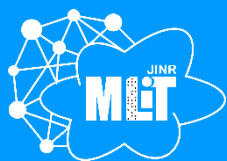


Цифровые двойники для решения задач управления и развития распределенных центров сбора, хранения и обработки данных

26 июня 2025



ДАРЬЯ ПРЯХИНА

к.т.н., научный сотрудник

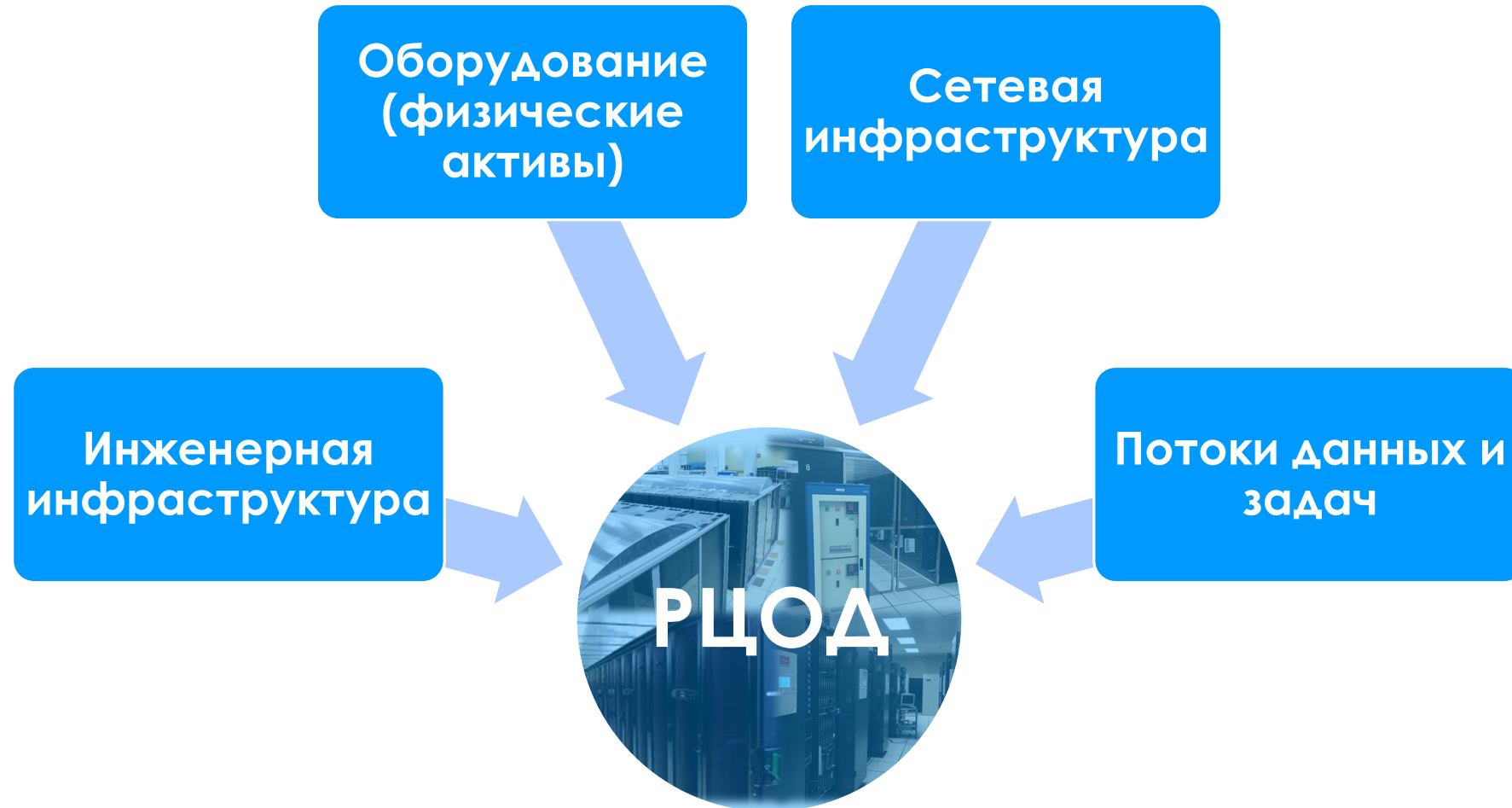


Лаборатория информационных технологий им. М.Г. Мещерякова

Объединенный институт ядерных исследований

Цифровой двойник (ЦД) РЦОД*

* РЦОД – распределенный центр сбора, хранения и обработки данных



Цифровой двойник (ЦД) РЦОД



Цифровой двойник (ЦД) РЦОД

Работа в реальном времени на протяжении всего жизненного цикла РЦОД.

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ



ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

- Архитектура и параметры оборудования РЦОД.
- **Характеристики потоков данных и задач.**
- **Параметры случайных процессов функционирования системы** (потери данных, отказы, изменение производительности и др.)

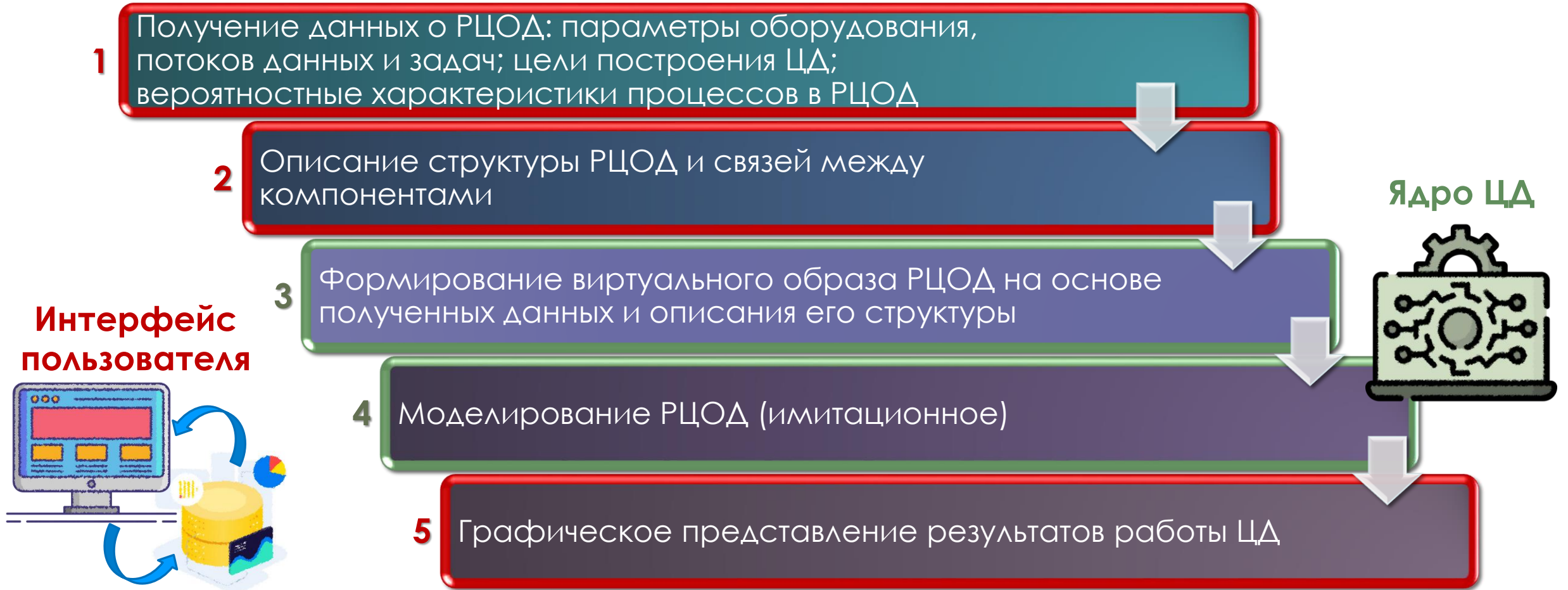
ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ

- Проектирование РЦОД.
- Анализ эффективности и надежности функционирования РЦОД.
- Тестирование сценариев масштабирования с учетом **требований к потокам данных и задач.**
- Оценка необходимого количества ресурсов для конкретных задач.
- Проверка стратегий управления потоками задач.

Метод построения ЦД РЦОД

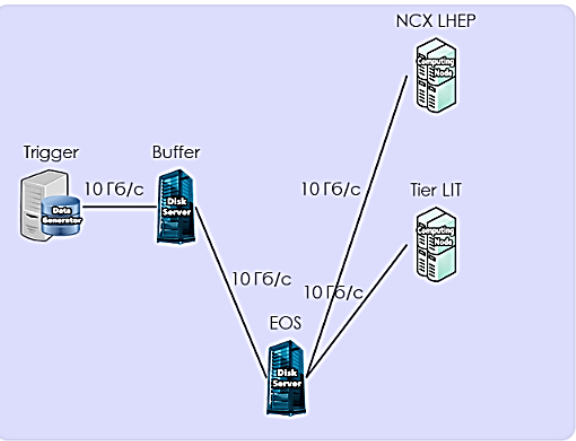
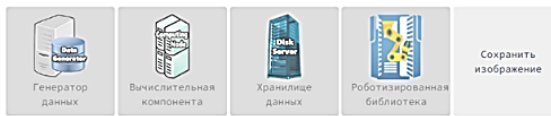


Метод построения ЦД РЦОД



Функциональные возможности пользовательского интерфейса

Построение инфраструктуры центра сбора, хранения и обработки данных



Информация об эксперименте

Дата создания: 7 февраля 2023 г., 10:36

Название эксперимента: Test 1

Описание эксперимента: Поиск оптимального количества ресурсов для хранения данных

Параметры моделирования: * Продолжительность работы моделируемой инфраструктуры - 800 ч.

Базовая конфигурация

Название	Описание	Объем (TB)
trigger	Trigger BMON	10000,0
buffer	Data reception buffer	5400,0
eoslhep	Main storage LHEP	1000,0
eoslit	Main storage LIT	1000,0
dcach	pp	1000,0

Название	Описание	Количество ядер
t2lit	LIT T2 farm	500
exlhep	LHEP main farm	1200
super	Goverun	100

Название	Описание	Способность (Gb/c)
raw0	trigger - buffer	100,0
raw1	buffer - lhep	10,0
raw2	buffer - lit	10,0
compute0	lhep - farm lhep	10,0
compute1	lit - govern	10,0
compute2	lit - farm lit	10,0
eoslithep	eoslhep - eoslit	10,0
eoslitthep	eoslit - eoslhep	10,0

Список модификаций

#	Статус	Дата обновления
16	NEW	9 марта 2023 г., 14:52
15	NEW	9 марта 2023 г., 14:52

Просмотр, Запуск, Результаты

Список событий

Название	Описание
decrease	уменьшение количества ядер

Добавить событие, Подробнее

Настройка потоков задач

* Обязательное поле для заполнения

Название: rtd

Описание: Raw To Digit

Тип обрабатываемых данных: raw

Объем входных данных для задачи: 40 GB

Объем входных данных (допустимое отклонение): 5 GB

Тип результирующих данных: digit

Объем выходных данных: 1 GB

Объем выходных данных (допустимое отклонение): 1 GB

Распределение вероятности для генерации данных: равномерное

Среднее время выполнения задачи: 10 c

Среднее время выполнения (допустимое отклонение):

Распределение вероятности для генерации задач: равномерное

Общее количество задач: 300

Добавить

Хранилища данных

Вычислительные компоненты

Каналы связи

Очереди задач

Распределения файлов

Нагрузка на канал связи compute0

Нагрузка на канал связи compute2

- Построение структуры РЦОД
- Задание параметров оборудования РЦОД, характеристик потоков данных и задач
- Конфигурация сценариев масштабирования РЦОД
- Запуск ЦД
- Просмотр результатов работы ЦД

Результаты эксперимента Test 1

Нажмите вкладку для просмотра результатов

Ядро ЦД

Обеспечивает функционирование ЦД.



- **Вероятностные распределения** учитываются при формировании потоков данных, потоков задач и критериев функционирования оборудования.

Генерация параметров для потоков данных и задач:

$$pr(x) = \frac{1}{b-a}$$

- функция плотности вероятности равномерного распределения, где $[a, b)$ — интервал изменения значения параметра

$$pn(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

- функция плотности вероятности нормального распределения, где μ — среднее значение случайной величины, σ — стандартное отклонение

Формирование потока событий (экспоненциальное распределение):

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} * \ln(r)$$

τ — интервал между случайными событиями,
 λ — среднее число событий в единицу времени,
 r — равномерно распределенное случайное число $[0;1]$

Цифровые двойники РЦОД для крупных научных экспериментов

Ускорительный комплекс NICA



- Физика высоких энергий
 - Изучение барионной материи
 - Спиновая физика

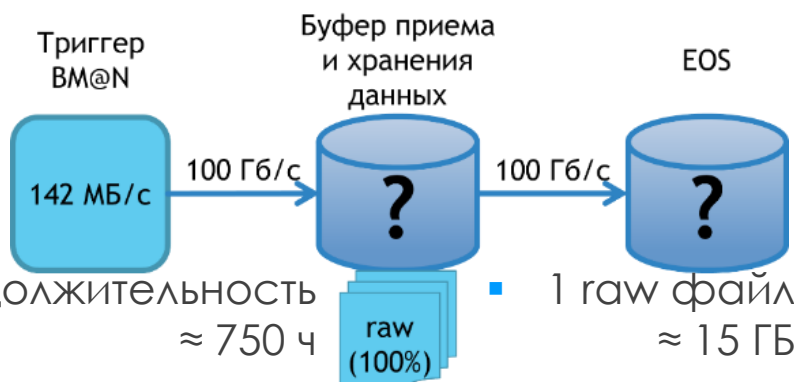
Эксперименты
класса
«мегасайенс»



Верификация ядра ЦД

Исходные данные: результаты мониторинга вычислительной инфраструктуры эксперимента BM@N комплекса NICA (физический сеанс 2022-2023 г.)

Получение и хранение экспериментальных данных



- Продолжительность ≈ 750 ч
- 1 raw файл ≈ 15 Гб

Задачи

1. Найти **количество ресурсов** для хранения **всех экспериментальных данных**.
2. Найти **количество raw файлов** в хранилище EOS.

Выполнение задач преобразования экспериментальных данных

- Количество задач – 25 800
- Время выполнения 1 задачи ≈ 2 500 сек
- 1 raw (input) файл ≈ 15 Гб
- 1 digit (output) файл ≈ 870 МБ

Задачи

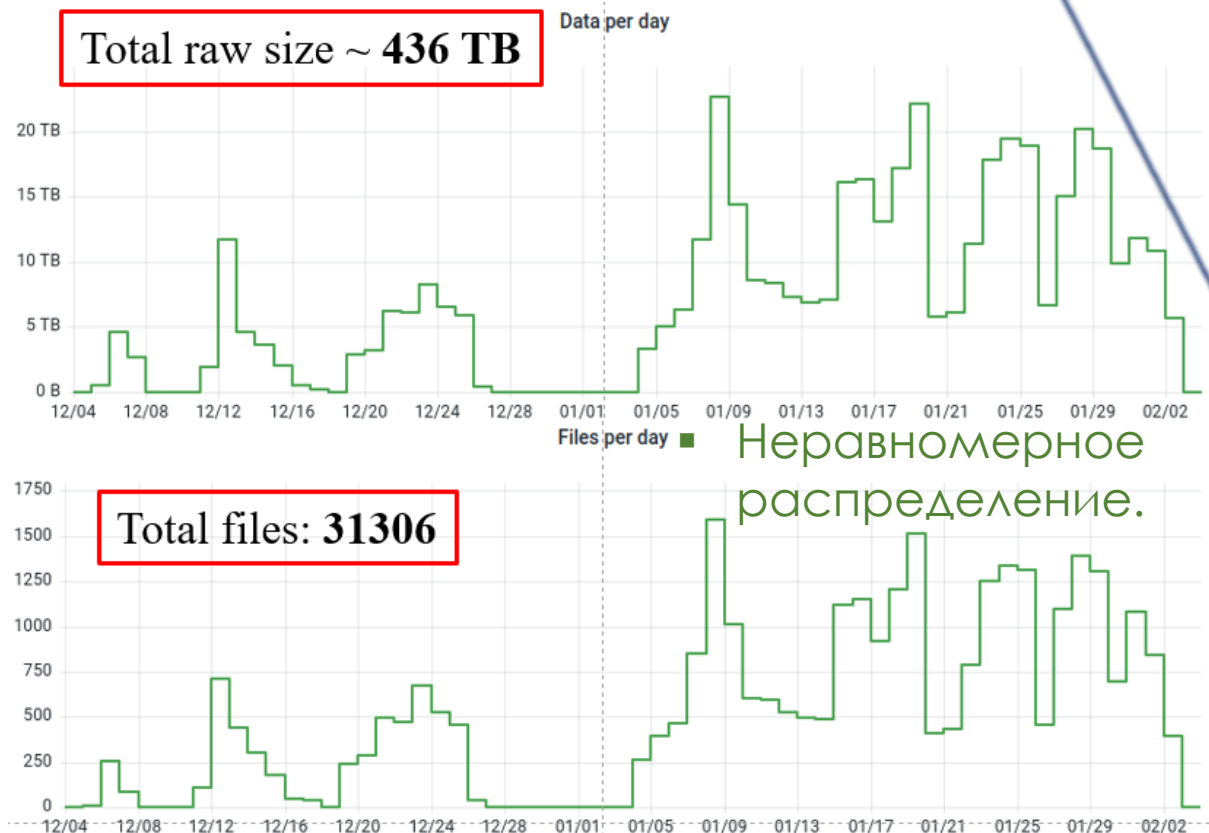
1. Найти **общее время выполнения** всех задач.
2. Рассчитать **нагрузку на вычислительные ресурсы** в процессе выполнения задач.
3. Рассчитать **нагрузку на каналы связи**.



Верификация ядра ЦД

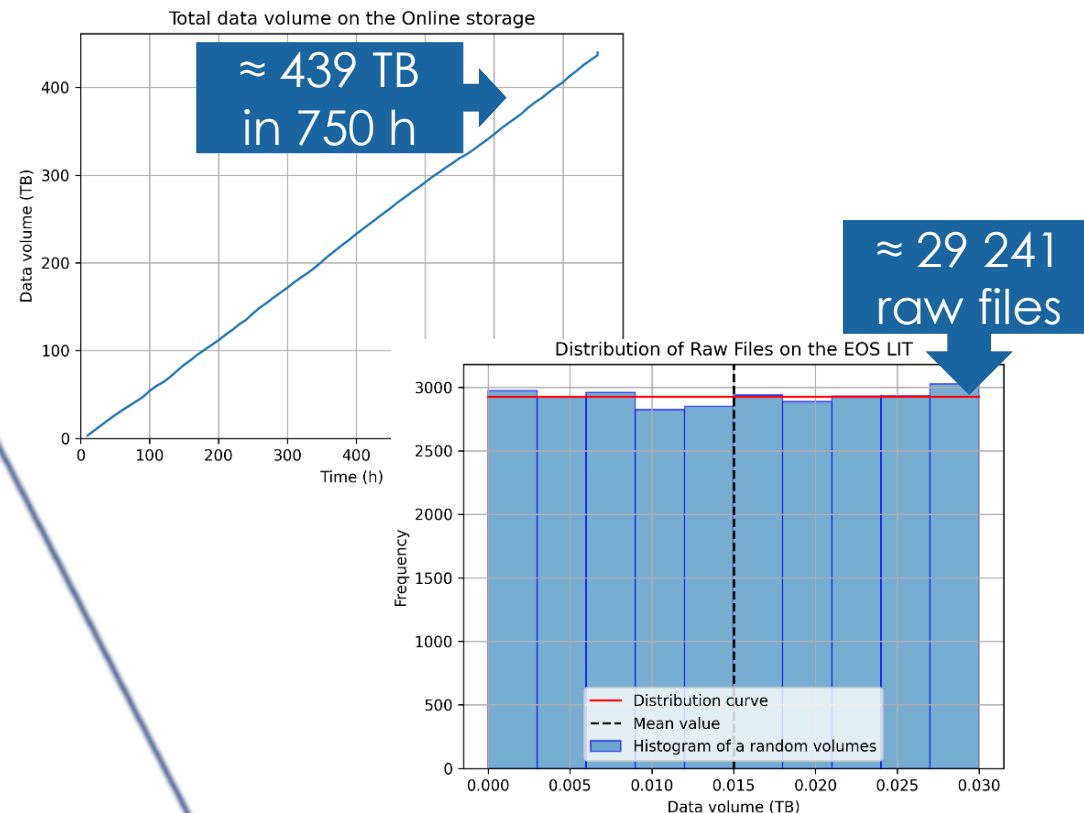
Получение и хранение экспериментальных данных

Мониторинг



Цифровой двойник

Эффективность генерации данных – 20%



■ Отсутствуют данные в некоторые периоды времени.



Верификация ядра ЦД

Загрузка вычислительных ресурсов и время выполнения задач

Мониторинг

NICA ЛФВЭ (100 ядер)



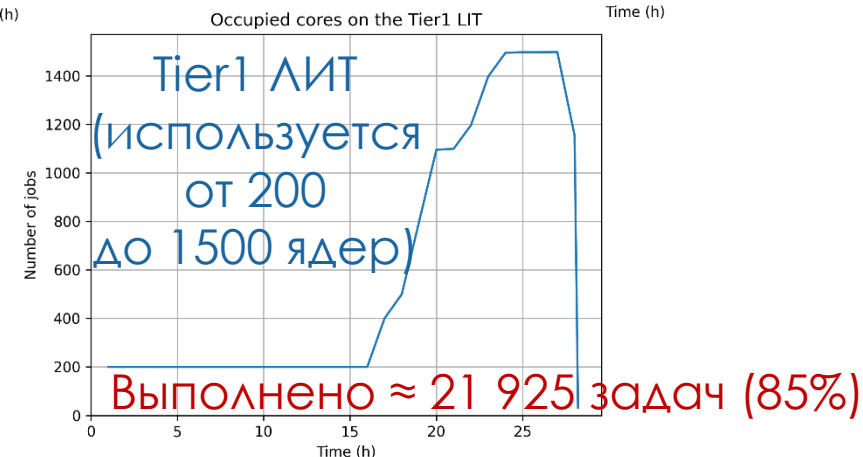
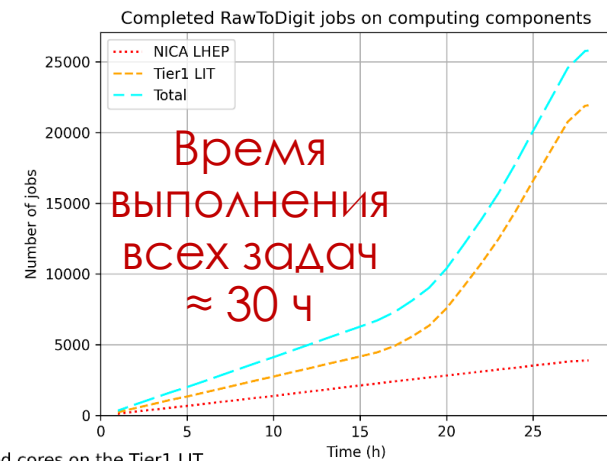
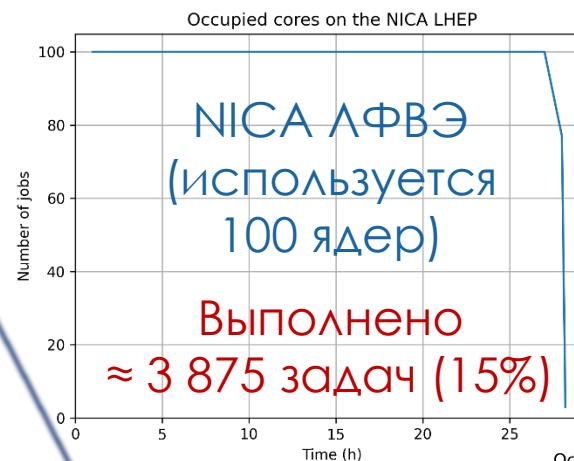
- Равномерное использование ресурсов
- ≈ 100 задач / ч
- 19% задач от общего количества

Tier1 ЛИТ (1500 ядер)



- Неравномерное использование ресурсов
- 200 – 1 500 задач / ч
- 81% задач от общего количества

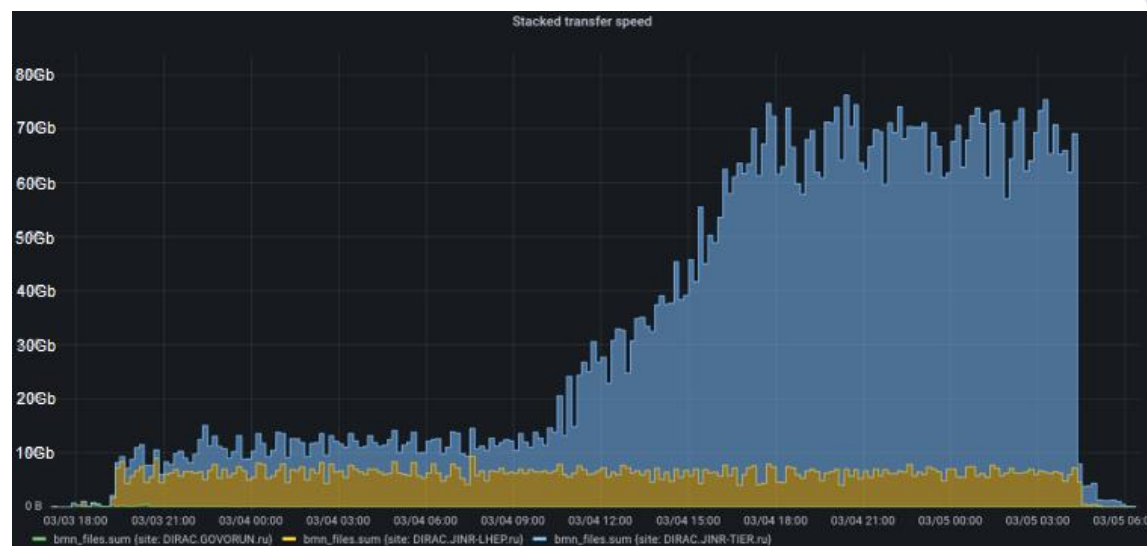
Цифровой двойник



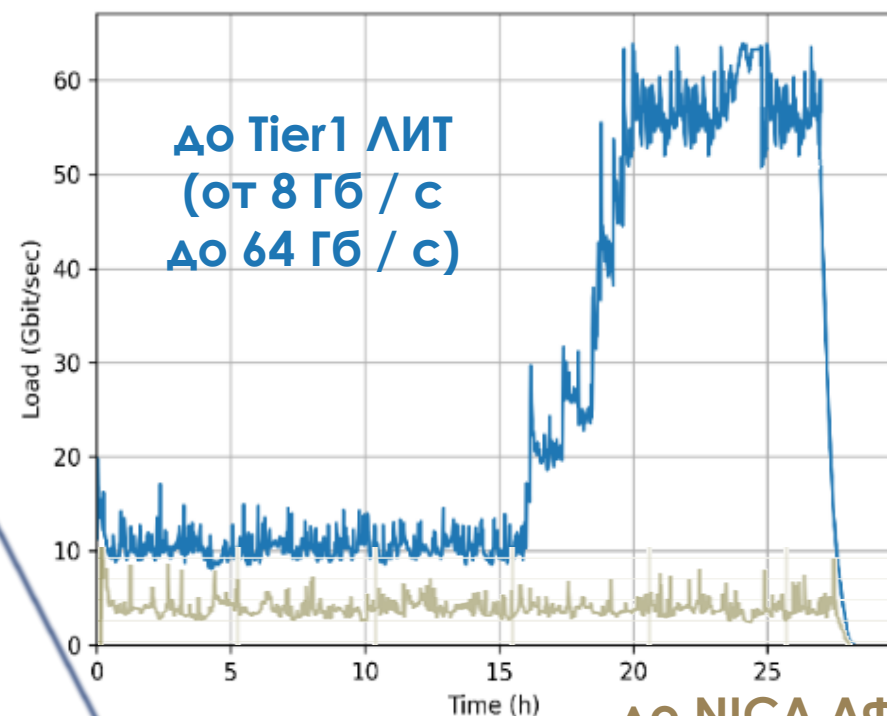
Верификация ядра ЦД

Скорость передачи данных

Мониторинг



Цифровой двойник



до Tier1 ЛИТ
(от 8 Гб / с
до 64 Гб / с)

до NICA ЛФВЭ
(≈ 5 Гб / с)

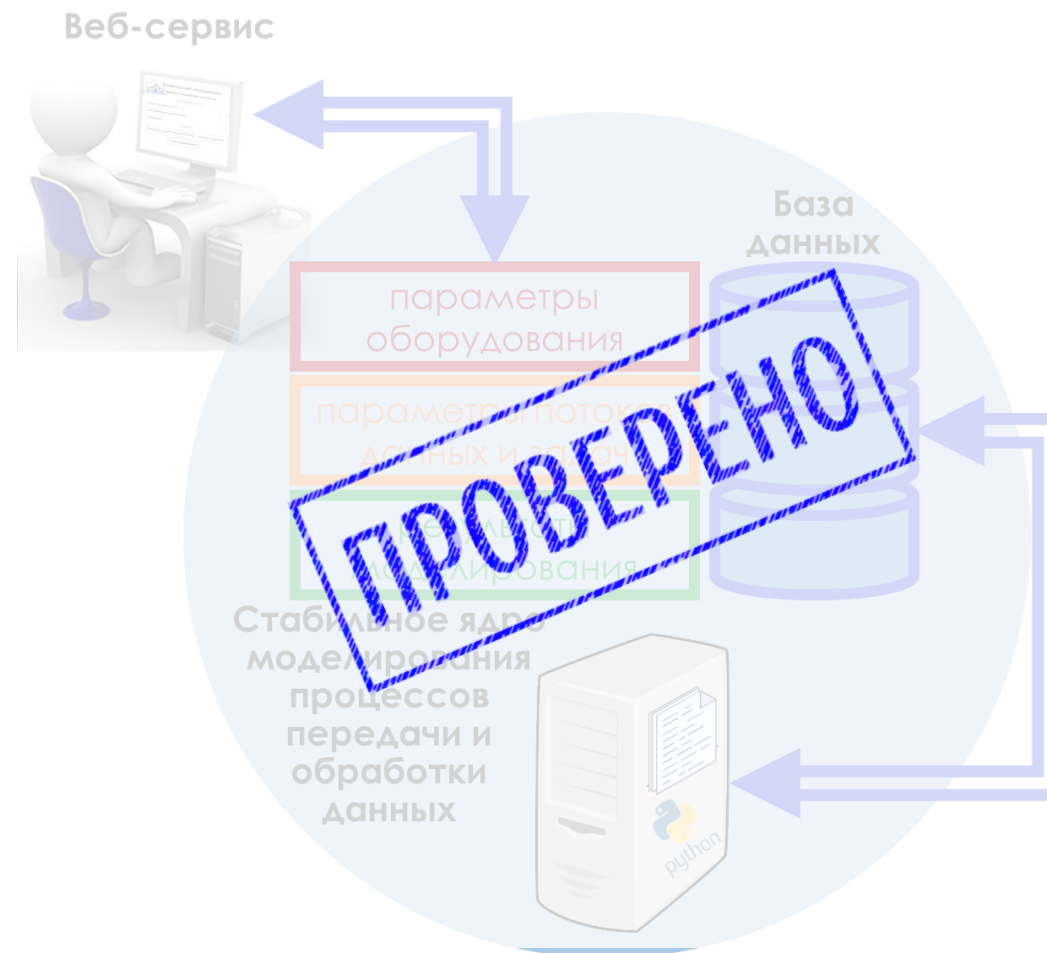
- Средняя скорость передачи данных до NICA ЛФВЭ ≈ 4 Гб / с
- Средняя скорость передачи данных до Tier1 ЛИТ от 8 Гб / с до 64 Гб / с



Верификация ядра ЦД

Выводы

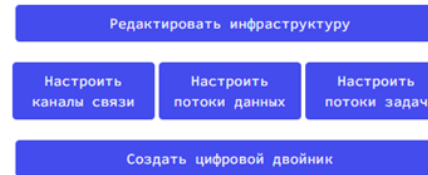
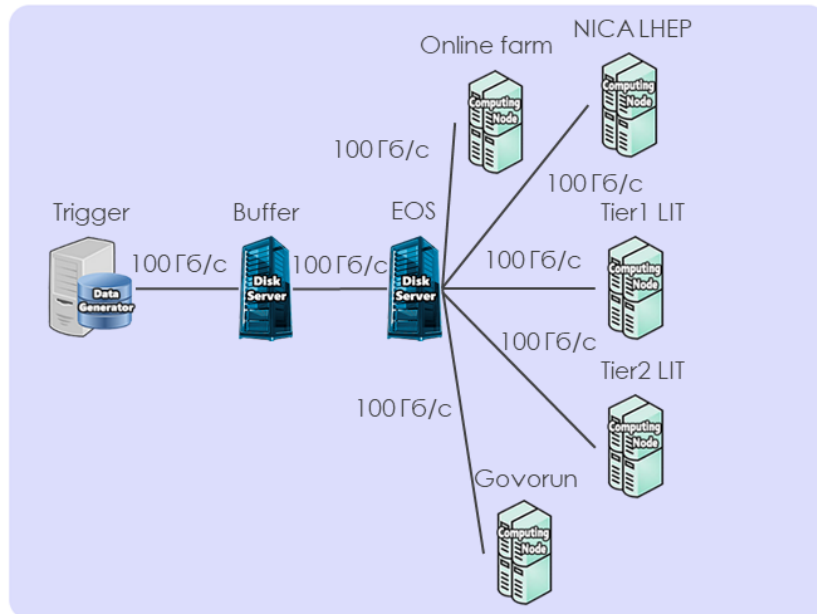
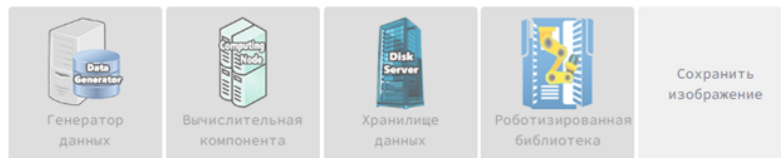
1. Проведена **серия экспериментов**.
2. Результаты работы ЦД **в пределах трех среднеквадратических отклонений** от показателей мониторинга.
3. **Точность достаточна для дальнейшего использования** и создания цифровых двойников РЦОД, которые будут применяться для решения задач проектирования и развития вычислительной инфраструктуры научных экспериментов класса «мегасайенс».



Опытная эксплуатация программного комплекса для создания цифровых двойников РЦОД

ЦД вычислительной инфраструктуры эксперимента BM@N

Построение инфраструктуры центра сбора, хранения и обработки данных



Цели

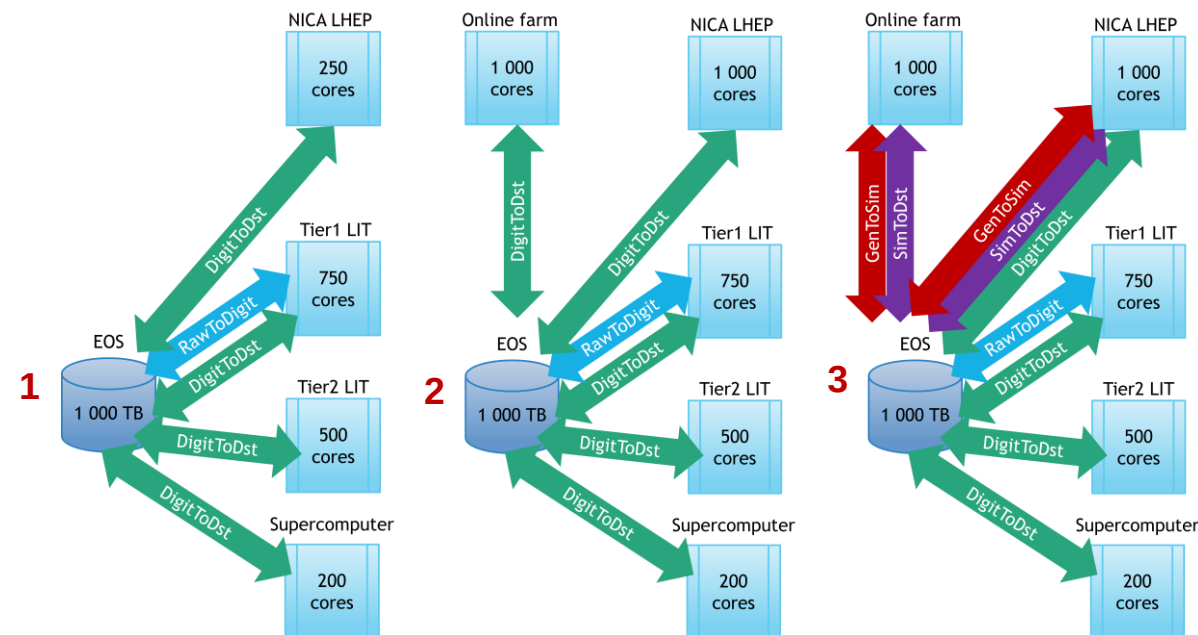


- оценить **потребности в ресурсах для хранения и обработки данных** с учетом планируемых параметров потоков данных будущих сеансов эксперимента;
- получить примерное **время, которое потребуется на обработку данных** по окончании сеанса эксперимента.

Опытная эксплуатация программного комплекса для создания цифровых двойников РЦОД

ЦД вычислительной инфраструктуры эксперимента BM@N

Сравнение конфигураций инфраструктуры для обработки данных



1→2:

– Увеличено количество ресурсов

NICA LHEP с 250 до 1 000 ядер.

– Добавлены ресурсы **Online farm (1 000 ядер).**

3: Добавлены потоки задач по обработке модельных данных.

100% использование ресурсов

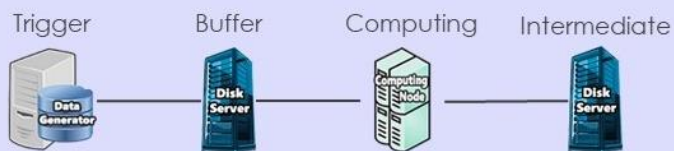
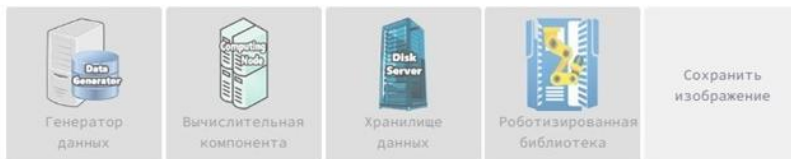
Процесс преобразования raw-данных **ускорен в 2 раза**

Результаты	1	2	3
Преобразование всех raw-данных в формат digit (RawToDigit)	60 часов (2,5 дня)	28 часов (1 день)	28 часов (1 день)
Время полной обработки всех экспериментальных данных	432 часов (18 дней)	240 часов (10 дней)	367 часов (15 дней)
Время полной обработки всех модельных данных	---	---	130 часов (6 дней)

Опытная эксплуатация программного комплекса для создания цифровых двойников РЦОД

ЦД вычислительной системы онлайн-фильтра данных эксперимента SPD

Построение инфраструктуры центра сбора, хранения и обработки данных



1) Decryption:

raw file → dec. file

2) Partial reconstruction:

dec. file → p-rec. file

3) Filtering:

p-rec → filt. file

1



Цели



- спроектировать эффективную вычислительную систему для обеспечения быстрой реконструкции событий и фильтрации данных в режиме реального времени;
- узнать объем хранилищ данных, загрузку сети, требуемое количество вычислительных ресурсов и т.д.
- предусмотреть возможности для дальнейшего развития и оптимизации проектируемой системы.



Опытная эксплуатация программного комплекса для создания цифровых двойников РЦОД

ЦД вычислительной системы онлайн-фильтра данных эксперимента SPD

Исходные данные

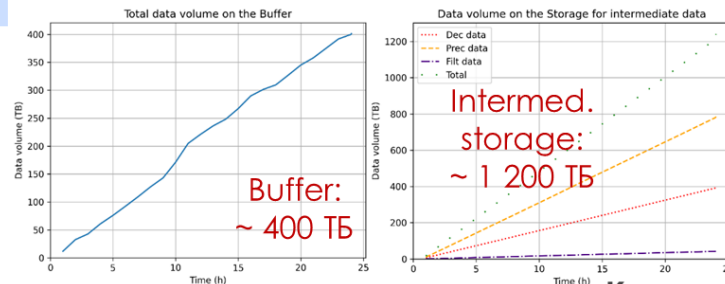
Время работы установки	24 ч	Объем raw-файла	4 ГБ
Скорость генерации данных	20 ГБ/с	Объем дес-файла	4 ГБ
Эффективность генерации данных	20%	Объем прес-файла	8 ГБ
Скорость обработки событий	1 000 соб/с	Объем filtred-файла	450 МБ
Количество задач обработки данных	100 000		



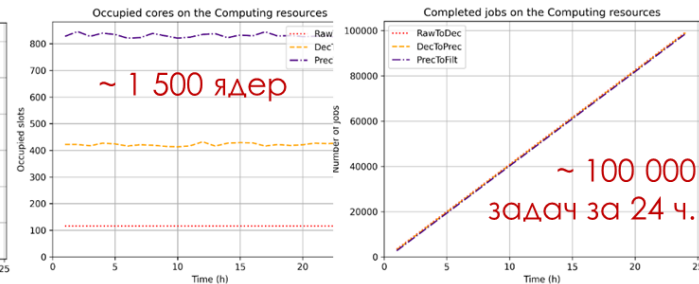
Результаты

Буфер для хранения raw-данных	400 ТБ
Промежуточное хранилище	1 200 ТБ
Вычислительные ресурсы	1 500 ядер
Канал связи Триггер-Буфер	50 Гб/с
Канал связи Буфер-Выч.рес.	40 Гб/с
Канал связи Выч.рес.-Хранилище	250 Гб/с

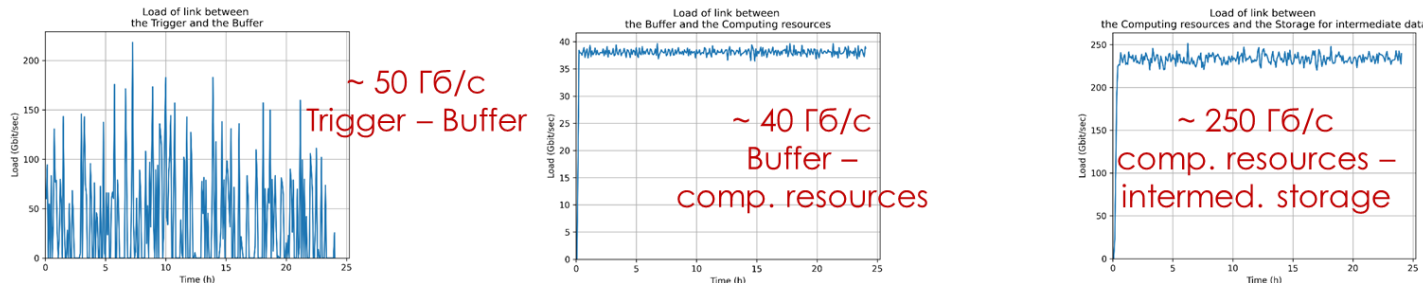
Хранилища данных



Вычислительные ресурсы



Каналы связи





Заключение

1. **Разработан новый метод** построения и использования ЦД, который отличается возможностью моделирования процессов обработки и хранения данных, учитывая характеристики потоков данных и задач, вероятности сбоев, отказов, изменений в производительности оборудования и др.
2. **Для реализации метода разработан программный комплекс**, используемый для принятия решений по выбору конфигурации оборудования РЦОД согласно заданным требованиям.
3. **Проведена верификация и подтверждена адекватность** построенных методов и алгоритмов на примере вычислительной инфраструктуры существующего эксперимента.
4. **Получено свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ.
5. **Проведена опытная эксплуатация:**
 - решена задача поиска конфигурации инфраструктуры системы сбора, хранения и обработки данных эксперимента BM@N комплекса NICA.
 - результаты работы применяются при проектировании вычислительной системы онлайн-фильтра данных эксперимента SPD комплекса NICA.





Список публикаций (1)



Пряхина Д.И. дис. канд. техн. наук: 2.3.1. - СПбГУ, 2024.
Научный руководитель: д.т.н. Кореньков В.В.

1. 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.
2. Пряхина Д.И., Кореньков В.В., Трофимов В.В. **Метод построения цифровых двойников для решения задач эффективного управления и развития распределенных центров сбора, хранения и обработки данных** // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2023. Т. 19, № 2. С. 272-281.
3. Пряхина Д.И., Кореньков В.В., Трофимов В.В., Герценбергер К.В. **Верификация программы моделирования для создания цифровых двойников распределенных центров сбора, хранения и обработки данных** // International Journal of Open Information Technologies. 2024. V. 12, no. 1. P. 118-128.
4. Priakhina D., Korenkov V., Trofimov V. **Prototype of a software complex for creating digital twins of distributed data acquisition, storage and processing centers** // Physics of Particles and Nuclei. 2024. V. 55, no. 3. P. 444-446.
5. Пряхина Д.И., Кореньков В.В., Олейник Д.А., Жемчугов А.С. **Цифровой двойник системы первичной обработки данных эксперимента SPD** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. №12. С. 237-242.



Список публикаций (2)



Пряхина Д.И. дис. канд. техн. наук: 2.3.1. - СПбГУ, 2024.
Научный руководитель: д.т.н. Кореньков В.В.

6. Трофимов В.В., Нечаевский А.В., Ососков Г.А., Пряхина Д.И. **Вероятностно-стоимостной подход к оптимизации распределенных систем хранения данных физических экспериментов** // CEUR Workshop Proceedings. 2018. Т. 226. С. 393–399.
7. Кореньков В.В., Пряхина Д.И., Нечаевский А.В., Ососков Г.А., Трофимов В.В. **Моделирование центров хранения и обработки данных с учетом экономических составляющих** // Системный анализ в науке и образовании. 2018. № 4.
8. Korenkov V., Nechaevskiy A., Ososkov G., Priakhina D., Trofimov V. **A probabilistic approach of the simulation of data processing centers** // European Physical Journal Web of Conferences. January 2020. Vol. 226. P. 03012.
9. Priakhina D., Trofimov V., Ososkov G., Gertsenberger K. **Data center simulation for the BM@N experiment of the NICA project** // AIP Conference Proceeding. 2021. Vol. 2377. P. 040007.
10. Priakhina D., Korenkov V., Gertsenberger K., Trofimov V. **Simulation of Data Processing for the BM@N Experiment of the NICA Complex** // CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 3041. pp. 483–487.
11. Priakhina D., Korenkov V., Trofimov V., Gertsenberger K. **Simulation Results of BM@N Computing Infrastructure** // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2023. Vol. 20. No. 5. pp. 1272–1275.

Спасибо за внимание!

Цифровые двойники
для решения задач управления и
развития распределенных центров
сбора, хранения и обработки данных

26 июня 2025



ДАРЬЯ ПРЯХИНА
к.т.н., научный сотрудник

pryahinad@jinr.ru



Лаборатория информационных технологий им. М.Г. Мещерякова

Объединенный институт ядерных исследований

Программный комплекс для создания цифровых двойников РЦОД

СТЕК ТЕХНОЛОГИЙ



Функциональные возможности пользовательского интерфейса

Построение инфраструктуры и задание базовой конфигурации оборудования

Построение инфраструктуры
центра сбора, хранения и обработки данных

1

2

3

Настройка базовой конфигурации оборудования
* Обязательное поле для заполнения

- Название*: EOS
- Описание: Main storage
- Объем: 1000 ТБ

Добавить устройство

Генератор данных

Вычислительная компонента

Хранилище данных

Роботизированная библиотека

Сохранить изображение

Завершить построение инфраструктуры

Настроить каналы связи

Настроить потоки данных

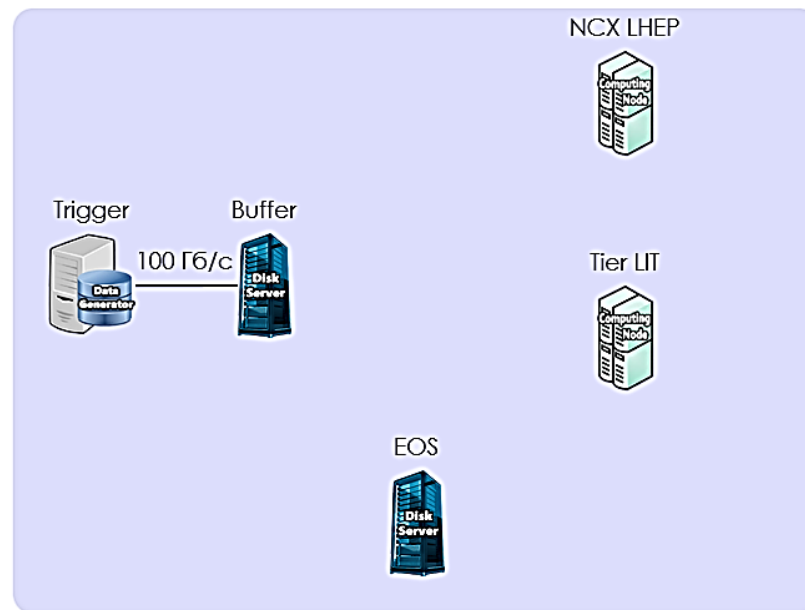
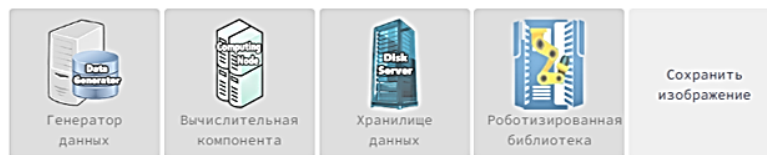
Настроить потоки задач

Создать цифровой двойник

Функциональные возможности пользовательского интерфейса

Настройка каналов связи

Построение инфраструктуры
центра сбора, хранения и обработки данных



Редактировать инфраструктуру

Настроить каналы связи

Настроить потоки данных

Настроить потоки задач

Создать цифровой двойник

Настройка каналов связи

* Обязательное поле для заполнения

Выберите существующий канал из списка, чтобы изменить параметры

link1

• Название*:

link1

• Описание:

trigger-buffer

• Канал от*:

Trigger

до*:

Buffer

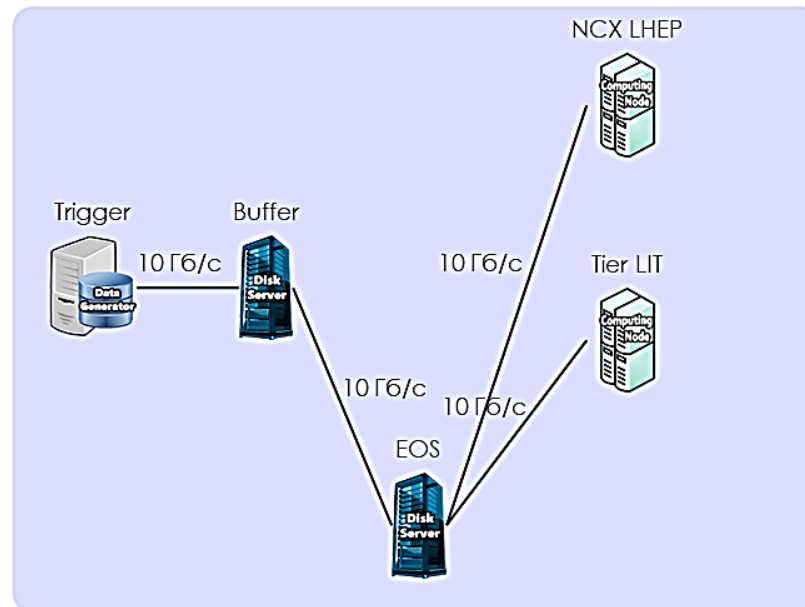
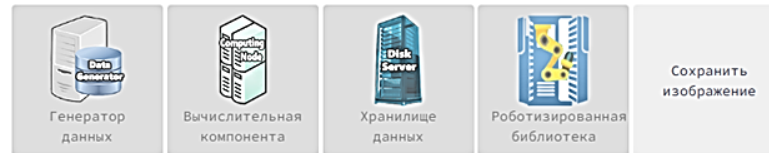
• Пропускная способность: 10 Гб/с

Сохранить изменения

Функциональные возможности пользовательского интерфейса

Настройка потоков данных и задач

Построение инфраструктуры
центра сбора, хранения и обработки данных



Редактировать инфраструктуру

Настроить каналы связи

Настроить потоки данных

Настроить потоки задач

Создать цифровой двойник

Настройка потоков задач

* Обязательное поле для заполнения

- Название*:
- Описание:
- Тип обрабатываемых данных*:
- Объем входных данных для задачи*: Гб
- Объем входных данных (допустимое отклонение): Гб
- Тип результирующих данных*:
- Объем выходных данных*: Гб
- Объем выходных данных (допустимое отклонение): Гб
- Распределение вероятности для генерации данных:
- Среднее время выполнения задачи*: с
- Среднее время выполнения (допустимое отклонение):
- Распределение вероятности для генерации задач:
- Общее количество задач *

Добавить

Функциональные возможности пользовательского интерфейса

Создание вычислительного эксперимента

Добавление эксперимента	Эксперименты
Заполните поля формы, чтобы добавить новый эксперимент для поиска оптимальной конфигурации оборудования * Обязательное поле для заполнения Название эксперимента * Test 1 Описание эксперимента Поиск оптимального количества ресурсов для хранения данных Параметры моделирования - Продолжительность работы моделируемой инфраструктуры – 720 ч. - Ускорение процесса моделирования в 100 раз. Параметры логирования Выберите объекты и события, о которых необходимо сохранять информацию во время моделирования - Объекты моделируемой инфраструктуры ☒ Хранилища данных ☐ Вычислительные компоненты ☐ Каналы связи - События ☒ Генерация данных ☒ Потери данных ☒ Работа с файлами ☐ Генерация, запуск, выполнение задач Добавить Очистить Отмена	Выберите существующий эксперимент или добавьте новый эксперимент для поиска оптимальной конфигурации оборудования Test 4 Test Дата создания: 9 марта 2023 г. 15:04 Test 3 Исследование загрузки каналов связи Дата создания: 7 февраля 2023 г. 10:42 Test 2 Поиск оптимального количества вычислительных ресурсов Дата создания: 7 февраля 2023 г. 10:38 Test 1 Поиск оптимального количества ресурсов для хранения данных Дата создания: 7 февраля 2023 г. 10:36 Добавить

Функциональные возможности пользовательского интерфейса

Настройка сценариев масштабирования и запуск ЦД

Информация об эксперименте

Дата создания: 7 февраля 2023 г. 10:36

Название эксперимента

Test 1

Описание эксперимента

Поиск оптимального количества ресурсов для хранения данных

Параметры моделирования

- Продолжительность работы моделируемой инфраструктуры – 800 ч.
- Ускорение процесса моделирования в 1000 раз.

Параметры логирования

- Объекты моделируемой инфраструктуры
 - ☒ Хранилища данных
 - ☐ Вычислительные компоненты
 - ☐ Каналы связи
- События
 - ☒ Генерация данных
 - ☒ Потери данных
 - ☒ Работа с файлами
 - ☐ Генерация, запуск, выполнение задач

Посмотреть результаты

Выбрать другой эксперимент

Базовая конфигурация

Хранилища данных

Название	Описание	Объем (Тб)
trigger	Trigger BM@N	10000,0
buffer	Data receptipon buffer	5400,0
eoslhep	Main storage LHEP	1000,0
eoslit	Main storage LIT	1000,0
dcach	pp	1000,0

Вычислительные компоненты

Название	Описание	Количество ядер
t2lit	LIT T2 farm	500
ncxlhep	LHEP main farm	1200
super	Govorun	190

Каналы связи

Название	Описание	Пропускная способность (Гб/с)
raw0	trigger – buffer	100,0
raw1	buffer – lhep	10,0
raw2	buffer – lit	10,0
compute0	lhep – farm lhep	10,0
compute1	lit – Govorun	10,0
compute2	lit – farm lit	10,0
dataeosLhepLit	eoslhep – eoslit	10,0
dataeosLitLhep	eoslit – eoslhep	10,0

Добавить модификацию

Список модификаций

№	Статус	Дата обновления	
16	NEW	9 марта 2023 г. 14:52	Просмотр Запуск Результаты
15	NEW	9 марта 2023 г. 14:52	Просмотр Запуск Результаты

Список событий

Название	Описание	
decrease	уменьшение количества ядер	Подробнее

Добавить событие

Функциональные возможности пользовательского интерфейса

Просмотр результатов работы ЦД

Результаты эксперимента Test 1

Выберите вкладку для просмотра результатов

Хранилища данных

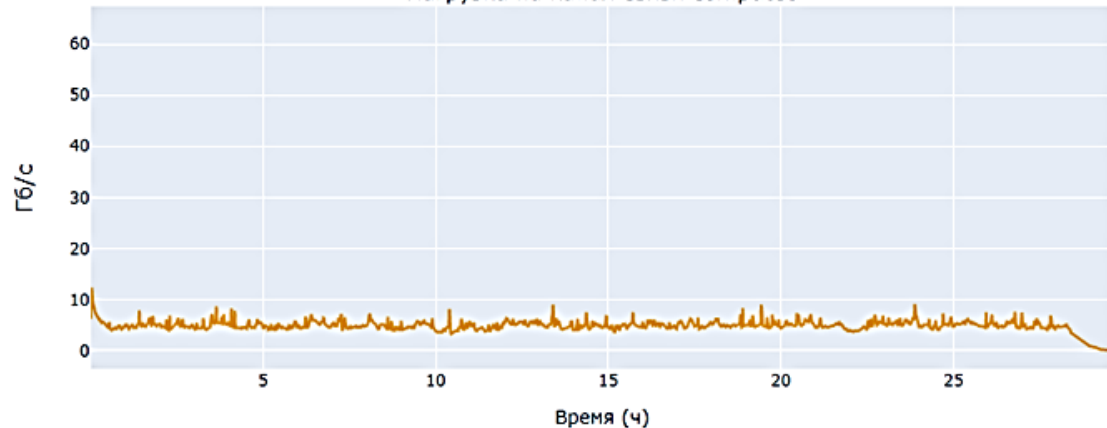
Вычислительные компоненты

Каналы связи

Очереди задач

Распределения файлов

Нагрузка на канал связи compute0



Нагрузка на канал связи compute2

