/10.1007/s41781-025-00153-4>.
13. Talochka Y., Ososkov G., Voytishin N. Enhanced KAN Architecture for Experimental Data Processing in High-Energy Physics // Comp. Phys. Com. 2025. V. 316. P. 109801; <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2025.109801>.
14. Kalikulov O., Saduyev N., Mukhamejanov Y. et al. Monte Carlo Simulation of the HERO Orbital Detector Calorimeter // Symmetry. 2025. V. 17(9). P. 1449; <https://doi.org/10.3390/sym17091449>.
15. Hayrapetyan A. et al. Dark Sector Searches with the CMS Experiment // Phys. Rep. 2025. V. 1115. P. 448–569.
16. Baranov D. GAN-based Simulation of Triple GEM Detector in the BM@N Experiment // Phys. Part. Nucl. 2026. V. 57, No. 4.
17. Wen P. W., Chuluunbaatar O., Gusev A. A. et al. Role of Multi-Phonon and High-Spin States on the Quasi-Elastic Barrier Distributions of Massive Systems // Phys. Lett. B. 2025. V. 863. P. 139383; <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2025.139383>.
18. Kovalev O. O., Batgerel B., Gusev A. A. et al. Symbolic-Numerical Algorithms for Solving Multidimensional Boundary Value Problems by Finite Element Method on Hypercubes // Lect. Notes Comput. Sci. 2025. V. 16235. P. 210–222; [doi.org/10.1007/978-3-032-09645-6\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-032-09645-6_12).
19. Земляная Е. В., Лукьянов К. В., Лукьянов В. К. и др. Микроскопический анализ упругого рассеяния и реакции передачи при столкновении  ${}^7\text{Li} + {}^{10}\text{B}$  при энергии пучка 58 МэВ // Изв. РАН. Сер. физ. 2025. Т. 89, № 8. С. 1222–1226.
20. Yushankhai V. Yu., Siurakshina L. A. Variational Quantum Algorithm for Computational Problems of Quantum Chemistry: From UCCSD-VQA to ADAPT-VQA // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. P. 1004–1008.
21. Zemlyanaya E. V., Bogolubskaya A. A., Alexeeva N. V., Bashashin M. V.  $\varphi^4$  Oscillons as Standing Waves in a Ball: A Numerical Study // Ibid. P. 1655–1659.
22. Hristov I., Hristova R., Puzynina T. et al. Numerical Search for Three-Body Periodic Free-Fall Orbits with Central Symmetry // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 2025. V. 51. P. 109066.
23. Zemlyanaya E., Kiselev M., Chaurova V. et al. Analysis of Structure of the PhTNS Vesicles Based on Small-Angle Neutron Scattering Data Obtained at the “Yellow Submarine” Spectrometer // Int. J. Mod. Phys. E. 2025; <https://doi.org/10.1142/S021830132641003X>.
24. Akishin P. G., Vesenkov V. A., Vlasov A. I. et al. Medical Superconducting Cyclotron MSC-230. Status of the Project // Phys. Part. Nucl. Lett. 2025. V. 22, No. 4. P. 847–851.
25. Aryan E., Buša J., Hnatič M. et al. Approximate Calculation of Functional Integrals Arising from the Operator Approach // Physica A: Stat. Mech. Appl. 2025. V. 670. P. 130616.
26. Tawfik A. N., Ahmadov A. I., Friesen A. et al. Derivation of Meson Masses in  $SU(3)$  and  $SU(4)$  Extended Linear Sigma Model at Finite Temperature // Particles. 2025. V. 8, No. 1. P. 9; <https://doi.org/10.3390/particles8010009>.
27. Khvedelidze A., Mladenov D., Torosyan A. Towards Parameterizing the Entanglement Body of a Qubit Pair // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. P. 1493–1497.
28. Babich M. V., Bordag L. A., Khvedelidze A. M., Mladenov D. M. On Multidimensional Analogs of Euler (Tait-Bryan) Angles and Grassmannians // Zap. Nauchn. Sem. POMI. 2025. V. 543. P. 43–55.
29. Yukalov V. I., Yukalova E. P. Quantum Systems of Atoms with highly singular interaction potentials // Laser Phys. 2025. V. 35. 045501.
30. Rahmonova A., Streltsova O., Rahmonov I., Zuev M. Simulation of a Controllable Magnetization Reversal in a Chain of  $\varphi_0$  Junctions by an Alternating Voltage pulse // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. P. 1592–1598.