

## Актуальность создания цифрового двойника для управления распределенными центрами сбора, хранения и обработки данных

Д. И. Пряхина\*, В. В. Кореньков

Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Российская Федерация

Адрес: 141980, Российская Федерация, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

\* pgyahinad@jinr.ru

### Аннотация

В работе рассматриваются области применения цифровых двойников. Основное внимание уделяется возможностям использования цифровых двойников для центров хранения и обработки данных. Рост популярности распределенных систем сбора, хранения и обработки сверхбольших объемов данных в различных областях деятельности человека приводит к необходимости создания их цифрового двойника. Главным элементом цифрового двойника является компонент, осуществляющий моделирование системы. В связи с чем обоснованы преимущества и недостатки существующих средств моделирования распределенных центров хранения и обработки данных, в частности узкоспециализированных библиотек *Bricks*, *OptorSim* и *GridSim*, а также программных комплексов, в основе которых лежат перечисленные инструменты. В результате проведенного анализа сделан вывод о необходимости создания иного подхода к моделированию, реализация которого позволит создавать цифровые двойники распределенных систем для проведения исследований в области эффективности и надежности функционирования распределенных центров сбора, хранения и обработки данных. Появится возможность проверять различные сценарии масштабирования сложных распределенных систем с учетом процессов, происходящих в системе, и требований к потокам данных и потокам задач. В заключении сформулированы задачи по разработке программного инструмента, который позволит создавать цифровые двойники распределенных центров сбора, хранения и обработки данных.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, моделирование, сложные системы, распределенный центр хранения и обработки данных

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Пряхина Д. И., Кореньков В. В. Актуальность создания цифрового двойника для управления распределенными центрами сбора, хранения и обработки данных // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2023. Т. 19, № 2. С. 262-271.

© Пряхина Д. И., Кореньков В. В., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



## The Relevance of Creating a Digital Twin for Managing Distributed Centers for Collecting, Storing and Processing Data

D. I. Priakhina\*, V. V. Korenkov

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

Address: 6 Joliot-Curie St., Dubna 141980, Moscow region, Russian Federation

\* pryahinad@jinr.ru

### Abstract

The work discusses the areas of application of digital twins. The focus is on the possibilities of using digital twins for data centers. The growing popularity of distributed systems for collecting, storing and processing ultra-large volumes of data in various areas of human activity leads to the need to create digital twins. The main element of the digital twin is the component that models the system. In this regard, the advantages and disadvantages of existing tools for modeling distributed storage and data processing centers, in particular the highly specialized libraries Bricks, OptorSim and GridSim, as well as software packages based on the listed tools, are justified. Based on the analysis, it was concluded that it is necessary to create a different approach to modeling, the implementation of which will make it possible to create digital twins of distributed systems to conduct research in the field of efficiency and reliability of functioning of distributed centers for collecting, storing and processing data. It will be possible to test various scaling scenarios for complex distributed systems, taking into account the processes occurring in the system and the requirements for data flows and task flows. In conclusion, the article provides formulations of tasks for developing a software tool that will allow creating digital twins of distributed centers for collecting, storing and processing data.

**Keywords:** digital twin, modeling, complex systems, distributed data storage and processing center

**Conflict of interests:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Priakhina D.I., Korenkov V.V. The Relevance of Creating a Digital Twin for Managing Distributed Centers for Collecting, Storing and Processing Data. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2023;19(2):262-271.



## Введение

Понятие «цифровой двойник» не так давно вошло в современную жизнь, но уже нашло широкое применение во многих областях науки и деятельности человека. Цифровые двойники используют в машиностроении, аэрокосмической отрасли, судостроении, сельском хозяйстве, медицине, социальных структурах, логистике, экономике и многих других сферах. Цифровые двойники создаются для сложных систем с целью отслеживания процессов, происходящих в системе, своевременного обнаружения возможных неисправностей, масштабирования системы и дальнейшей оптимизации.

Одной из важнейших сложных систем XXI века являются центры сбора, хранения и обработки данных. Для этих систем уже существуют цифровые двойники, но они представляют собой виртуальные копии центров, которые территориально расположены в одном физическом пространстве. Помимо этого, центры обработки данных рассматриваются только с точки зрения инженерной инфраструктуры.

Ни для кого не секрет, что рост объемов данных увеличивается с каждым годом, поэтому прослеживается тенденция создания распределенных центров хранения и обработки данных. Такие центры имеют сложную географически распределенную инфраструктуру, включающую множество ресурсов разных типов (серверное оборудование, процессоры различных типов, системы иерархической памяти, сетевое оборудование, суперкомпьютеры и многое другое), что позволяет более эффективно хранить и обрабатывать сверхбольшие объемы данных. В связи с этим возникает необходимость создания инструмента, который позволит описать архитектуру существующего или проектируемого распределенного центра хранения и обработки данных. Такой инструмент должен учитывать процессы, происходящие в центре, опираясь на характеристики потоков данных для хранения и обработки.

Конечно, существуют средства моделирования распределенных центров хранения и обработки данных, но они не позволяют качественно проводить исследования, направленные на оптимизацию стратегии управления потоками задач, анализ используемых ресурсов, оценку необходимого количества ресурсов для конкретных задач согласно предъявленным требованиям и критериям оценки результативности центров. В связи с этим возникает актуальная задача разработки программного комплекса для построения цифровых двойников для управления распределенными центрами сбора, хранения и обработки данных.

## Цифровой двойник: определение, примеры применения

Цифровой двойник (ЦД) — понятие, которое появилось совсем недавно. Первое упоминание о нем было в 2002 году во время презентации Майкла Гривса под названием “*Conceptual Ideal for PLM*”. Американский ученый, рассказывая об управлении жизненным циклом продукта (PLM), неофициально представил концепцию ЦД, которая основана на идее о том, что для каждой физической системы должна существовать некоторая

виртуальная система. Эта виртуальная система является зеркальным отображением (дублированием, двойником) физической системы. Предполагается, что двойник содержит всю информацию о физической системе и связан с ним на протяжении всего жизненного цикла. При этом между виртуальной и физической системами должен существовать некоторый канал, обеспечивающий обмен данными и синхронизацию<sup>1</sup>.

Жизненный цикл любой системы начинается с проектирования, когда анализируются цели создания системы, ее поведение, характеристики, т. е. формулируются некоторые требования. Также определяются и нежелательные формы поведения системы для разработки стратегий предотвращения их появления. На этом этапе ЦД является прототипом будущей системы и используется для проверки, насколько проект соответствует сформулированным требованиям. Как только виртуальная копия конкретной системы со всеми компонентами завершена и проверена, начинается этап непосредственного создания физической системы, где ЦД поможет скорректировать производство или установку элементов системы, тем самым предотвращая возможные проблемы при вводе системы в эксплуатацию, сокращая финансовые расходы и время. На этапе эксплуатации системы осуществляется верификация прогнозов ЦД относительно поведения системы при различных внешних факторах. При использовании системы, как правило, возникает необходимость в замене составных частей, появляются требования по улучшению ее характеристик, поведения, добавлению новых функциональных возможностей. Именно на этом этапе необходима связь между физической и виртуальной системами. Для прогнозирования поведения системы при изменении ее конфигураций, для оценки производительности и возможных сбоев используются ЦД [1].

Конечно, в первую очередь речь идет о сложных системах, состоящих из большого количества компонентов, между которыми существуют множественные связи. Проектирование, разработку и эксплуатацию таких систем усложняет не только их архитектура, но и нетривиальные процессы передачи и обработки большого количества информации, а также разнообразные технологий, на которых они основаны. Очевидно, что сложные системы должны безупречно выполнять свои задачи, всегда давать желаемые результаты. Риск выхода такой системы из строя должен быть минимален. Но, к сожалению, в реальной жизни в процессе эксплуатации сложных систем возникают острые проблемы, требующие быстрого решения. Поэтому необходим инструмент, который способен предупреждать о вероятности возможных сбоев в системе, чтобы их можно было своевременно исправить. Одним из таких инструментов является моделирование, которое позволяет определить, как система будет работать в разных условиях, проверить и оценить последствия изменений внутри системы, найти причину возможных сбоев и т. д. Несмотря на то, что моделирование является предшественником ЦД, этот подход не обеспечивает обмен данными между физической системой и моделью в режиме реального времени.

Таким образом, ЦД могут быть определены как компьютерные модели, которые имитируют, отражают или дублируют

<sup>1</sup> Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. Digital Twin White Paper, 2014. 7 p.



физическую систему, а также следуют жизненному циклу своего физического двойника, отслеживая, контролируя и оптимизируя его процессы и функции. ЦД постоянно прогнозирует будущие состояния системы (например, дефекты, повреждения, сбои) и позволяет моделировать и тестировать новые конфигурации. Физическая система и ее ЦД должны постоянно обмениваться информацией. Данные, полученные, например, по средствам мониторинга самой системы и условий ее эксплуатации, позволяют применять вычислительные методы для прогнозирования сбоев, тестирования результатов возможных решений и др. Таким образом, формируется подход прогнозного моделирования, при котором можно предсказать возможные сбои в системе, смоделировать любые модификации системы для предотвращения ошибок или поиска наилучшего решения. Однако важно понимать, что ЦД не всегда полностью автономны и требуют большого вмешательства человека, особенно в случаях, когда они используются для тестирования новых функций и модификаций физических систем [2]. В настоящее время достаточно много примеров применения ЦД во всем мире. ЦД разрабатывают для разных целей. Например, в транспортном машиностроении для создания и эксплуатации автомобилей [3], в аэрокосмической отрасли для профилактического обслуживания [4] и при создании внутренних систем для авиации [5], в судостроении и эксплуатации водного транспорта для проведения виртуальных испытаний [6], в железнодорожном транспорте для строения путей [7], в нефтегазовой отрасли [8] и электроэнергетике [9], в сельском хозяйстве для повышения урожайности и оптимизации процессов ухода за животными<sup>2</sup>. В медицине очень широкое распространение получили ЦД органов [10], важную роль для здравоохранения играют ЦД медицинских компонентов<sup>3</sup>. Интересным примером применения виртуальных двойников является ЦД города. Такие системы применяются как для зарубежных [11], так и для российских городов [12]. Существуют также примеры применения ЦД в логистике [13], для оптимизации жизненных циклов производства [14], больниц<sup>4</sup> и других организаций.

Выше представлена лишь небольшая часть от большого множества примеров применения ЦД во всех областях человеческой деятельности. Далее исследования сосредоточены на изучении новых тенденций в области разработки и применения ЦД, а именно для центров хранения и обработки данных, в частности, распределенных.

## Возможности использования цифровых двойников для центров хранения и обработки данных

В современном мире в любой области деятельности человека (науке, технике, производстве, социальной жизни и т. п.) прослеживается необходимость в хранении и обработке больших объемов данных. В связи с этим повсеместно начали использовать центры хранения и обработки данных (ЦОД). Например, в науке ЦОД применяют для записи и дальнейшего анализа данных проводимых экспериментов; в бизнесе — для предоставления услуг ИТ-аутсорсинга; в государственных организациях — для автоматизации внутренних процессов, таких как документооборот; в системах безопасности городской среды, транспорта и промышленных предприятий — для обеспечения сбора, хранения и анализа систем контроля доступа, видеонаблюдения и т. п. Для хранения и интенсивной обработки информации существует множество вычислительных систем различного масштаба. Для проектирования, создания и модификаций таких сложных систем нельзя обойтись без ЦД. Рассмотрим несколько примеров применения технологий ЦД в ЦОД.

Американская компания *Future Facilities*<sup>5</sup> занимается разработкой программного обеспечения и созданием ЦД для ЦОД. ЦД реализован как 3D-копия ЦОД, которая может имитировать его физическое поведение при любом сценарии работы. ЦД охватывает всю экосистему ЦОД, включая виртуальные представления компонентов питания, охлаждения и т. д. Такие ЦД основаны на моделировании инженерных систем и позволяют прогнозировать влияние изменений в компонентах ЦОД путем визуализации и количественной оценки производительности [15]. Рассматриваемые ЦД используются для проектирования объектов нового поколения, устранения неполадок на существующих объектах, ускорения процессов планирования мощностей и повышения общей эффективности и устойчивости. Еще одна американская компания, *Sunbird DCIM*<sup>6</sup>, специализируется на создании 3D-копии физического ЦОД, которая отражает фактические условия работы ЦОД в режиме реального времени и предоставляет возможности удаленной визуализации и мониторинга, тем самым обеспечивая более быстрое управление ЦОД. Этот ЦД содержит всю наиболее важную информацию о физической инфраструктуре ЦОД. В виде высококачественных масштабируемых 3D-изображений в ЦД представлены серверы, сетевое оборудование, системы хранения данных, кабели. О каждом из компонентов инфраструктуры в ЦД содержится информация о точном расположении, мерке,

<sup>2</sup> Абрамов В. И., Столяров А. Д. Цифровые двойники в сельском хозяйстве: возможности и перспективы // АПК России: образование, наука, производство: материалы II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции: сб. трудов (Саратов, 28-29 сентября 2021 г.). Пенза : ПГАУ, 2021. С. 3-9. EDN: KDOWBX

<sup>3</sup> Меньшутина Н. В. Многоуровневое моделирование аэрогелей и их производства // Сверхкритические флюиды (СКФ): фундаментальные основы, технологии, инновации: материалы IX научно-практической конференции с международным участием: тезисы докладов (Сочи, 9-4 октября 2017 г.). М. : ЗАО «Шаг», 2017. С. 124-126. EDN: XPEWAX

<sup>4</sup> Polyniak K., Matthews J. The Johns Hopkins Hospital Launches Capacity Command Center to Enhance Hospital Operations [Электронный ресурс] // John Hopkins Medicine. 26 October 2016. URL: [https://www.hopkinsmedicine.org/news/media/releases/the\\_johns\\_hopkins\\_hospital\\_launches\\_capacity\\_command\\_center\\_to\\_enhance\\_hospital\\_operations](https://www.hopkinsmedicine.org/news/media/releases/the_johns_hopkins_hospital_launches_capacity_command_center_to_enhance_hospital_operations) (дата обращения: 08.09.2023).

<sup>5</sup> Cadence Design Systems Inc. The Digital Twin Company [Электронный ресурс] // Future Facilities Homepage. URL: <https://www.futurefacilities.com> (дата обращения: 08.09.2023).

<sup>6</sup> DCIM – Data Center Infrastructure Management Software System, Cable Management, Infrastructure Design & Optimization Companies : официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sunbirdcim.com> (дата обращения: 08.09.2023).



модели, размерах, конфигурации, портах и многом другом. В такой модели можно визуализировать даже те порты и кабели, которые трудно увидеть физически, например, в кабельных лотках. Помимо этого, в ЦД отображаются текущие показания датчиков окружающей среды, таких как температура, влажность, вода, воздушный поток и перепад давления, что обеспечивает точное представление о том, что происходит в ЦОД. Такой функционал ЦД позволяет увеличить время безотказной работы за счет своевременного информирования о возможных проблемах и нагрузках на компоненты ЦОД, повысить эффективность ЦОД с помощью функции анализа текущего потребления ресурсов и оценки влияния допустимых изменений, удаленно повысить производительность и не затрачивать время и деньги на физическое присутствие в ЦОД. Благодаря автоматическому сбору, хранению и представлению отчетов можно получать и анализировать данные о работе ЦОД в режиме реального времени.

В описанных выше ЦД существует два существенных недостатка:

- представлены виртуальные копии ЦОД, которые территориально расположены в одном физическом пространстве;
- ЦОД рассматриваются только с точки зрения инженерной инфраструктуры.

Однако, во-первых, в последнее время чаще используются распределенные ЦОД, а во-вторых, существует необходимость моделирования потоков данных для оптимизации стратегии управления потоками задач, анализа количества используемых ресурсов с целью своевременного обновления оборудования, предотвращения ситуации, когда имеющегося оборудования будет недостаточно для хранения всех данных или быстрой обработки в требуемый промежуток времени, оценки оптимального количества ресурсов, необходимых для использования ЦОД в тех или иных задачах, согласно предъявляемым требованиям и критериям оценки результативности ЦОД.

## Распределенные системы сбора, хранения и обработки данных

Распределенные системы предназначены, как правило, для сбора, хранения и обработки сверхбольших объемов данных и представляют собой географически распределенную инфраструктуру, объединяющую множество ресурсов разных типов (процессоры, долговременная и оперативная память, хранилища, сети), доступ к которым пользователь может получить из любой точки, независимо от места их расположения. В такой системе предполагается коллективный разделяемый режим доступа к ресурсам<sup>7</sup>. Таким образом, распределенные ЦОД (РЦОД) включают в себя не только мощные гибридные вычислительные ресурсы и ресурсы для хранения данных, но и сетевое оборудование, отвечающее за обмен данными внутри системы и связь между центрами и с внешними потребителями, инженерные системы, системы безопасности, системы мониторинга и прочее.

Развитие научных исследований в физике высоких энергий, астрофизике, биологии, науках о Земле, химии, а также в ме-

дицине, нанотехнологиях, промышленности, бизнесе и других направлениях человеческой деятельности требуют совместной работы многих организаций по обработке большого объема данных в относительно короткие сроки. Именно для этого создаются и развиваются РЦОД, которые способны передавать и хранить огромные массивы данных, а также служат универсальной эффективной инфраструктурой для высокопроизводительных распределенных вычислений и обработки данных. В качестве примера РЦОД можно привести инфраструктуру для обработки данных Большого адронного коллайдера (БАК) — эксперимента физики высоких энергий в CERN (Европейская организация для ядерных исследований, Женева, Швейцария)<sup>8</sup>. Эта система имеет несколько уровней организации (*Tier*). Суть распределенной модели состоит в том, что весь объем информации с детекторов БАК после обработки в реальном времени и первичной реконструкции должен направляться для дальнейшей обработки и анализа в региональные центры. В России, в частности, существуют уровни этой большой распределенной инфраструктуры [16]. Системы, аналогичные вычислительной инфраструктуре БАК, необходимо создавать и развивать в России для существующих и планируемых экспериментов класса «мегасайенс». К таким российским экспериментам можно отнести:

- проект NICA, состоящий из нескольких экспериментов на ускорительном комплексе для изучения свойств плотной барионной материи, — (г. Дубна) [17];
- исследования на реакторе ПИК (г. Гатчина) [18];
- центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (г. Новосибирск) [19];
- исследования в области нейтринной астрофизики высоких энергий с использованием нейтринного телескопа Baikal-GVD (оз. Байкал) [20]. Также стоит обратить внимание на эксперименты, реализуемые совместно с другими странами, например JUNO (Китай) — планируемый прецизионный эксперимент с реакторными антинейтрино нового поколения, предназначенный для определения иерархии масс нейтрино [21]. РЦОД для таких важных и сложных экспериментов должны развиваться и масштабироваться, чтобы обеспечить качественную и эффективную работу. В зависимости от области применения и типов решаемых задач требования к масштабированию могут быть разными, поэтому необходим инструмент, который позволит анализировать эффективность и надежность различных процессов, происходящих в РЦОД, с учетом потоков данных для хранения и обработки, а также оптимизировать стратегию управления потоками задач. Традиционные средства моделирования не позволяют качественно проводить такие исследования.

## Состояние проблемы моделирования РЦОД

На этапе проектирования РЦОД важно как можно точнее определить параметры всех процессов, которые будут происходить в рассматриваемой системе. Для этого создаются различные модели. В процессе моделирования можно определить мини-

<sup>7</sup> Foster and I., Kesselman C. The grid: blueprint for a new computing infrastructure. San Francisco, CA : Morgan Kaufmann Publ. Inc., 1999. 677 с.

<sup>8</sup> CERN. Welcome to the Worldwide LHC Computing Grid [Электронный ресурс] // WLCG. URL: <https://wlcg.web.cern.ch> (дата обращения: 08.09.2023).



мально необходимое оборудование для функционирования системы, а также выбрать несколько вариантов оборудования с учетом текущих потребностей и перспективы развития в будущем. В проводимом исследовании рассматриваются библиотеки и комплексы программ, которые позволяют прежде всего проводить моделирование потоков данных РЦОД.

До настоящего времени были созданы различные инструменты для моделирования распределенных систем, например Bricks, OptorSim и GridSim [22], которые имели узкую специализацию. С помощью этих программных пакетов можно было моделировать определенные архитектуры распределенных систем. Стоит отметить, что использование таких инструментов требует знания специальных языков программирования, что существенно снижает эффективность их использования<sup>9</sup>. Но тем не менее существуют программные комплексы для моделирования, построенные на основе перечисленных выше инструментов.

Так, например, программный инструмент SyMSim разработан с использованием пакета GridSim, который построен на библиотеке SimJava, позволяющей моделировать поток дискретных событий во времени [23]. Стоит отметить, что библиотеки GridSim (последняя версия 5.2 вышла в 2010 году<sup>10</sup>) и SimJava (последняя версия 2.0 вышла в 2002 году<sup>11</sup>) в настоящее время являются устаревшими, поэтому не могут быть использованы для моделирования современных РЦОД, т. к. не позволяют учесть новые тенденции построения распределенных систем, имеющих, например, гибридную структуру, т. е. включающих разнородные модули обработки данных, в том числе облачные структуры и суперкомпьютеры, а также системы иерархической памяти и многое другое.

Тем не менее SyMSim предоставляет возможность моделирования процесса обработки потока заданий распределенной системы, обладающей заданными ресурсами и правилами их резервирования и использования. SyMSim представляет собой имитационную модель, которая позволяет получить величину времени обработки задач и оценить, как структура вычислительной установки и производительность отдельных ее частей влияют на это время. Также результаты моделирования показывают наибольшее значение интенсивности потока задач (данных) [24].

Главная особенность программы SyMSim — синтез процессов моделирования и мониторинга. Данные мониторинга работы конкретного вычислительного центра хранятся в базе данных (БД), а затем используются для формирования входного потока заданий для моделирования. В случае если для конкретного вычислительного центра отсутствуют данные мониторинга, то анализируется статистика заданий по аналогичным вычислительным центрам [25]. Затем строятся распределения заданий по времени исполнения и размеру входного файла, после чего выдвигается и проверяется гипотеза о количестве типов заданий в потоке [26]. Сгенерированные потоки данных и за-

дач независимо от их объема хранятся в БД, что является недостатком, т. к. может привести к серьезным вычислительным затратам при работе с БД.

Средство описания вычислительной инфраструктуры в программном комплексе реализовано как БД с интерфейсом, представленном в виде веб-страницы [27]. Описанию присваивается идентификатор, который пользователь должен указать в параметрах запуска модели. Модель считывает информацию из БД, по которой строится описание вычислительной структуры [28]. Следовательно, параметры оборудования и архитектура моделируемой инфраструктуры задается через БД, что является серьезным недостатком. Не все потенциальные пользователи программного комплекса имеют навыки работы с БД. Прямое взаимодействие неопытных пользователей с БД может привести к нарушению ее целостности.

Ядром программы является модуль, который отвечает за прием заданий на обработку и запуск их на процессорах, а также управляет очередями, сохраняя информацию о занятых и свободных в данный момент процессорах. При апробации [29-31] инструментарий SyMSim специально адаптируется под каждую моделируемую инфраструктуру путем изменения программного кода. Этот факт является серьезным недостатком, который не позволяет применять SyMSim для решения широкого класса задач при проектировании и поддержке центров обработки и хранения данных.

Результатом работы программы моделирования служит последовательность записей в базе данных, отражающая все события, происходящие в системе. К ним относится, например, поступление задания, начало и конец обработки задания, начало и конец передачи файла, манипуляции с лентами и т. д. Все события описываются в едином формате. Запись привязывается к внутреннему времени. Результаты моделирования представлены в виде ограниченного количества графиков на веб-интерфейсе, передающих только часть информации, что может быть недостаточным для пользователей.

Таким образом, существующий программный комплекс SyMSim, несмотря на главное достоинство, которое заключается в синтезе процессов моделирования и мониторинга, имеет ряд существенных недостатков:

- библиотеки, которые лежат в основе комплекса, являются устаревшими и не позволяют учесть современные тенденции построения распределенных систем;
- веб-интерфейс комплекса позволяет устанавливать только параметры потоков задач, запускать/останавливать процесс моделирования, а также просматривать некоторые результаты на ограниченном наборе графиков (для получения дополнительных результатов данные необходимо экспортировать из БД);
- для изменения параметров оборудования и структуры моделируемой системы необходимо напрямую взаимодействовать с БД;

<sup>9</sup> Проблемы моделирования GRID-систем и их реализации / О. И. Самоваров, Н. Н. Кузурин, Д. А. Грушин [и др.] // Научный сервис в сети Интернет: решение больших задач : Труды Всероссийской научной конференции, Новороссийск, 22-28 сентября 2008 года. Новороссийск : Изд-во Московского университета, 2008. С. 83-88. EDN: SYIPZT

<sup>10</sup> GridSim: A Grid Simulation Toolkit 5.2 [Электронный ресурс] // Soft112. URL: <https://gridsim-a-grid-simulation-toolkit.soft112.com> (дата обращения: 08.09.2023).

<sup>11</sup> SimJava v2.0 API Specification [Электронный ресурс] // The University of Edinburgh, 2002. URL: <https://www.icsa.inf.ed.ac.uk/research/groups/hase/simjava/doc/index.html> (дата обращения: 08.09.2023).



- входной поток заданий и данных независимо от объема хранится в БД;
  - ядро программы адаптируется под каждую моделируемую инфраструктуру путем изменения программного кода;
  - не учитываются такие важные критерии функционирования системы, как потери данных или их отсутствие в зависимости от типа выбранного оборудования, т. е. вероятность осуществления тех или иных их значений;
  - отсутствует возможность поиска оптимальной конфигурации оборудования, удовлетворяющей заданным критериям.
- Можно сделать вывод, что перечисленные недостатки не позволяют применять комплекс программ SumSim для решения широкого класса задач при проектировании и поддержке распределенных центров сбора, хранения и обработки данных. Следовательно, необходимо создать иной подход к моделированию.

## Заключение

В результате проведенного анализа существующих ЦД и средств моделирования ЦОД можно сделать вывод, что на данный момент ни в России, ни за рубежом не существует инструмента, позволяющего построить ЦД для РЦОД с целью оптимизации стратегии управления потоками задач, анализа используемых ресурсов, оценки необходимого количества ресурсов для конкретных задач согласно предъявленным требованиям и критериям оценки результативности ЦОД. В связи с этим возникает актуальная задача разработки программного комплекса для построения ЦД распределенных центров сбора, хранения и обработки данных. Созданный ЦД позволит проводить исследования эффективности и надежности функционирования РЦОД, проверять различные сценарии масштабирования, учитывая требования к потокам данных и задач.

Конечно, ЦД для РЦОД не могут быть полностью автономны и требуют вмешательства человека, например, при тестировании различных модификаций сложной системы, при поиске оптимальных конфигураций оборудования согласно имеющимся требованиям. Это значит, что разрабатываемый ЦД должен быть оснащен хорошо продуманным, удобным и доступным интерфейсом, где пользователь сможет не только задавать требуемые параметры РЦОД, критерии для выбора оптимальной конфигурации и оценки эффективности, но и получать результаты работы ЦД в понятном и структурированном виде, в том числе на графиках. Для хранения различных параметров и результатов работы ЦД необходима БД.

При построении ядра ЦД, реализующего процесс моделирования РЦОД, необходимо учитывать современные тенденции построения распределенных систем и придерживаться принципа разработки универсального программного пакета, который не нужно изменять под каждую моделируемую инфраструктуру. При моделировании необходимо также учитывать критерии функционирования системы, вероятности возникновения тех или иных событий в зависимости от типа оборудования. К таким событиям можно отнести, например, нарушение работоспособности оборудования, изменения в производительности вычислительных ресурсов и хранилищ данных и т. д.

Таким образом, в первую очередь необходимо разработать метод построения цифровых двойников РЦОД, который, в отличие от существующих, выполняет моделирование распределенных центров с учетом характеристик потоков задач и данных для хранения и обработки, а также вероятностей появления изменений в процессах, происходящих в РЦОД. Затем требуется разработать и апробировать алгоритмы, необходимые для реализации метода, после чего можно приступать к проектированию и реализации программного комплекса для создания цифровых двойников РЦОД.

## Список использованных источников

- [1] Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*; ed. by J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. Cham : Springer, 2017. P. 85-13. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
- [2] Barricelli B. R., Casiraghi E., Fogli D. Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 167653-167671. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
- [3] Денисов А. С., Куверин И. Ю. Цифровые двойники как основа цифровой трансформации технической эксплуатации автомобилей в рамках четвёртой технологической революции // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2020. № 3(42). С. 165-168. EDN: YGLIID
- [4] Yang J., Zhang W., Liu Y. Subcycle fatigue crack growth mechanism investigation for aluminum alloys and steel (special session on the digital twin) // *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. Boston, MA, United States, 2013. <https://doi.org/10.2514/6.2013-1499>
- [5] Шалумов А. С., Шалумова Н. А., Шалумов М. А. Цифровой двойник авиационной электроники: моделирование физических процессов при формировании электронной модели // *Автоматизация. Современные технологии*. 2021. Т. 75, № 9. С. 403-415. EDN: LSASMI
- [6] Филатов А. Р. Цифровой двойник корпуса судна. Назначение и основные принципы построения // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2021. № 4(398). С. 87-92. <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2021-4-398-87-92>
- [7] Шевченко Д. В. Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2021. Т. 80, № 2. С. 91-99. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99>
- [8] Применение цифрового двойника в нефтегазовой отрасли / В. Н. Быкова, Е. Ким, М. Р. Гаджиалиев [et al.] // *Актуальные проблемы нефти и газа*. 2020. № 1(28). С. 8. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-28.art8>



- [9] Разработка нелинейной модели трехфазного трансформатора для исследования влияния несимметрии магнитной системы на работу устройства в произвольных режимах / А. И. Тихонов, А. В. Стулов, А. А. Каржевин, А. В. Подобный // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2020. № 1. С. 22-31. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2020.1.022-031>
- [10] Bruynseels K., Santoni de Sio F., Hoven J. Digital Twins in Health Care: Ethical Implications of an Emerging Engineering Paradigm // Frontiers in genetics. 2018. Vol. 9. Article number: 31. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00031>
- [11] Digital twin of a city: Review of technology serving city needs / V. V. Lehtola [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. Vol. 114. P. 102915. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102915>
- [12] Концепция построения цифрового двойника города / С. А. Иванов, К. Ю. Никольская, Г. И. Радченко [et al.] // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2020. Т. 9, № 4. С. 5-23. <https://doi.org/10.14529/cmse200401>
- [13] Амирханян А. Г. Цифровые двойники в логистике // Modern science. 2020. № 1-2. С. 37-40. EDN: QTZJIE
- [14] Rosen R., Wichert G. Von, Bettenhausen K. D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, no. 3. P. 567-572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- [15] Quantifying data center performance / K. Nemati [et al.] // 2018 34th Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM). San Jose, CA, USA, 2018. P. 141-147. <https://doi.org/10.1109/SEMI-THERM.2018.8357365>
- [16] LHC Grid Computing in Russia: present and future / A. Berezhnaya [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 513. P. 062041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/513/6/062041>
- [17] The NICA Project at JINR Dubna / V. Kekelidze [et al.] // EPJ Web of Conferences. 2014. Vol. 71. Article number: 00127. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20147100127>
- [18] Program for studying fundamental interactions at the PIK reactor facilities / A. P. Serebrov [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. 2016. Vol. 79, issue 3. P. 293-303. <https://doi.org/10.1134/S1063778816030145>
- [19] Оптимизация магнитной структуры источника синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ в Новосибирске / Г. Н. Баранов, А. В. Богомягков, Е. Б. Левичев, С. В. Сияткин // Сибирский физический журнал. 2020. Т. 15, № 1. С. 5-23. <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2020-15-1-5-23>
- [20] Baikal-GVD: status and prospects / A. D. Avrorin [et al.] // EPJ Web of Conferences. 2018. Vol. 191. Article number: 01006. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201819101006>
- [21] Neutrino Physics with JUNO / F. An [и др.] // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. 2016. Vol. 43, no. 3. P. 030401. <https://doi.org/10.1088/0954-3899/43/3/030401>
- [22] Нечаевский А. В., Кореньков В. В. Пакеты моделирования DataGrid // Системный анализ в науке и образовании. 2009. № 1. С. 21-35. EDN: KNNWPL
- [23] Моделирование грид и облачных сервисов как средство повышения эффективности их разработки / В. В. Кореньков [и др.] // CEUR Workshop Proceedings. 2014. Т. 1297. С. 13-19. URL: [https://ceur-ws.org/Vol-1297/13-19\\_paper-4.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-1297/13-19_paper-4.pdf) (дата обращения: 08.09.2023).
- [24] Синтез процессов моделирования и мониторинга для развития систем хранения и обработки больших массивов данных в физических экспериментах / В. В. Кореньков [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. Т. 7, № 3. С. 691-698. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2015-7-3-691-698>
- [25] Service monitoring system for JINR Tier-1 / I. Kadochnikov [et al.] // EPJ Web of Conferences. 2019. Vol. 214. Article number: 08016. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921408016>
- [26] Моделирование грид и облачных сервисов как важный этап их разработки / В. В. Кореньков [и др.] // Системы и средства информатики. 2015. Т. 25, № 1. С. 4-19. <https://doi.org/10.14357/08696527150101>
- [27] Нечаевский А. В., Пряхина Д. И., Ужинский А. В. Разработка веб-сервиса для моделирования систем хранения и обработки данных физических экспериментов // Системный анализ в науке и образовании. 2015. № 4. С. 28-35. EDN: WMEKGF
- [28] Web-Service Development of the Grid-Cloud Simulation Tools / V. V. Korenkov [et al.] // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 66. P. 533-539. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.11.060>
- [29] Simulation concept of NICA-MPD-SPD Tier0-Tier1 computing facilities / V. V. Korenkov [et al.] // Particles and Nuclei Letters. 2016. Vol. 13, no. 5. P. 693-699. <https://doi.org/10.1134/S1547477116050290>
- [30] Моделирование межпроцессорного взаимодействия при выполнении MPI-приложений в облаке / Н. А. Кутовский // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9, № 6. С. 955-963. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2017-9-6-955-963>
- [31] Simulation approach for improving the computing network topology and performance of the China IHEP Data Center / A. Nechaevskiy [et al.] // EPJ Web of Conferences. 2019. Vol. 214. Article number: 08018. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921408018>

*Поступила 08.02.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 23.05.2023.*

#### Об авторах:

**Пряхина Дарья Игоревна**, научный сотрудник Лаборатории информационных технологий имени М.Г. Мещерякова, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (141980, Российская Федерация, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7523-5459>, [pryahinad@jinr.ru](mailto:pryahinad@jinr.ru)



**Кореньков Владимир Васильевич**, научный руководитель Лаборатории информационных технологий имени М.Г. Мещерякова, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (141980, Российская Федерация, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6), доктор технических наук, профессор, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2342-7862>**, [korenkov@jinr.ru](mailto:korenkov@jinr.ru)

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## References

- [1] Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen J., Flumerfelt S., Alves A. (eds.) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer; 2017. p. 85-113. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
- [2] Barricelli B.R., Casiraghi E., Fogli D. Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. *IEEE Access*. 2019;7:167653-167671. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
- [3] Denisov A.S., Kuverin I.Yu. Features of the circuitry solution of use of piezometers by development of diagnostic aids of cars. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve = Technical Regulation in Transport Construction*. 2020;(3):165-168. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YGLIID
- [4] Yang J., Zhang W., Liu Y. Subcycle fatigue crack growth mechanism investigation for aluminum alloys and steel (special session on the digital twin). In: 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Boston, MA, United States; 2013. <https://doi.org/10.2514/6.2013-1499>
- [5] Shalumov A.S., Shalumova N.A., Shalumov M.A. Aviation electronics digital twin: simulation of physical processes in the formation of an electronic model. *Automation. Modern Technologies*. 2021;75(9):403-415. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: LSASMI
- [6] Filatov A.R. A digital twin of the ship hull, purpose and main principles of development. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2021;(4):87-92. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2021-4-398-87-92>
- [7] Shevchenko D.V. Methodology for constructing digital twins in railway transport. *Russian Railway Science Journal*. 2021;80(2):91-99. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99>
- [8] Bykova V.N., Kim E., Gadzhialiev M.R., Musienko V.O., Orudzhhev A.O., Turovskaya E.A. Application of a digital twin in the oil and gas industry. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2020;(1):8. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-28.art8>
- [9] Tikhonov A.I., Stulov A.V., Karzhevina A.A., Podobny A.V. Development of a nonlinear model of a three-phase transformer to study the effect of asymmetry of the magnetic system on the operation of the device in arbitrary modes. *Vestnik IGEU*. 2020;(1):22-31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2020.1.022-031>
- [10] Bruynseels K., Santoni de Sio F., Hoven J. Digital Twins in Health Care: Ethical Implications of an Emerging Engineering Paradigm. *Frontiers in genetics*. 2018;9:31. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00031>
- [11] Lehtola V.V., Koeva M., Elberink S.O., Raposo P., Virtanen J.P., Vahdatikhaki F., Borsci S. Digital twin of a city: Review of technology serving city needs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022;114:102915. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102915>
- [12] Ivanov S.A., Nikolskaya K.Yu., Radchenko G.I., Sokolinsky L.B., Zymbler M.L. Digital Twin of a City: Concept Overview. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2020;9(4):5-23. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.14529/cmse200401>
- [13] Amiryanyan A.G. *Cifrovyye dvojniki v logistike* [Digital twins in logistics]. *Modern science*. 2020;(1-2):37-40. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: QTZJIE
- [14] Rosen R., Wichert G. Von, Bettenhausen K.D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*. 2015;48(3):567-572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- [15] Nemati K., Zabalegui A., Bana M., Seymour M.J. Quantifying data center performance. In: 2018 34th Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM). San Jose, CA, USA; 2018. p. 141-147. <https://doi.org/10.1109/SEMI-THERM.2018.8357365>
- [16] Berezhnaya A., Dolbilov A., Ilyin V., Korenkov V., Lazin Y., Lyalin I., Mitsyn V., Ryabinkin E., Shmatov S., Strizh T., Tikhonenko E., Tkachenko I., Trofimov V., Velikhov V., Zhiltsov V. LHC Grid Computing in Russia: present and future. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014;513:062041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/513/6/062041>
- [17] Kekelidze V., Kovalenko A., Lednický R., Matveev V., Meshkov I., Sorin A., Trubnikov G. The NICA Project at JINR Dubna. *EPJ Web of Conferences*. 2014;71:00127. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20147100127>
- [18] Serebrov A.P., Vassiljev A.V., Varlamov V.E., Geltenbort P., Gridnev K.A., Dmitriev S.P., Dovator N.A., Egorov A.I., Ezhov V., Zherebtsov O.M., Zinoviev V.G., Ivochkin V.G., Ivanov S.N., Ivanov S.A., Kolomensky E.A., Konoplev K.A., Krasnoschekova I.A., Lasakov M.S., Lyamkin V., Martemyanov L.P., Murashkin A.N., Neustroev P.V., Onegin M.S., Petelin A.L., Pirozhkov A., Polyushkin A.O., Prudnikov D.V., Ryabov V., Samoylov R.M., Sbitnev S.V., Fomin A.K., Fomichev A.V., Zimmer O., Cherny A., Shoka I. Program for studying fundamental interactions at the PIK reactor facilities. *Physics of Atomic Nuclei*. 2016;79(3):293-303. <https://doi.org/10.1134/S1063778816030145>



- [19] Baranov G.N., Bogomyagkov A.V., Levichev E.B., Sinyatkin S.V. Magnet lattice optimization for Novosibirsk fourth generation light source SKIF. *Siberian Journal of Physics*. 2020;15(1):5-23. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2020-15-1-5-23>
- [20] Avrorin A.D., Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Bannash R., Belolaptikov I.A., Brudanin V.B., Budnev N.M., Doroshenko A.A., Domogatsky G.V., Dvornický R., Dyachok A.N., Dzhiikibaev Z.A., Fajt L., Fialkovsky S.V., Gafarov A.R., Golubkov K.V., Gres T.I., Honz Z., Kebkal K.G., Kebkal O.G., Khramov E.V., Kolbin M.M., Konischev K.V., Korobchenko A.P., Koshechkin A.P., Kozhin V.A., Kulepov V.F., Kuleshov D.A., Milenin M.B., Mirgazov R.A., Osipova E.R., Panfilov A.I., Pan'kov L.V., Petukhov D.P., Pliskovsky E.N., Rozanov M.I., Rjabov E.V., Rushay V.D., Safronov G.B., Simkovic F., Shoibonov B.A., Solovjev A.G., Sorokovikov M.N., Shelepov M.D., Suvorova O.V., Shtekl I., Tabolenko V.A., Tarashansky B.A., Yakovlev S.A., Zagorodnikov A.V., Zurbanov V.L. Baikal-GVD: status and prospects. *EPJ Web of Conferences*. 2018;191:01006. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201819101006>
- [21] An F., et al. Neutrino Physics with JUNO. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. 2016;43(3):030401. <https://doi.org/10.1088/0954-3899/43/3/030401>
- [22] Korenkov V.V., Nechaevskiy A.V. DataGrid simulation packages. *Sistemnyj analiz v nauke i obrazovanii* = System Analysis in Science and Education. 2009;(1):21-35. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: KNNWPL
- [23] Korenkov V.V., Nechaevskiy A.V., Ososkov G.A., Pryahina D.I., Trofimov V.V., Uzhinskiy A.V. Simulation of Grid and Cloud Services as the Means of the Efficiency Improvement of Their Development. *CEUR Workshop Proceedings*. 2014;1297:13-19. Available at: [https://ceur-ws.org/Vol-1297/13-19\\_paper-4.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-1297/13-19_paper-4.pdf) (accessed 08.09.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
- [24] Korenkov V.V., Nechaevskiy A.V., Ososkov G.A., Pryahina D.I., Trofimov V.V., Uzhinskiy A.V. Synthesis of the simulation and monitoring processes for the development of big data storage and processing facilities in physical experiments. *Computer Research and Modeling*. 2015;7(3):691-698. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2015-7-3-691-698>
- [25] Kadochnikov I., Korenkov V., Mitsyn V., Pelevanyuk I., Strizh T. Service monitoring system for JINR Tier-1. *EPJ Web of Conferences*. 2019;214:08016. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921408016>
- [26] Korenkov V.V., Nechaevskiy A.V., Ososkov G.A., Pryakhina D.I., Trofimov V.V., Uzhinskiy A.V. Grid and cloud services simulation as an important step of their development. *Sistemy i Sredstva Informatiki* = Systems and Means of Informatics. 2015;25(1):4-19. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.14357/08696527150101>
- [27] Nechaevskiy A.V., Pryahina D.I., Uzhinskiy A.V. Web-service development for the physical experiments data storage and processing simulation. *Sistemnyj analiz v nauke i obrazovanii* = System Analysis in Science and Education. 2015;(4):28-35. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: WMEKGF
- [28] Korenkov V., Nechaevskiy A., Ososkov G., Pryahina D., Trofimov V., Uzhinskiy A., Balashov N. Web-Service Development of the Grid-Cloud Simulation Tools. *Procedia Computer Science*. 2015;66:533-539. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.11.060>
- [29] Korenkov V., Nechaevskiy A., Ososkov G., Pryahina D., Trofimov V., Uzhinskiy A. Simulation concept of NICA-MPD-SPD Tier0-Tier1 computing facilities. *Particles and Nuclei Letters*. 2016;13(5):693-699. <https://doi.org/10.1134/S154747711605029041>
- [30] Kutovskiy N.A., Nechaevskiy A.V., Ososkov G.A., Pryahina D.I., Trofimov V.V. Simulation of interprocessor interactions for MPI-applications in the cloud infrastructure. *Computer Research and Modeling*. 2017;9(6):955-963. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2017-9-6-955-963>
- [31] Nechaevskiy A., Ososkov G., Pryahina D., Trofimov V., Li W. Simulation approach for improving the computing network topology and performance of the China IHEP Data Center. *EPJ Web of Conferences*. 2019;214:08018. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921408018>

Submitted 08.02.2023; approved after reviewing 24.04.2023; accepted for publication 23.05.2023.

#### About the authors:

**Daria I. Priakhina**, Research Fellow of the Mescheryakov Laboratory of Information Technologies, Joint Institute for Nuclear Research (6 Joliot-Curie St., Dubna 141980, Moscow region, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7523-5459>, pryahinad@jinr.ru

**Vladimir V. Korenkov**, MLIT Scientific Leader, Joint Institute for Nuclear Research (6 Joliot-Curie St., Dubna 141980, Moscow region, Russian Federation), Dr. Sci. (Tech.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2342-7862>, korenkov@jinr.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

