



ЛАБОРАТОРИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В 2017 г. Лабораторией информационных технологий (ЛИТ) в рамках направления «Сети, компьютеринг, вычислительная физика» проводились исследования по двум темам первого приоритета: «Информационно-вычислительная инфраструктура ОИЯИ» и «Методы, алгоритмы и программное обеспечение для моделирования физических систем, математической обработки и анализа экспериментальных данных». В рамках взаимодействия с другими лабораториями ОИЯИ сотрудники ЛИТ принимали участие в исследованиях по 26 темам Проблемно-тематического плана научно-исследовательских работ. Деятельность ЛИТ призвана обеспечивать развитие сетевой, информационно-вычислительной инфраструктуры, математическое и программное обеспечение научно-производственной деятельности Института и стран-участниц ОИЯИ на базе современных информационных и вычислительных технологий.

Начата реализация проекта развития Многофункционального информационно-вычислительного комплекса (МИВК) ОИЯИ, который в настоящее время включает в себя следующие основные компоненты:

- Центральный информационно-вычислительный комплекс (ЦИВК) ОИЯИ с построенными в лаборатории вычислительными элементами и системами массовой памяти;
- грид-систему уровня Tier-1 для эксперимента CMS;
- грид-систему уровня Tier-2 для поддержки экспериментов на LHC и других масштабных экспе-

риментов и проектов в рамках всемирной грид-инфраструктуры;

- гетерогенный кластер HybriLIT для параллельных вычислений;
- облачную инфраструктуру.

МИВК ОИЯИ предоставляет ресурсы, необходимые для решения различных задач в рамках многочисленных проектов, в реализации которых ученые из ОИЯИ принимают активное участие: MPD, BM@N, CMS, ALICE, ATLAS, NOvA, BES-III, OPERA, PANDA, STAR, COMPASS и др. Грид-сайты ОИЯИ уровня Tier-1 и Tier-2 являются элементами российского сегмента всемирной грид-инфраструктуры, используемой в рамках проекта WLCG для обработки данных экспериментов ALICE, ATLAS, LHCb и CMS на LHC и других грид-приложений.

В 2017 г. начато построение в ЛИТ специализированной для высокопроизводительных вычислений (HPC) инженерной инфраструктуры, которая базируется на технологии контактного жидкостного охлаждения и предназначена для развития гетерогенного кластера HybriLIT с целью многократного увеличения вычислительной мощности, необходимой для кардинального ускорения комплексных теоретических исследований, проводимых в ОИЯИ.

В 2017 г. сотрудниками Лаборатории информационных технологий опубликовано 213 научных работ в реферируемых научных изданиях, представлен 61 доклад на международных и российских конференциях.

ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ОИЯИ

В 2017 г. продолжены работы, связанные с развитием и обеспечением надежного функционирования сетевой и информационно-вычислительной инфраструктуры ОИЯИ. Основными элементами этой инфраструктуры являются телекоммуникацион-

ные каналы связи, локальная вычислительная сеть (ЛВС) ОИЯИ, многофункциональный информационно-вычислительный комплекс и базовое программное обеспечение, в том числе на основе облачных, грид- и гибридных технологий, объединяющие

информационно-вычислительные ресурсы Института в единую, доступную для всех пользователей среду.

Телекоммуникационные каналы связи ОИЯИ.

В 2017 г. обеспечивалась надежная работа высокоскоростного канала связи Дубна–Москва. Внешний канал ОИЯИ построен на технологии DWDM (Dense Wave Division Multiplexing — спектрального мультиплексирования по длине волны) и использует одну лямбду (одну частоту) 100 Гбит/с и две лямбды (две частоты) по 10 Гбит/с каждая. К внешней распределенной сети ОИЯИ относятся: внешняя наложенная сеть LHCORP (ОИЯИ–ЦЕРН), проходящая через МГТС-9 в Москве, Будапешт и Амстердам, для связи центров Tier-0 ЦЕРН и Tier-1 (ОИЯИ), и внешняя наложенная сеть LHCONE, проходящая таким же маршрутом, предназначенная для центра Tier-2 ОИЯИ; прямые каналы для связи по технологии RU-VRF с коллаборацией научных центров

RUNEP (Гатчина, НИЦ «Курчатовский институт», Протвино и с сетями Runnet, RASnet). Поднята IPv6 маршрутизация для сайтов Tier-1 и Tier-2. Пропускная способность резервного канала связи составила 20 Гбит/с.

Распределение входящего (превышающего 4 Тбайт) и исходящего трафика по подразделениям ОИЯИ в 2017 г. приведено в табл. 1.

Общий входящий трафик ОИЯИ, включая серверы общего назначения, Tier-1, Tier-2 и вычислительный комплекс, составил в 2017 г. 23,5 Пбайт (14,2 Пбайт в 2016 г.). Распределение входящего трафика по категориям (в процентах) приведено в табл. 2.

Локальная вычислительная сеть ОИЯИ.

В 2017 г. были продолжены работы по развитию и совершенствованию сетевых компонентов ИТ-структуры ОИЯИ, призванные повысить ее эффективность. Локальная вычислительная сеть переведена на DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol). Разработан проект новой связи в 4×100 Гбит/с между площадками ЛЯП и ЛФВЭ с двойным резервированием для повышения надежности оптической транспортной магистрали.

В настоящее время основная оптическая транспортная магистраль локальной вычислительной сети ОИЯИ работает на скорости 10 Гбит/с. Запланирован переход на 100 Гбит/с в 2018 г.

Установлены системные сетевые сервисы DNS, DHCP, SMTP, SNMP, сервисы регистрации пользователей, авторизации устройств, аутентификации пользователей, коммутации, маршрутизации, безопасности, видеоконференцсвязи, VoIP, IPDB (Internet Protocol Data Base), WebMail и др.

ЛВС ОИЯИ содержит 8008 сетевых элементов и 14 129 IP-адресов, 4559 пользователей сети, 2584 пользователя сервиса mail.jinr.ru, 1597 пользователей электронных библиотек и 396 пользователей сервиса удаленного доступа.

Грид-среда ОИЯИ. Грид-инфраструктура ОИЯИ представлена центром уровня Tier-1 для эксперимента CMS на LHC и центром уровня Tier-2, который поддерживает целый ряд виртуальных организаций (ВО), в частности: ALICE, ATLAS, BES, BIOMED, COMPASS, CMS, LHCb, MPD, NOVA, STAR и др.

Центр Tier-1 CMS в ОИЯИ состоит из следующих главных систем.

Таблица 1

Подразделение	Входящий трафик, Тбайт	Исходящий трафик, Тбайт
Лаборатория ядерных проблем	158,23	82,88
Лаборатория физики высоких энергий	115,36	89,71
Лаборатория информационных технологий	58,15	18,89
Лаборатория нейтронной физики	54,38	37,56
Лаборатория ядерных реакций	41,18	21,1
Управление ОИЯИ	39,65	74,95
Узел удаленного доступа	35,96	4,95
Гостинично-ресторанный комплекс	30,54	4,05
Лаборатория теоретической физики	22,75	8,68
Санаторий-профилакторий «Ратмино»	15,46	2,41
Лаборатория радиационной биологии	7,73	4,39
СМТС	7,18	2,05
Отдел главного энергетика	5,02	0,48
Управление социальной инфраструктурой	4,79	0,58
Участок телефонной связи	4,12	1,04

Таблица 2

Научно-образовательные сети	Файлообмен (p2p)	Веб-ресурсы	Социальные сети	Программное обеспечение
97,54	1,34	0,9	0,17	0,05

1. Система обработки данных поддерживает 248 64-разрядных 12- и 20-ядерных рабочих узлов (WNs), что в общей сложности составляет 4160 ядер. Задания обслуживаются в пакетном режиме. Для поддержки системы пакетной обработки установлен специальный сервер с системой распределения ресурсов кластера и планировщиком. Программное обеспечение Torque/Maui используется в качестве менеджера ресурсов планировщика задач.

2. Система хранения данных обслуживается программным обеспечением dCache и Enstore в качестве буфера для работы с ленточным роботом. Одна из установок dCache работает только с дисковыми серверами и используется для оперативного хранения данных с быстрым доступом к ним. Вторая установка dCache обслуживает специальные дисковые серверы и ленточного робота. Дисковые серверы являются буферной зоной для обмена с лентами, тогда как ленточный робот предназначен для длительного, практически вечного, хранения данных CMS. В общей сложности 2 установки имеют сейчас 6,4 Пбайт эффективного дискового пространства, а ленточный робот IBM TS3500 имеет 9 Пбайт для хранения данных. Для поддержки хранения и доступа к данным было установлено 8 физических и 14 виртуальных машин.

3. Система поддержки сервисов обеспечивает функционирование вычислительного сервиса, сервиса хранения данных, грид-сервисов, сервиса пересылки данных (File Transfer System (FTS)), системы управления распределенными вычислениями (Portable Batch System (PBS)), информационного сервиса (мониторинг сервисов, серверов хранения, передачи данных, информационные сайты). Грид-сервис VOBOX предназначен для переноса данных между грид-сайтами CMS посредством FTS, также сконфигурирован и используется прокси-сервер SQUID, который необходим при работе со специализированными базами данных CMS (conditions DB). Сервис FTS используется для надежной пересылки файлов между крупными хранилищами данных, в первую очередь, между центрами уровня Tier-0 и Tier-1. Кроме того, сервис FTS обеспечивает контроль и мониторинг передач, распределение ресурсов сайта между различными организациями, управление запросами пользователей. Для вычислений используется стандартный программный стек проекта WLCG: 2 x CREAM, 4 x ARGUS, BDI top, BDI site, APEL parsers, APEL publisher, EMI-UI, 220 x EMI-WN + gLExec-wn, 4 x FTS3, LFC, WMS, L&B, glite-proxyrenewal.

Центр уровня Tier-1 для CMS в ОИЯИ продемонстрировал стабильную работу в течение всего периода после его запуска в работу в полном объеме [1]. В течение всего 2017 г. этот центр выполнил 6 778 864 задачи, нормированное время ЦПУ составило 227 802 717 ч в единицах HEPSpec06. На рис. 1 демонстрируется вклад мировых центров 1-го уровня

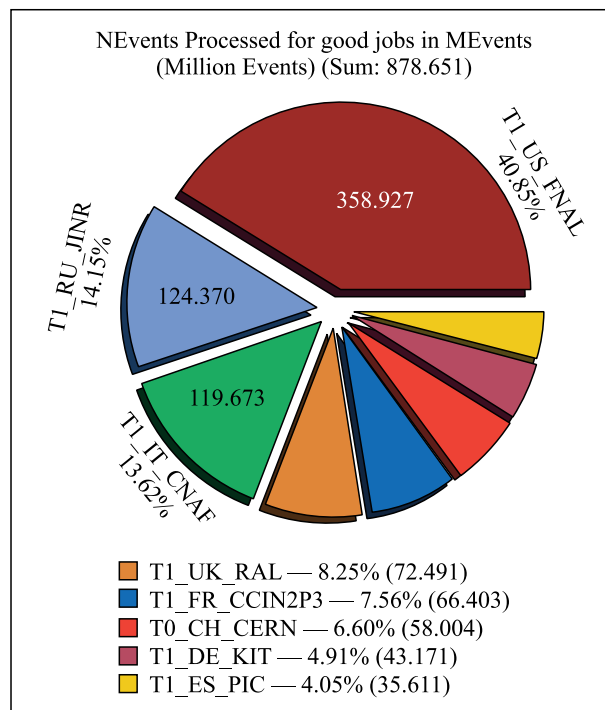


Рис. 1. Количество событий, обработанных для CMS Tier-1 (в миллионах событий) за 2017 г.

в обработку экспериментальных данных CMS (в миллионах обработанных событий) за 2017 г. Сайт ОИЯИ занимает второе место в мире по своей производительности.

На рис. 2 показано количество событий, обработанных в ОИЯИ в центре уровня Tier-1 CMS в 2017 г. по разным типам потоковой обработки данных (реконструкция, моделирование, повторная обработка, анализ и т. д.).

Одной из основных функций центров уровня Tier-1 является организации архивного хранения «сырых» экспериментальных и моделированных данных. На рис. 3 показана нагрузка нашего ленточного робота в течение 2017 г.

Рис. 4 иллюстрирует скорость передачи данных и объем переданных данных для записи и обработки (рис. 4, а, б) от центров Tier-1 и Tier-2 в Tier-1 CMS ОИЯИ и скорость передачи данных и объем переданных данных с Tier-1 CMS ОИЯИ для записи и обработки в центры Tier-1 и Tier-2 (рис. 4, в, г) в 2017 г. Средняя скорость передачи «сырых» данных в Tier-1 CMS ОИЯИ составляет 280–380 Мбайт/с.

Центр уровня Tier-2 в ОИЯИ [1] обеспечивает обработку данных всех четырех экспериментов на LHC (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) и кроме этого поддерживает целый ряд виртуальных организаций (VO), не входящих в LHC (BES, BIOMED, COMPASS, FUSION, MPD, NOVA, STAR и др.). Вычислительные ресурсы центра Tier-2 состоят из 3640 ядер/слотов. Система хранения данных установлена в двух вариантах программного исполнения: 2 установки dCache; 2 установки XROOTD. Одна из уста-

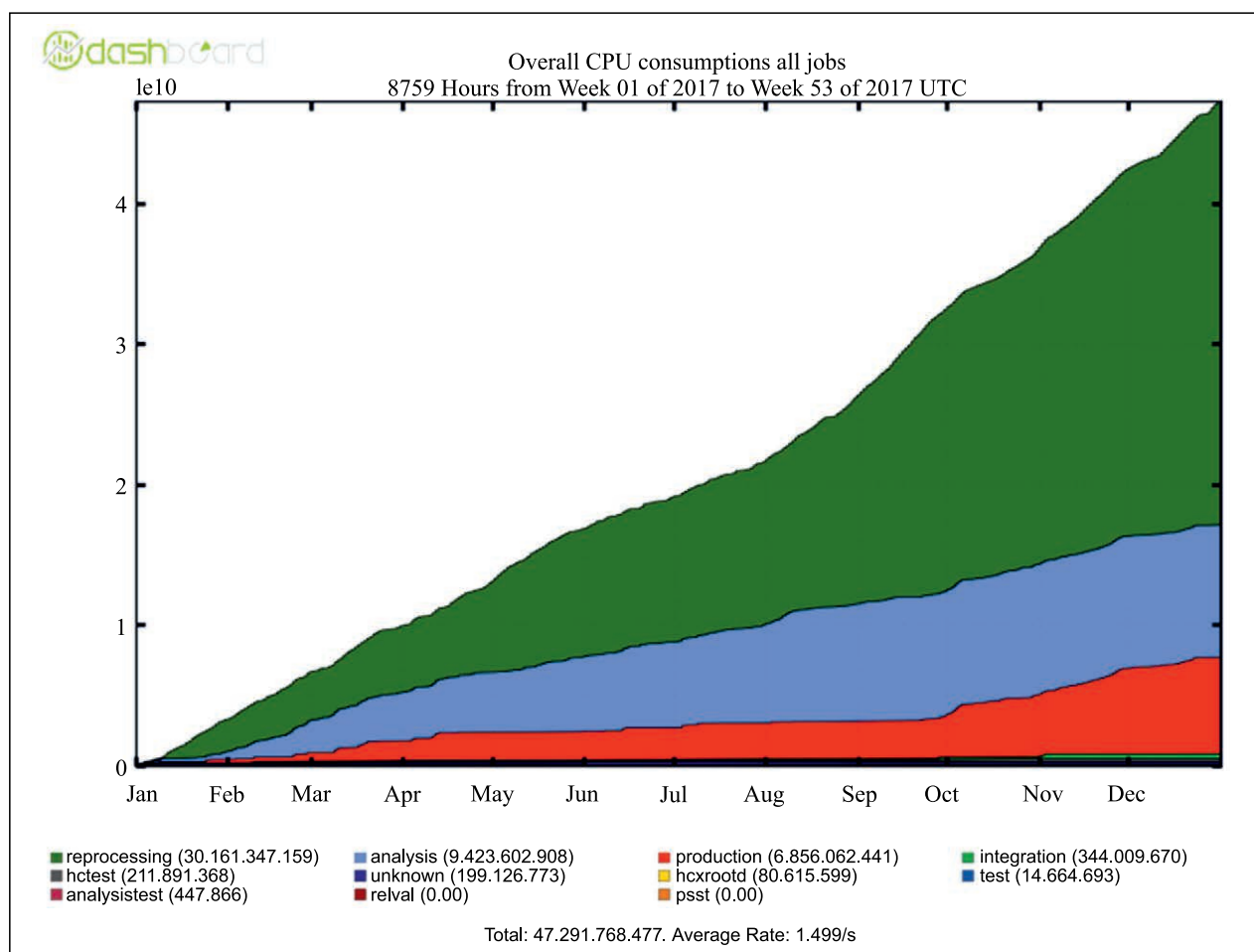


Рис. 2. Количество событий, обработанных в ОИЯИ в центре уровня Tier-1 CMS в 2017 г. по эксперименту CMS (реконструкция, моделирование, повторная обработка, анализ и т. д.)

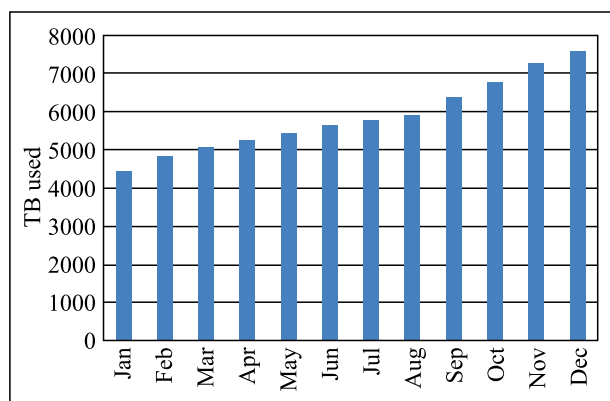


Рис. 3. Загрузка ленточного робота центра уровня Tier-1 для CMS в ОИЯИ в 2017 г.

новок dCache используется CMS и ATLAS, вторая — пользователями и группами пользователей ОИЯИ, в том числе и для эксперимента NICA (MPD), также на этой установке хранят данные несколько сторонних экспериментов (BIOMED, BES, FUSION). Одна установка XROOTD используется ALICE, вторая — в проекте FAIR коллаборацией PANDA. Объем систем хранения составляет 1909,8 Тбайт. Системы

хранения обслуживают 19 серверов, организующих распределение данных, авторизацию доступа к данным и протоколы работы с ними.

Для работы ВО установлены специальные серверы поддержки грид-окружения WLCG. Часть сервисов WLCG установлена на физических машинах, часть — на виртуальных. Сервисы WLCG используют программное обеспечение UMD для совместимости с программной средой грид в WLCG. В настоящее время установлено 23 сервиса WLCG. Они обеспечивают всю инфраструктуру удаленной работы с грид: авторизацию пользователей и ВО, запуск задач из удаленных сервисов ВО, информационную систему WLCG, различные алгоритмы удаленного тестирования и проверки среды обслуживания на локальных ресурсах. Имеются 5 установок пользовательского интерфейса (UI) для запуска задач в распределенную грид-среду.

Проведена интеграция вычислительного элемента OSG HT-CONDOR в инфраструктуру центра уровня Tier-2, что позволило ВО STAR проводить обработку данных на нашем Tier-2.

Основными пользователями грид-ресурсов ОИЯИ являются виртуальные организации всех эксперимен-

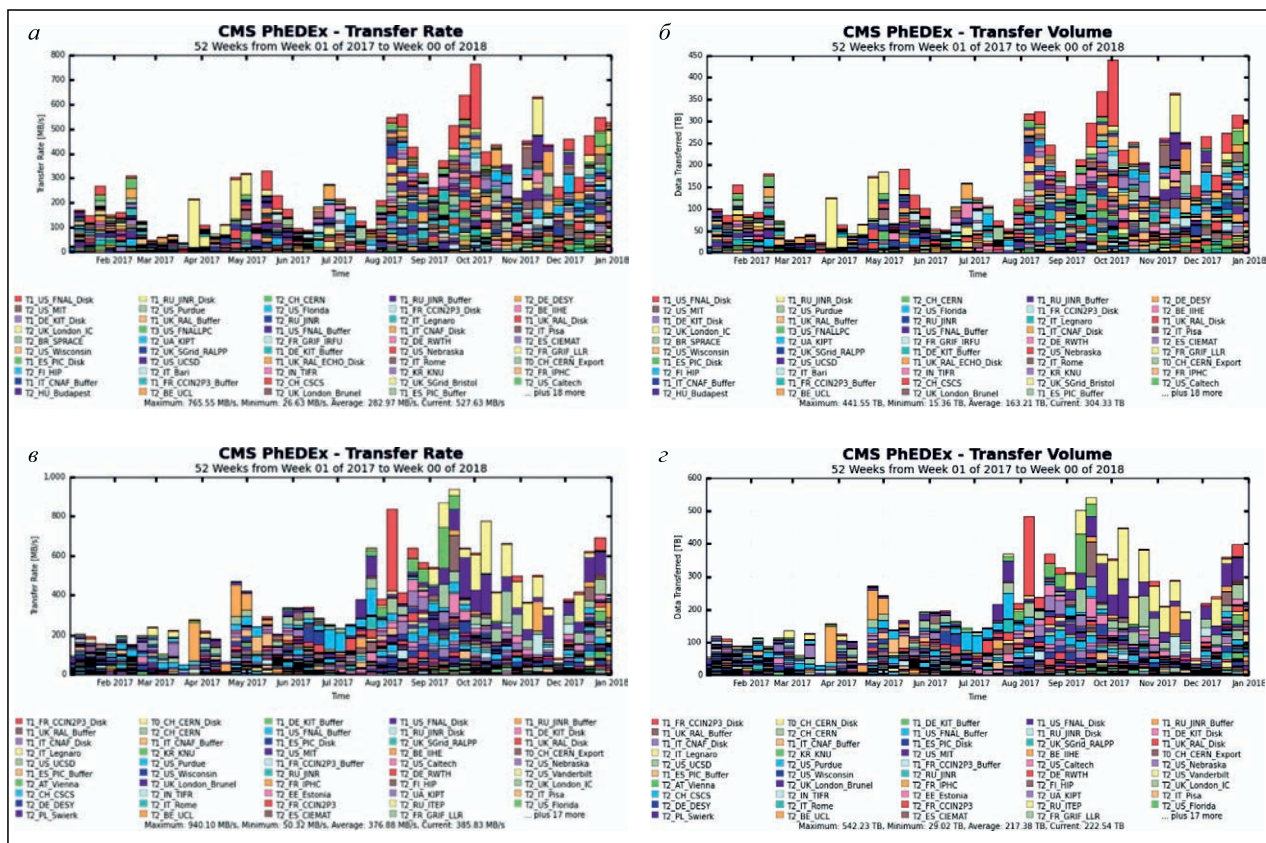


Рис. 4. Скорость передачи и объем переданных данных для записи и обработки (рис. а и б) от центров Tier-1 и Tier-2 в Tier-1 CMS ОИЯИ и скорость передачи и объем переданных данных с Tier-1 CMS ОИЯИ для записи и обработки в центры Tier-1 и Tier-2 (рис. в и г) в 2017 г.

тов на LHC. В 2017 г. на сайте Tier-2 выполнено 6 112 682 задачи, время ЦПУ составило 236 405 186 ч в единицах HEPSpec06. На рис. 5 приведены данные по использованию сайта Tier-2 (JINR-LCG2) ОИЯИ виртуальными организациями в рамках проектов RDIG/WLCG/EGI в 2017 г.

Начата разработка новой системы мониторинга сервисов Tier-1 для CMS в ОИЯИ. Эта система имеет модульную структуру. Разработаны следующие модули: Job Status — для определения числа выполненных и аварийно закончившихся задач; SSB Status — для отображения результатов мониторинга, проводимого системой Dashboard в ЦЕРН; Phedex-Quality — для отображения качества передач между другими грид-сайтами и сайтом Tier-1 для CMS в ОИЯИ; PhedexErrors — для определения ошибок, связанных с Tier-1 для CMS в ОИЯИ. Тестовая версия этой системы мониторинга запущена и доступна на lcgens01o.jinr.ru. Теперь система собирает и отображает на своей веб-странице данные по мониторингу Phedex, dCache, а также мониторинг WLCG. Система развивается как инструмент общего назначения, который может быть адаптирован для других центров уровня Tier-1 и экспериментов.

Разработана и запущена в эксплуатацию новая система обработки данных эксперимента COMPASS в

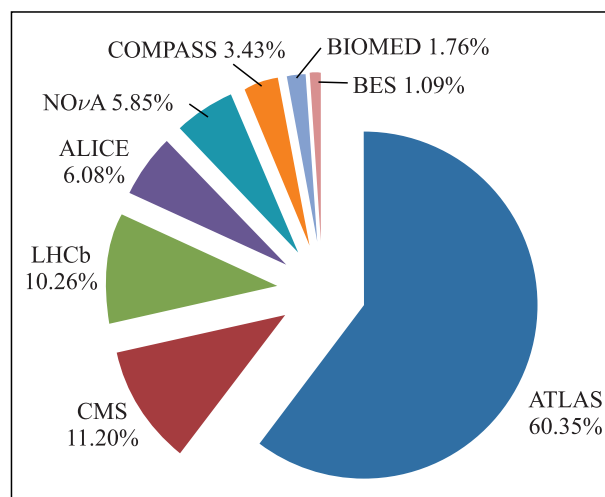


Рис. 5. Использование грид-сайта JINR-LCG2 в ОИЯИ виртуальными организациями, входящими в RDIG/WLCG/EGI

грид-среде (COMPASS Grid Production System) [2]. Управляющая инфраструктура находится в облаке ОИЯИ. Для обработки данных используется PanDA, которая позволяет послать задание на любой из доступных вычислительных ресурсов Condor, LSF, PBS и т.д. Большая часть обработки ведется на грид-ресурсах ЦЕРН и ОИЯИ.

Высокопроизводительная система вычислений. Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс в ЛИТ обеспечивает проведение пользователями вычислений, в том числе параллельных, вне рамок грид-среды. Это необходимо как экспериментам NO ν A, PANDA, BES, NICA/MPD и др., так и локальным пользователям из лабораторий ОИЯИ. Все вычислительные мощности доступны пользователям ОИЯИ и пользователям грид-среды через единую систему пакетной обработки заданий. На рис.6 приведено распределение по времени задач, выполненных на вычислительном кластере подразделениями Института и группами пользователей.

Системы хранения и доступа к данным dCache и XROOTD обеспечивают работу с данными как для локальных пользователей ОИЯИ, так и для внешних пользователей. Поддерживаются две инсталляции dCache: dCache-1 — для экспериментов CMS и ATLAS; dCache-2 — для локальных пользователей, групп пользователей и международных проектов NICA/MPD, HONE, FUSION, BIOMED, COMPASS. Две инсталляции системы доступа к данным XROOTD поддерживают работу с данными трех международных коллабораций ALICE, PANDA и CBM. Все системы хранения построены с использованием аппаратного механизма защиты данных RAID6 и программного — RAIDZ2, который не уступает по надежности аппаратному RAID6.

Облачная среда. В 2017 г. в облачную инфраструктуру ОИЯИ было введено 14 серверов Dell PowerEdge R630 с общим количеством ядер ЦПУ 336 и общим объемом ОЗУ в размере 1792 Гбайт, 6 серверов Dell PowerEdge R730xd с 16 8-Тбайт дисками в каждом для облачного хранилища на базе ceph, 2 сервера Dell PowerEdge R630 для головных машин облака. В рамках поддержки информационно-вычислительной инфра-

структуры эксперимента NO ν A было введено в эксплуатацию 5 серверов Dell PowerEdge R430 с общим количеством 120 ядер ЦПУ и общим объемом ОЗУ в размере 640 Гбайт, а также 1 сервер Dell PowerEdge R730xd с 16 8-Тбайт дисками для расширения облачного хранилища для нужд эксперимента NO ν A.

В 2017 г. была проработана новая отказоустойчивая архитектура облака ОИЯИ на базе Raft-алгоритма, реализованного на новой версии облачной платформы OpenNebula. Выполнены работы по оптимизации архитектуры облачного хранилища на базе ceph [3].

Совместно с НИИ ЯФ БГУ (Минск, Белоруссия) выполнены работы по интеграции облачной инфраструктуры с облаком ОИЯИ. Аналогичные работы [4] ведутся со следующими организациями:

- 1) Университет Назарбаева и Институт ядерной физики (Астана, Казахстан);
- 2) Грузинский технический университет (Тбилиси, Грузия);
- 3) Ереванский физический институт (Ереван, Армения);
- 4) Институт ядерных исследований и ядерной энергетики и Софийский университет (София, Болгария);
- 5) Университет им.Св.Климента Охридского в Битоле (Битола, Македония).

География организаций из стран-участниц ОИЯИ, предоставляющих часть своих ресурсов для интеграции с облаком ОИЯИ, представлена на рис. 7.

В 2017 г. выполнена работа, связанная с рефакторингом драйвера облака ЛИТ ОИЯИ на платформе OpenNebula для развертывания контейнера OpenVZ. Для выполнения поставленной задачи развернут и настроен тестовый полигон, представляющий собой решение, состоящее из двух виртуальных машин, на одной из которых установлена хост-система OpenNebula, а на второй — ее рабочий узел. Для кор-

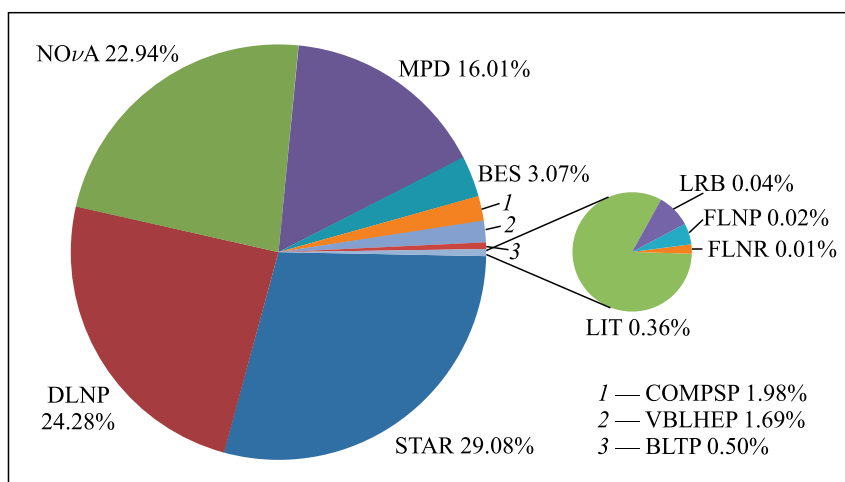


Рис. 6. Статистика использования вычислительного кластера подразделениями и экспериментами ОИЯИ в 2017 г. без учета пользователей грид-среды

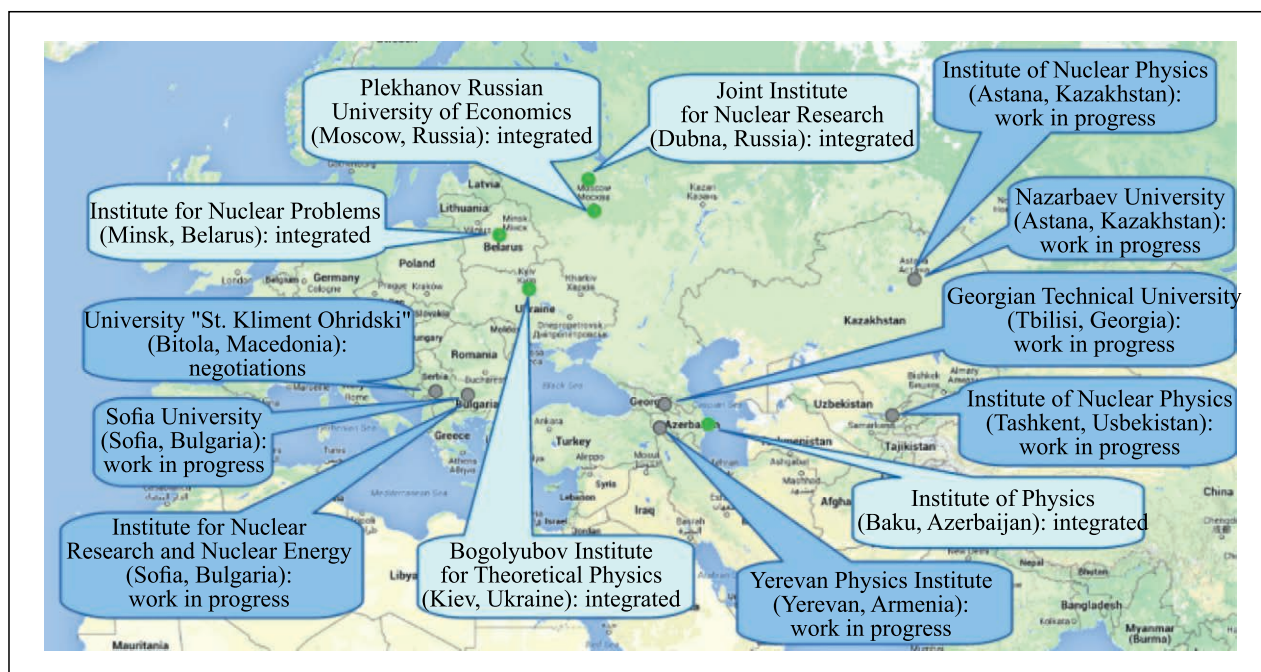


Рис. 7. Географическое положение облачных инфраструктур организаций из стран-участниц ОИЯИ, предоставляющих часть своих ресурсов для интеграции с облаком ОИЯИ

ректной работы тестового полигона необходима синхронизация данных драйвера между хост-системой и рабочим узлом. В ходе выполнения работы был создан единый класс OneDriver, включающий в себя все необходимые для корректной работы драйвера методы управления контейнером, а также вспомогательные методы и функции, участвующие в работе контейнера. В OpenNebula правила для сторонних разработчиков драйверов предусматривают вызов функций управления контейнером из одноименных скриптов, например: команда создания и развертывания контейнера deploy должна вызываться из одноименного файла. Поэтому были созданы соответствующие скрипты, в которых происходит создание объекта класса OneDriver, а затем вызов метода управления контейнером. Драйвер был разработан на языке программирования Ruby.

В 2017 г. для облака был разработан интеллектуальный планировщик, в котором предложено использовать механизм оверкоммитмента (превышения виртуальных ресурсов над физически доступными) с автоматизацией миграции виртуальных машин на освобождаемые ресурсы. Одной из подзадач являлся сбор текущей и исторической информации о нагрузке на все виртуальные машины облака, при этом встроенная в платформу OpenNebula система мониторинга имеет ограниченные возможности по сбору и обработке данных. Таким образом, встала проблема выбора наиболее подходящей внешней системы мониторинга. Важными факторами отбора такой системы являются производительность и масштабируемость, так как применимость планировщика в целом к большим облакам может оказаться ограничена именно

ими. По результатам тестов и полученному опыту работы с системами Ganglia, Icinga2, NetXMS, NMIS и Zabbix для использования в интеллектуальном планировщике была выбрана система Icinga2 [5].

Гетерогенный вычислительный кластер HybriLIT. В 2017 г. продолжено развитие программно-информационной среды гетерогенного вычислительного кластера HybriLIT, являющегося одним из компонентов Многофункционального информационно-вычислительного комплекса ЛИТ ОИЯИ. Кластер HybriLIT предназначен для проведения массивно-параллельных вычислений на новейших вычислительных архитектурах, таких как графические процессоры (Nvidia Tesla K40, K80) и сопроцессоры/процессоры Intel Xeon Phi. В настоящее время кластер содержит 10 вычислительных узлов с графическими ускорителями Nvidia Tesla K20X, K40, K80, сопроцессорами Intel Xeon Phi 5110P, 7120 и процессорами Intel Xeon E5-2695 V2 и V3. Общее количество CUDA ядер 77 184, процессорных ядер 252, ядер сопроцессора 182, общий объем памяти 2,5 Тбайт, общая производительность при вычислениях с одинарной точностью 140 Тфлопс, с двойной 50 Тфлопс. В качестве планировщика заданий и менеджера ресурсов на кластере используется SLURM, настройки которого позволяют распределить вычислительные узлы по группам (очередям), сформированным по используемым в расчетах вычислительным архитектурам. Для получения информации о доступных ресурсах в различных SLURM-очередях, характеристиках узлов, а также о статусе

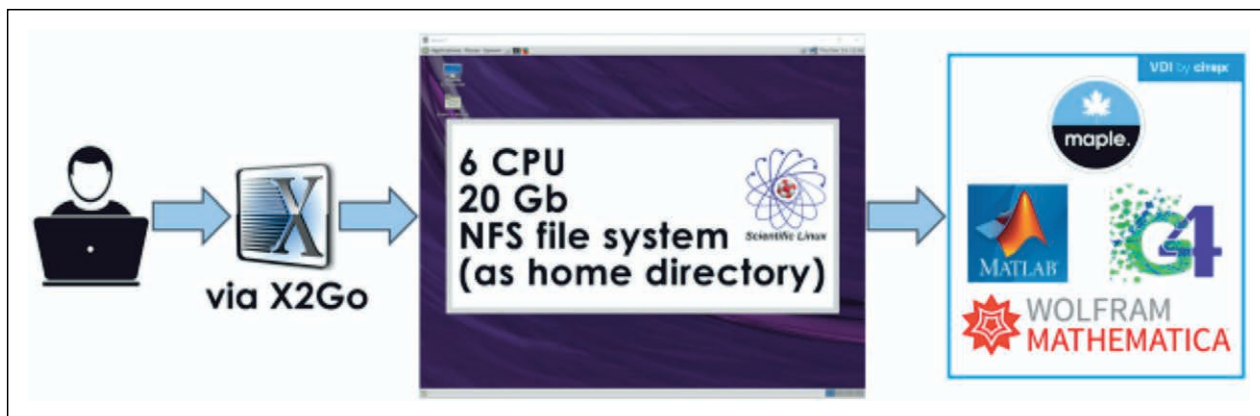


Рис. 8. Схема работы с сервисом HLIT-VDI

запущенных на счет задач, т. е. для более эффективной организации проведения расчетов на кластере, было разработано мобильное приложение MobiLIT, позволяющее:

- осуществлять мониторинг задач пользователей;
- быстро просматривать свои файлы (*.out, *.dat, *.in or *.sh);
- иметь возможность прекращения выполнения задачи;
- осуществлять мониторинг ожидаемого времени окончания расчетов;
- осуществлять мониторинг доступных ресурсов на различных узлах кластера и в различных очередях, организованных для использования различных вычислительных архитектур;
- по всем задачам, запущенным на кластере, иметь полную информацию о занимаемых ресурсах и т. д.

Приложение MobiLIT разработано на фреймворке NativeScript для пользователей мобильных телефонов и планшетов, работающих под управлением операционных систем Android и iOS. В настоящее время приложение доступно для скачивания через Google Play Store для пользователей Android, для iOS — через App Store (в тестовом режиме). Для входа в систему используется авторизация кластера HybriLIT. Разработанное мобильное приложение MobiLIT для пользователей кластера обогащает программно-информационную среду кластера удобным и современным IT-сервисом, упрощая проведение параллельных расчетов, и обеспечивает дополнительную оптимизацию использования вычислительных ресурсов.

В 2017 г. в программно-информационную среду кластера HybriLIT введен новый сервис HLIT-VDI, который предназначен для работы с прикладным программным обеспечением, использующим развитые графические интерфейсы. Данный сервис позволяет работать с такими пакетами прикладных программ, как Wolfram Mathematica, Maple, Matlab, GEANT4 и др., через удаленный доступ на виртуальные машины (ВМ) на базе кластера HybriLIT.

Созданный сервис обеспечивает как проведение небольших расчетов внутри ВМ, так и выполнение ресурсоемких расчетов на вычислительных узлах кластера (рис. 8).

Ресурсы кластера активно используются не только для массивно-параллельных расчетов задач, решаемых в ОИЯИ, но и для подготовки кадров для работы на высокопроизводительных вычислительных системах (HPC). На базе кластера HybriLIT, являющегося динамической, активно развиваемой структурой, включающего в себя самые современные вычислительные HPC-архитектуры, а также обладающего развитой программно-информационной средой, разрабатываются учебные программы на самом современном уровне. Эти программы дают студентам, аспирантам и молодым ученым возможность как научиться работать на современных вычислительных платформах, так и овладеть современными IT-технологиями [6].

Информационная и программная поддержка.

В Лаборатории информационных технологий создана специализированная платформа, представляющая собой набор взаимосвязанных облачных сервисов и средств, предоставляющая удобные инструменты для управления и обработки данных биомониторинга, позволяющая упростить и автоматизировать этапы мониторинга, начиная с выбора мест для сбора образцов и заканчивая генерацией карт распределения загрязнений и прогнозированием изменений в окружающей среде. Разработка такой платформы необходима для автоматизации контроля загрязнения окружающей среды, что имеет большое значение для стран Европы и Азии и курируется специальной комиссией ООН. Созданная платформа при помощи современных аналитических, статистических, программных и организационных методов позволяет повысить качество и скорость обработки данных, расширить возможности взаимодействия между участниками, обеспечить базу для анализа ретроспективы и организовать доступ ко всей имеющейся информации, что дает возможность активизировать работы

по прогнозированию распространения трансграничных загрязнений. В настоящее время в системе содержится информация о более чем 6000 точках пробоотбора в 40 регионах различных стран Европы и Азии. Участники программы могут в режиме реального времени анализировать данные, проводить сравнения с другими регионами, строить карты загрязнений и многое другое. Платформа может быть использована и для других областей со схожим процессом исследований [7].

В 2017 г. программа SyMsim (Synthesis of Monitoring and SIMulation), разработанная для моделирования грид- и облачных систем хранения и обработки данных, впервые применена для моделирования межпроцессорного взаимодействия при выполнении HPC-приложений в облаке на базе MPI-реализации программы расчета вольт-амперных характеристик длинных джозефсоновских переходов. Сравнение результатов, полученных эмпирическим путем, с результатами имитационного моделирования показало, что имитационная модель корректно моделирует параллельные расчеты, выполненные с использованием технологии MPI, и доказало, что для быстрого счета задач такого класса надо одновременно с увеличением числа процессоров увеличивать пропускную способность сети. Результаты продемонстрировали, что программу имитационного моделирования SyMsim можно успешно использовать для оценки времени выполнения MPI-алгоритмов в облачной среде с учетом межпроцессорных соединений [8]. В рамках решения этой задачи был разработан сервис с веб-интерфейсом пользователя для моделирования длинных джозефсоновских переходов, при этом расчеты выполняются на динамически

создаваемых в облаке виртуальных машинах, подключаемых в качестве рабочих узлов батч-системы HTCondor. Также в 2017 г. программа SyMsim использовалась для моделирования распределенной обработки данных эксперимента BM@N и в совместном проекте с ИНЕР (Китай) по оптимизации инфраструктуры вычислительного центра.

В 2017 г. в ЛИТ продолжалась традиционная работа по сопровождению и развитию библиотеки программ JINRLIB — библиотека была дополнена учебными материалами по технологиям параллельного программирования, а также двумя программами: PSD2SAS авторов А.Г. Соловьева, С.А. Кутузова, О.И. Иванькова, А.И. Куклина (программа для преобразования данных позиционно-чувствительного детектора спектрометра малоуглового рассеяния нейтронов в случае изотропно рассеивающего образца) и IntroOMP — подборка учебных программ-примеров по технологии параллельного программирования OpenMP авторов М.В. Башашина, Т.Ф. Сапожниковой и Е.В. Земляной.

В 2017 г. продолжалось развитие единой системы IC 8.2 УПП, а также осуществлялась регулярная поддержка конечных пользователей этой системы. Также в этом году была продолжена регулярная работа по созданию и хранению электронных документов, связанных с научной и административной деятельностью Института, в том числе продолжено совершенствование программного обеспечения системы JINR Document Server (JDS), разработанного как репозиторий открытого доступа к статьям, препринтам, сборникам видеолекций для молодых ученых и другим материалам, которые отражают исследовательскую деятельность ОИЯИ.

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

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

Предложены новые вычислительные схемы и алгоритмы для решения параметрической самосопряженной эллиптической краевой задачи в двумерной области с граничными условиями Дирихле или Неймана с использованием метода конечных элементов высокого порядка точности с прямоугольными и треугольными элементами. Комплексы программ, реализующие алгоритмы, вычисляют собственные значения, собственные функции, их производные по па-

раметру и матричные элементы (интегралы от произведения собственных функций и/или их производных по параметру), которые появляются при редукции многомерной краевой задачи к одномерной, методом Канторовича. Эффективность предложенных схем расчета и алгоритмов продемонстрирована на решении двумерных эллиптических краевых задач, описывающих квадрупольные колебания в коллективной модели атомного ядра [9].

Проведены исследования влияния итерационного параметра в непрерывном аналоге метода Ньютона на область и скорость сходимости. Предложен подход к оптимизации процесса сходимости непрерывного аналога метода Ньютона (НАМН), основанный на использовании квадратичного интерполяционного

полинома. На основании данного подхода разработан механизм управления скоростью сходимости непрерывного аналога метода Ньютона с использованием в качестве управляющего параметра коэффициента изменения шага разностной схемы для численного решения дифференциального уравнения НАМН. На основе разработанного механизма управления процессом сходимости была предложена модификация непрерывного аналога метода Ньютона [10].

Для получения более экономичного алгоритма вычисления характеристик стохастических дифференциальных уравнений (СДУ) предлагается использовать представление функции плотности вероятности перехода (ФПВП) для решения СДУ через функциональный интеграл и методы приближенного вычисления возникающих функциональных интегралов. Для записи ФПВП через функциональный интеграл используется техника Onsager-Machlup функционалов. Для вычисления возникающих функциональных интегралов применен метод, основанный на выделении из всех траекторий классической траектории, для которой действие принимает экстремальное значение, и разложении действия относительно классической траектории [11].

На основе комбинации методов вычислительной теории групп с моделированием Монте-Карло построена модель квантовой эволюции, инспирированная квантовым эффектом Зенона. В рассматриваемой модели траектория квантовой системы представлена в виде последовательности наблюдений с унитарными переходами между ними. Время предполагается фундаментально дискретным. С математической точки зрения *наблюдение (измерение)* представляет собой ортогональную проекцию в определяемое «измерительной установкой» подпространство гильбертова пространства. Статистика результатов наблюдений описывается теоремой Глисона (частным случаем которой является правило Борна). Стандартная квантовая механика предполагает единственную детерминистическую унитарную эволюцию квантовой системы в интервале времени между наблюдениями. Однако в соответствии с принципом наименьшего действия эта единственная эволюция появляется как доминирующий элемент в некотором множестве «виртуальных» эволюций. В предложенной модели унитарный переход между наблюдениями интерпретируется как разновидность калибровочной связности, т.е. способ отождествления неразличимых объектов в различные моменты времени (в дискретном времени принципиально невозможно отследить индивидуальность неразличимых объектов в процессе их эволюции), и предполагается, что все возможные унитарные преобразования участвуют в переходах между наблюдениями с весами, соответствующими вероятностям перехода. Это предположение подтверждается моделированием Монте-Карло, показывающим резкое доминирование некоторых эволюций над остальными. Это доминирова-

ние быстро растет с увеличением размера группы симметрий состояний и размерности гильбертова пространства. Вероятность траектории квантовой системы вычисляется как произведение вероятностей переходов между смежными наблюдениями. Континуальный предел (отрицательного) логарифма этого произведения представляет собой *действие*. Таким образом, принцип выбора наиболее вероятной траектории в континуальном пределе переходит в принцип наименьшего действия [12].

Для улучшения качества реконструкции мюонных треков в CSC (Cathode strip chamber) мюонной системы эксперимента CMS был разработан новый алгоритм [13]. Детальный сравнительный анализ проведен с целью подтверждения необходимости использования нового алгоритма в качестве базового алгоритма реконструкции в CSC на Монте-Карло [14] и экспериментальных данных. В сравнении со стандартным алгоритмом существенно уменьшается множественность трек-сегментов (рис. 9, а). Это повышает точность и уменьшает время выполнения реконструкции на последующих этапах, где требуется перебор по всем построенным трек-сегментам. Эффективность стандартного алгоритма падает с увеличением псевдобыстроты, в то время как для нового алгоритма эффективность остается на высоком ($\sim 95\%$) уровне для всего диапазона псевдобыстрот, перекрываемых CSC (рис. 9, б). Точность реконструкции азимутальной координаты, обеспечивающей точность восстановления поперечного импульса мюонов, значительно улучшена (рис. 9, в, г), что хорошо видно на примере мюонов с высокой энергией (рис. 9, в), где среднеквадратичное отклонение отображаемого распределения более чем в три раза меньше для нового алгоритма по сравнению со старым. Новый алгоритм реконструкции трек-сегментов был имплементирован в официальный пакет программ CMS в июле 2016 г. и, начиная с 2017 г., используется по умолчанию при реконструкции моделированных и экспериментальных данных.

Разработан быстрый и эффективный алгоритм для реконструкции мюонных треков распада $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$, регистрируемых детектором MUCN эксперимента CBM. Одна из ключевых задач этого эксперимента — исследование процессов рождения чармония в ядро-ядерных соударениях при высоких энергиях. При этом регистрацию таких распадов, как $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$, планируется проводить в режиме реального времени. В основу алгоритма распознавания мюонных треков положена модель клеточного автомата (КА), которая успешно применяется в ряде экспериментов в области физики высоких энергий. Модель КА хороша тем, что позволяет уменьшить количество рекурсивных операций на массиве входных данных и провести большую часть вычислений локально. В рассматриваемом случае элементами КА («клетками») являются отрезки ломаной, из которых

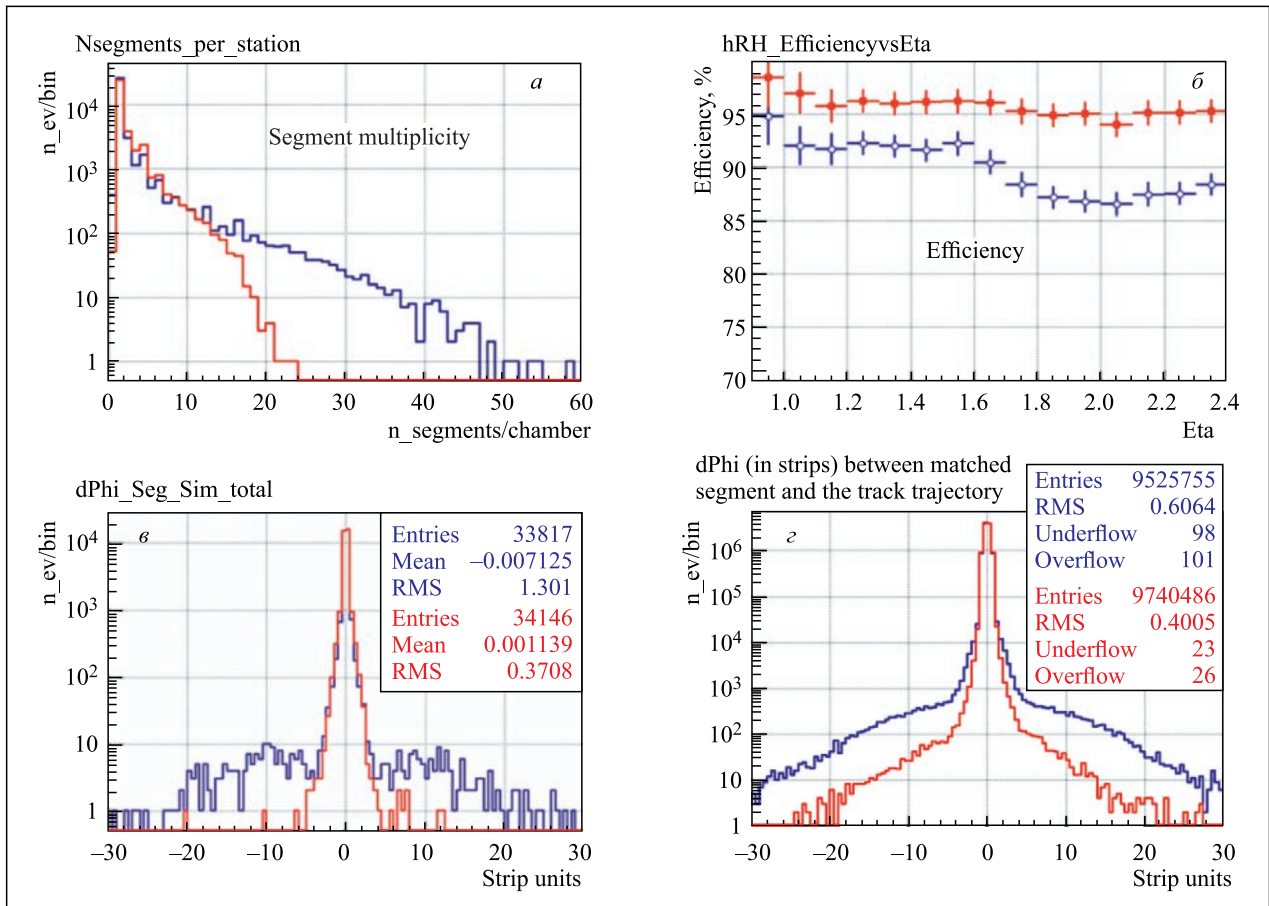


Рис. 9. Сравнение стандартного ST (синий) и нового RU (красный) алгоритмов реконструкции трек-сегментов. а) Число реконструированных трек-сегментов в камере для моделированных мюонов с $P_t = 1$ ТэВ; б) зависимость эффективности реконструкции от псевдобыстроты для моделированных мюонов с $P_t = 1$ ТэВ; в) разница азимутальных координат (в единицах ширины стрипа) трек-сегмента, ассоциированного с реконструированным мюоном, и моделированного мюона с $P_t = 1$ ТэВ; г) разница азимутальных координат трек-сегмента, ассоциированного с мюоном, и реконструированного мюона на основе экспериментальных данных 2016 г.

строится аппроксимация прямолинейного трека. Алгоритм распознавания треков включает три последовательных этапа: вычисление средних точек; формирование сегментов — элементов реконструируемых треков; связывание сегментов и реконструкция треков. Разработанный алгоритм включен в пакет CBM-ROOT в качестве динамически подключаемой библиотеки под именем Lx. В эту же библиотеку включены алгоритмы, реализующие триггер для отбора распадов $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$, и набор методик для настройки параметров алгоритма на модельных данных. В дальнейшем планируется исследовать возможность применения аналогичного подхода для отбора легких векторных мезонов, распадающихся по мюонному каналу [15].

Исследована зависимость многократного дифференциального сечения ($e, 2e$) однократной ионизации молекулы H_3^+ от энергии налетающего и вылетающего электронов, а также от направления вылетающего и рассеянного электронов. Расчеты были выполнены в первом борновском приближении, которое требует разработки трехцентровых волновых

функций связанного состояния и непрерывного спектра. Три рассеивающих центра находятся в вершинах равностороннего треугольника. Получены оптимальные условия и особенности треугольных мишеней, такие как появление интерференционных эффектов четырехкратного дифференциального сечения при изменении угла рассеяния с условием фиксированной ориентации молекулы. Дано сравнение сечений, полученных с помощью двух различных волновых функций молекулы H_3^+ , как с учетом корреляции электронов, так и без него. Показано, что разница полученных тройных дифференциальных сечений незначительна, однако корреляции приводят к некоторой модификации структуры четырехкратного дифференциального сечения [16].

В качестве примеров алгоритмического построения разностных схем для уравнений в частных производных, наследующих на дискретном уровне их основные алгебраические свойства, построены новые разностные схемы для уравнений Навье–Стокса и уравнения Кортевега–де Фриза. Построенные схемы имеют хорошее численное поведение [17].

Усовершенствованы методы получения функциональных уравнений для фейнмановских интегралов на основе алгебраических соотношений для пропагаторов. Проведены вычисления КХД-вкладов (с учетом калибровки) в константу перенормировки смешанного пропагатора фермионов [18].

Проведено построение геометрического описания уравнений Максвелла в терминах расслоенных пространств. Предложены разные варианты тен-

зора проникаемостей и, соответственно, разные варианты геометризаций уравнений Максвелла. В частности, выделяется вариант геометризаций на основе квадратичной метрики, приводящий к уравнениям янг-миллсовского типа. Разработанный формализм применен к задачам трансформационной оптики и задачам проектирования оптических приборов и устройств субволнового диапазона [19].

НАУЧНО-ПРИКЛАДНЫЕ РАБОТЫ

Построена модель прогнозирования суточного энергопотребления для Московского региона с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС). Важную роль в решении этой задачи сыграли следующие факторы: оптимально подобранная архитектура ИНС, адекватная структура выборки, подаваемой на вход сети, и оригинально построенные процедуры обучения и прогнозирования сети. В качестве основных переменных, подаваемых на вход ИНС, были выбраны переменные, отвечающие за сезонные и периодические колебания энергопотребления, переменная, которая берется либо из отфильтрованных данных (на этапе обучения сети), либо из прогнозных значений, вычисленных с помощью пакета «Гусеница»-SSA, и величина, взятая из исходного ряда (на этапе обучения сети), либо то значение, которое предсказывалось на текущий день обученной ИНС (на этапе обучения сети). Показано, что сформированная таким образом входная выборка позволила достичь быстрого и эффективного обучения нейронной сети и обеспечить приемлемое среднесрочное прогнозирование суточного энергопотребления для Московского региона [20].

В рамках сотрудничества с Российским экономическим университетом им. Г. В. Плеханова разработана автоматизированная система мониторинга и прогноза соответствия профессионального образования потребностям рынка труда. При создании системы использовался значительный арсенал методов и средств аналитики Больших данных, а также опыт, накопленный в проектах по компьютерному моделированию экспериментов ATLAS и CMS в ЦЕРН. Задача, лежащая в русле так называемой цифровой экономики, является весьма непростой и для своего решения требует новых подходов и методов науки о данных, в том числе методов семантического анализа и машин-

ного обучения. Постоянно обновляющаяся информационная база формируется из открытых источников. Разработанная система обеспечивает дополнительные возможности для выявления качественных и количественных связей между сферой образования и рынком труда. Она ориентирована на широкий круг пользователей: органы власти и управления регионов и муниципалитетов, руководство университетов, компаний, кадровых агентств, выпускников и абитуриентов вузов [21].

Проведено моделирование структурных изменений на поверхности образца никеля при облучении ионами урана с энергией диапазона 100–700 МэВ. Получены размеры характерных повреждений в зависимости от энергии облучения в различные моменты времени. Важно отметить, что при облучении металлического образца ионами высоких энергий основная часть энергии теряется в электронном газе и затем передается кристаллической решетке, но определенное количество энергии аккумулируется в электронном газе. Поэтому при выборе начальных условий для молекулярно-динамического моделирования этот факт необходимо учитывать, при этом начальные условия (температурные профили) можно варьировать. Кроме того, экспериментальные данные можно использовать для уточнения начальных условий. Проведенные исследования показали: предложенная методика хорошо подходит для описания структурных изменений в поверхностных слоях облучаемого материала, для получения более точных предсказаний о структурных изменениях рекомендуется использовать экспериментальные данные, а также более полно использовать нелинейную зависимость от температуры параметров модели термического пика [22].

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Сотрудниками ЛИТ совместно с сотрудниками международной коллаборации CBM разрабатываются системы считывания и сбора данных детектора

черенковских колец RICH эксперимента CBM. На основе данных, собранных в течение пучковых тестов в ЦЕРН, и результатов лабораторных измере-

ний с помощью специально построенного для этого стенда проведен подробный анализ прототипов модулей считывания и приема данных. Разработано программное обеспечение приема и анализа данных СВМ RICH. Разработаны методики калибровки, и выполнена оптимизация отдельных компонентов с целью достижения наилучшего временного разрешения для регистрации одиночных фотонов в условиях высокой загрузки каналов, ожидаемых в СВМ. С помощью разработанной системы считывания и сбора данных проведено прямое измерение временного профиля сместителя спектра п-терфенила и его влияние на временные характеристики всей системы считывания СВМ RICH. Полученные результаты достаточны для использования исследованной схемы считывания и сбора данных в эксперименте СВМ [23].

Совместно с болгарскими коллегами была разработана непрерывно-атомистическая модель (НАМ) для моделирования взаимодействия тяжелых ионов высоких энергий с конденсированными средами. НАМ описывается двумя разными классами уравнений, а именно: непрерывными уравнениями теплопроводности модели термического пика и уравнениями движения материальных точек метода молекулярной динамики. Использование высокопроизводительных систем для непрерывно-атомистического моделирования требует разработки новых вычислительных схем и параллельных алгоритмов. В работе для исследования НАМ разработаны вычислительная

схема и алгоритмы с возможностью их использования в многопроцессорных системах. Исследована эффективность вычислительной схемы и параллельных алгоритмов [24].

Совместно с коллегами из ЮАР и США предложен метод PT -симметричного расширения уравнения Дирака. Возмущения, нарушающие P - и T -симметрии, соответствуют диссипации и компенсирующей накачке энергии извне. С помощью предложенного метода сформулированы три PT -симметричные спинорные модели с кубической нелинейностью. Показано, что PT -симметричные расширения модели Тирринга и модели Гросса–Невью обладают, соответственно, бесконечным и конечным набором законов сохранения, тогда как PT -симметричное расширение третьей (нововведенной) спинорной модели не имеет сохраняющихся величин. Несмотря на эти чрезвычайные различия в количестве интегралов движения и интегрируемости, все три модели обладают точными солитонными решениями. Численный анализ показывает, что все солитоны устойчивы, вне зависимости от значения частоты солитона и параметра накачки и диссипации. Структурная устойчивость спинорных солитонов по отношению к возмущениям, нарушающим P - и T -симметрии, а также устойчивость к возмущениям начальных данных указывают на фундаментальный характер частицеподобных объектов в теориях, описываемых нелинейным уравнением Дирака [25].

СОВЕЩАНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ

С 3 по 7 июля в ЛИТ проходила очередная, девятая международная конференция «Математическое моделирование и вычислительная физика» (ММСР'2017). Конференция была посвящена 60-летию образования Объединенного института ядерных исследований. Ее организаторами выступили ЛИТ ОИЯИ, IFIN-HH (Бухарест, Румыния), Технический университет (Кошице, Словакия), Институт экспериментальной физики Словацкой академии наук (Кошице, Словакия), Университет им. П. Й. Шафарика (Кошице, Словакия). Спонсором конференции выступила компания Intel. Председателем конференции был В. В. Кореньков (ЛИТ ОИЯИ), сопредседателями организационного комитета — Г. Адам (ЛИТ ОИЯИ, IFIN-HH), М. Гнатич (ЛТФ ОИЯИ, Институт экспериментальной физики САН и Университет им. П. Й. Шафарика).

Научная тематика конференции охватила широкий круг вопросов, включающих в себя распределенные и параллельные вычисления в науке и технологиях; математические методы и программное обеспечение для моделирования сложных физических и

технологических систем; биоинформатика и вычислительная биофизика; методы, программные и компьютерные комплексы для обработки экспериментальных данных; методы, алгоритмы и программное обеспечение для компьютерной алгебры и квантового компьютеринга.

В работе конференции приняли участие свыше 250 ученых и специалистов из различных научных центров Румынии, Болгарии, Германии, Литвы, Финляндии, Франции, Словакии, США, Монголии, Канады и большого числа российских научных центров и университетов, среди которых НИЦ «Курчатовский институт», ИМПБ РАН, ИТПМ СБ РАН, Санкт-Петербургский ГУ, Новосибирский ГУ, РУДН и др. Всего на конференции было представлено 212 докладов, из них 31 пленарный, 158 секционных и 23 постерных.

В рамках конференции ММСР'2017 при поддержке дирекции ОИЯИ была организована конференция-школа «Математическое моделирование для проекта NICA». Программа школы включала в себя как лекционную часть, так и прак-

тические занятия и мастер-классы. Учебные курсы проводились на гетерогенном кластере HUBRI-LIT при поддержке группы по гетерогенным вычислениям ЛИТ ОИЯИ. Всего в работе конференции-школы приняли участие 54 молодых ученых и специалиста из ОИЯИ, студенты университетов «Дубна», МИФИ, МГУ, СПбГУ, ТвГУ, РУДН, ЮУрГУ, ПГУТИИ, КазНУ им. аль-Фараби (Казахстан).

С 25 по 29 сентября в Республике Черногории (г. Будва) проходил XXVI Международный симпозиум ОИЯИ по ядерной электронике и компьютерингу («Nuclear Electronics and Computing» — NEC'2017). Этот симпозиум традиционно проводится ОИЯИ с 1963 г., и в девятый раз его организаторами были ОИЯИ и ЦЕРН. Сопредседателями симпозиума были: со стороны ОИЯИ — директор ЛИТ В.В. Кореньков, со стороны ЦЕРН — доктор Ян Бёрд.

В работе симпозиума приняли участие более 120 ведущих специалистов в области современных компьютерных и сетевых технологий, распределенного компьютеринга и ядерной электроники из 14 стран: Белоруссии, Молдовы, Болгарии, Великобритании, Германии, России, США, Франции, Чехии, Словакии, Италии, Китая, Нидерландов, Швейцарии.

Научная программа симпозиума охватила широкий круг вопросов и включала следующие секции: по детекторной и ядерной электронике, триггерным системам и системам сбора данных, машинному обучению и аналитике больших данных, грид-технологиям и облачным вычислениям, компьютерингу для экспериментов на крупномасштабных ускорительных установках (LHC, FAIR, NICA, SKA, PIC, XFEL, ELI и др.), нереляционным базам данных и гетероген-

ным репозиториям, исследовательским инфраструктурам данных, вычислениям на гибридных системах, а также ставшей традиционной тематике симпозиума — информационным технологиям в образовании. В рамках симпозиума также состоялось рабочее совещание «BigPanDA Technical Interchange Meeting». Симпозиум прошел при спонсорской поддержке Niagara Computers, JET Infosystems, Dell-EMC и IBS Platformix.

Всего в рамках научной программы мероприятия было представлено 89 докладов, включая 36 пленарных и 53 секционных. На образовательной секции было представлено 10 докладов.

В четвертый раз в рамках симпозиума проведена международная школа для студентов и аспирантов по современным информационным технологиям. На этот раз школа была посвящена распределенным гетерогенным вычислительным инфраструктурам.

В работе школы-конференции приняли участие ведущие ученые России, Великобритании, США и Италии, сотрудники ОИЯИ, НИЦ КИ, ЦЕРН и DESY.

В школе-конференции приняли участие 32 студента старших курсов (а также магистры и аспиранты), которые специализируются в области информационных технологий, из ведущих вузов страны: Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Санкт-Петербургского государственного университета, университета «Дубна», Рязанского государственного радиотехнического университета, Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, Российского университета дружбы народов, Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Astakhov N., Baginyan A., Balandin A. et al. // CEUR Workshop Proceedings. 2017. V. 2023. P. 68–74.
2. Petrosyan A. COMPASS GRID Production System // Proc. of The 26th Intern. Symp. on Nuclear Electronics & Computing (NEC2017), CEUR Workshop Proceedings. 2017. V. 2023. P. 234–238.
3. Balashov N., Baranov A., Belov S., Kadochnikov I., Korenkov V., Kutovskiy N., Nechaevskiy A., Pelevanyuk I. Optimization of the JINR Cloud's Efficiency // The 26th Intern. Symp. on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2017), CEUR Workshop Proceedings. 2017. V. 2023. P. 88–91.
4. Balashov N., Baranov A., Mazhitova Ye., Kutovskiy N., Semenov R. JINR Member States Cloud Infrastructure // The 26th Symp. on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2017), CEUR Workshop Proceedings. 2017. V. 2023. P. 202–206.
5. Kadochnikov I. S. et al. // CEUR Workshop Proceedings. 2017. V. 1787. P. 279–283.
6. Korenkov V. V., Podgany D. V., Streltsova O. I. Modern Information Technology and IT-Education. 2017. V. 13, No. 4. P. 141–146.
7. Kutovskiy N. A., Nechaevskiy A. V., Ososkov G. A., Uzhinskiy A. V., Frontasyeva M. V. // Geoinformatica. 2017. No. 2. P. 11–16.
8. Кутовский Н. А., Нечаевский А. В., Ососков Г. А., Пряхина Д. И., Трофимов В. В. // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9, № 6. С. 955–963.
9. Гусев А. А. и др. // Вестн. РУДН. Сер. Математика. Информатика. Физика. 2017. Т. 25, № 1. С. 36–55.
10. Никонов Э. Г., Казаков Д. С. Механизм управления процессом сходимости итерационного метода Нью-

- тона // Системный анализ в науке и образовании / Под. ред. Е. Н. Черемисиной. Дубна, 2017. Вып. 1. С. 1–9.
11. Айрян Э. А. и др. // Математическое моделирование. 2017. Т. 9, № 3. С. 339–348.
 12. Korniyak V. V. // EPJ Web Conf. 2017 (submitted).
 13. Palichik V., Voytishin N. // Phys. Part. Nucl. 2017. V. 48. P. 786.
 14. Kapishin M., Palichik V., Voytishin N. // RO-LCG-2017 Conf. Proc. 2017. P. 56.
 15. Ablyazimov T. O. Ivanov V. V. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14, No. 3(208). P. 287–298.
 16. Obeid S., Chuluunbaatar O., Joulakian B. B. // J. Phys. B. 2017. V. 50. P. 145201-1-9.
 17. Amodio P., Blinkov Yu. A., Gerdt V. P., La Scala R. // Appl. Math. Comp. 2017. V. 314. P. 408–421.
 18. Tarasov O. V. // J. High Energy Phys. 2017. V. 11. P. 38–60;
Tarasov O. V. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 920(1). P. 012004–012013.
 19. Кулябов Д. С. // Вестн. РУДН. Сер. Математика. Информатика. Физика. 2017. Т. 25, № 1. С. 81–90;
 - Gevorkyan M. N., Kulyabov D. S., Lovetskiy K. P., Nikolaev N. E., Sevastianov A. L., Sevastianov L. A. // Math. Mod. Geom. 2017. V. 5, No. 1. P. 1–20.
 20. Иванов В. В., Крянев А. В., Осетров Е. С. // Письма в ЭЧАЯ. 2017. Т. 14, № 4(209). С. 418–430.
 21. Belov S. D., Filozova I. A., Kadochnikov I. S., Korenkov V. V., Semenov R. N., Zrelov P. V. // CEUR Workshop Proceedings. 2017. V. 2023. P. 98–104.
 22. Дудык А. Ю. и др. // Поверхность. Сер. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 6. С. 1–6.
 23. Adamczewski-Musch J., Akishin P., et al. // Part. Nucl. 2017. V. 14, No. 6. P. 637.
 24. Dimova S. N., Puzynin I. V., Puzynina T. P., Tuhliyev Z. K., Hristov I. G., Christova R. D., Chernogorova T. P., Sharipov Z. A. // CEUR-WS.org. 2017. V. 1787. P. 184–188.
 25. Barashenkov I. V., Alexeeva N. V., Saxena A. // Ann. Phys. 2017 (in press).