

# Цифровой двойник Сибирского кольцевого источника фотонов и большие вычисления

М.А. Марченко, Я.В. Зубавичус,  
В.С. Потеряев, С.Р. Шакиров, Р.А. Пермяков

**Консорциум «Комплексные цифровые  
двойники ЦКП СКИФ»**

# СИБИРСКИЙ КОЛЬЦЕВОЙ ИСТОЧНИК ФОТОНОВ – ЦКП СКИФ



- Зданий и сооружений - 34
- Общая площадь - ~30 Га
- Присоединенная электрическая мощность 12 МВ·А
- Общий бюджет 47.27 млрд. руб.
- Срок реализации - декабрь 2024 г.

## Экспериментальные станции

1-1 «Микрофокус»

1-2 «Структурная диагностика»

1-3 «Быстропротекающие процессы»

1-4 «XAFS спектроскопия и магнитный дихроизм»

1-5 «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне»

1-6 «Электронная структура»

1-7 «Operando-диагностика катализаторов и функциональных материалов»

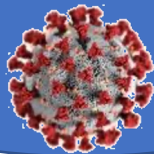
1-8 «Метрология и рефлектометрия в мягком рентгеновском диапазоне»

# ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЦКП СКИФ



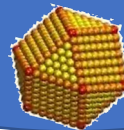
наука

Медицина и биологическая безопасность



наука

Зеленые технологии для химической промышленности и энергетики



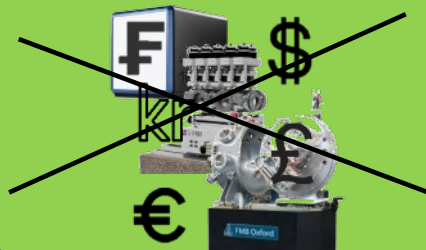
наука

Новые конструкционные материалы и технологии машиностроения



Инфра-структура

Импортозамещение в научном приборостроении

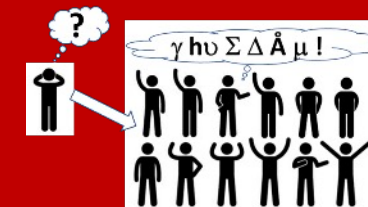


Цифра

Цифровизация научных исследований, разработок и образовательных технологий

кадры

Подготовка научных и инженерных кадров



# СИБИРСКИЙ КОЛЬЦЕВОЙ ИСТОЧНИК ФОТОНОВ – ЦКП СКИФ



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХ

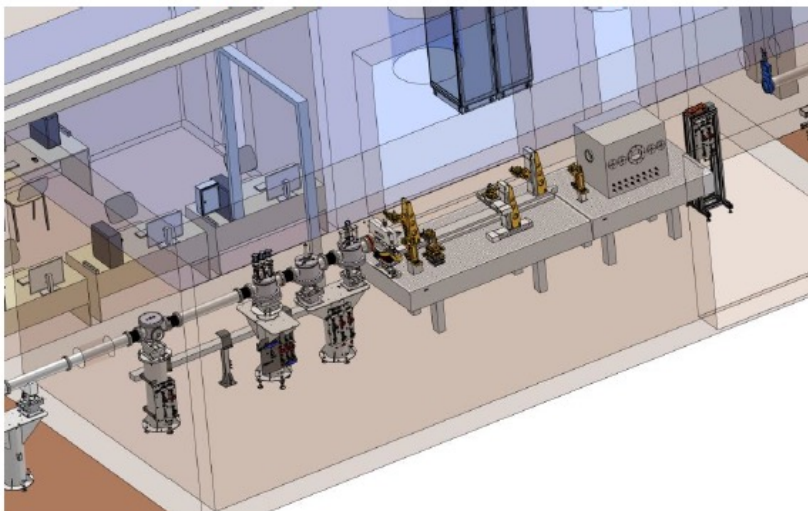


# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СТАНЦИЯ 1-5 «ДИАГНОСТИКА В ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ»

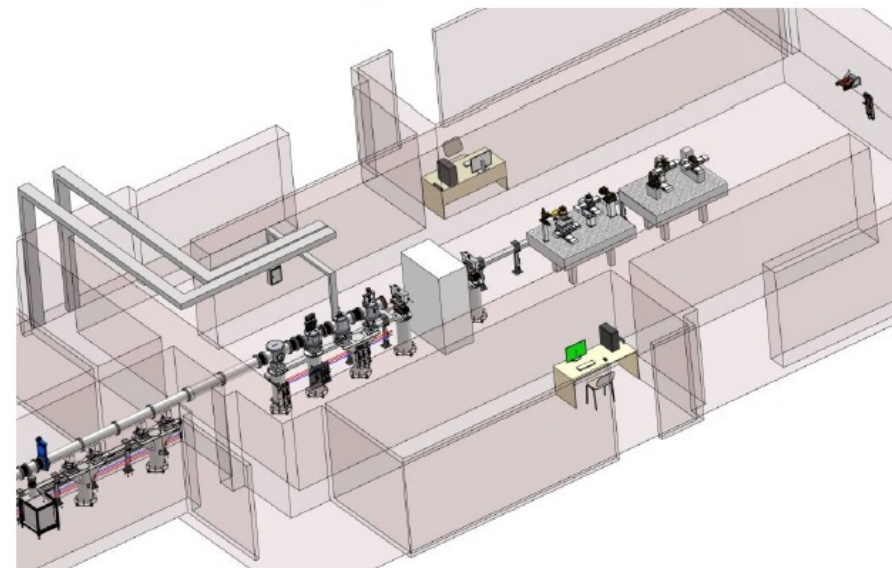


## 1-5 Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне

### I. Рентгенофлуоресцентный и рентгеноструктурный анализ (30-150 кэВ)



### II. Рентгеновская микроскопия и томография



Проблемы и задачи:

Медицина

Материаловедение

Археология  
и палеонтология

Методики:

Рентгеновская  
микроскопия

Дифракция

Когерентные  
методики

## Стройка в р.п. Кольцово (план-график)

**29.03.2023**, дополнительное соглашение с АО «Концерн Титан-2» на полный объем работ

**Осень 2023** – появление первых зданий в «строительной готовности»

**Май 2024** Начало монтажа технологического оборудования инжектора

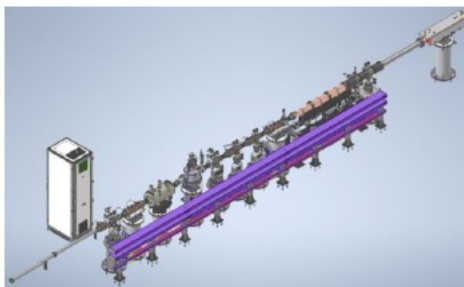
**Июль 2024** Начало монтажа технологического оборудования накопителя и экспериментальных станций

**Декабрь 2024** Техническая готовность всего комплекса: здания, коммуникации, инжектор, накопитель, 6 экспериментальных станций



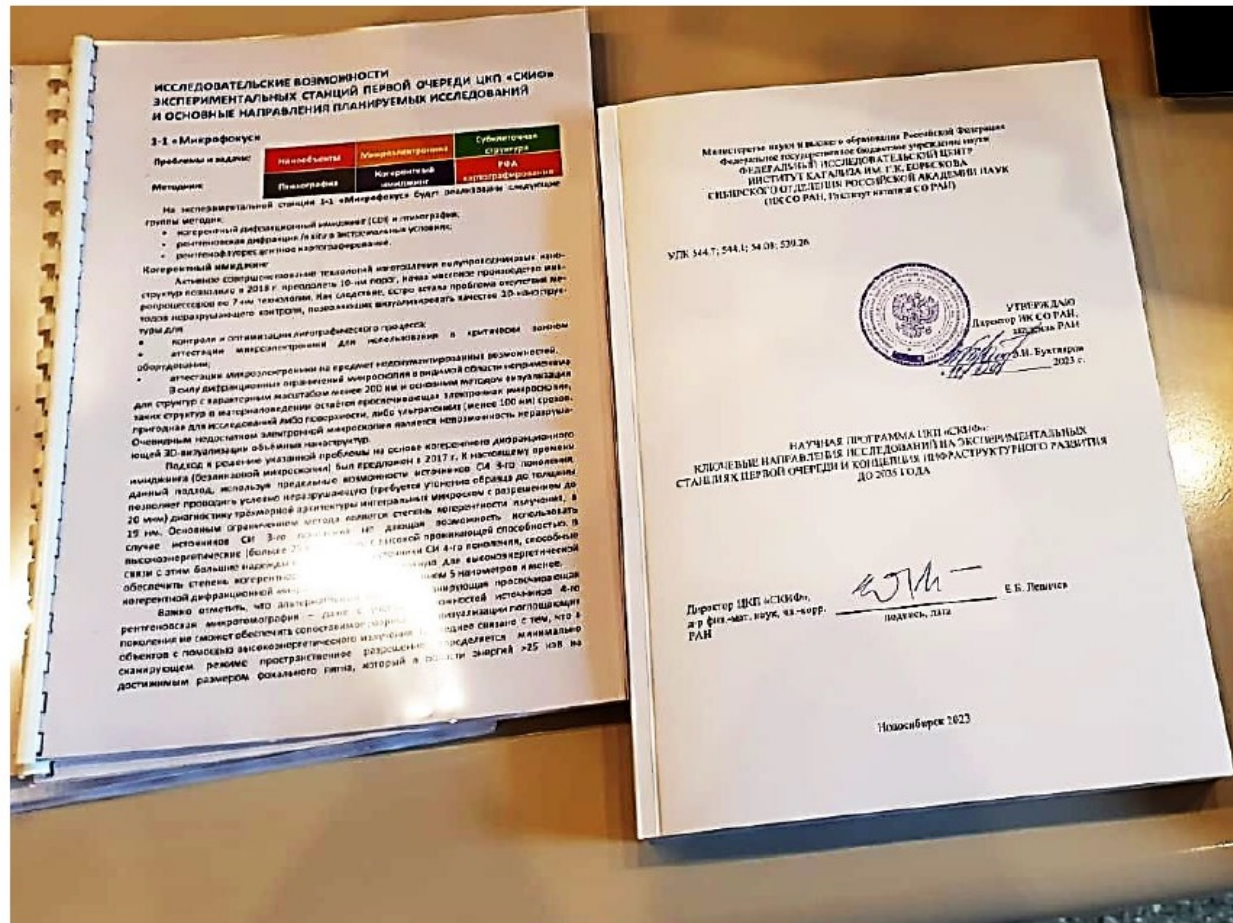


## Оборудование ускорительного комплекса



- ✓ **Февраль 2022** Передана первая партия оборудования для ускорительного комплекса (высокочастотные усилители мощности).
  - ✓ **Июнь 2022** Осуществлена вторая поставка оборудования линейного ускорителя.
  - ✓ **Июль 2022** Начата крупноблочная сборка оборудования инжекционного комплекса.
  - ✓ **Август 2022** Начат монтаж линейного ускорителя для ускорения пучка электронов до 20 МэВ.
  - ✓ **Сентябрь 2022** Проведены первые тесты с ускоренным электронным пучком
  - ✓ **Октябрь 2022** Проведена демонстрация работы первого ускорительного сегмента 0.8 МэВ
  - ✓ **Декабрь 2022** Два первых поворотных магнита накопительного кольца успешно прошли магнитные испытания
  - ✓ **Февраль 2023** Выход на проектные параметры сверхпроводящего вигглера станции 1-5
  - ✓ **Март 2023** Завершение конструирования фронтендов, начало производства ключевых узлов
  - ✓ **Апрель 2023** Запуск первого сегмента линейного ускорителя
  - ✓ **Май 2023** Демонстрация достижения работоспособности клистрона разработки ИЯФ СО РАН
- Степень готовности инжекционного комплекса 95%+,  
степень готовности основного накопителя 55%+**

## НАУЧНАЯ ПРОГРАММА ЦКП «СКИФ»



*Научная программа ЦКП «СКИФ»:  
ключевые направления исследований на  
экспериментальных станциях первой очереди  
и концепция инфраструктурного развития до  
2035 года (439 стр.)*

- I. Ключевые направления научных исследований на экспериментальных станциях первой очереди
- II. Концепция инфраструктурного развития ЦКП «СКИФ»
- III. Финансовое обеспечение текущей деятельности и инфраструктурного развития ЦКП «СКИФ» до 2035 года

*Исследовательские возможности  
экспериментальных станций первой очереди  
ЦКП «СКИФ» и основные направления  
планируемых исследований (Аннотация к  
Программе, 17 стр.)*

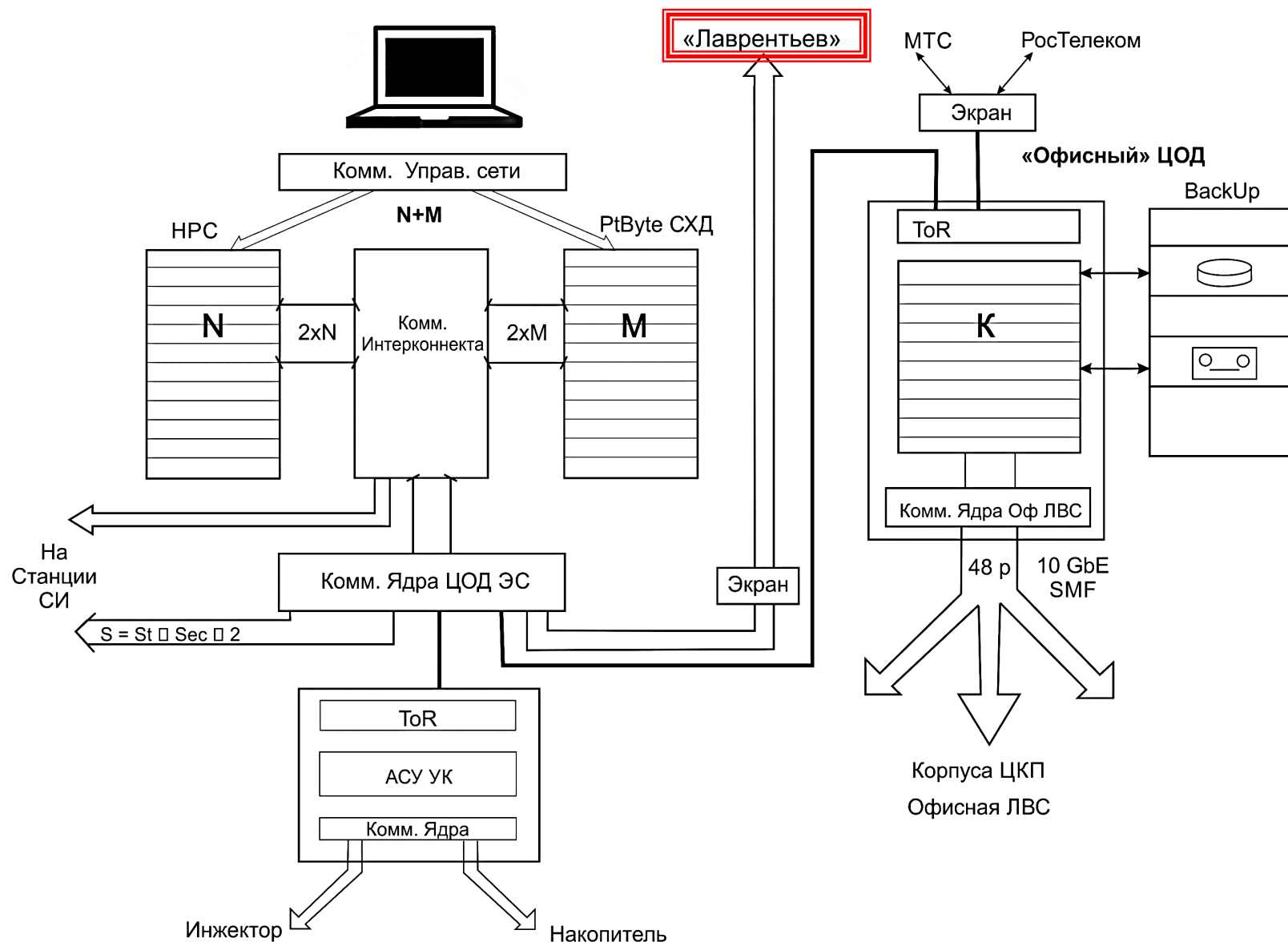


## Прогнозируемый рост требований центров СИ в США (2022-2028)

Центр СИ, США	Объём генерируемых данных, ПБайт/год	Производительность «горячей» обработки данных, Петафлопс
ALS (Беркли)	2-20	0.1-30
APS (Аргонн)	7-150	4-50
NSLS-II (Аптон)	20-90	2.5-45
SSRL (Стенфорд)	1-10	1-10

# ЛОКАЛЬНЫЙ ЦОД СКИФ

- Вычислительная производительность – не менее 900 Терафлопс (CPU:GPU ~2:3), рост до 8 Петафлопс к 2030 г.
- Объем «сверхгорячих» детекторных экспериментальных данных для кратковременного хранения – 1.2 Петабайт на твердотельной памяти в вычислительных узлах НРС-кластера
- Объем долговременного «теплого» хранения экспериментальных данных PtByte 8 Петабайт (рост до 80 Петабайт к 2030 году).
- Поддержка файловых систем NFS, Lustre, DAOS. Интерконнект с библиотеками MPI

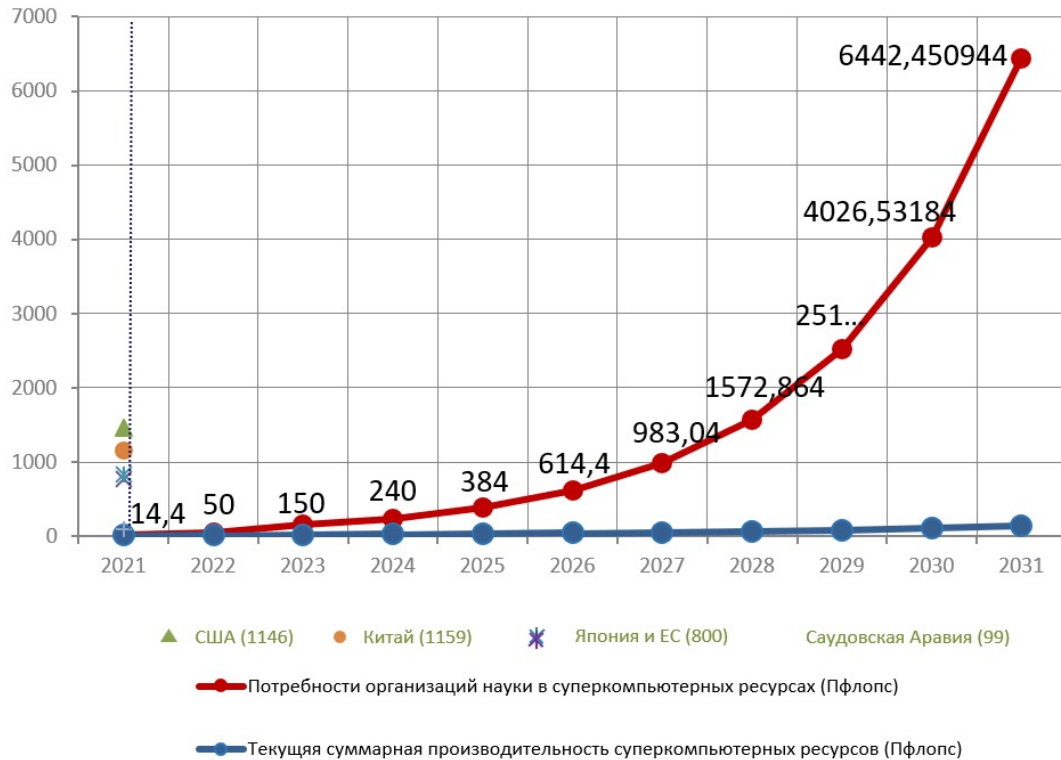


«Вечное» хранение  
непрерывно растущего  
массива данных в соответствии  
с принципом FAIR



- On-the-fly обработка данных, pipelines (отбор образцов и оптимизация параметров сбора данных)
- Расшифровка кристаллических структур по данным рентгеноструктурного анализа, решение обратной задачи спектроскопии
- Распознавание образов, классификация и обработка изображений
- Использование технологий ИИ и глубокого машинного обучения
- Цифровое моделирование, квантовая механика, инженерные расчеты
- Развитие собственных алгоритмов и программных комплексов, оптимизированных под нужды локального сообщества
- **Технологии цифровых двойников**

# СРАВНЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ МОЩНОСТЕЙ В АКАДЕМГОРОДКЕ



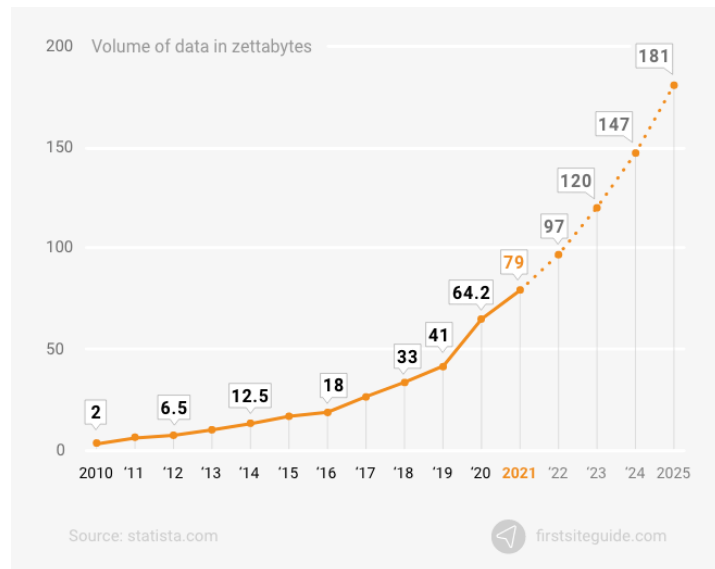
## Минимальная оценка производительности СКЦ для институтов СО РАН к 2025 году:

- ЦКП «СКИФ» – 5 Петафлопс
- ИВМиМГ СО РАН – 3 Петафлопса
- ИЦиГ СО РАН – 3 Петафлопса
- ИТПМ СО РАН – 3 Петафлопса
- ИНГГ СО РАН – 3 Петафлопса
- ИТ СО РАН – 3 Петафлопса
- ИЯФ СО РАН – 2 Петафлопса
- ИК СО РАН – 1 Петафлопс

**Задачи в институтах: фундаментальная наука и индустрия (вычисления и ИИ-МО).**

Оценка минимальной суммарной производительности СКЦ мощность суперкомпьютеров к 2030 году для решения важнейших задач в России

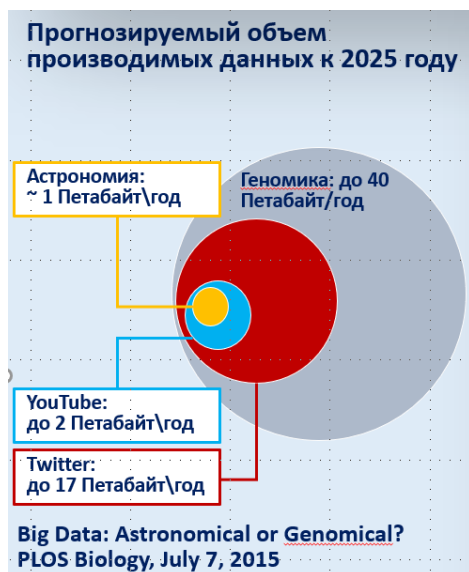
# ОБЪЕМЫ ДАННЫХ ДЛЯ УСТАНОВОК И ПРОЕКТОВ МЕГАСАЙЕНС В АКАДЕМГОРОДКЕ



Оценка роста общего объема данных в мире до 2025 года (по материалам <https://firstsiteguide.com/big-data-stats/>)

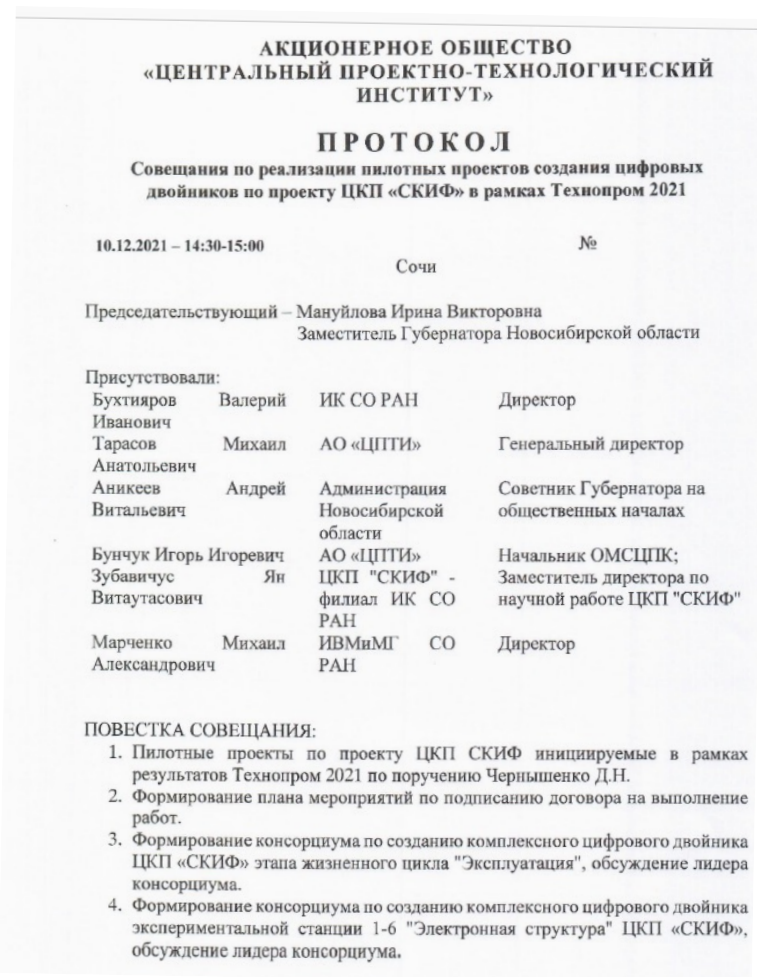
- ЦКП «СКИФ» – 20 Петабайт в год
- Центр генетических технологий – 15 Петабайт в год
- Институт ядерной физики – 10 Петабайт в год
- Институт теплофизики – 5 Петабайт в год
- Институт теоретической и прикладной механики – 5 Петабайт в год
- Институт катализа – 2 Петабайта в год

**ИТОГО – около 100 Петабайт в год**



Из доклада академика Н.А. Колчанова: к 2025 году суммарный объем геномной информации в несколько раз превысит объём данных, которые будут накоплены в астрономии и социальных сетях, твиттер и ютуб.

- **Общая задача: разработка цифровых двойников установок мегасайенс**
- **Частная задача: создание цифрового двойника ЦКП «СКИФ»**



- **03.09.2021** - поручение заместителя Председателя Правительства РФ Д.Н. Чернышенко № ДЧ-П8-12119, п. 11 по задаче создания цифрового двойника ЦКП «СКИФ» стадии «эксплуатация».
- **10.12.2021** – совещание в Университете Сириус, ИВМиМГ определен ответственным за создание цифрового двойника станции 1-5.
- **28.11.2022** - создание консорциума, участниками которого являются ИВМиМГ (головная организация), ИК, ЦКП «СКИФ» и КТИ НП, для выполнения работ по разработке комплексного цифрового двойника ЦКП «СКИФ».
- **28.11.2022** – обоснование для Минобрнауки для начала и поддержки проекта создания ЦКП «СКИФ» (сроки выполнения 2023-2027 гг.).
- **12.12.2022** – соглашение с СПбПУ о создании в ИВМиМГ университетского зеркального инжинирингового центра по разработке цифровых двойников.



## Консорциум «Комплексные цифровые двойники ЦКП СКИФ»:

- ИВМиМГ СО РАН (головная организация)
- ЦКП СКИФ
- ИК СО РАН
- КТИ НП СО РАН

## Цели и задачи Консорциума:

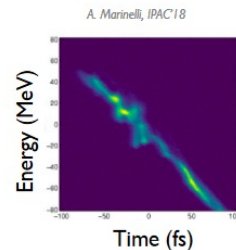
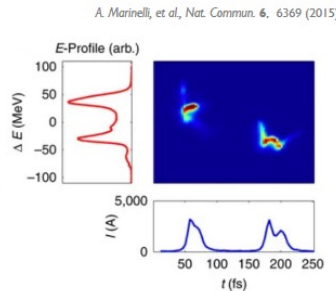
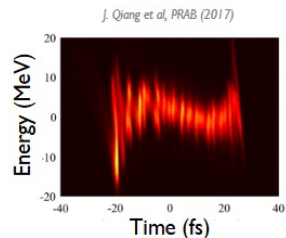
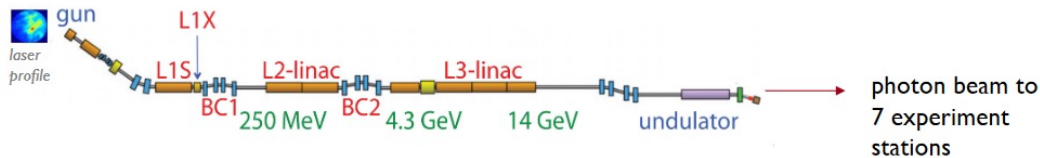
- координация совместных действий и реализация общих проектов в области создания комплексных ЦД ЦКП СКИФ
- организация и проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ
- образовательная деятельность и подготовка кадров
- инженерная и инновационная деятельность

# МИРОВОЙ ОПЫТ - КОМПЛЕКСНЫЕ ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ БОЛЬШИХ НАУЧНЫХ УСТАНОВОК



Примеры Больших Научных Установок (Large Scale Research Infrastructure), для которых создаются цифровые двойники:

- SKA, Australian Square Kilometre Array Pathfinder (ASKAP)
- Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST)
- extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array (eROSITA)
- Fermilab's Accelerator Complex
- Compact Linear Collider (CLIC), CERN
- Sealab - Superconducting RF Electron Accelerator Laboratory
- Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)





# МИРОВОЙ ОПЫТ - КОМПЛЕКСНЫЕ ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ БОЛЬШИХ НАУЧНЫХ УСТАНОВОК



- Цифровой двойник (ЦД) научной установки – это не просто ее 3D-модель, как думают многие
- ЦД – это комплекс компьютерных моделей, который описывает структуру, функциональность и поведение установки на основе данных телеметрии, собираемых в процессе эксплуатации
- ЦД – основа для системы принятия решений по управлению установкой и гарантия ее устойчивой прецизионной работы

## Основные задачи ЦД:

- сбор данных телеметрии в процессе эксплуатации
- управление установкой
- предиктивная аналитика - прогноз работоспособности
- планирование модернизации оборудования и ремонтов
- планирование экспериментов и управление экспериментальными данными
- обучение пользователей
- демонстрация работы установки

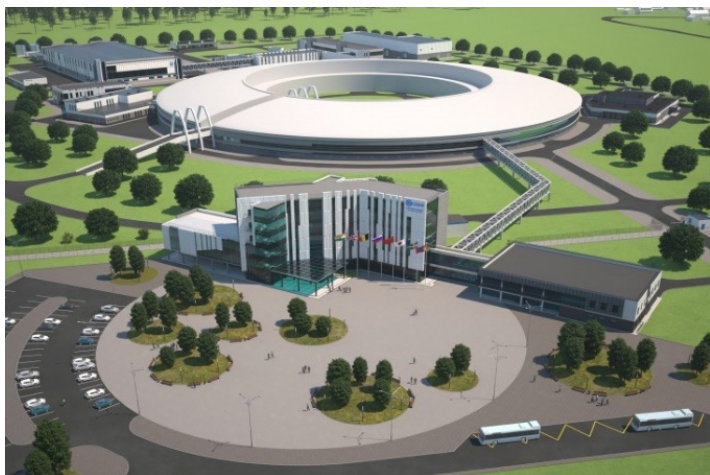
## С помощью ЦД - снижение:

- объема пуско-наладочных работ
- расходов на эксплуатацию
- количества аварий, поломок и сбоев
- затрат на ремонты и модернизацию

## С помощью ЦД - увеличение:

- числа пользователей и экспериментов
- количества и качества научных результатов
- **прибыли в масштабах страны от новых разработок и внедрения новых технологий, исследованных на установке**

# КОМПЛЕКСНЫЙ ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЦКП СКИФ НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ



## Комплексный ЦД ЦКП СКИФ:

- будет состоять из цифровых двойников элементов установки
- будет автоматически самообучаться на основе данных
- окажет содействие в управлении установкой
- позволит проводить виртуальные эксперименты, имитирующие критические режимы работы установки
- даст возможность предсказывать состояние установки
- обеспечит управление экспериментами и данными
- позволит обучать пользователей
- обеспечит информационную безопасность



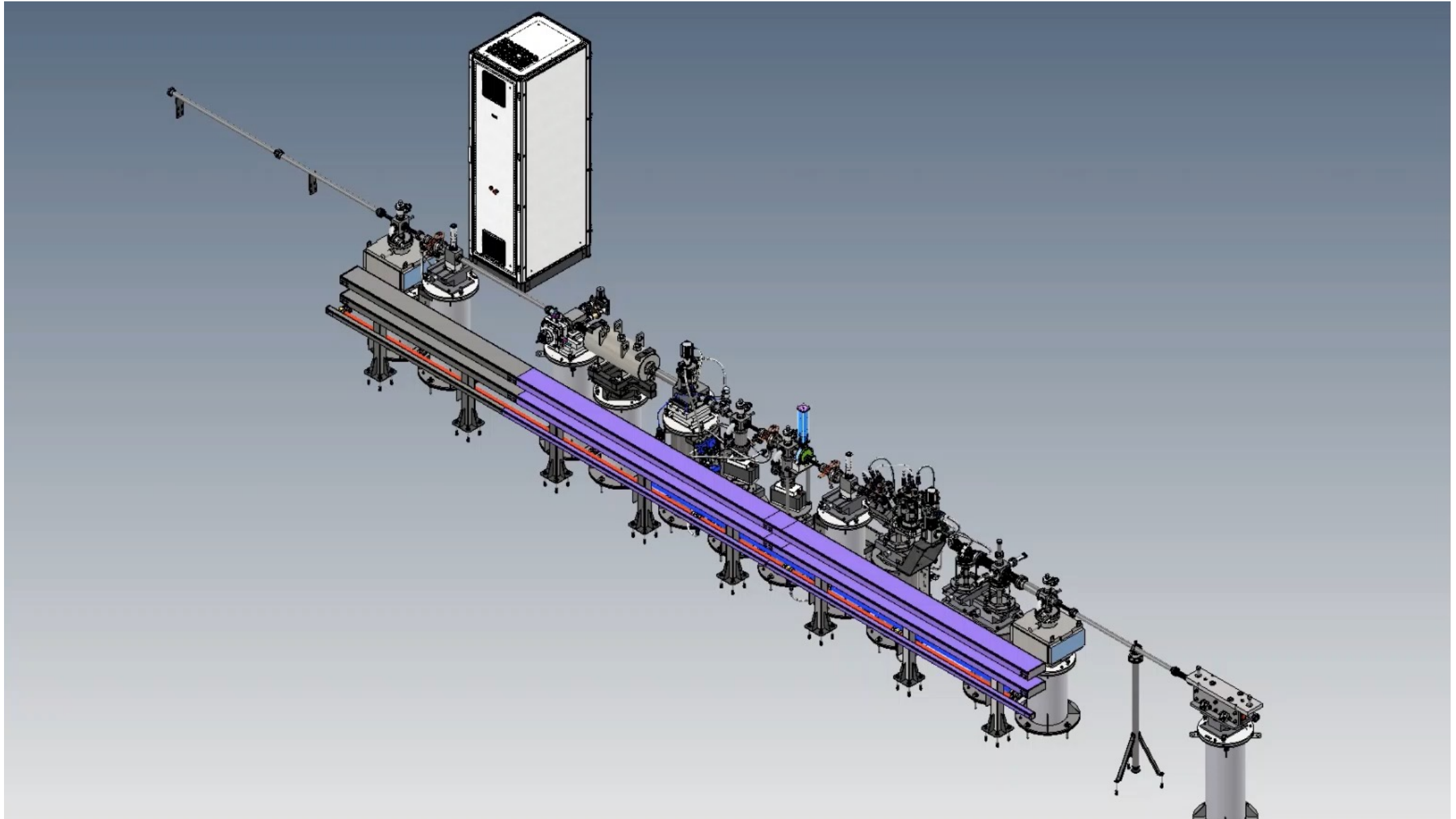
## План работ на 5 лет:

- годы 1-2: создание ЦД станции 1-5 и настройка АСУ
- годы 3-4: создание комплексного ЦД ЦКП СКИФ
- год 5: обобщение опыта и разработка методических материалов, создание предварительного национального стандарта на ЦД установок класса мегасайенс

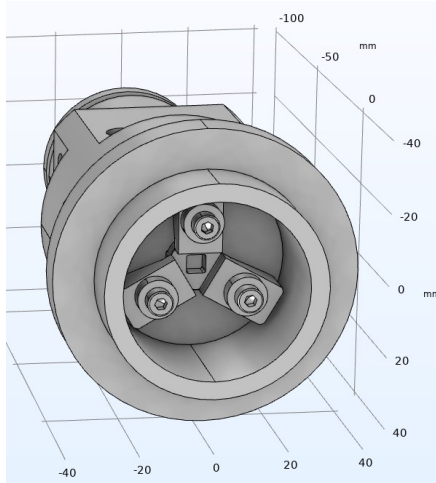
# БЕЗОПАСНОСТЬ ДАННЫХ ЦКП СКИФ – РЕШЕНИЯ ЦЕНТРА НТИ «ТЕХНОЛОГИИ ДОВЕРЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ»



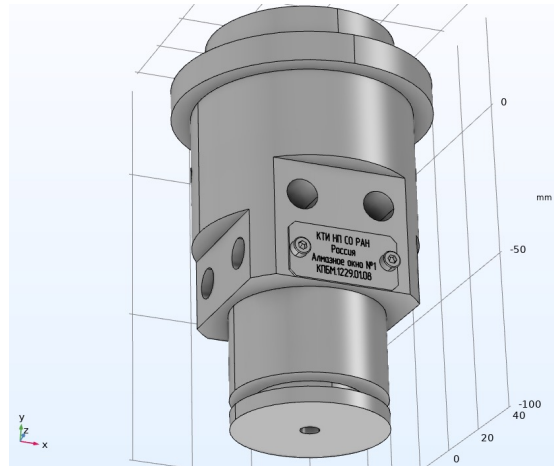
# ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК АЛМАЗНОГО ОКНА ФРОНТЕНДА СТАНЦИИ



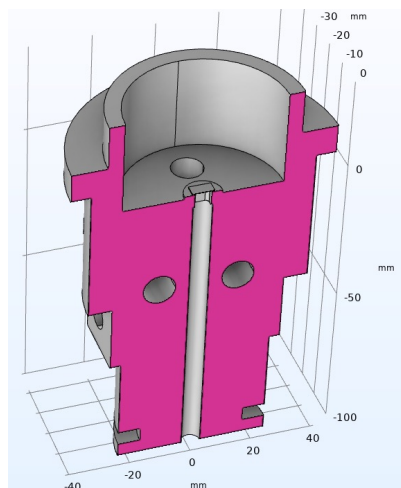
# ОСНОВА ДЛЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА АЛМАЗНОГО ОКНА ФРОНТЕНДА СТАНЦИИ



*Алмазное окно  
(вид с торца)*



*Алмазное окно  
(вид сбоку)*



*Алмазное окно  
(продольное  
сечение)*

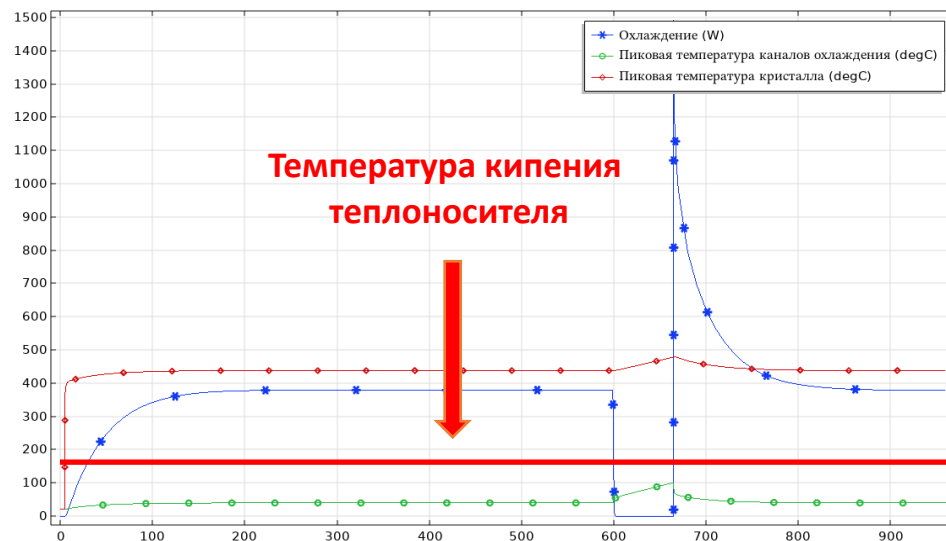
Компьютерная модель алмазного окна монитора пучка фронтенда экспериментальной станции:

- вход – интенсивность излучения
- управление – температура и скорость охлаждающей жидкости
- 3D-моделирование нагрева элемента

На основе подобных моделей элементов будет создан комплекс моделей для станции:

- «классические» - для продолжительного счета в режиме «оффлайн»
- гибридные модели на основе нейросетей - для быстрого счета в режиме «онлайн»

# РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕДАВАРИЙНОГО РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ АЛМАЗНОГО ОКНА



- Алмазное окно выходит на стационарный режим работы через 300 секунд после попадания пучка синхротронного излучения на кристалл
- Выход из строя системы охлаждения (теплоноситель перестал циркулировать по каналам) приводит к росту температуры всей конструкции и в итоге к закипанию теплоносителя на 64 секунде после аварии
- Несмотря на рост внутренних напряжений в алмазе, восстановление работы системы охлаждения через 65 секунд после аварии позволяет избежать его разрушения

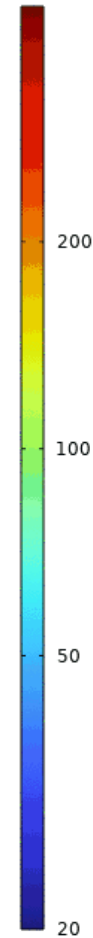
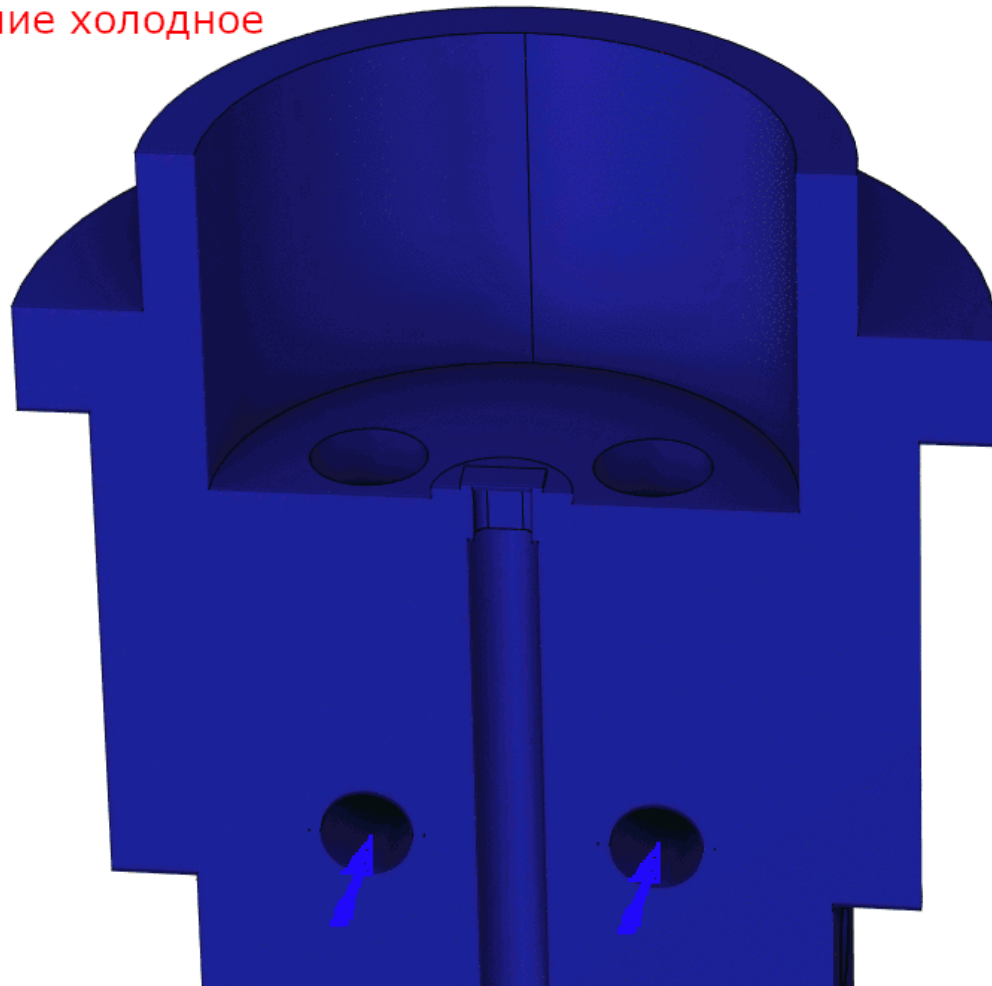
# ВИРТУАЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ С МОДЕЛЬЮ АЛМАЗНОГО ОКНА ФРОНТЕНДА СТАНЦИИ 1-1



Time=0 s

Исходное состояние  
Изделие холодное

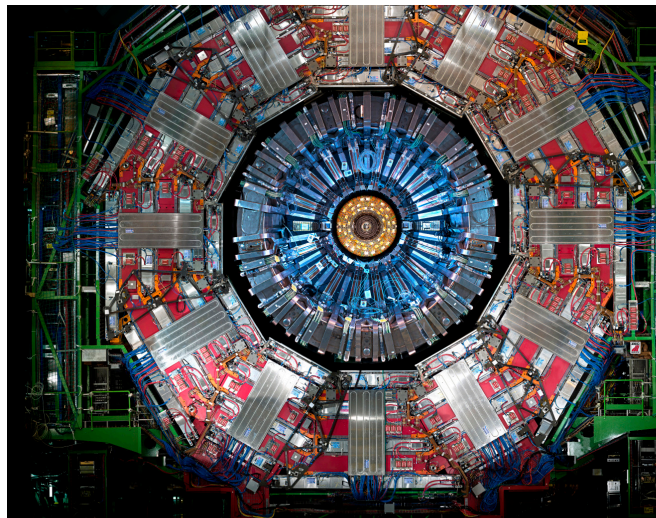
Volume: Temperature T (degC)



Проведем виртуальный эксперимент, имитирующий выход из строя системы охлаждения, по сценарию:

- включение пучка синхротронного излучения
- выход на стационарный режим
- работа в стационарном режиме
- выход из строя системы охлаждения
- работа без охлаждения (нагрев)
- восстановление охлаждения
- возврат в стационарный режим (охлаждение)





В перспективе результаты выполнения проекта по созданию комплексного ЦД ЦКП СКИФ будут использованы при разработке платформы для создания комплексных цифровых двойников установок класса мегасайенс.

**ВАЖНО: включение профильных организаций в консорциум по созданию комплексного ЦД ЦКП СКИФ**

[marchenko@sscc.ru](mailto:marchenko@sscc.ru)