



СИБИРСКИЙ КОЛЬЦЕВОЙ
ИСТОЧНИК ФОТОНОВ

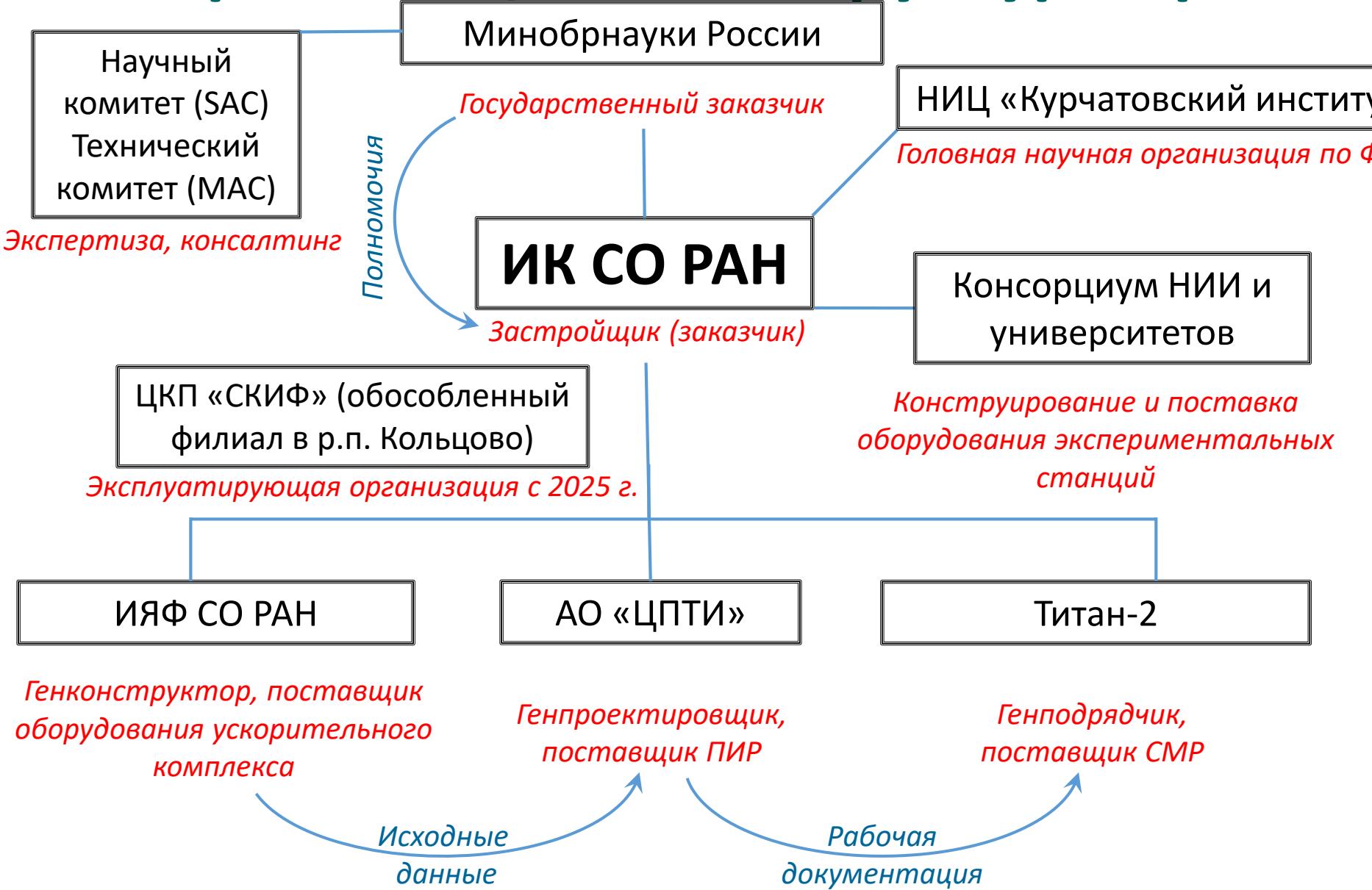
ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ КОЛЬЦЕВОЙ ИСТОЧНИК ФОТОНОВ»
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«ИНСТИТУТ КАТАЛИЗА ИМ. Г.К. БОРЕСКОВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

Источник синхротронного излучения ЦКП «СКИФ»: статус реализации и исследовательские возможности

Рубцов Иван Андреевич, Бухтияров А.В., Левичев Е.Б., Бухтияров В.И.



Организационная структура проекта

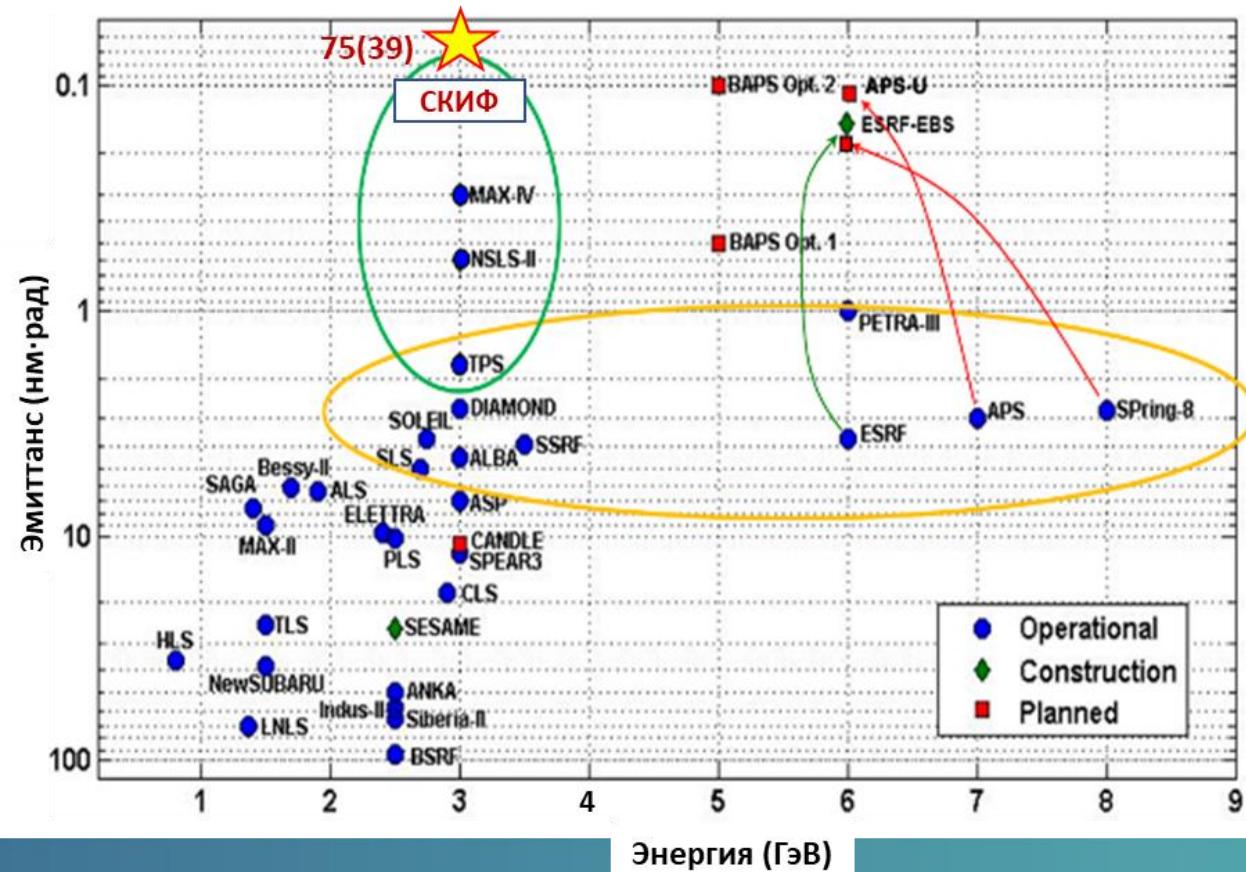


- Здания и инженерные сети
 - Ускорительно-накопительный комплекс
 - Экспериментальные станции

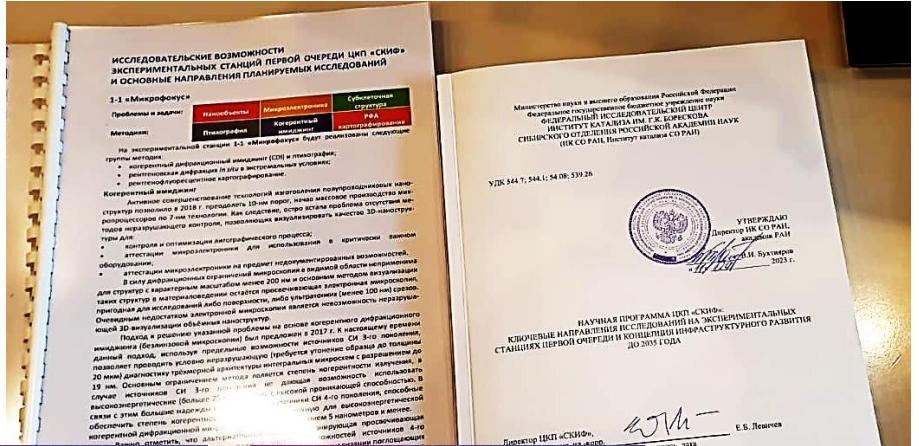
Основные параметры

Рабочая энергия	3 ГэВ
Периметр	476 м
Эмиттанс	75 пм*рад
Электрическая мощность	12 000 кВт
Экспериментальных станций 1-й очереди	6
Полное количество экспериментальных станций	30
Персонал – новые рабочие места	474 (в т.ч. 200 н.с.)
Площадь участка	30 Га
	34 здания и сооружения

ЦКП «СКИФ» на момент запуска
станет лучшим источником
синхротронного излучения в мире



Научная программа ЦКП «СКИФ»



Нефте- и газодобыча

- Динамическая 3D-визуализация на масштабе керна
- Высокоразрешающая 3D-субмикронная и нановизуализация пор в нефтеносных породах
- Повышение нефтеотдачи пласта на месторождениях высоковязкой и сверхвязкой нефти

Рентгеновская томография и цифровой керн:

Консорциум «СИ в интересах нефтегазовой отрасли» на Технопром-2023

Газпромнефть НТЦ
ИТУ
ИК СО РАН, СКИФ
ИТП
ИФИ РАН
ИФГ СО РАН
ИФИ СО РАН

СКИФ
Сибирский кольцевой источник фотонов

Химические технологии

- Пластики и полимеры
- Органический синтез
- Нефтехимия
- Кatalитические технологии

Примеры задач из практики мировых центров:

- 3D исследование распределения потоков жидкости и нефти при моделировании гидроразрыва пласта
- Изучение поведения смешанных флюидов (нефть, вода, газ и песок), образующихся в пласте, при изменении температуры и давления при выходе на поверхность
- Исследование реальных катализаторов (гранулы, матрицы) в процессе эксплуатации – активация/дезактивация, старение, истирание

Потенциальные пользователи:

Газпром нефть Красцветмет и многие другие

СКИФ
Сибирский кольцевой источник фотонов

«Зеленая» энергетика

- Солнечные батареи
- Литий-ионные аккумуляторы
- Топливные элементы
- Материалы для хранения водорода
- Производство биотоплива
- Переработка и утилизация CO₂

Масштабируемое производство первовскитных солнечных элементов

Изучение механизма зарядки литий-ионных батарей

Потенциальные пользователи:

РОСНАНО
Лиотех
Газпром нефть и многие другие

СКИФ
Сибирский кольцевой источник фотонов

Файлы доступны для скачивания: <https://disk.yandex.ru/d/gxEldsjlallvHw>

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

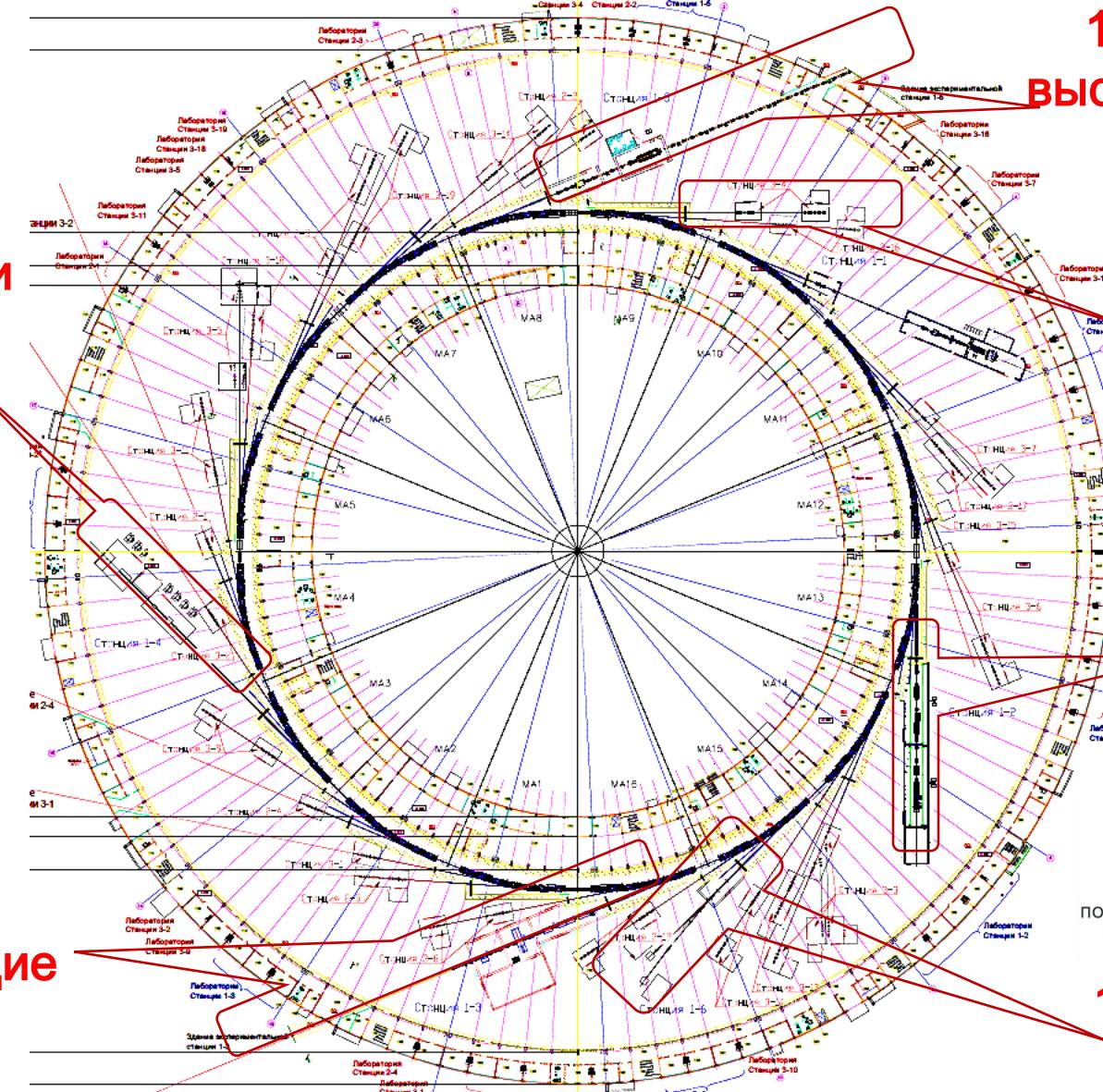
- ✓ 20.09.2023 – Заслушана и одобрена на заседании Президиума СО РАН
- ✓ 23.04.2024 – Заслушана на совместном заседании Президиума РАН и НТС синхротронной-нейтронной ФНП
- ✓ 20.11.2024 - Заседание Совета ФНП Представить предложения по формированию научной программы национальной сети синхротронных и нейтронных исследований с учетом разработанной научной программы ЦКП "СКИФ"

Станции 1ой очереди ЦКП «СКИФ»

№ п/п	Название станции (диапазон энергии)	Реализованные методики
1-1	«Микрофокус» (5-47 кэВ)	Многоэлементный флуоресцентный анализ и картографирование. Микротомография. Монокристальная дифракция. Порошковая дифракция. Рентгеновская дифрактометрия
1-2	«Структурная диагностика» (5-40 кэВ)	Рентгеновская порошковая дифракция высокого разрешения Монокристальная дифракция (макро- и малые молекулы)
1-3	«Быстропротекающие процессы» (15-100 кэВ)	Высокоскоростная рентгенография и томография (X-Ray Imaging), Малоугловое рентгеновское рассеяние с высоким временным разрешением (TR-SAXS), Дифракция с высоким временным разрешением (TR-WAXS), Дифракционные схемы Лауэ и Дебая - Шеррера для изучения моно- и поликристаллов
1-4	«XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм» (2.5-35 кэВ)	Рентгеновская спектроскопия поглощения EXAFS и XANES
1-5	«Диагностика в высоко-энергетическом рентгеновском диапазоне» (25-200 кэВ)	Рентгеновская порошковая дифракция, Энергодисперсионная дифракция, Рентгенофлуоресцентный анализ, Рентгеновская микроскопия и томография.
1-6	«Электронная структура» (0.01-2 кэВ)	РФЭС, РФЭС ВД (NAP XPS), ФЭС УР (Spin ARPES)
1-7 (1-46)	«Базовые методы синхротронной диагностики...» (0.01-2 кэВ)	Рентгеновская спектроскопия поглощения, Рентгеновская порошковая дифракция, Монокристальная дифракция



1-3
Быстропротекающие
процессы



1-5 Диагностика в
высокоэнергетическом
рентгеновском
диапазоне



1-4 XAFS
спектроскопия и
магнитный
дихроизм

1-1 Микрофокус
ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХ



1-2 Структурная
диагностика



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



1-6 Электронная
структура

Актуальное состояние работ по Станциям 2ой очереди

Станция	Инициаторы	Отв. лицо от СКИФ	Статус
1. Станция 1-7 (1-46)	НГУ, ИК СО РАН, ЦКП «СКИФ»	Сараев А.А.	Разработка КД
2. Станция 1-8 «Спектроскопия и метрология МРД»	ЦКП «СКИФ»	Николенко А.Д.	Разработка ЭП
3. Станция 2-1 «Инженерное материаловедение»	НГТУ, ЦКП «СКИФ»	Довженко Г.Д.	Разработка ЭП
4. Станция 2-2 «Белок»	МФТИ, ЦКП «СКИФ»	Архипов С.Г.	Разработка ЭП
5. Станция 2-3 ИК-диагностика	МТЦ СО РАН, ЦКП «СКИФ»	Вебер С.Л.	Разработка ЭП
6. Станция БелСИ	НАНБ, ЦКП «СКИФ»	Платунов М.С.	Обсуждение Концепции
7. Станция 3-6 УРАЛ (Рутинный РФЭС)	ИФМ УрО РАН, ЦКП «СКИФ»	Терещенко О.Е.	Разработка ЭП
8. Станция 3-3 «Поверхность»	ИСЭ РАН, ЦКП «СКИФ»	Шмаков А.Н.	Разработка ЭП
9. Станция РФА-Геология	ТПУ, ИГМ СО РАН, ЦКП «СКИФ»	Дарьин Ф.А.	Разработка ЭП
10. Станция 2-8 БиоМУРР	КНЦ СО РАН, ЦКП «СКИФ»	Архипов С.Г., Ларичев Ю.	Обсуждение Концепции
11. Станция 2-5 Наноскоп	ИФМ (Нижний Новгород), ЦКП «СКИФ»	Николенко А.Д./Купер К.Э.	Обсуждение Концепции
12. Станция 2-7 X-Techno	ИЯФ СО РАН, ЦКП «СКИФ»	Золотарёв К.В.	Обсуждение Концепции

Актуальное состояние работ по Станциям 2ой очереди

Станция	Инициаторы	Отв. лицо от СКИФ	Статус
13. РСА	НГУ, ИК СО РАН, ЦКП «СКИФ»	Захаров Б.А.	Обсуждение концепции
14. Вирусология	ВЕКТОР, ЦКП «СКИФ»	Зубавичус Я.В.	Обсуждение концепции
15. Магнетизм/Дихроизм	ЦКП «СКИФ»	Платунов М.С.	Обсуждение концепции
16. Когерентный имиджинг	ЦКП «СКИФ»	Купер К.Э.	Обсуждение концепции
17. Люминесценция	УрФУ, МГУ, Гиредмет	Завьялов А.П.	Обсуждение концепции
18. Диагностика пучка в рентгеновском диапазоне	ИФМ РАН	???	Обсуждение концепции
19. Метрология в жестком рентгеновском диапазоне	ЦКП «СКИФ»	Хомяков Ю.В., Дарьин Ф.А.	Обсуждение концепции

Поэтапный ввод ЦКП «СКИФ» в эксплуатацию

№	Название этапа	Срок	Краткое описание результата
1	Монтаж оборудования инжектора	Ноябрь 2024	Переданы необходимые помещения и начата сборка линейного ускорителя и бустерного синхротрона
2	Запуск линейного ускорителя	Декабрь 2024	Получен пучок электронов в линейном ускорителе
3	Работы с бустерным синхротроном	Март 2025	Пучок электронов инжектирован из линейного ускорителя в бустерный синхротрон
4	Монтаж оборудования накопителя	Май 2025	Начаты ПНР оборудования накопителя и первых шести экспериментальных станций
5	Инжекция пучка в накопительное кольцо	Октябрь 2025	Пучок электронов с энергией 3 ГэВ инжектирован в накопительное кольцо. Получена циркуляция
6	Создание источника синхротронного излучения поколения 4+	Декабрь 2025	Получены проектные параметры электронного пучка. Начаты эксперименты с синхротронным излучением на станции диагностики пучка
7	Введение в эксплуатацию всех станций первой очереди	Поэтапно в течении 2026 г.	Проведены пуско-наладочные работы по всем шести станциям первой очереди, начаты первые эксперименты
8	Промышленная эксплуатация источника СИ ЦКП «СКИФ»	Декабрь 2026	Начата промышленная эксплуатация ЦКП «СКИФ» силами отечественных и зарубежных пользователей



Станция 1-3 «Быстропротекающие процессы»

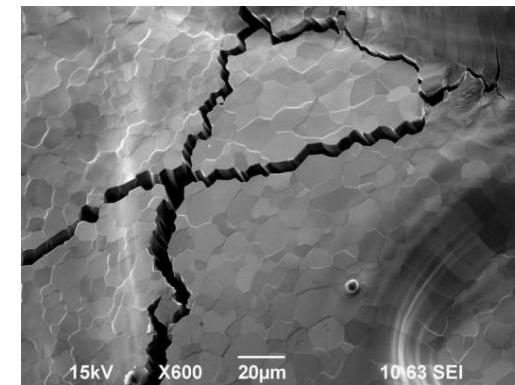
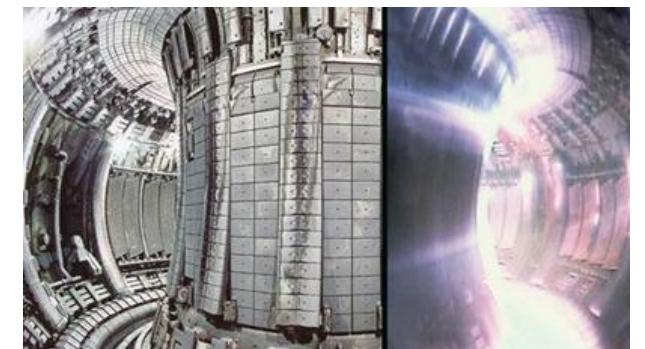
Секция «Динамические процессы»

Свойства энергетических материалов, структура ударного и детонационного фронта, уравнение состояния, фазовые переходы при сжатии, химические реакции, динамическое формирование наноструктур, скоростное деформирование и разрушение материалов.



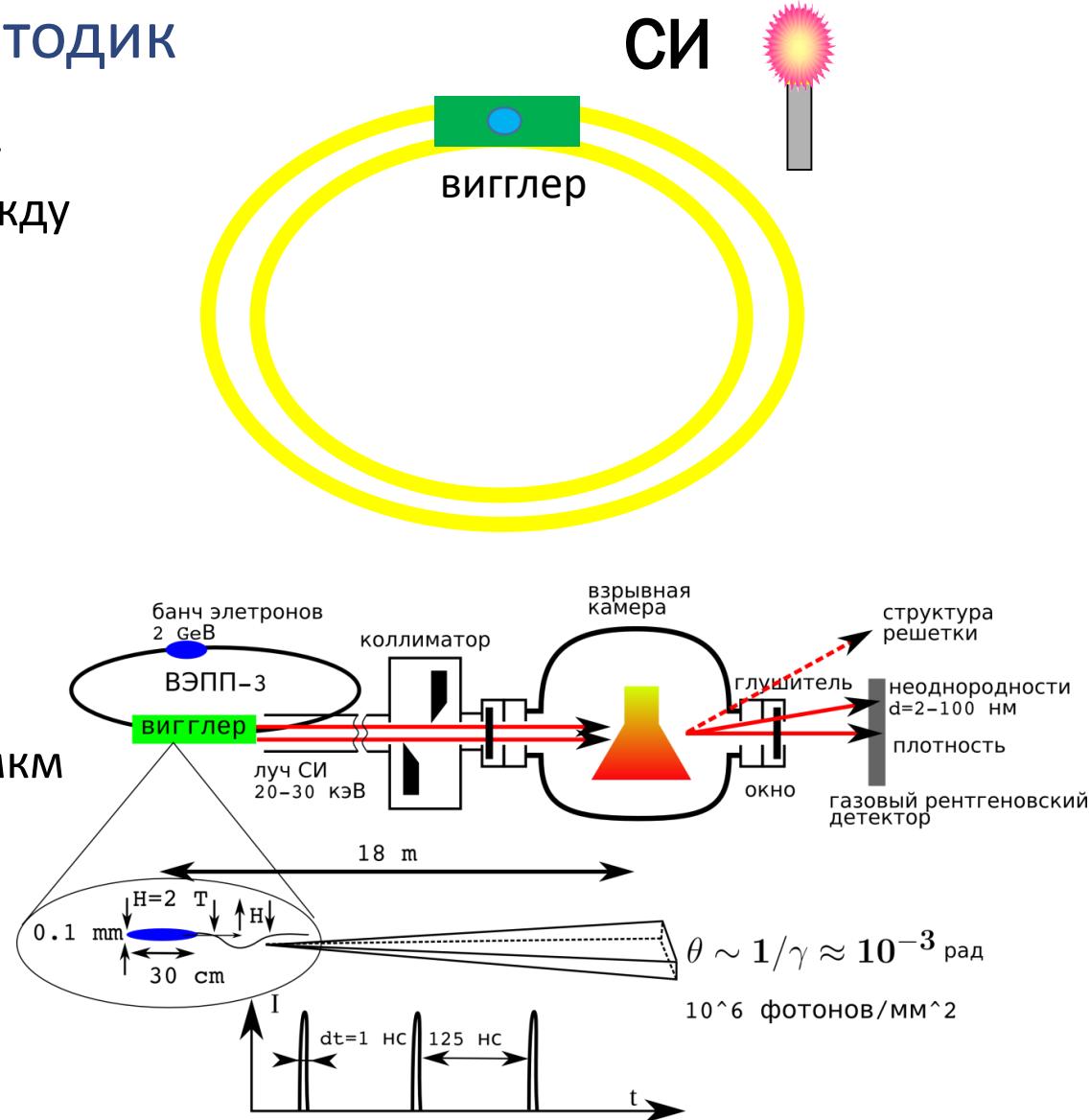
Секция «Плазма»

Исследование воздействия высокой температуры и плазмы на материалы в условиях термоядерного реактора. Используя дифракционные методики, будет исследоваться изменение кристаллической структуры образцов и возникающие в них деформации.



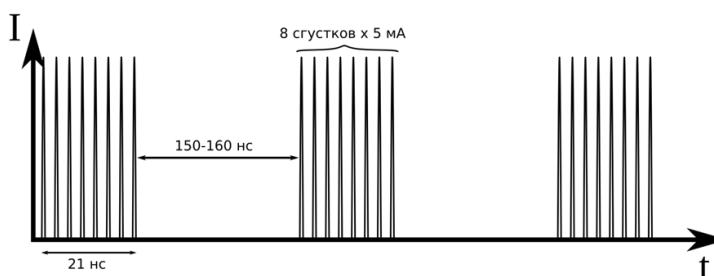
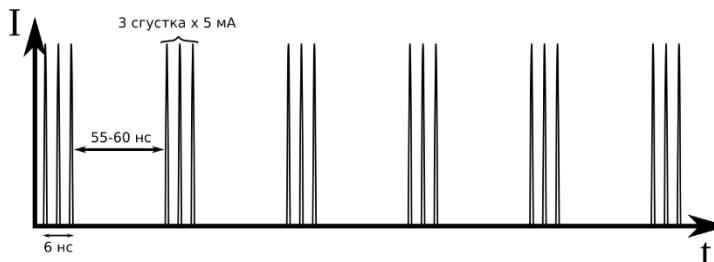
Характеристики запланированных методик

- **Рентгенография 2d** (фотографирование люминофора) – пространственное разрешение 100x100 мкм, время между кадрами 100 нс, возможность снимать 8 кадров.
- **Рентгенография 1d** (газовый и твердотельный микростриповый детектор) – пространственное разрешение 50 мкм, время между кадрами 50 нс, возможность снимать 100 кадров.
- **Рентгенография 0d** (фотокатод) – время между измерениями ограничено скважностью банчей (3 нс).
- **Малоугловое рентгеновское рассеяние** – регистрация рассеяния на частицах в диапазоне размеров 2 нм – 1 мкм с временным разрешением между кадрами 50 нс.
- **Рентгеновская дифракция с высоким временным разрешением** – регистрация структуры межатомной решетки и фазового состава монокристаллов и поликристаллов.



Временные характеристики пучка СИ

- 567 сепаратрис, периметр 477.06 м, частота обращения 628.4167 кГц, 1 оборот = 1.591 мкс, длина сгустка 1.45 см, число сгустков 255, полный ток 400 мА, ток сгустка в стандартном режиме $1.57\text{mA}=1.55*10^{10}$ электронов.



Время между бunchами	Распределение по периметру	Ток в ускорителе, мА	Количество bunchей
6.2 нс	Равномерное заполнение	400	255 $T=1591$ нс
до 2.8 нс	Поезд (train)	до 400	≈ 70 bunchей
30 нс	Равномерное заполнение	350	53 bunchа
50 нс	Равномерное заполнение	160	32 bunchа
133 нс	Равномерное заполнение	60	12 bunchей

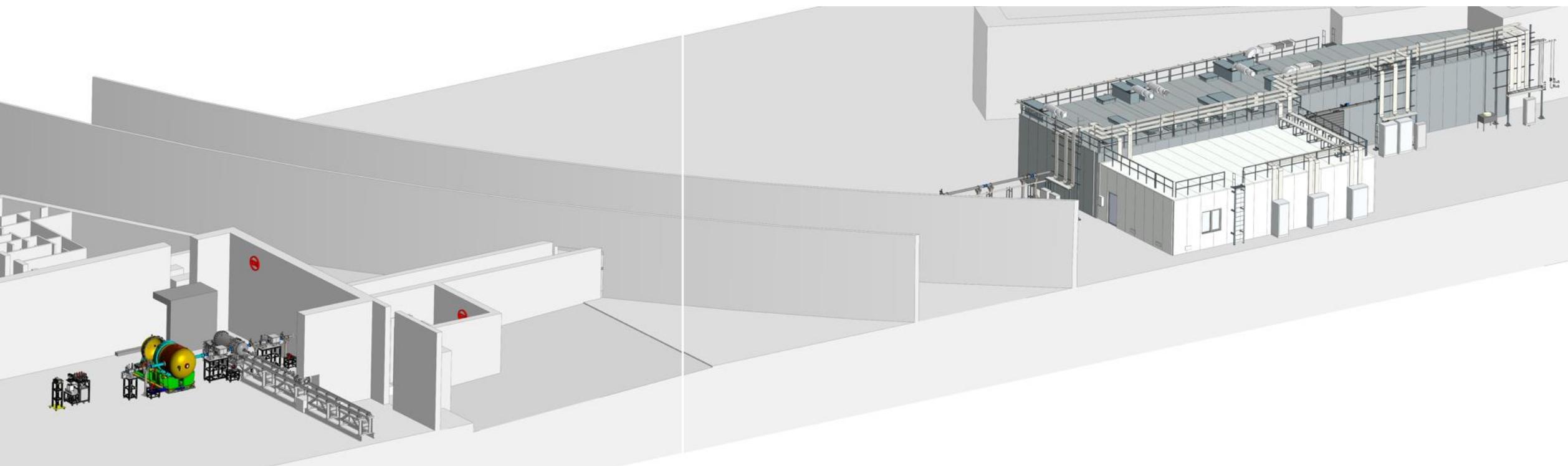
Схема станции 1-3 «Быстропротекающие процессы»

Станция располагается в двух зданиях:

- Здание накопителя
- Отдельное здание Станции 1-3
- Протяженность канала 130 метров

Основное экспериментальное оборудование:

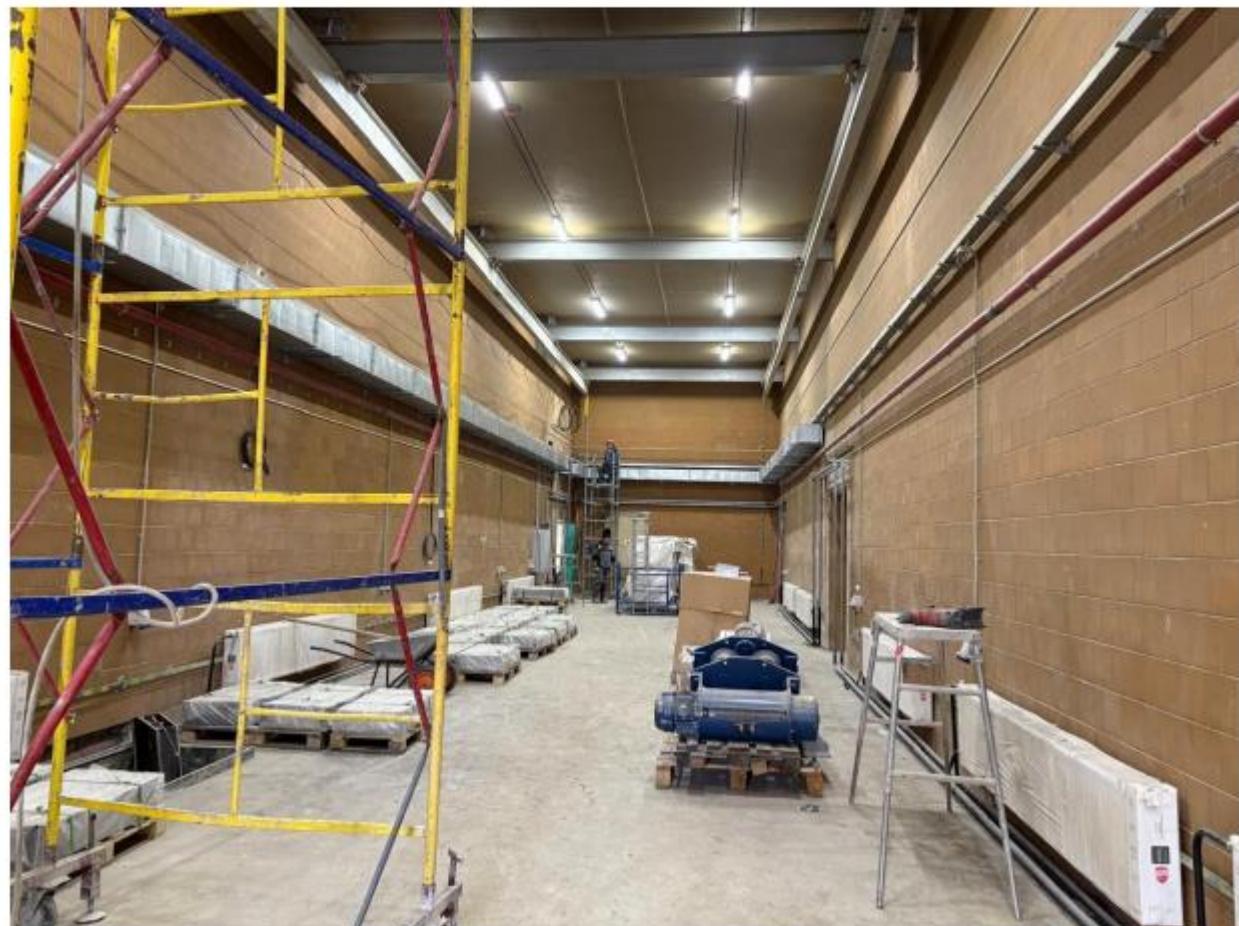
- Взрывная камера (2 кг в т.э.)
- Пневматические устройства высокого давления (пушки калибром 20 и 50 мм)





Фотоотчёт по объекту: «Здание экспериментальной станции 1-3»
13.05.25г.

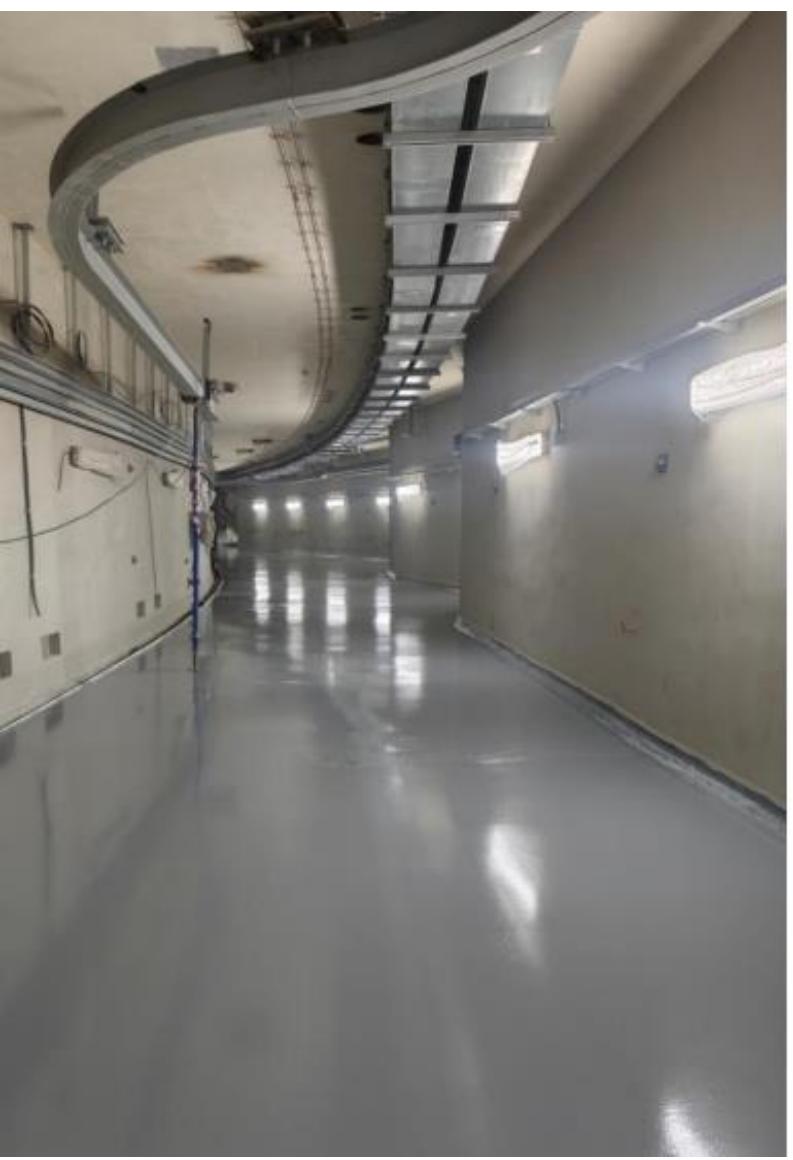
пом.№101

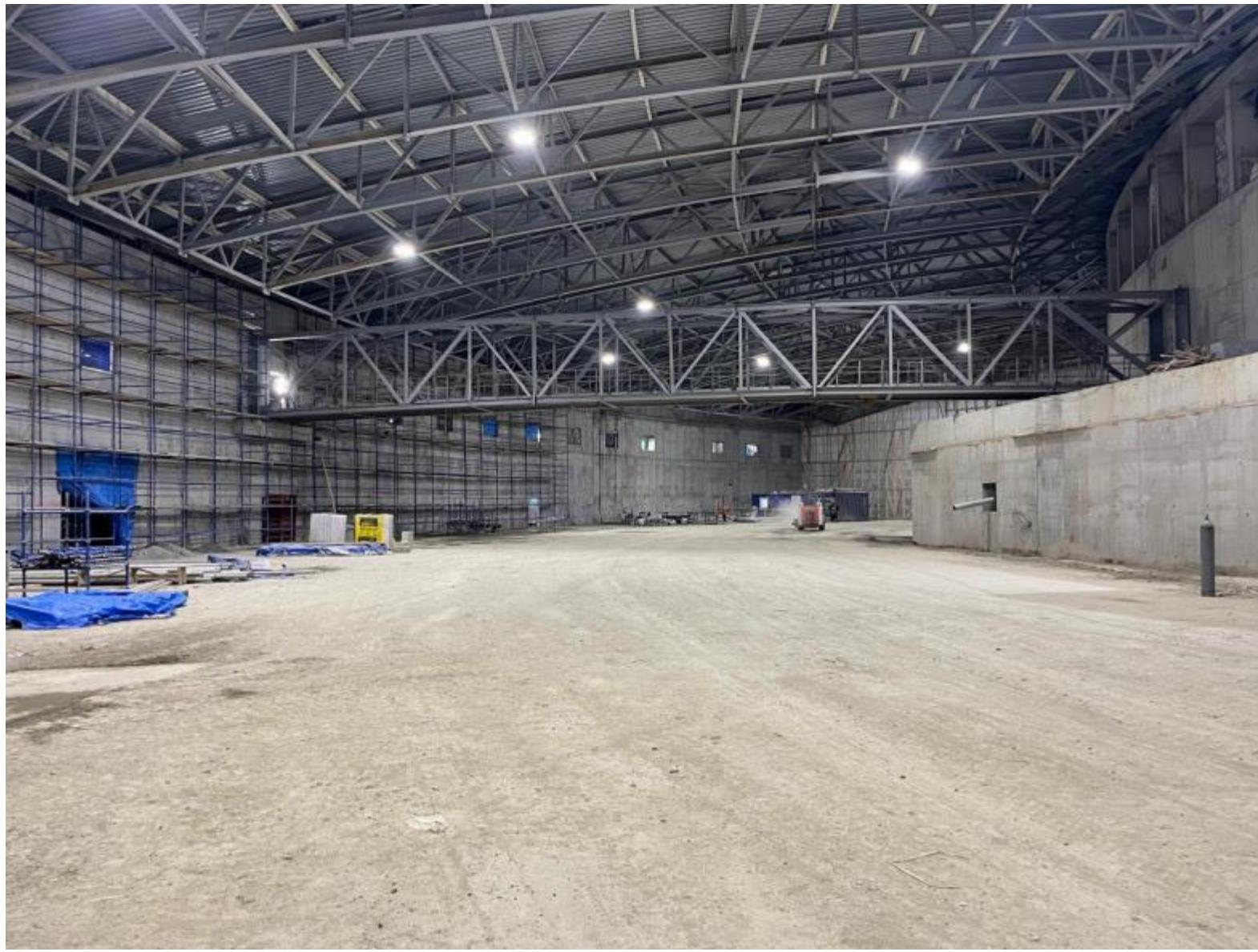


пом.№108









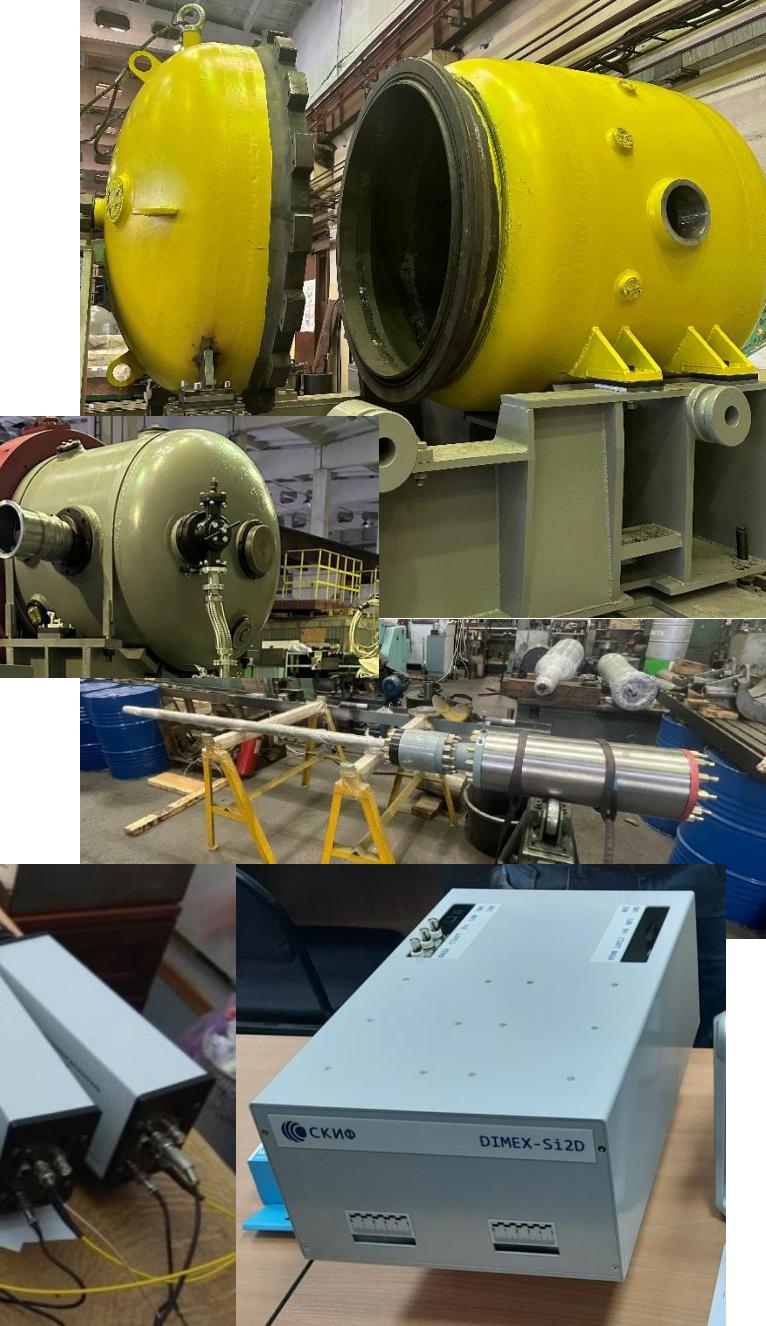


Предложения по развитию взаимодействия

Целью проекта является создание исследовательского центра реализующего широкий спектр экспериментальных методик, в т.ч. для исследования динамических процессов с использованием синхротронного излучения.

Для эффективной загрузки экспериментального оборудования необходима кооперация и активное участие в работе широкого спектра организаций России. Практика загрузки оборудования такого класса – 24 часа * 7 дней в неделю. Это значительно больше возможностей одной организации.

Основными задачами проекта являются поисковые исследования, развитие новых экспериментальных методик и получение научных знаний на новом уровне. Также предполагаются работы по решению конкретных технологических задач: материалы, образцы, элементы конструкций и постановки заказчика.





*С пожеланием развития
сотрудничества!*



РОСАТОМ



Пермский
моторный завод
ОДК



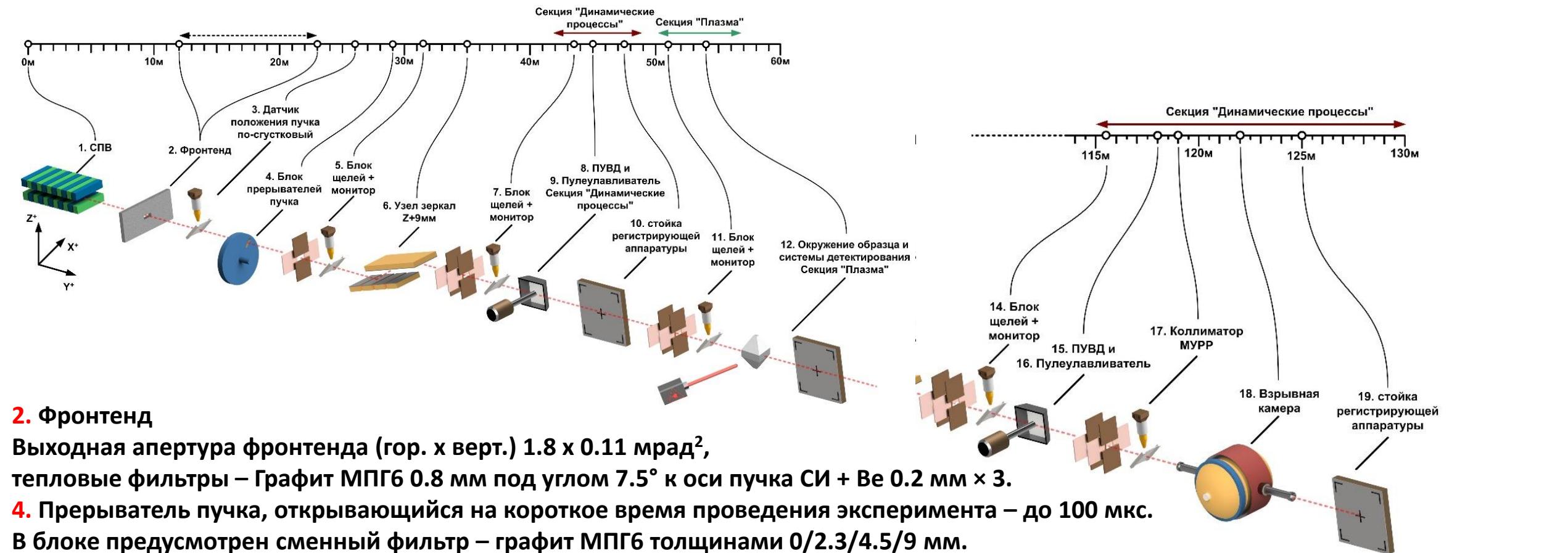
Новосибирский
государственный
университет
*НАСТОЯЩАЯ НАУКА



Ваша организация...



Станция 1-3. Оптическая схема



2. Фронтенд

Выходная апертура фронтенда (гор. x верт.) 1.8×0.11 мрад 2 ,

тепловые фильтры – Графит МПГ6 0.8 мм под углом 7.5° к оси пучка СИ + Be 0.2 мм \times 3.

4. Прерыватель пучка, открывающийся на короткое время проведения эксперимента – до 100 мкс.

В блоке предусмотрен сменный фильтр – графит МПГ6 толщинами 0/2.3/4.5/9 мм.

5. Блок рентгеновских коллиматоров с повышенной тепловой нагрузкой (щели), с апертурой 60 (гор.) \times 6 (верт.), мм 2 .

6. Узел зеркал представляет собой рентгенооптическую систему, состоящую из двух сегментированных зеркал Au на подложке Si(100), первое – концентратор (состоит из 10 секций), второе – ориентационное, Z+9мм. Окна Be 0.2 мм \times 2.

7, 11, 14, 17. Блок нерассеивающих рентгеновских коллиматоров (щели), с апертурой 100 (гор.) \times 15 (верт.), мм 2 , расстояние между комплектами щелей внутри блока – 300 мм.

Центры, исследующие быстропротекающие процессы пучками СИ и протонов	Вставное устройство	Объекты исследования			Методики			
		Динамическая прочность материалов, взрывные процессы конструкций. 0.1-1 ГПа	Энергетическая энергия материала, взрывные процессы 10-30 ГПа	Ударные волны (пушки) 1-50 ГПа	Ударные волны (лазеры) 50-500 ГПа	Рентгенография (imaging)	Малоугловое рентгеновское рассеяние (SAXS)	Дифракция (XRD)
США, Los Alamos National Laboratory, Ускоритель протонов 0.8 ГэВ, 1999 г.	Протоны 0.8 ГэВ		100 г. ВВ			2d, dt 100 нс, dx 0.2 мм, L 100x100 мм ²		
Россия, Протвино и Саров, Ускоритель протонов У70, раньше 2009 г.	Протоны 70 ГэВ		1000 г. ВВ			2d, dt 100 нс, dx 0.2 мм, L 60x60 мм ²		
Россия, Новосибирск, ИЯФ, ВЭПП3, 2000 г.	Вигглер, 20 кэВ		50 г. ВВ			1d, dt 124 нс, dx 0.1 мм, L 40 мм	124 нс	-
США, Аргонская лаборатория, APS, The Dynamic Compression Sector, 2009 г.	Ондулятор 10, 20 кэВ		3 г.	U 1 км/с, d 12 мм	100 Дж, 1012 Вт/см ² , 0.25-1 мм, 300 ГПа	2d, 500 нс, 10x10 мм ² .	2d, 10-100 нс	2d, dt 10-100 нс
Россия, Новосибирск, ИЯФ, ВЭПП4, 2013 г.	Вигглер 40 кэВ		250 г. ВВ	U 0.5 км/с, d 20 мм		1d: 150 нс, 0.1 мм. 2d: 150 нс, 0.1 мм	150 нс.	100 мкс
Германия, Гамбург, XFELL, 2018 г.	Ондулятор, 8, 24 кэВ				100 Дж, 10 нс	Фазоконтрастное изображение (PCI).		
Франция, Гренобль, ESRF, каналы ID24, ID19, ID09, 2018 г.	Ондулятор + вигглер			U 0.5 км/с, d 12 мм	Лазер пока строят. Аналог (XFEL)	Радиография просвечивающая и фазоконтрастная, рассеяние, дифракция, спектроскопия.		
Англия, Diamond Light Source, канал I12, 2014 г.	Вигглер, 50 - 150 кэВ	Прочность нагруженных конструкций (авиадвигатели)		U 0.5 км/с, d 12 мм)		2d, 1 мкс, L 5x5 мм ²		
Россия, СКИФ, 2024 г.	Вигглер, 30 - 70 кэВ		200 г., 2000 г. ВВ	U 1 км/с, d 30 мм		0d 1 нс (стрейк камера), 1d 50 нс, 2d 10 – 100 нс		1d; 2d: dt 50 нс

Научная программа ЦКП «СКИФ»

1. Каталитические технологии. В химической промышленности в настоящий момент около 90% используемых технологий, обеспечивающих около 10-15% материальной составляющей ВВП России, относятся к каталитическим. В связи с этим обеспечение широкого фронта исследований в области катализа имеет не только научное, но и ярко выраженное практическое значение, так как востребованность в разработке новых высокоэффективных катализаторов и каталитических процессов крайне высока. Результаты *in situ* и *operando* исследований, которые возможно будет проводить на СКИФ позволят развить подходы к целенаправленному синтезу новых, а также оптимизации и модификации уже существующих каталитических систем.

2. Нефтегазовая промышленность. Методы рентгеновской томографии позволяют проводить визуализацию *in situ* процессов в геоматериалах. При этом рентгеновская томография отличается высоким разрешением и скоростью съемки. При уровне разрешения 1 мкм для параллельной геометрии рентгеновская томография превосходит все другие методы трехмерной визуализации для быстрых динамических процессов. Характерное время для одного полного сканирования составляет около 1–5 минут, в зависимости от размера образца, оптики прибора и аппаратных ограничений. Изучение при помощи таких методов исследования пористой структур нефте- и газоносных пород (кернов) позволит развить технологии для повышения эффективности добычи нефти и газа.

3. Химические источники тока и водородная энергетика. Стремительное развитие электрохимических устройств запасания и преобразования энергии стимулирует разработку новых материалов для электродов топливных элементов, электролизеров, аккумуляторов, суперконденсаторов и т.д. Планируемые к реализации на СКИФ методы исследования позволяют изучать процессы, протекающие в электрохимических системах на границе раздела между электродом и электролитом, в том числе в режимах *in situ* и *operando*. Такие исследования позволят проводить разработку и тестирование новых материалов для электродов топливных элементов, электролизеров, аккумуляторов, суперконденсаторов и т.д.

4. Металлургия и композитные материалы. Целенаправленная оптимизация структуры, состава и, соответственно, свойств новых сплавов и композитных материалов для различных приложений, включая авиа- и судостроения. Исследование поведения различных материалов при динамических нагрузках, горении и разрушении.

5. Биомедицина и фармакология. Аттестация фармацевтических субстанций, разработка новых лекарственных средств, лекарственных форм, терапия сложных онкологических заболеваний.

6. Полупроводниковая промышленность. Исследование 3D-микроструктуры чипов с целью контроля и оптимизации их характеристик. Поиск перспективных материалов для приложений современной электроники. Динамика кристаллической структуры новых функциональных материалов (топологические изоляторы, сверхпроводники, сильнокоррелированные системы, новые магнитные материалы).

Файлы доступны для скачивания: <https://disk.yandex.ru/d/gxEldsjlallvHw>