

**Пояснительная записка к проекту создания уникальной  
инфраструктуры для фундаментальных и прикладных исследований в  
Новосибирском научном центре.**

**Центр коллективного пользования  
«СКИФ»  
(Сибирский кольцевой источник фотонов)**



**Новосибирск, 2018**

## Содержание:

1. Краткое описание проекта.	3
2. Особенности проекта, его уникальность.	5
3. Техническое описание.	7
4. Инструментальная база, перечень решаемых задач.	12
5. Научная и практическая значимость проекта.	23
6. Основные участники.	25
7. Предложения по подготовке кадров.	26
8. Расположение установки, привязка к источникам энергии.	29
9. Международное сотрудничество в рамках реализации проекта.	30
10. Текущее состояние	33
11. Календарный план-график реализации проекта.	37
12. Стоимость проекта, требуемая вспомогательная инфраструктура.	40

В подготовке Пояснительной записки к проекту принимали участие сотрудники ИЯФ СО РАН, ИК СО РАН, ИГМ СО РАН, ИНХ СО РАН, ИХТТМ СО РАН, ИХБФМ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, ИЦИГ СО РАН и других научно-исследовательских организаций СО РАН, НГУ и НГТУ.

Работа ведётся на основании:

1. Указа Президента Российской Федерации от 01.12.2016 № 642 "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации" (п. 21, п. 30 г, п.32, п. 39 б, п. 45).
2. Поручения Президента Российской Федерации В.В. Путина от 18 апреля 2018 года п. 1б. и п.4.
3. Указа Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204 "О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года".

## 1. Краткое описание проекта.

**Цель проекта:** Реализация пилотного проекта ЦКП «СКИФ» с целью создания сети современной исследовательской инфраструктуры на базе источников синхротронного излучения нового поколения с головной машиной в НИЦ «Курчатовский институт».

**Актуальность:** Реализация проекта позволит на десятилетия обеспечить Сибирский регион высокопроизводительной современной инфраструктурой для решения актуальных задач материаловедения (включая технологии двойного назначения), биологии и медицины, создать условия для проведения исследований и разработок, соответствующие современным принципам организации научной и инновационной деятельности. Центр позволит сконцентрировать, закрепить и развить региональные интеллектуальные и инфраструктурные ресурсы для обеспечения выхода российских научных, образовательных организаций и производственных компаний на глобальные рынки знаний и технологий.

**Планируемая кооперация:** В настоящее время СО РАН в лице Президиума, Объединённых учёных советов СО РАН и более 25 организаций уже поддержали инициативу ИЯФ СО РАН о реализации проекта. Ведутся переговоры с РФЯЦ-ВНИИЭФ и РФЯЦ-ВНИИТФ о совместном развитии технологий производства современных высокочастотных, силовых и магнитных систем. Начато создание кооперации с ВУЗами Новосибирска для развития учебных программ по подготовке молодых специалистов и организации совместных специализированных лабораторий. К настоящему времени уже реализованы пилотные проекты регулярных школ для студентов НГУ, НГТУ и молодых учёных по тематикам развития ускорительной техники и использования синхротронного излучения с целью своевременной подготовки специалистов высокой квалификации, предложена и принята новая магистерская программа. Планируется развитие международной научной кооперации с синхротронными центрами Японии (Spring-8), Китая (BSRF), Таиланда (SPS), Франции (ESRF), Германии (DESY) и другими.

Потребность в инфраструктуре для проведения прикладных исследований с использованием СИ также имеется у ряда региональных и федеральных наукоёмких производств, а также центров инновационного развития (технопарков).

Оценка количества участников на этапе выхода на полную мощность: более 250, из них 200 – научно-исследовательские организации, 10 – ВУЗы, более 30 – промышленные предприятия и организации реального сектора экономики, 10 – иностранные организации.

**Планы развития инфраструктуры:** Планируется строительство здания синхротрона и экспериментального зала, окружающего синхротрон, с наружным диаметром около 220 метров. Также планируется создание лабораторного корпуса, с помещениями для размещения пользователей и персонала, помещениями для пробоподготовки, предварительных и сопутствующих исследований. Общая установочная мощность оборудования - 20 МВт.

**Кадровый потенциал проекта:** При реализации проекта будет создано 300 новых рабочих мест для высококвалифицированных сотрудников (научный, инженерно-технический

персонал) и дополнительно в экспериментальных работах будет задействовано около 100 научных сотрудников ежедневно и около 10 000 ежегодно.

**Необходимое финансирование:** Для сооружения проекта класса мегасайенс в полном объеме необходимо финансирование со стороны Российской Федерации в следующих размерах: 2019 г. – 1 000 млн руб.; 2020 г. - 3 400 млн руб.; 2021 г. – 10 500 млн руб.; 2022 г. – 12 600 млн руб.; 2023 г. – 9 300 млн руб.; 2024 г. – 2 700 млн руб. (направление расходования средств - см. таблицу 12.1).

Сроки реализации 1-ой очереди проекта 2019-2024 годы. За этот период общие инвестиции в проект составляют около 40 млрд. рублей. Введение в эксплуатацию ЦКП «СКИФ» планируется до конца 2024 года. С 2024 года планируется реализация 2-ой очереди ЦКП «СКИФ» (создание и развитие экспериментальных станций) в течение 10 лет (2024 – 2033 годы) и общей стоимостью 27 млрд. рублей.

**Возможные риски:** Имеющийся в ИЯФ, ИК и других организациях СО РАН, а также в НИЦ «Курчатовский институт» опыт создания источников синхротронного излучения и экспериментальных станций, опыт эксплуатации и решения научных и научно-технических задач позволяет с уверенностью говорить о том, что проект будет реализован в срок при обеспечении необходимого поэтапного финансирования.

**Результаты реализации проекта:** Создание и использование современной научно-исследовательской инфраструктуры позволит совершить качественный скачок по следующим направлениям:

- *технологический эффект* – Создание и развитие отечественных технологий в области силовой электроники, высокочастотных систем, систем автоматизации и контроля, систем высокоточного позиционирования, сверхпроводящих систем и многих других. Новые технологии могут быть применены в авиа-, судо- и машиностроении, на предприятиях добывающей и перерабатывающей, микроэлектронной и химической промышленности, энергетике и ВПК.

- *социальный эффект* – Формирование конкурентной инфраструктуры и среды, соответствующей современным стандартам научных исследований, создание новых рабочих мест, укомплектованных молодыми кадрами, и связанное с этим развитие социальной инфраструктуры региона.

- *экономический эффект* – Развитие транспортной, энергетической и технологической инфраструктуры Сибирского региона. Внедрение новых и импортозамещающих эффективных технологий. Трансфер передовых технологий отечественным субподрядным организациям.

- *научный эффект* – Получение новых фундаментальных знаний о строении и свойствах вещества на микро- и наноуровне для решения задач биологии и медицины, химии и катализа, энергетике будущего и других областей.

- *стратегический эффект* – Новый исследовательский центр позволит сконцентрировать, закрепить и развить интеллектуальные и инфраструктурные ресурсы в Сибирском и Дальневосточном регионах, обеспечить устойчивость позиций российских научных, образовательных организаций и производственных компаний на глобальном рынке знаний и технологий.

## 2. Особенности проекта, его уникальность.

Представленный проект направлен на создание в России сети источников синхротронного излучения с пилотной машиной в НИЦ СО РАН (Новосибирск), головной машиной в НИЦ «Курчатовский институт» (Протвино, МО), источником СИ в Дальневосточном Федеральном округе (Владивосток). Предварительные параметры приведены в таблице и будут уточнены на этапе технического проектирования:

	Периметр, метров	Рассчитанный эмиттанс, пм*рад	Количество экспериментальных станций
НИЦ «Курчатовский институт»	1500	10	40-50
НИЦ СО РАН (ЦКП «СКИФ»)	477	186	30
ДФО (ЦКП «РИФ»)	477	186	30

Проект пилотного источника СИ ЦКП «СКИФ» имеет ряд преимуществ по сравнению с зарубежными аналогами в Южной Корее, Австралии, Тайване, Китае и Японии:

- Минимальный эмиттанс при рабочей энергии электронов 3 ГэВ (использование вигглеров-затухателей и других ускорительных решений в перспективе может позволить уменьшить эмиттанс до величин порядка 60 пм\*рад).
- Наличие сверхпроводящих сильнополевых вставных устройств для генерации мощного излучения в жёстком рентгеновском диапазоне.
- Наличие сверхпроводящих короткопериодных ондуляторов, генерирующих пространственно когерентное излучение в диапазоне энергий фотонов 40–80 кэВ.
- Создание уникальных современных мультидисциплинарных экспериментальных станций и сопутствующей научно-исследовательской инфраструктуры, которая выведет целые направления российских исследований на передовые позиции в мире (подробнее, главы 4-5).
- Создание уникальной экспериментальной станции исследования быстропротекающих процессов. Детальное понимание механики и химии взрывных и ударно-волновых процессов позволит решить ряд важных задач в области базовых и критических военных и промышленных технологий для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники. Например, безопасность эксплуатации и эффективность работы устройств и технологий, использующих энергию взрыва, в том числе безопасность и гарантия работоспособности ядерных зарядов; противодействие терроризму; новые материалы с высокой удельной энергоёмкостью для ракетной промышленности; синтез новых соединений в условиях взрыва; взрывной синтез наночастиц углерода с заданными свойствами.

Тесное сотрудничество с НИЦ «Курчатовский институт» как на этапе проектирования пилотной и головной машин, так и на этапе их создания позволит обогатить опыт команд ускорительщиков и пользователей организаций-участников проекта, совместно подготовить ряд технических решений, которые увеличат

внутрироссийский трансфер технологий и внутрироссийскую научно-технологическую кооперацию.

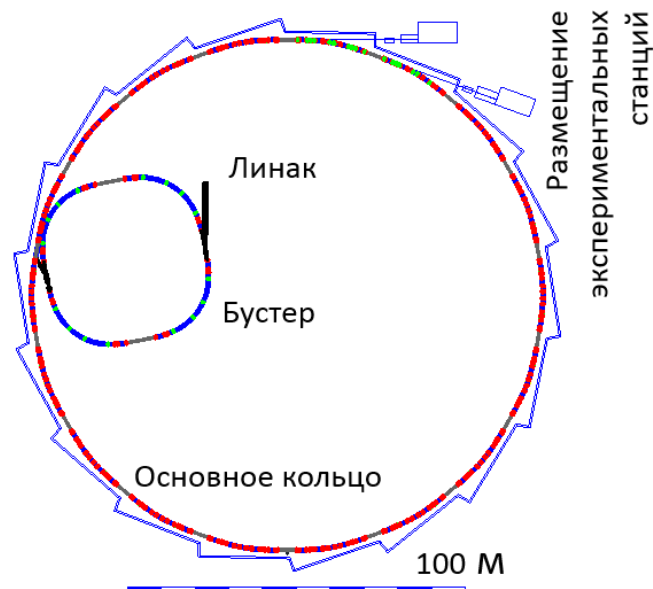
Кроме того, целенаправленная политика, включающая в себя обучение студентов и аспирантов из Дальневосточного региона в процессе реализации проекта в ННЦ СО РАН, позволит своевременно подготовить дееспособный коллектив специалистов в области ускорительной техники и методов синхротронного излучения, развить набор соответствующих компетенций и транслировать их на Дальний Восток. Этот коллектив сможет реализовать проект Дальневосточного источника синхротронного излучения и использовать его мультидисциплинарный инструментарий для развития науки и технологий, закрепить и развить региональные интеллектуальные и инфраструктурные ресурсы.

### 3. Техническое описание проекта.

«СКИФ» (Сибирский кольцевой источник фотонов) состоит из ускорительно-накопительного комплекса, предназначенного для эффективной генерации синхротронного излучения высокой яркости, комплекса пользовательской научно-исследовательской инфраструктуры, предназначенного для получения новых фундаментальных знаний о строении и свойствах вещества на микро- и наноуровне и инженерной инфраструктуры.

#### **Ускорительно-накопительный комплекс.**

Ускорительно-накопительный комплекс состоит из основного кольца – источника СИ и инжекционной части, включающей линейный ускоритель (линак), бустерный синхротрон (бустер), каналы транспортировки электронных пучков от линака до бустера и от бустера до основного кольца и каналы вывода пучков СИ (фронтэнды). Общая схема комплекса представлена на рис. 3.1.



**Рисунок 3.1.** Схема ускорительно-накопительного комплекса.

Линейный ускоритель предназначен для получения начальных электронных пучков и последующей их инжекции в бустер. Инжектор «СКИФа» представляет собой электронную пушку, систему группировки пучка и регулярные ускоряющие секции на основе диафрагмированного волновода. Каждая секция обеспечивается СВЧ-мощностью 50 МВт клистрона, что позволяет получить темп ускорения около 70 МэВ на каждую секцию. Характеристики линака представлены в Табл. 3.1. Пучки электронов из линака проводятся в бустер по низкоэнергетичному транспортному каналу.

Бустер является импульсным ускорителем электронных пучков до проектной энергии основного кольца (3 ГэВ). В данном проекте за основу предполагается взять бустер, разработанный в ИЯФ СО РАН, и успешно запущенный в 2014 г на комплексе NSLS-II в Брукхевенской Национальной Лаборатории (США). Характеристики бустера представлены

в Табл. 3.1. Пучки электронов из бустера проводятся в основное кольцо по высокоэнергетичному транспортному каналу.

В начальном состоянии инжекционный комплекс используется для создания необходимого тока циркулирующих электронов в основном кольце (400 мА). После получения проектного тока, инжекционный комплекс служит для поддержания рабочего тока с точностью до 0.1 %, компенсируя потери энергии пучка электронов на орбите основного кольца.

**Таблица 3.1.** Основные характеристики систем ускорительно-накопительного комплекса.

Линак	Энергия выпуска: 200 МэВ Длина: 15 м Длительность пучка электронов: 0,2 нс
Бустер	Энергия выпуска: 3 ГэВ Периметр: 158 м Длительность цикла ускорения: 1 с
Основное кольцо	Рабочая энергия: 3 ГэВ Периметр: 477 м Максимальный рабочий ток: 400 мА Эмиттанс: 186 пм*рад Количество экспериментальных станций: 30

Основное кольцо является источником СИ и состоит из 18 элементов периодичности (суперпериодов). Каждый суперпериод содержит поворотную арку и 4-х или 7-ми метровый прямолинейный промежуток, в котором размещаются вставные устройства для генерации СИ. Поворотная арка предназначена для поворота пучков электронов на 20 градусов и многократной фокусировки пучков для удержания их в некотором ограниченном сечении. Магнитная структура суперпериода является результатом оптимизации качества электронного пучка, с целью минимизации равновесного фазового объема пучка (эмиттанса) и максимизации сечения области устойчивого движения в поперечных направлениях (динамическая апертура). Предполагаемая структура носит название гибридный мультибенд-ахромат и включает в себя магниты с продольной вариацией поля. Данный подход позволяет достигнуть эмиттанса лучшего среди существующих машин подобного класса (186 нм рад) без использования специальных решений. Подобная структура принята к реализации в проекте модернизации ESRF-EBS (Франция). Перечень основных элементов магнитной структуры основного кольца и количество семейств элементов одного типа с указанием базовых характеристик магнитов представлен в Табл. 3.2.

В 14 из 18 прямолинейных промежутков будут размещены вставные устройства для генерации СИ: вигглеры, ондуляторы и шифтеры. Два промежутка предназначены для размещения высокочастотной системы из четырех резонаторов, обеспечивающих стабильность энергии циркулирующих частиц, и ещё один промежуток предназначен для установки системы впуска пучков из бустера. Один промежуток будет иметь технологическое назначение для размещения систем диагностики. Циркуляция



электронных сгустков происходит внутри сверхвысоковакуумной камеры с остаточным давлением не более  $1 \cdot 10^{-9}$  торр.

Каналы вывода пучков СИ (фронтэнды) предназначены для доставки излучения из точек генерации до пользовательских станций. Фронтэнды содержат водоохлаждаемые блоки поглотителей-формирователей обеспечивающих правильную коллимацию выходных пучков, блоки бериллиевых фольг (при необходимости) для разделения вакуумных областей накопителя и пользовательских станций, радиационные затворы и системы поглощения тормозных ливней.

**Таблица 3.2.** Состав и характеристики магнитных элементов основного кольца.

Тип элемента	Количество - семейства	Основные параметры
Магнит с вариацией поля	72 - 2	L=1.56 m B <sub>max</sub> =0.55 T
Диполь – квадруполь	54 - 2	L=1.03 m G=18 T/m B=0.5 T
Квадруполь длинный	72 - 2	L=0.484 m G=44.65 T/m
Квадруполь	180 - 5	L=0.212 m G=22 T/m
Секступоль	169 - 4	L=0.083 m G <sub>2</sub> =890 T/m <sup>2</sup>
Октуполь	36 - 1	L=0.05 G <sub>3</sub> = 1000 T/m <sup>3</sup>
Корректор	96 - 1	L=0.05 m B <sub>max</sub> =0.1 T

### ***Комплекс пользовательской научно-исследовательской инфраструктуры.***

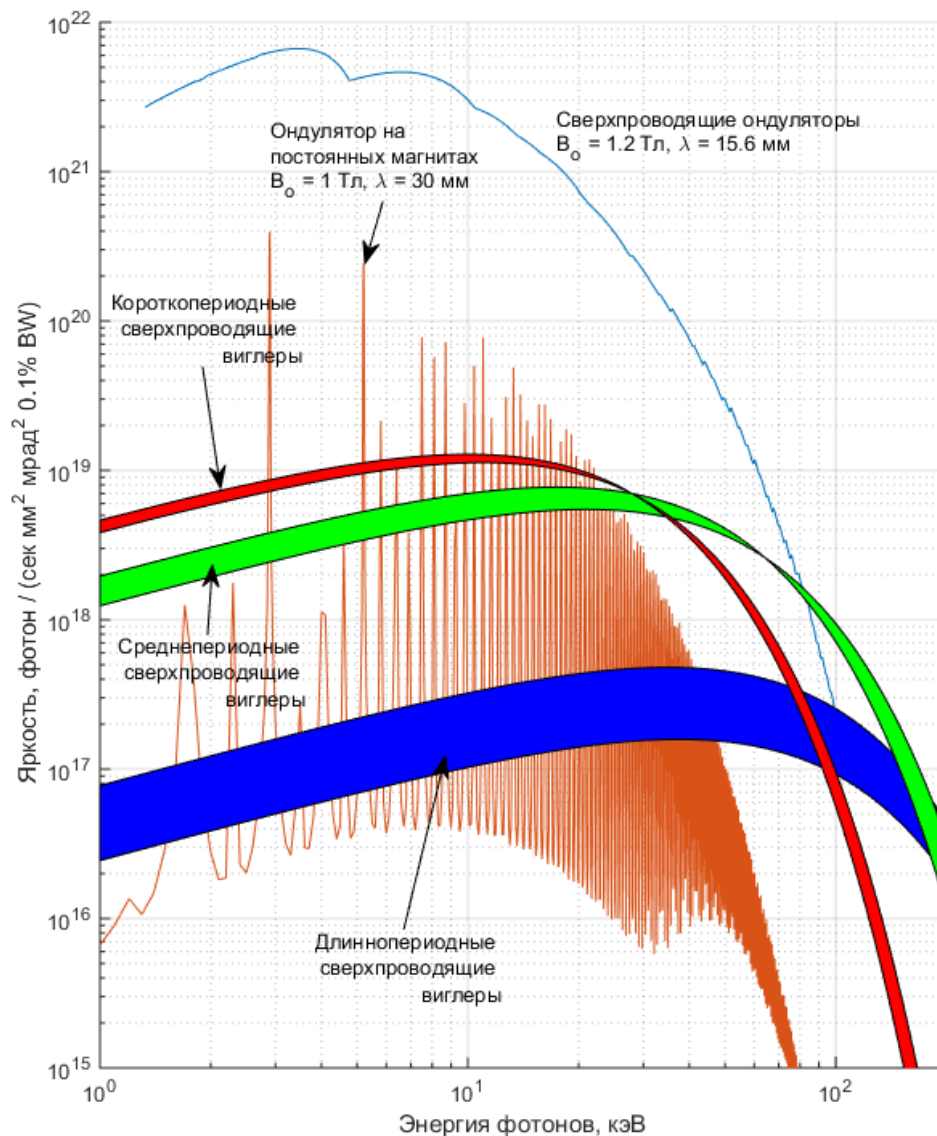
Комплекс пользовательской научно-исследовательской инфраструктуры состоит из экспериментальных станций и специализированных лабораторий.

Экспериментальные станции будут расположены внутри радиационно защищённых помещений (хатчей) в кольцевом экспериментальном зале вокруг основного кольца. Источниками синхротронного излучения для экспериментальных станций служат вставные устройства: вигглеры, ондулляторы и шифтеры, а также поворотные магниты, входящие в состав суперпериодов. Типичные параметры излучения из вставных устройств - генераторов СИ представлены на рис. 3.2.

Вигглеры генерируют синхротронное излучение в широком диапазоне энергий, в то время как ондулляторы позволяют получить излучение высокой интенсивности в заданных диапазонах длин волн. Основным преимуществом шифтеров является возможность формирования источника излучения с предельно малым размером. СИ из поворотных магнитов имеет максимум в диапазоне мягкого рентгеновского излучения.

Основной задачей оборудования экспериментальных станций является формирование геометрических и энергетических характеристик пучка фотонов, падающего на образец и фиксирование отклика от образца. Для задания геометрических параметров

пучка используется набор оптических элементов: щели, коллиматоры, линзы и зеркала. Для задания энергетических характеристик используются рентгеновские фильтры, зеркала и монохроматоры. Для фиксирования отклика от образца используются детекторы различного типа: полупроводниковые, записывающие пластины (image plate), газовые. В зависимости от типа проводимых исследований (in situ, in vivo, operando и другие), образец может размещаться в свободном состоянии, в специализированных устройствах-держателях или химических реакторах. Состав оборудования экспериментальных станций определяется исходя из рабочего диапазона энергий, типов исследуемых образцов и реализуемых методов. Конструкторская проработка экспериментальных станций первой очереди будет начата на этапе подготовки концептуального проекта.



**Рисунок 3.2.** Спектральные характеристики вставных устройств – генераторов СИ нового источника.

Специализированные лаборатории планируется разместить в отдельном лабораторно-офисном здании, соединённом с основным зданием коротким переходом. Основное назначение лабораторий – предоставление пользователям СИ дополнительных возможностей по работе в «чистых» помещениях, пробоподготовке и предварительному анализу исследуемых образцов как рентгеновскими, так и другими методами, а также

постэкспериментального анализа образцов. Спецификация лабораторий также будет определена на этапе подготовки концептуального проекта.

Необходимо отметить, что пилотный проект ЦКП «СКИФ» создания сети современной исследовательской инфраструктуры на базе источников синхротронного излучения нового поколения с головной машиной ИССИ-4 разрабатывается, в основном, силами научных школ ИЯФ СО РАН и НИЦ «Курчатовский институт». «СКИФ» комплементарен ИССИ-4: с одной стороны, это Центр коллективного пользования Сибирского региона, на котором могут выполняться международные исследования стран Азии, с другой стороны, более низкая энергия электронов (3 ГэВ по сравнению 6 ГэВ ИССИ-4), главным образом, позволяет наиболее полно использовать возможности источника в более мягкой области рентгеновского спектра излучения.

#### 4. Инструментальная база, перечень решаемых задач.

В процессе подготовки проекта был проведен анализ наиболее актуальных пользовательских потребностей и на основании этого предложен список из шести экспериментальных станций первой очереди. Этот список обусловлен наибольшей востребованностью со стороны пользовательского сообщества, а также наличием целого ряда актуальных задач в различных областях физики, химии, биологии, геологии и катализа. В первую очередь включены следующие станции:

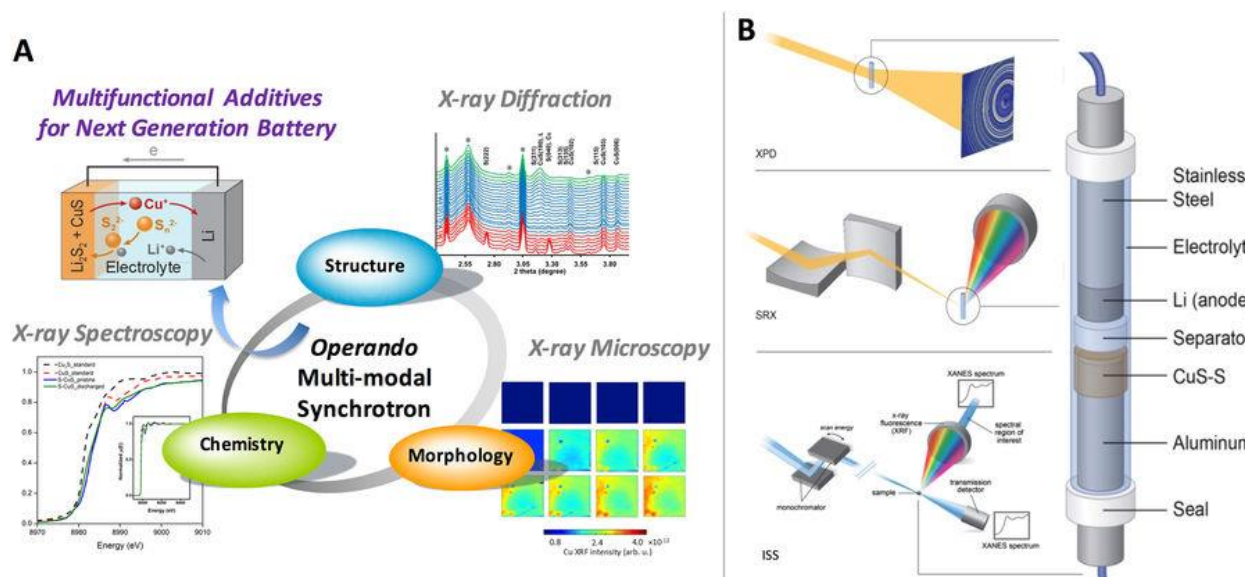
1. Станция «Микрофокус»;
2. Станция «Структурная диагностика»;
3. Станция исследования быстропротекающих процессов;
4. Станция «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм»;
5. Станция «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне»;
6. Станция «Электронная структура».

Станции первой очереди будут построены с учетом возможности перестройки инструментов формирования пучков фотонов и систем детектирования для эффективного сочетания различных экспериментальных методик.

Примером актуальных задач, которые будут решаться на экспериментальных станциях в области **технологий новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику**, является разработка высокоэффективных литий-ионных аккумуляторов (ЛИА). Оценка среднегодового темпа роста глобального рынка ЛИА за 2016-2022 г составляет 10.8%. ЛИА с высокой энергетической плотностью требуются для производства устройств портативной электроники, стационарных источников энергии, а также электромобилей. Согласно оценкам, общемировой спрос ЛИА для новых электромобилей возрастет с 19 ГВт час в 2015 до 408 ГВт час в 2025 году.

Одним из важных факторов для использования ЛИА, наряду с удельной энергетической емкостью, мощностью и стоимостью производства, является время их жизни. Согласно международным оценкам, время жизни портативных устройств должно составлять 2 года, а целевые показатели времени жизни аккумуляторов для электромобилей к 2020 г должны составлять срок службы 15 лет, число циклов 1000 при глубине разряда 80%, при эксплуатации в жестких условиях и широком диапазоне температур.

Процессы деградации в ЛИА могут привести к серьезным последствиям – возгоранию и взрыву, что влечет за собой выход устройства из строя. Исследование механизмов деградации в ЛИА с конкретной конструкцией и составом материалов имеет решающее значение для снижения рисков негативного воздействия. Для решения этих и других подобных задач отлично себя зарекомендовали методы на базе синхротронного излучения, например, методы рентгеновской дифракции и микроскопии, XAFS-спектроскопия в мягкой и жесткой рентгеновских областях, рентгено-фотоэлектронная спектроскопия в экспериментах как *ex situ*, так и *in situ*, и *operando* (рис. 4.1).



**Рисунок 4.1.** (А) Иллюстрация концепции operando исследований ЛИА с использованием нескольких методов на базе синхротронного излучения. (В) Схема экспериментальных установок и ячейки батареи для синхротронных исследований.

Рисунок 4.1 иллюстрирует концепцию исследования operando – реакции, происходящей в литий ионной батарее во время зарядки/разрядки, с использованием нескольких синхротронных методов – рентгеновской дифракции, рентгеновской флуоресцентной микроскопии и XAFS-спектроскопии.

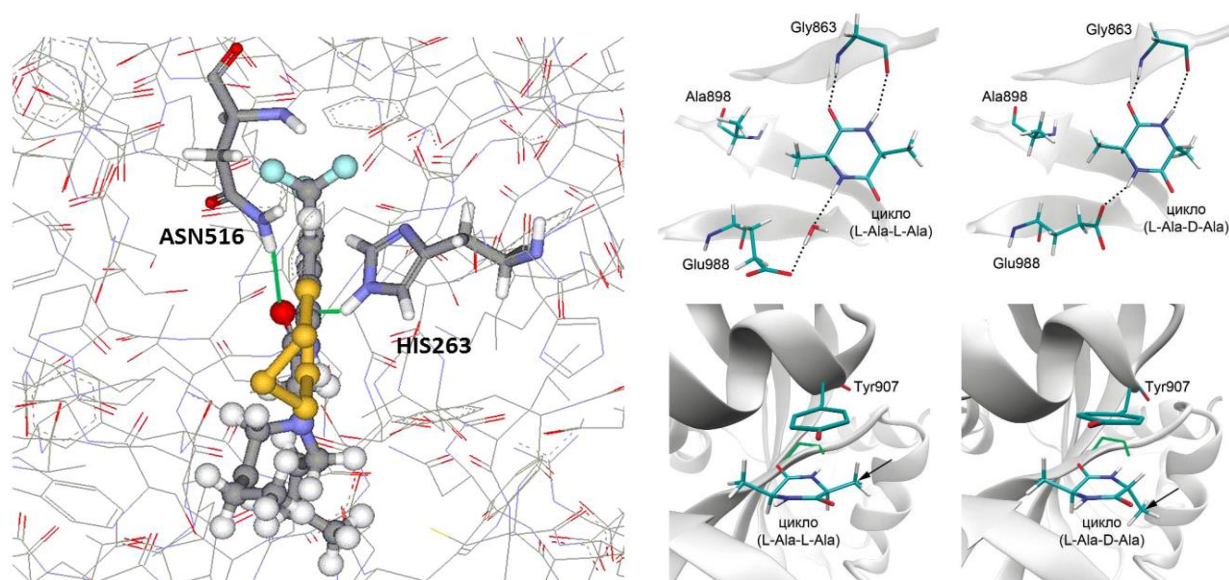
Другим важнейшим направлением является развитие **нано-, био-, информационных, когнитивных технологий**, а также **биомедицинских и ветеринарные технологий**. Сочетание нанотехнологических подходов с достижениями молекулярной биологии, био- и генной инженерии потребовало значительных вычислительных мощностей, наличия разветвлённой системы передачи и хранения данных. Объём данных о биологических материалах, накопленный в настоящее время, позволяет перейти к следующему этапу исследования живых систем – пониманию и воспроизведению информационных связей, процессов передачи и преобразования в них информации. В свою очередь, это требует более глубокого вовлечения информационных технологий в исследование процессов познания, то есть их симбиоза с подходами и методами когнитивных наук. Результатом такого симбиоза будет создание широкого спектра биогибридных устройств.

Исходной точкой создания биогибридных устройств является возможность сочетания объектов живой и неживой природы на структурном уровне организации биомолекул и полупроводниковых кристаллов. При этом самым мощным инструментом исследования такого рода структур является рентгеноструктурный анализ (РСА), возможности которого наиболее полно реализуются на источниках синхротронного излучения.

Важнейшим примером сочетания технологий является поиск ингибиторов систем репарации ДНК для создания на их основе терапевтических препаратов. В Сибирском отделении РАН активно развиваются работы по дизайну отечественных лекарств нового поколения на базе природных соединений, обладающих биологической активностью, а

также нуклеиновых кислот и их синтетических аналогов. Ряд соединений уже передан в доклинические испытания. Для оптимизации структуры ингибиторов используются биоинформационные методы моделирования (рис. 4.2), однако это не всегда дает необходимый результат для последующего поиска структур. Необходимым этапом дальнейшего улучшения свойств прототипов инновационных отечественных препаратов является рентгеноструктурный анализ их комплексов с белками-мишенями.

В России структурные исследования биологических макромолекул развиваются в основном по пути выполнения совместных исследований с зарубежными лабораториями, в которых российским учёным принадлежат объект исследования и идея работы. Для сохранения ведущих позиций в мировой науке необходимы самостоятельные исследования полного цикла на отечественной экспериментальной базе РСА. Проведение исследований полного цикла включает в себя сложный многоступенчатый этап пробоподготовки и поиска оптимальных условий кристаллизации биологических молекул и их комплексов с помощью роботизированных систем, проведение РСА методами синхротронного излучения, а также широкого применения информационных технологий для расчёта целого ряда полученных структур.



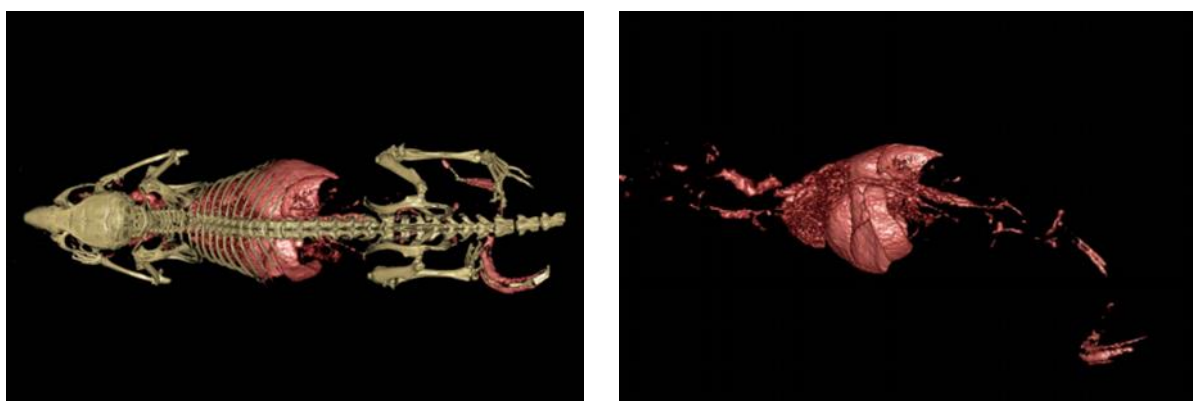
**Рисунок 4.2.** Примеры моделирования связывания ингибиторов Tdp1 в известной структуре белка. Стрелкой (справа внизу) показан участок, наиболее перспективный для введения заместителей с целью оптимизации структуры ингибитора

Другим направлением работ в передовых научных центрах, специализирующихся на использовании синхротронного излучения в области медицинских технологий, является развитие методов визуализации слабоконтрастных структур в биологических тканях.

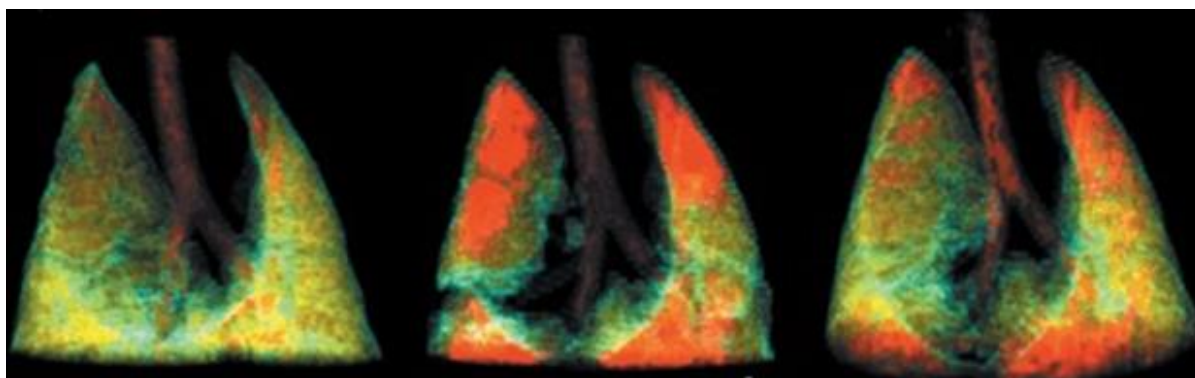
Например, использование рентгеноконтрастных веществ позволяет получать изображения с высоким пространственным разрешением и минимально возможной дозой нагрузки на биологические ткани. В качестве контраста используются вещества, содержащие химические элементы с высоким атомным числом, такие как йод, ксенон,

гадолиний, висмут и золото. Для получения предельного контраста используется методика разностной радиографии. Суть метода заключается в получении двух изображений в монохроматическом излучении с энергиями рентгеновских фотонов лежащих, до и после К-края поглощения исследуемого элемента.

Используя препараты на основе йода можно получать высококачественные изображения кровеносной системы (рис. 4.3), что является очень важным при диагностике ишемических заболеваний на ранней стадии. Использование небольших концентраций ксенона позволяет визуализировать процессы насыщения легких воздухом на различных стадиях дыхания (рис. 4.4), что позволяет определять пораженные части легочной системы с высокой точностью.



**Рисунок 4.3.** Распределение йодного препарата в кровеносной системе мыши.



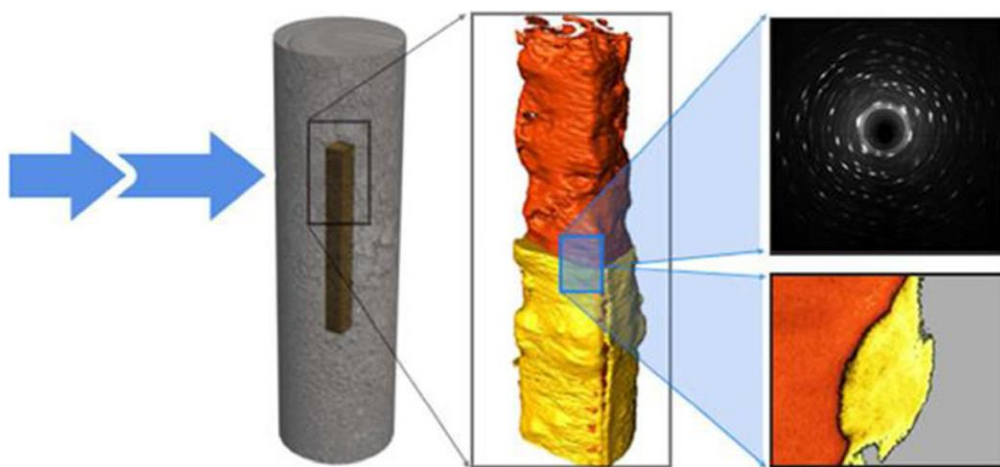
**Рисунок 4.4.** Распределение ксенона в лёгких мыши при различных фазах дыхания.

В области технологий атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом существуют актуальные задачи контролирования процессов коррозии при хранении отработанного ядерного топлива (ОЯТ).

Атомная отрасль России представляет собой мощный комплекс, доля которого в общей выработке электроэнергии в стране составляет около 18%, и является в современных условиях одним из важнейших секторов экономики. Однако, наряду с производством электрической энергии, атомная отрасль решает также ряд критически важных задач, в числе которых: геополитические (например, национальное присутствие в Арктике),

развитие термоядерной энергетики (участие в проекте ИТЭР), безопасная эксплуатация станций и безопасное обращение с радиоактивными отходами. В государственной программе РФ «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» этим и другим вопросам уделено существенное внимание.

Наиболее трудоёмкой задачей в области безопасного обращения с ОЯТ является изучение процессов, протекающих в захоронении и оценка связанных с ними рисков. Эти процессы чрезвычайно трудно моделировать в лаборатории не только из-за опасности обращения с радиоактивными веществами, но и из-за сложности воспроизведения условий, соответствующих закрытому контейнеру с ОЯТ. Возможность проводить такие исследования дают источники СИ нового поколения, позволяющие не вскрывая контейнера осуществлять комплексный мониторинг состояния ОЯТ внутри, отслеживая химические реакции, изменение плотности, деградацию контейнера и т.п. (рис. 4.5).



**Рисунок 4.5.** Схема бесконтактного исследования процесса коррозии радиоактивных отходов внутри бетонного контейнера на источнике СИ «Diamond light source» (Оксфорд, Англия). Слева – бетонный контейнер с ОЯТ внутри, в центре – томографическое изображение ОЯТ (оранжевое – ОЯТ в исходном состоянии, жёлтое – продукты коррозии), справа сверху – анализ вещества внутри контейнера методом рентгеновской дифракции.

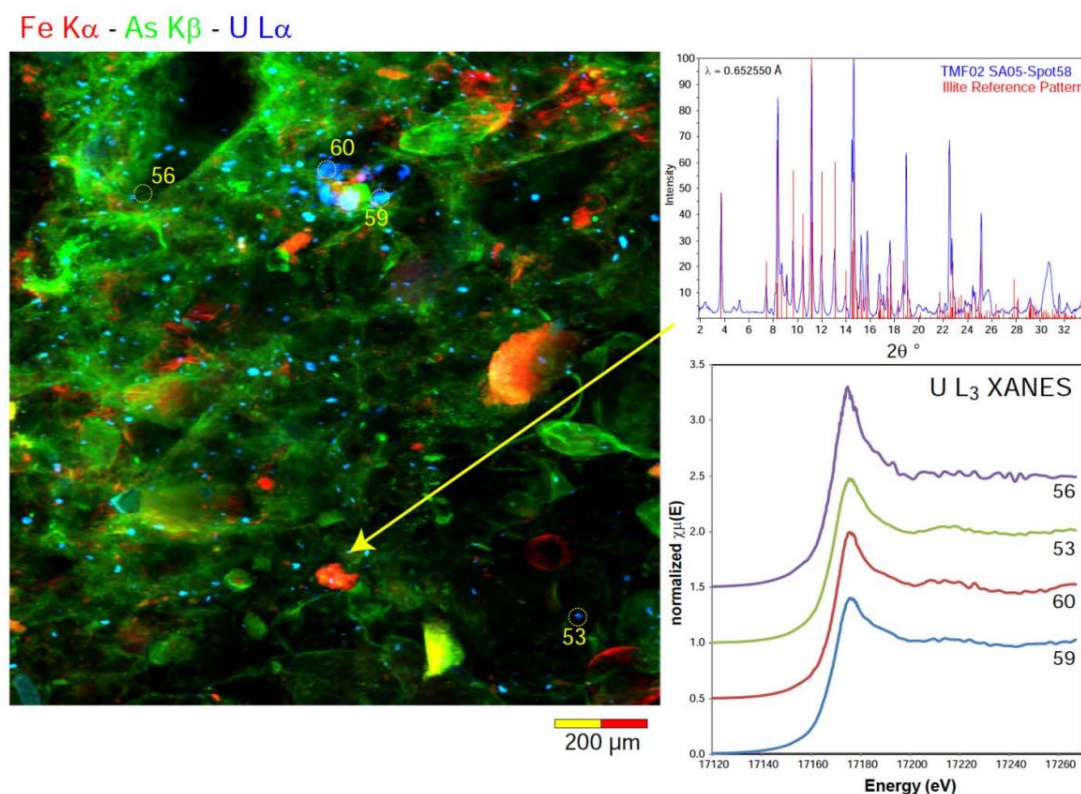
Задачи, решаемые в рамках создания и развития **технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации её загрязнения**, дают возможность широкого применения уникальных свойств синхротронного излучения. Исследования направлены на анализ химического (элементного) состава природных материалов, позволяющего оценить степень техногенных воздействий и их влияние на изменение природной среды. Важное направление проводимых исследований связано с изучением природных изменений, обусловленных как климатическими, так и антропогенными факторами.

Несмотря на высокий уровень взятых по отдельности современных аналитических методов, одной из основных проблем в изучении геоматериалов остаётся сложность комплексного анализа состава объектов. Так, например, с помощью сканирующей электронной микроскопии достаточно легко получить карту элементного состава образца, однако задача параллельного определения в нём концентрации рассеянных элементов,



минеральных фаз, или же валентного состояния элементов с тем же пространственным разрешением вряд ли сможет быть решена традиционными методами. Между тем, именно такой комплексный анализ необходим для мониторинга загрязнения окружающей среды токсичными и радиоактивными элементами, требующего определения не только концентраций опасных элементов, но их подвижности, зависящей от валентного состояния элементов и минеральных фаз, в которых они концентрируются.

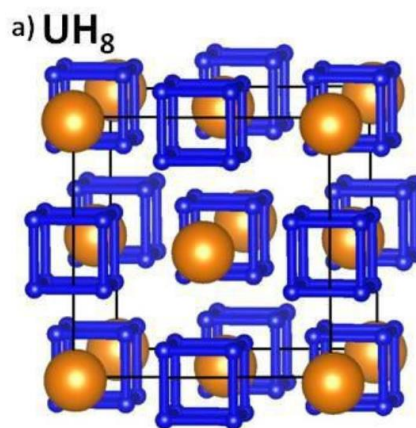
Возможности специализированного источника СИ нового поколения, однако, позволят успешно справляться с приведённой задачей, одновременно анализируя (с разрешением от 10 нм до 1 мкм) элементный состав в широком диапазоне элементов и концентраций методами рентгенофлуоресцентного анализа, структуру веществ методами рентгеновской дифракции, а также локальную структуру микро- и наночастиц методами XAFS-спектроскопии (рис. 4.6).



**Рисунок 4.6.** Результаты комплексного анализа глинистых частиц из зоны радиоактивного загрязнения, полученные на источнике СИ APS (США). Слева – пространственное распределение железа (красный), мышьяка (зелёный) и урана (синий), справа – дифракционный профиль, демонстрирующий минералы-концентраторы элементов (вверху) и спектры рентгеновского поглощения, показывающие валентное состояние урана (внизу) в конкретных точках образца (по Mihok *et al.* 2017).

Одной из основных технологий создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии несомненно является сверхпроводимость. Уже сегодня высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) выходят на рынок, в ряде применений окупая высокую стоимость своего использования практически полной ликвидацией потерь на сопротивление. При этом используемые сейчас ВТСП на основе купратов, разработанные в 1985-1995 гг., давно исчерпали свой потенциал, поэтому во всём мире активно ведутся поиски новых сверхпроводящих материалов. Прорывом в

этом направлении стало экспериментальное обнаружение в 2015 г. рекордно высокой (203 К) сверхпроводимости в высокобарическом полигидриде серы (Drozdov *et al.* 2015), открывшее новую область для поиска ВТСП, бурное развитие которой ожидается в ближайшие 5-10 лет. Российскими учёными теоретически предсказана высокотемпературная сверхпроводимость в полигидридах урана и тория (Kruglov *et al.* 2017, Kvashnin *et al.* 2017, рис. 4.7). Для экспериментального подтверждения расчётов, а также поиска и исследования других полигидридных ВТСП, требуется привлечение методов на базе источников СИ нового поколения, связанных с исследованием структуры, а также электрических и магнитных свойств вещества в широком диапазоне температур и давлений.



**Рисунок 4.7.** Слева – сравнение обычного (чёрный) и сверхпроводящего (белый) кабеля, рассчитанных на одинаковую нагрузку в 12 500 ампер (экспозиция ЦЕРН). Справа – структура метастабильного при атмосферном давлении полигидрида урана с теоретически предсказанной сверхпроводимостью при 193 К (Kruglov *et al.* 2017)..

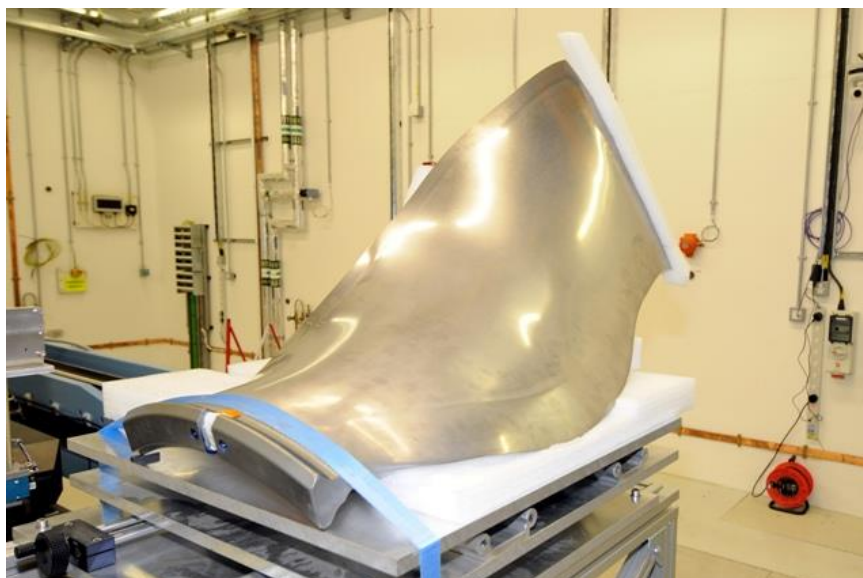
Чрезвычайно актуальным направлением в области **технологий получения и обработки функциональных и конструкционных наноматериалов** является разработка металлических и металлосодержащих наноматериалов. Промежуточное положение, которое занимают наночастицы в ряду атом – массивный материал, предопределяет отличие их физико-химических свойств от свойств изолированных атомов, с одной стороны, и объемных кристаллитов, с другой. Изменения претерпевают электронные, магнитные, оптические и многие другие характеристики частиц, причем характерный диапазон размеров частиц, в котором происходят эти изменения, колеблется от нескольких единиц до десятков нанометров.

Количество современных наноразмерных металлических частиц и их ансамблей весьма велико и включает целый ряд одно-, двух- и трехкомпонентные наноразмерные системы (наносплавы). При этом свойства и структурные образования металлических систем радикально меняются при переходе к двух-, трехкомпонентным системам, образующим неупорядоченные твердые растворы, интерметаллиды и другие виды атомного упорядочения типа ядро-оболочка, кластер-в-кластере и др. Основная причина интереса к наноразмерным сплавам состоит в том, что их химические и физические свойства могут регулироваться за счет изменения состава, атомного упорядочения и изменения размера частиц, что, в совокупности с синергетическим эффектом и богатыми возможностями по изменению вторичной структуры сплава, приводит к расширению областей их применения в современных технологиях.

Ключевой проблемой современных нанотехнологий является разработка эффективных методов синтеза нано- и субмикроразмерных порошковых материалов с заданными свойствами. В настоящее время для их получения применяются самые различные подходы, к наиболее перспективным из которых можно отнести плазмохимию, лазерный синтез, радиационно-термические методы, конденсацию из высокотемпературной газовой фазы, механохимию, ударно-волновое воздействие, электровзрыв проволок, осаждение из растворов солей, золь-гель процесс, пиролиз и др.

На каждом этапе получения и обработки функциональных и конструкционных материалов особое внимание уделяется контролю химических, радиационных, быстротекущих и других процессов производства. Для этой цели активно внедряется синхротронное излучение.

Например, существенный прогресс наблюдается в работах, проводимых на источнике СИ «Diamond Light Source» (Оксфорд, Англия). На канале I12 - JEOP активно работает фирма Rolls-Royce, исследующая композиционные материалы, используемые для изготовления реактивных двигателей (рис. 4.8.).

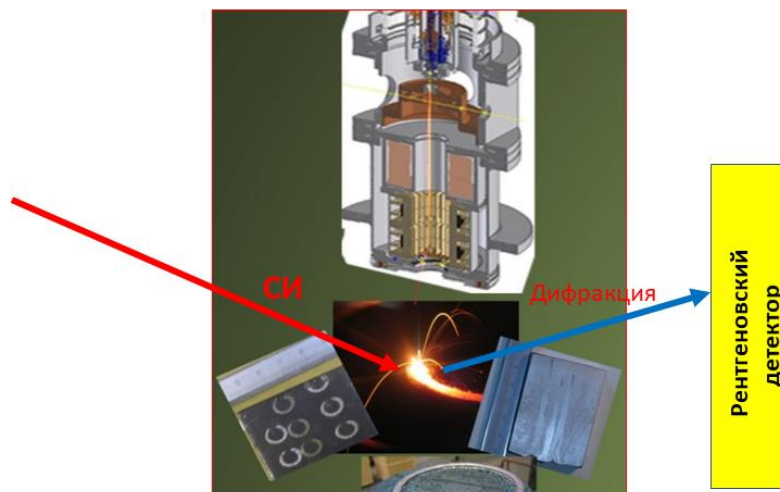


**Рисунок 4.8.** Подготовка образца из композиционного материала для изготовления реактивных двигателей фирмы Rolls-Royce перед установкой на канал I12 источника СИ «Diamond Light Source».

По мнению профессора David Rugg, специалиста по материалам фирмы Rolls-Royce: «Информация, которую мы теперь можем получить от JEOP, поможет нам разработать новые процессы, улучшить свойства материалов и снизить стоимость. Эти *in situ* исследование передовых технических материалов позволят повысить прочность аэрокосмических компонентов».

Использование на новом источнике СИ пучка излучения с энергией до 200 кэВ позволит приступить к отечественным исследованиям процессов внутри реальных изделий из композиционных материалов, таких как крылья современных самолетов, корпуса катеров и реактивных двигателей в режиме *in situ*, т.е. при мощном внешнем воздействии вплоть до разрушения (совместно с ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина»).

Другим актуальным направлением работ на новом источнике станет *in situ* исследование процесса синтеза новых композиционных материалов под мощным воздействием электронных пучков современных ускорителей. Для этого на канале СИ будет установлена электронно-оптическая колонна (ЭЛС – В – 60/250), позволяющая нагревать исследуемую систему до нескольких тысяч градусов (рис. 4.9).



**Рисунок 4.9.** Энергоблок для установки электронно-лучевой обработки с электронно-оптической колонной (ЭЛС – В – 60/250), планируемый как исследовательский элемент канала СИ нового источника.

Процессы, протекающие в таких условиях, в настоящее время малоизучены, однако, перспективы несомненны. Например, одна из предполагаемых систем для исследования – сложные карбиды гафния и тантала, перспективные для использования в изготовлении сопел реактивных двигателей. По имеющимся данным эта система обладает рекордной температурой плавления – 4200 С.

Разрабатываемые методы и подходы могут быть применены в аддитивных технологиях, например, для исследования поведения кристаллической структуры порошков металлов (оксидов) спекаемых на 3D – принтерах.

Особое место в ряду технологий, развиваемых на источниках СИ являются **базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники.**

Конденсированные взрывчатые вещества или в более широком современном смысле энергетические материалы являются бесконкурентным источником энергии, если необходимы компактные размеры и большие импульсные мощности. Несмотря на потенциальную опасность несчастных случаев и возрастающие требования к безопасности в ряде областей взрывчатые материалы не имеют альтернатив и будут продолжать применяться.

Детальное понимание механики и химии взрывных и ударно-волновых процессов позволит решить ряд проблем: безопасность эксплуатации и эффективность работы устройств и технологий, использующих энергию взрыва, в том числе безопасность и гарантия работоспособности ядерных зарядов; противодействие терроризму; новые

материалы с высокой удельной энергоемкостью для ракетной промышленности; синтез новых соединений в условиях взрыва; взрывной синтез наночастиц углерода с заданными свойствами.

Развивающаяся техника ускорителей элементарных частиц и источников СИ позволяет создавать пучки различной природы с высокими проникающими способностями. Их высокие характеристики позволяют получать детальную информацию о поведении вещества непосредственно в условиях взрыва на самых разных масштабах, от макро характеристик течения (скоростная рентгенография и томография) до наноуровня (дифракция с высоким временным разрешением). Потенциал возможностей ускорительной техники и синхротронного излучения для решения задач использования энергетических материалов только раскрывается.

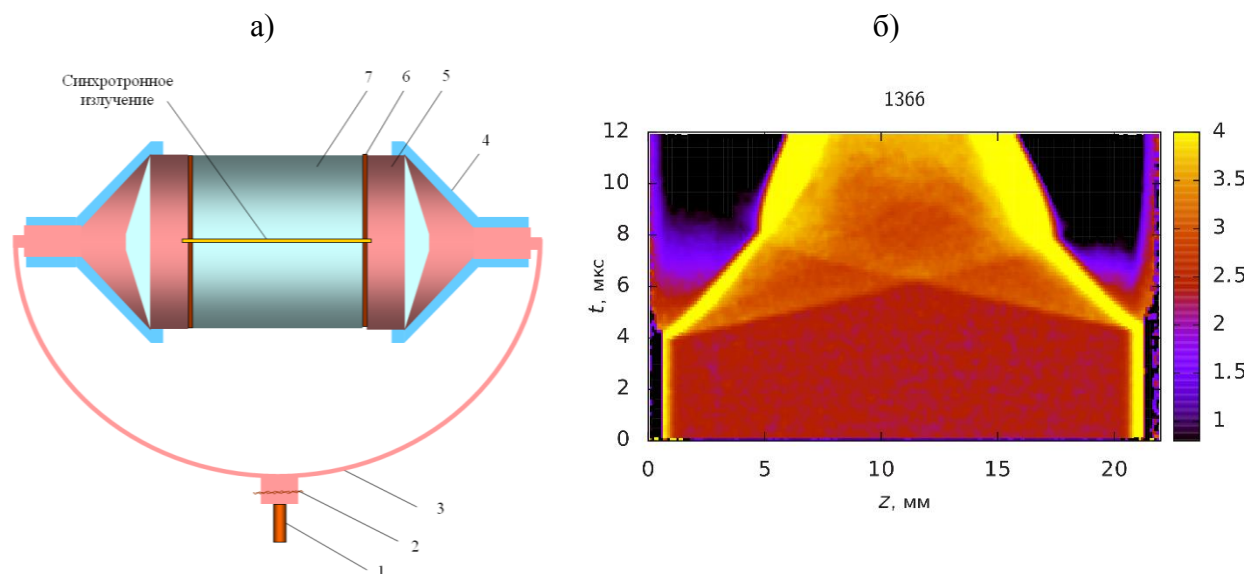
ИЯФ совместно с институтами Сибирского отделения РАН впервые в мире реализовал методики синхротронного излучения для исследования протекания взрывных процессов. Так непосредственно во взрывном эксперименте проводится скоростное рентгенографирование и дифракционные измерения малоуглового рассеяния (рис. 4.10). Подходы успешно используются для решения задач детонации и поведения материалов и элементов конструкций при динамическом воздействии.



**Рисунок 4.10.** Фотография экспериментального стенда для исследования детонационных и ударноволновых процессов в бункере ВЭПП-3 (ИЯФ СО РАН).

Следует подчеркнуть, что на базе синхротрона Advanced Photon Source в Аргоннской национальной лаборатории (США) в последние несколько лет сформировалась группа исследователей, реализующая аналогичные подходы. Используемый ими современный источник синхротронного излучения позволил сразу выйти на мировой уровень исследований, а по задачам скоростной дифракции и динамическому анализу наноструктурных свойств вещества - на лидирующие позиции.

Интенсивность рентгеновского излучения от современных ускорителей позволяет также снимать рентгеновское кино динамических течений с временем между кадрами менее микросекунды. Это позволяет исследовать структуру ударной и детонационной волн распространяющихся со скоростями до 10 км/с (рис. 4.11).



**Рисунок 4.11.** а) схема экспериментального узла со столкновением плоских ударных волн в исследуемом образце. 1 - электродетонатор; 2 - электроконтактный датчик; 3 - детонационная разводка (ПС-83); 4 - плосковолновой генератор; 5 - диск из взрывчатого вещества; 6 - металлическая пластина (медь М1); 7 - цилиндрический образец (ПММА).  
б) количество массы на луче на встречных ударных волнах в ПММА.

Развитие этой методики на новом оборудовании позволит определять уравнение состояния продуктов реакции детонации и структуру зоны энерговыделения. Создание экспериментального стенда по исследованию энергетических материалов и поведению вещества при динамических воздействиях востребовано организациями Сибирского отделения РАН (ИПХЭТ, ИКГ, ИТПМ, ИГД), высокотехнологичными предприятиями гражданского и военно-промышленного комплекса (НПО «Кристалл», НПО «Алтай») и Российскими федеральными ядерными центрами.

В целом, ряду региональных и федеральных наукоёмких производств, а также центрам инновационного развития (технопаркам) необходима инфраструктура для проведения прикладных исследований с использованием СИ. Оценка количества участников на финальных этапах реализации проекта составляет порядка 100 организаций, из них 55 – научно-исследовательские, 10 – ВУЗы, 25 – промышленные предприятия, 10 – иностранные организации.

## 5. Научная и практическая значимость проекта.

Целью научно-технологического развития Российской Федерации (в соответствии со Стратегией научно-технологического развития РФ, утверждённой указом Президента РФ от 01.12.2016 за №642) является обеспечение независимости и конкурентоспособности страны за счет создания эффективной системы наращивания и наиболее полного использования интеллектуального потенциала нации. В соответствии со Стратегией и с Указом Президента РФ от 07.05.2018 за №204 одним из механизмов достижения поставленной цели является создание передовой инфраструктуры научных исследований для развития новых технологий и инновационной деятельности, включая создание и развитие сети уникальных научных установок класса «мегасайенс», крупных исследовательских инфраструктур на территории Российской Федерации.

В ближайшей и долгосрочной перспективе отечественная сетевая инфраструктура Центров коллективного пользования на базе источников синхротронного излучения будет наиболее адекватным и мощным инструментом реализации Стратегии. Во всём мире источники СИ принципиально по своей сути - объекты мультидисциплинарной исследовательской инфраструктуры, обеспечивающие проведение научных исследований в различных областях науки и техники от материаловедения до медицины. Поэтому на их базе создаются передовые научные центры мирового уровня, которые также позволят сформировать целостную систему подготовки и профессионального роста научных кадров, обеспечив условия для осуществления молодыми учёными научных исследований и разработок, создания конкурентноспособных коллективов. Следует отметить, что срок эффективной работы ЦКП составляет 25-30 лет, поэтому создание таких центров позволит Российской Федерации не только войти, но и обеспечить долговременное присутствие в числе пяти ведущих стран мира, осуществляющих научные исследования и разработки в областях, определяемых приоритетами научно-технологического развития (п. 10 Указа Президента РФ от 07.05.2018 за №204). Введение в строй источников СИ позволяет Российской Федерации и локомотивам отечественной промышленности быть в авангарде научно-технического прогресса, обеспечить опережающее развитие в таких областях, как здравоохранение, образование, экология, культура, и завоевать лидерство в международной кооперации.

Приборы и методы экспериментальной физики, развиваемые на исследовательских станциях источников СИ позволят добиться существенного продвижения в реализации ключевых технологий Российской Федерации, в том числе:

- Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику.
- Технологии создания новых лекарственных препаратов (необходимый этап работ – рентгеноструктурный анализ взаимодействия лекарственных комплексов с белками).
- Технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации её загрязнения.

- Технологий создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии.
- Технологий создания и использования новых функциональных и конструкционных материалов и покрытий, в том числе наноматериалов и композитов.
- Технологий аддитивного производства и методов, обеспечивающих переход на следующий технологический уклад.
- Технологий поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи.
- Военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники.
- Генетические, робототехнические, информационные, когнитивные технологии и многие другие.

Важной особенностью исследовательской инфраструктуры на базе источников СИ является возможность своевременного обновления экспериментальных станций и методов. Центр коллективного пользования в данном случае выступает как высокоадаптивный инструмент, который может быть относительно легко переконфигурирован или модернизирован для решения новых фундаментальных и прикладных научных задач. Именно поэтому возможности ЦКП «СКИФ» принципиально не ограничены актуальными задачами, пример которых приведён в данной главе. Необходимо понимать, что с расширением круга фундаментальных проблем материаловедения, химии, медицины, биологии, геологии, катализа и других областей наук инструментарий ЦКП «СКИФ» сможет оставаться адекватным поставленным задачам.



## **6. Основные участники.**

В работах на предпроектном этапе принимают участие сотрудники ИЯФ СО РАН, ИК СО РАН, ИГМ СО РАН, ИНХ СО РАН, ИХТТМ СО РАН, ИХБФМ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, ИЦИГ СО РАН и других научно-исследовательских организаций, НГУ и НГТУ. Необходимо также отметить ключевую роль НИЦ «Курчатовский институт» в совместных работах по подготовке ключевых решений по созданию ускорителя и комплиментарных экспериментальных станций.

Оценка количества участников на этапе выхода на полную мощность: более 250, из них 200 – научно-исследовательские организации, 10 – ВУЗы, более 30 – промышленные предприятия и организации реального сектора экономики, 10 – иностранные организации.

Список потенциальных участников: организаций реального сектора экономики, научно-исследовательских организаций и ВУЗов, с которыми в настоящее время ведутся переговоры на различных уровнях или достигнуты соглашения о взаимодействии при создании и использовании ЦКП «СКИФ» находится в Приложении 2. Необходимо отметить, что в этот перечень организаций не включены Новосибирские институты и ВУЗы, участвовавшие в подготовке проекта.

## 7. Предложения по подготовке кадров.

С каждым годом период времени от научного открытия до его технического воплощения сокращается. Современные мультидисциплинарные вызовы и задачи, стоящие перед наукой, требуют оперативного решения, а промедление рискует оставить Россию за бортом научно-технического прогресса. В ответ на такие вызовы необходимы новые прорывные технологии, способные максимально интенсифицировать практическую реализацию новых знаний. Именно поэтому стране необходимы специалисты высшей квалификации, мультидисциплинарный арсенал знаний которых обеспечит научно-техническое лидерство России. Подготовка таких кадров сегодня – залог долговременного успеха страны в будущем.

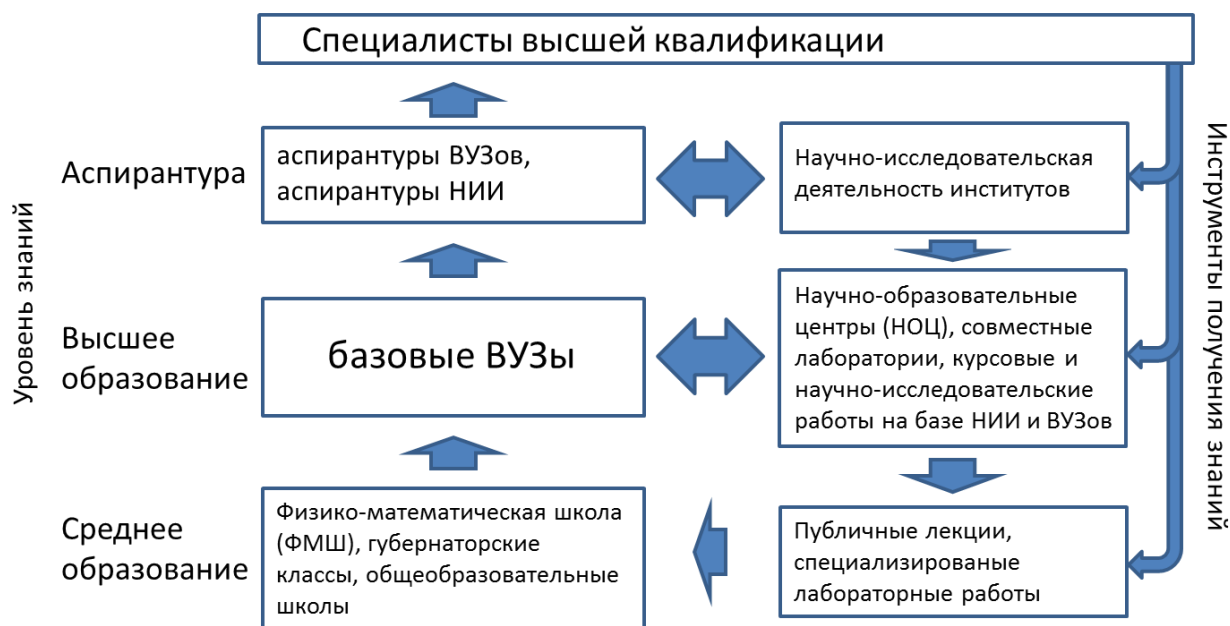
Одним из примеров действующей государственной инфраструктуры, в настоящее время наиболее адекватно отвечающей за создание и развитие новых прорывных технологий, является Новосибирский научный центр СО РАН (ННЦ СО РАН). Здесь сосредоточены специализирующиеся в самых различных областях знаний научно-исследовательские институты, многие сотрудники которых являются преподавателями в одном из ведущих вузов страны - Новосибирском государственном университете (НГУ). Это позволяет студентам с самого начала обучения окунуться в питательную научную среду, решая актуальные исследовательские задачи. Кроме того, ряд предприятий города и области с помощью Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) способен максимально быстро обеспечить практическую реализацию полученных научно-исследовательскими институтами знаний.

В этом триединстве – наука, кадры, производство (т.н. «треугольник Лаврентьева»), - ведущую роль играет наука, обеспечивающая прорывное развитие знаний и технологий. Достижения науки обусловлены наличием как современной исследовательской инфраструктуры, так и наукоориентированной промышленности. Развитие промышленности в первую очередь обеспечивается высокой скоростью восприятия новых научных идей. Эффективность использования ресурсов, в значительной степени, определяется наличием кадров, квалификация которых адекватна этим ресурсам. Поэтому важной составной частью общего плана работ по созданию нового центра для междисциплинарных исследований с использованием современного источника синхротронного излучения является подготовка специалистов высокой квалификации, способных: а) обеспечить эксплуатацию и развитие центра, б) ставить и решать задачи, адекватные возможностям нового центра и отвечающие требованиям фундаментальной науки и запросам практики. Это означает, что ключевую роль в успехе науки и производства, безусловно, играют кадры.

Одним из успешных примеров реализации этой концепции во всём мире являются Центры коллективного пользования на базе источников синхротронного излучения. Источники СИ принципиально по своей сути являются объектами мультидисциплинарной исследовательской инфраструктуры и обеспечивают проведение научных исследований на стыке различных областей науки и техники: создание и исследование новых функциональных и конструкционных материалов, химии и катализе, геологии и геофизике, медицине и биологии, археологии и других. Благодаря этому источники СИ также являются

совершенной инфраструктурой, обеспечивающей подготовку специалистов высшей квалификации в различных областях знаний – научных кадров будущего страны.

Отсутствие сети современных источников СИ является серьёзным препятствием в долгосрочной перспективе научно-технологического развития России. При этом очевидно, что все условия для успешного создания такой сети в нашей стране имеются. Это утверждение основано, во-первых, на имеющемся в ИЯФ СО РАН и НИЦ «Курчатовский институт» опыте создании узлов и систем источников СИ по всему миру, во-вторых, на опыте эксплуатации имеющихся источников предыдущего поколения и, в-третьих, на успехе функционирующей в ННЦ СО РАН системе подготовки и воспроизводства научных и научно-технических кадров, которая представлена на рис. 7.1.



**Рисунок 7.1.** Система подготовки кадров, реализованная в ННЦ СО РАН.

В настоящее время базовым ВУЗом для научно-исследовательских институтов ННЦ СО РАН является НГУ, в определённой степени – НГТУ. Подготовка специалистов высокой квалификации осуществляется на их базовых кафедрах, например, в области создания источников и применения СИ - это кафедры: «Физика ускорителей», «Физико-техническая информатика», «Радиофизика» - НГУ, «Электрофизические установки и ускорители» - НГТУ.

Также активно работает ряд научно-образовательных центров (НОЦ) и лабораторий НГУ и НГТУ совместных с институтами ННЦ СО РАН, например, НОЦ «Наносиб» и совместная учебно-научная лаборатория «Структурной диагностики ультрадисперсных и наноструктурированных систем». НОЦ и совместные лаборатории осуществляют поддержку передовых научных исследований, проводимых коллективами университетов и институтов при непосредственном участии аспирантов и студентов, максимально эффективно вовлекая последних в процесс генерации знаний.

С началом реализации проекта Центра коллективного пользования Сибирского источника синхротронного излучения – ЦКП «СКИФ» (Сибирский кольцевой источник

фотонов), накопленный в ННЦ СО РАН и НИЦ «Курчатовский институт» опыт позволил подготовить и развернуть на физическом факультете НГУ новую Основную образовательную программу (ООП) междисциплинарной магистратуры «Методическое обеспечение физико-химических исследований конденсированных фаз» и создать предпосылки для организации совместной лаборатории НГУ-ИЯФ СО РАН-ИК СО РАН по применению экспериментальных методов СИ в материаловедении и медицине. Программа предусматривает комплекс лекционных, практических и проектно-ориентированных модулей, призванных сформировать новое поколение квалифицированных специалистов, способных решать крупные междисциплинарные задачи, эффективно использовать национальные центры с источниками синхротронного излучения и достойно представлять Россию в международных центрах Мега-науки, действовать в национальных интересах, при этом будучи интегрированными в международное научно-техническое сотрудничество. Эти меры позволят к моменту запуска ЦКП «СКИФ» в работу обеспечить постоянный приток специалистов высокой квалификации – выпускников НГУ и НГТУ, как в области ускорительной техники, так и в области применения методов СИ до 50 - 100 человек в год.

Необходимо отметить, что в НГУ и НГТУ обучаются студенты из различных регионов страны, в том числе, и из Дальневосточного Федерального округа. Ведение целенаправленной политики, включающей в себя обучение ребят из этого региона и создание в нём исследовательских рабочих мест (Дальневосточного источника синхротронного излучения), позволит своевременно подготовить дееспособный коллектив специалистов в области ускорительной техники и методов синхротронного излучения, задачей которого станет реализация проекта Дальневосточного источника синхротронного излучения. Это позволит использовать весь мультидисциплинарный потенциал ННЦ СО РАН для развития науки и технологий, закрепить и развить региональные интеллектуальные и инфраструктурные ресурсы, обеспечив долгосрочное научно-технологическое лидерство России.

## **8. Расположение установки, привязка к источникам энергии.**

Для расположения ЦКП «СКИФ» в рамках концепции развития науки в Сибири «Академгородок 2.0» рассматривается земельный участок в р.п. Кольцово Новосибирской области с кадастровым номером - 54:19:164801:323 (площадь: 243749 кв.м.), категорией земель: земли поселений (земли населенных пунктов) и видом разрешенного использования: «комбинаты по глубокой переработке зерна, инженерные коммуникации и объекты инженерной инфраструктуры» с возможностью изменения вида разрешённого использования земельного участка на «обеспечение научной деятельностью. 3.9».

Имеется согласие мэрии р.п. Кольцово на размещение ЦКП «СКИФ» на указанном участке (Приложение 3).

Привязка к источникам энергии возможна в рамках инвестиционной программы АО «РЭС» в 2019 – 2020 годах, в соответствии с которой предусматривается увеличение мощности электроподстанции ПС 110/10 «Барышевская» до 40 МВт.

## 9. Международное сотрудничество в рамках реализации проекта

Успешность реализации крупных научных проектов основана в первую очередь на эффективном сложении компетенций организаций-участников. В области создания ускорителей заряженных частиц, генерации и применения синхротронного излучения сложилось тесное партнёрство, которое позволило совместно разработать и эффективно использовать международную исследовательскую инфраструктуру центров СИ.

Среди примеров международного сотрудничества ИЯФ СО РАН необходимо отметить совместные работы с Европейским источником синхротронного излучения (European Synchrotron Radiation Facility, ESRF, Франция), Немецким электронным синхротроном (Deutsches Elektronen-Synchrotron, DESY, Германия), Брукхейвенской национальной лабораторией (Brookhaven National Laboratory, BNL, США) и многими другими. Например, в настоящее время команда сотрудников ИЯФ СО РАН участвует в сборке гирдеров магнито-вакуумной системы модернизированного международного источника СИ ESRF-EBS, который планируется запустить в эксплуатацию в 2020 году. В рамках соглашения о предоставлении субсидии Министерства образования и науки Российской Федерации от 22 ноября 2017 г. № 14.616.21.0087 совместно с коллективом ESRF (Гренобль, Франция) ведутся работы по разработке высокочастотной системы и устройств генерации излучений для флагманского российского проекта источника СИ четвертого поколения (ИССИ-4, НИЦ «Курчатовский институт»).

Примером создания целой системы «под ключ» является международное сотрудничество с BNL по разработке и созданию бустера для источника СИ NSLS-II (Национальный источник синхротронного излучения, США). В работах принимали участие как российские, так и европейские субподрядчики, но большая часть систем ускорителя была изготовлена в ИЯФ СО РАН. В феврале 2014 года бустер был собран и успешно запущен в эксплуатацию сотрудниками ИЯФ СО РАН (рис 9.1).

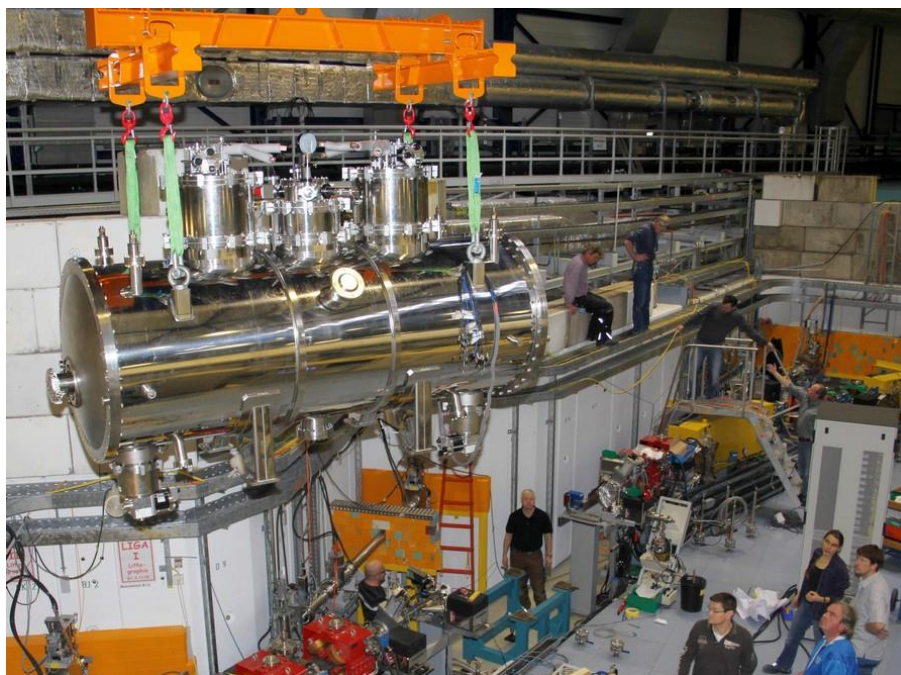


**Рисунок 9.1.** Бустер NSLS-II, арка 3.

Кроме того, в рамках договоров с международными организациями ИЯФ СО РАН разработал и изготовил более 25 сверхпроводящих генераторов СИ с полем от 2 до 8 Тл. Эти генераторы СИ создают мощные потоки фотонов в широком спектральном диапазоне для экспериментальных станций в США, Канаде, Италии, Англии, Германии, Бразилии, Австралии и других странах мира.

В 2016 году сотрудники Института разработали и изготовили для Технологического института Карлсруэ (Karlsruher Institut für Technologie, KIT, Германия) и ЦЕРН (European

Organization for Nuclear Research, CERN, Швейцария) уникальный сверхпроводящий вигглер (рис. 9.2), который в настоящий момент используется в качестве источника излучения для рентгеноскопического канала на установке АНКА. Он обеспечивает яркие жесткие рентгеновские лучи для микроскопа MiQA, который применяется в материаловедении и науках о жизни.



**Рисунок 9.2.** Установка сверхпроводящего вигглера на накопитель АНКА.

В 2003 году ИЯФ СО РАН разработал и изготовил для лаборатории ELETTRA (Италия) сверхпроводящий вигглер. В январе 2018 года в рамках договора с лабораторией ELETTRA была проведена коренная модернизация его криостата, в результате которой вигглер будет работать без расходования дорогостоящего жидкого гелия. Технология косвенного охлаждения, применённая при модернизации криостата, была предложена и разработана в ИЯФ СО РАН.

Для лаборатории «Diamond light source» (Оксфорд, Англия) ИЯФ СО РАН разработал и поставил два сверхпроводящих вигглера для генерации жёсткого рентгеновского излучения. Первый вигглер был предназначен для экспериментальной станции по исследованиям материалов в экстремальных условиях при высоких давлениях, высоких и низких температурах. Второй генерирует СИ для экспериментальной станции по *in situ* исследованиям технических образцов, находящихся в условиях близких к реальным режимам работы в технологических процессах.

На источниках СИ в Канаде и Австралии сверхпроводящие многополюсные вигглеры используются для биомедицинских целей, в том числе, для целей диагностики и терапии рака, диагностики сердечных заболеваний, болезней органов кровообращения, лёгких и других заболеваний.

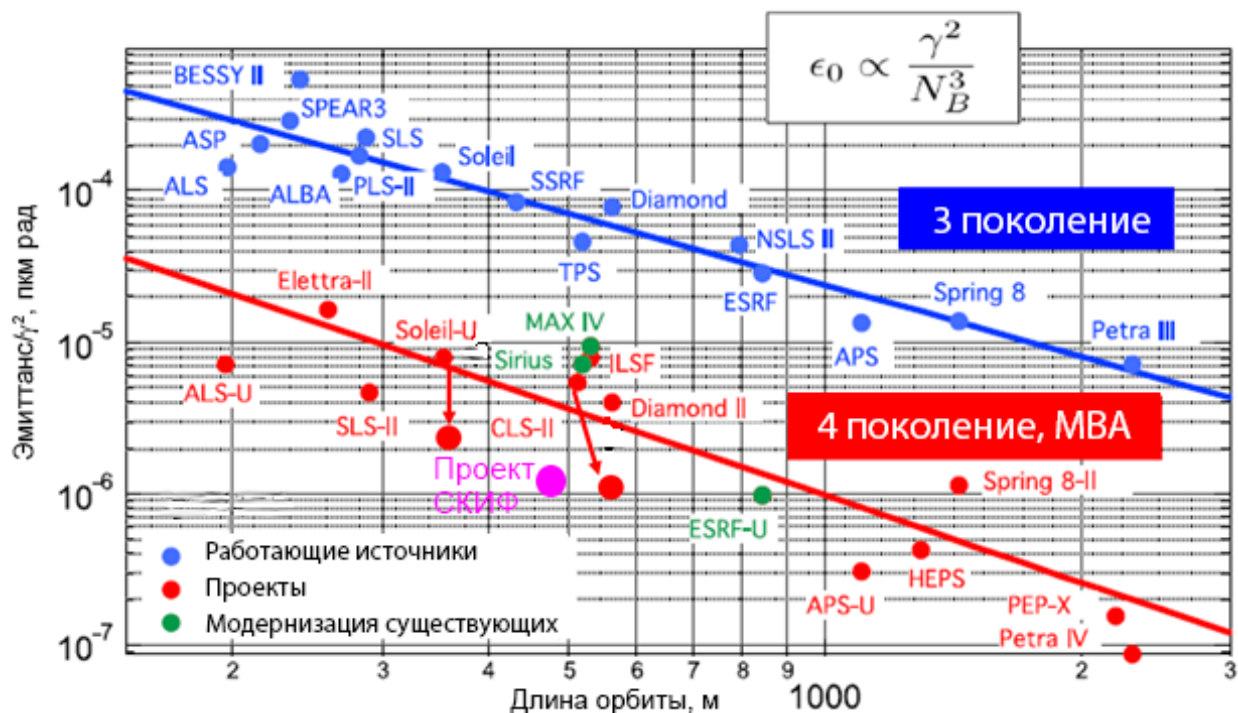
Следует также отметить, что один сверхпроводящий вигглер с максимальным полем 7,5 Тл установлен на источнике СИ в НИЦ «Курчатовский институт» и два в настоящее время находятся на этапе проектирования и прототипирования.

Тесная международная и внутрироссийская кооперация позволила отечественным научно-исследовательскими организациям накопить значительный опыт создания и эксплуатации как российской (КИСИ - НИЦ «Курчатовский институт» и ВЭПП-3, ВЭПП-4 – ИЯФ СО РАН), так и зарубежной исследовательской инфраструктуры на базе источников СИ. Это позволяет уверенно заявлять о готовности синхротронного сообщества к реализации пилотного проекта ЦКП «СКИФ» с целью создания сети современной исследовательской инфраструктуры на базе источников синхротронного излучения нового поколения с головной машиной в НИЦ «Курчатовский институт».



## 10. Текущее состояние.

В настоящее время в мире функционирует около 50 источников СИ, на которых функционирует порядка 1000 экспериментальных станций. При этом только около 20 из этих источников можно отнести к 3-го поколению. Прогресс последних лет в технологиях создания источников СИ, включая разработку новых магнитных структур оптики пучка электронов, привел к пониманию возможности создания источников СИ 4-го поколения. Сейчас на различных стадиях реализации (от предпроектных работ до начала эксплуатации) находится около 20 проектов. Два из них уже находятся на стадии строительства: ESRF-EBS (Франция) и SIRIUS (Бразилия) и один проект MAX-IV (Швеция) вышел на стадию эксплуатации пользователями. Общая картина источников СИ представлена на рис. 10.1. в соотношении эмиттанс/периметр, определяющем степень совершенства магнитной структуры источников СИ.



**Рисунок 10.1.** Из доклада D. Einfeld от 02.02.2018 о текущем состоянии в мире различных проектов по созданию источников СИ 4-го поколения. Горизонтальная ось - периметр основного кольца в метрах в логарифмическом масштабе, вертикальная ось – нормализованный эмиттанс в логарифмическом масштабе (параметр, определяющий достижимое разрешение на пользовательских станциях).

В России действуют две установки, которые можно отнести к предыдущим поколениям источников СИ. Это комплекс ВЭПП-3/ВЭПП-4М в ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и специализированный источник СИ – уникальная научная установка КИСИ в НИЦ «Курчатовский институт» (Москва). Реализация пилотного проекта ЦКП «СКИФ» позволит отработать ключевые решения (организационные, инженерно-инфраструктурные, ускорительные, пользовательские) и создать сеть современной исследовательской инфраструктуры на базе источников синхротронного излучения нового поколения с

головной машиной в НИЦ «Курчатовский институт». Это позволит на десятилетия обеспечить Российскую Федерацию высокопроизводительной современной инфраструктурой для решения актуальных задач материаловедения (включая технологии двойного назначения), биологии и медицины, создать условия для проведения исследований и разработок, соответствующие современным принципам организации научной и инновационной деятельности. Сеть источников СИ позволит сконцентрировать, закрепить и развить региональные интеллектуальные и инфраструктурные ресурсы для обеспечения выхода российских научных, образовательных организаций и производственных компаний на глобальные рынки знаний и технологий.

Необходимо отметить, что эта важнейшая задача уже решается - в сентябре 2017 года Минобрнауки России в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» через конкурс заключило три соглашения с ИЯФ СО РАН и НИЦ «Курчатовский институт» на проведение прикладных исследований до конца 2018 года совместно с Европейским центром синхротронного излучения (ESRF) по определению конфигурации и ключевых технических параметров основных систем источника синхротронного излучения 4-го поколения по одной из нижеперечисленных систем:

- магнитооптическая и вакуумная система,
- система диагностики и автоматического управления,
- встроенные источники излучения и ВЧ-система.

Кроме того, в целях продвижения проекта ИЯФ СО РАН подготовил предварительный вариант концептуального проекта источника СИ. Предложены первоначальные варианты отдельных систем, узлов, инфраструктуры. До конца 2018 года предстоит, взвесив все за и против, согласовать единую концепцию источника СИ в Новосибирске, с учетом концепции создания головной машины в НИЦ «Курчатовский институт» и концепции развития науки в Сибири «Академгородок 2.0».

### ***Разрабатываемая концепция источника СИ в Новосибирске.***

На текущем этапе выполнения предложенного проекта определены основные параметры ускорительного комплекса и предложена его основная структура. Гибридный мультибенд-ахромат положенный в основу магнитной системы является распространенным подходом и принят в ряде современных проектов создания новых источников СИ и в проектах модернизации существующих. Данная структура позволяет сочетать в себе низкий эмиттанс и достаточно большую динамическую апертуру.

Проведена классификация магнитных элементов, и начаты работы по разработке конструкций данных элементов. Коллектив ИЯФ СО РАН обладает необходимыми компетенциями для разработки, моделирования и изготовления широкого ряда магнитных элементов и других систем. Данный опыт является результатом активной контрактной деятельности по производству различных ускорительных систем для множества ускорительных центров в разных странах.

Предложена концепция высокочастотной системы и сделаны оценки необходимого количества резонаторов для успешного функционирования главного кольца.

Выработаны основные требования к вакуумной системе источника. Стоит отметить, что коллектив ИЯФ имеет реальный опыт изготовления высоковакуумных экструзионных алюминиевых камер и создания геттерных покрытий на внутренних поверхностях камер.

В качестве бустера предполагается реализовать проект, аналогичный бустеру NSLS-II (США), который был создан в ИЯФ СО РАН и успешно запущен в составе комплекса в 2014 году.

Предложен предварительный вариант зданий ЦКП «СКИФ» и инфраструктуры. Рассчитаны основные эксплуатационные параметры, которые позволяют оценить необходимые ресурсы для запуска, регулярной работы и развития ЦКП. Эти параметры сведены в Таблицу 10.1 и описаны в эскизном проекте.

Таблица 10.1. Основные эксплуатационные параметры ЦКП «СКИФ»

Рабочая энергия, ГэВ	3
Периметр, м	477
Эмиттанс, пм*рад (без учёта специальных решений)	186
Эмиттанс, пм*рад (с учётом специальных решений)	60
Рабочая частота, МГц	180
Тип инжекции	На полной энергии
Количество суперпериодов / прямолинейных участков для устройств генерации	18 / 14
Экспериментальных станций 1-й очереди	6
Площадь участка	15 Га
Площадь застройки, м <sup>2</sup>	60 000
Площадь зданий и сооружений, м <sup>2</sup>	80 000
Расход ХВ / ГВ, м <sup>3</sup> /сут	60 / 10
Расход тепла, Гкал в год	9000
Установленная электрическая мощность, КВА	20 000
Персонал, чел	300

В процессе подготовки проекта был проведен анализ наиболее актуальных пользовательских потребностей и на основании этого предложен список из шести экспериментальных станций первой очереди. Этот список обусловлен наибольшей востребованностью со стороны пользовательского сообщества, а также наличием целого ряда актуальных задач в различных областях физики, химии, биологии, геологии и катализа. В первую очередь включены следующие станции:

1. Станция «Микрофокус» (источник – сверхпроводящий ондулятор, тип 2, Таблица 10.2);
2. Станция структурной диагностики (источник –сверхпроводящий ондулятор, тип 1, Таблица 10.2);
3. Станция исследования быстропротекающих процессов (источник – сверхпроводящий вигглер, Таблица 10.3);

4. Станция XAFS-спектроскопии и магнитного дихроизма (источник – сверхпроводящий ондулятор, тип 2, Таблица 10.4);
5. Станция рентгеновской фазоконтрастной микроскопии и микротомографии (источник – сверхпроводящий вигглер, Таблица 10.3);
6. Станция «Электронная структура» (источник – сверхпроводящий шифтер, Таблица 10.5).

Станции первой очереди будут построены с учетом возможности перестройки инструментов формирования пучков фотонов и систем детектирования для эффективного сочетания различных экспериментальных методик.

Определены типы и параметры встроенных устройств генерации синхротронного излучения (Таблицы 10.2 – 10.5)

Таблица 10.2. Параметры сверхпроводящего ондулятора, тип 1:

Период, мм	15.6
Полная длина, м	2
Число периодов	128
Межполюсный зазор, мм	8
Внутренний размер вакуумной камеры, гор. x верт., мм	60x6
Амплитуда магнитного поля, Т	1.2
Параметр отклонения (ондуляторности) К	1.75
Фазовая ошибка, град.	<3

Таблица 10.3. Параметры сверхпроводящего вигглера:

Период, мм	53
Полная длина, м	1.7
Число периодов	30
Межполюсный зазор, мм	14.4
Внутренний размер вакуумной камеры, гор. x верт., мм	60x10
Амплитуда магнитного поля, Т	4.5

Таблица 10.4. Параметры сверхпроводящего ондулятора, тип 2:

Период, мм	18
Полная длина, м	2.3
Число периодов	128
Межполюсный зазор, мм	8
Внутренний размер вакуумной камеры, гор. x верт., мм	60x6
Амплитуда магнитного поля, Т	1.7
Параметр отклонения (ондуляторности) К	2.85
Фазовая ошибка, град.	<3

Таблица 10.5. Параметры сверхпроводящего шифтера:

Полная длина, м	1
Длина основного полюса, м	0,1
Межполюсный зазор, мм	12
Максимальная амплитуда магнитного поля, Т	4

## 11. Календарный план-график реализации проекта.

Проекты исследовательской инфраструктуры такого масштаба – это многоступенчатые процессы детализации, согласования и принятия решений. Принятие стратегических решений по этапности реализации проекта основывается на отечественном и международном опыте организаций-участников. Окончание каждой стадии сопровождается Ключевым решением заказчика о принятии определённого варианта продолжения работ на следующей стадии или этапе и связанное с ним финансовое обеспечение.

### ***Стадия 1 (этап 1): Разработка концепции.***

Длительность: 10 месяцев, ориентировочно - до конца 2018 года.

Задачи этапа:

1. Подготовка документов о создании организации (ЦКП «СКИФ»), структуры управления и каналов финансирования проекта.
2. Анализ текущих мировых разработок в технологиях создания источников СИ нового поколения.
3. Выбор оптической структуры кольца, определение основных параметров источника СИ и сценариев его работы на пользователей.
4. Определение списка инфраструктурных объектов и требований к ним. Помимо источника СИ и его инфраструктуры (подстанция, градирня и др.), для эффективной работы ЦКП требуется создание и развитие пользовательской научно-исследовательской инфраструктуры (комнаты для пробоподготовки и предварительных исследований, помещения для проведения сопутствующих исследований и др.)
5. Определение критических параметров и компонентов от которых зависит успешность реализации проекта.
6. Составление целей, задач и сроков выполнения следующей стадии.
7. Составление сметы следующей стадии.

### ***Ключевое решение 1 (КР1)***

Определяется:

- масштаб и комплектация проекта;
- его связь с другими проектами;
- последовательность создания инфраструктурных объектов;
- объем и механизмы финансирования проекта;
- объем работ, который необходимо выполнить для принятия КР2.

Итоговым документом является концептуальный проект ЦКП «СКИФ».

### ***Стадия 2 (этап 1): Проработка проекта.***

Длительность: 24 месяца, ориентировочно – до конца 2020 года.

Задачи:

1. Создание структуры управления проектом.
2. Финальная проработка параметров источника СИ.
3. Разработка технического дизайна основных компонентов и узлов источника СИ.
4. Изготовление прототипов критических компонентов. Для «СКИФ» в качестве критических элементов предстоит изготовить прототипы:
  - магнитовакуумная сборка элемента периодичности основного кольца, включая:
    - магнитные элементы на постоянных магнитах,
    - вакуумные камеры с напыляемым геттером,
  - импульсные магниты впуска/выпуска и источники к ним,
  - компоненты системы управления типа PSC и PLC на современной элементной базе,
  - клистрон.

Создание прототипов включает в себя создание комплектов оснастки и подготовки технологических линий для последующего производства серийных узлов.

5. Разработка технических спецификаций на изготовление элементов источников СИ.
6. Разработка технических спецификаций на создание пользовательских станций первой очереди. Составление сметы.
7. Разработка проекта и технических требований к заданию источника СИ и вспомогательных объектов инфраструктуры, определенных по результату предыдущего этапа.
8. Развертывание системы качества, контроля. Определение последовательности процедур, тестов и испытаний.
9. Составление целей, задач и сроков выполнения следующей стадии.
10. Составление сметы следующей стадии.
11. Выработка критериев эффективности проекта.

### ***Ключевое решение 2***

Задачи:

- Запуск выполнения основного объема работ по созданию ЦКП «СКИФ»;
- Корректировка целей и задач проекта исходя из текущей ситуации;
- Утверждение объемов и механизмов финансирования следующей стадии проекта;
- Утверждение объема работ, который необходимо выполнить для принятия КРЗ.

Итоговым документом является технический проект ЦКП «СКИФ», включающий проектно-сметную документацию.

### ***Стадия 3 (этап 1): Выполнение проекта.***

Длительность: 36 месяцев, ориентировочно – до конца 2023 года.

Задачи:

1. Строительство здания источника СИ и объектов инфраструктуры.
2. Создание 6 экспериментальных станций первой очереди.
3. Создание ускорителя и его запуск с получением основных параметров.
4. Получение первых научных результатов на пользовательских станциях первой очереди.

### ***Ключевое решение 3***

Задачи:

- Разрешение использование источника СИ, как центра коллективного пользования;
- Торжественное открытие ЦКП «СКИФ»;
- Корректировка организационной структуры, которая в дальнейшем будет управлять ЦКП «СКИФ»;
- Утверждение объемов и механизмов финансирования следующей стадии проекта.

Итоговым документом является акт сдачи в эксплуатацию

***Стадия 4 (этап 2): Первые 10 лет эксплуатации источника СИ после запуска.***

Длительность: 120 месяцев, ориентировочно – до конца 2033 года.

Задачи:

1. Доведение всех параметров источника СИ до проектных, включая надежную работу на пользователей не менее 6000 часов в год (в первый год после запуска).
2. Создание и запуск пользовательских станций второй очереди.
3. Проведение на работающем ускорителе исследования возможностей превзойти проектные параметры.

Совокупный календарный план-график выполнения проекта приведён в Приложении 1.

## 12. Стоимость проекта, требуемая вспомогательная инфраструктура.

### ***Оценка полной стоимости проекта:***

Для сооружения проекта класса мегасайенс в полном объеме необходимо финансирование со стороны Российской Федерации в следующих размерах: 2019 г. – 1 000 млн руб.; 2020 г. – 3 400 млн руб.; 2021 г. – 10 500 млн руб.; 2022 г. – 12 600 млн руб.; 2023 г. – 9 300 млн руб.; 2024 г. – 2 700 млн руб.; 2025 год – 2 700 млн руб.; 2026 год – 2 700 млн руб.; 2027 год – 2 700 млн руб.; 2028 год – 2 700 млн руб.; 2029 год – 2 700 млн руб.; 2030 год – 2 700 млн руб. (направление расходования средств - см. таблицу)

Сроки реализации 1-ой очереди проекта 2019-2024 годы. За этот период общие инвестиции в проект составляют около 40 млрд. рублей. Введение в эксплуатацию ЦКП «СКИФ» планируется до конца 2024 года.

С 2024 года планируется реализация 2-ой очереди ЦКП «СКИФ» (создание и развитие экспериментальных станций) в течение 10 лет (2024 – 2033 годы) и общей стоимостью 27 млрд. рублей.

### ***Оценка стоимости стадии 1 (этап 1): Разработка концепции – до конца 2018 года.***

Работы на данном этапе могут быть выполнены за счёт внутренних средств ИЯФ СО РАН и НИЦ «Курчатовский институт», а также при финансировании в рамках текущего соглашения с Минобрнауки России. В сентябре 2017 года Минобрнауки России в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» через конкурс заключило три соглашения с ИЯФ СО РАН и НИЦ «Курчатовском институт» на проведение прикладных исследований до конца 2018 года совместно с Европейским центром синхротронного излучения (ESRF) по определению конфигурации и ключевых технических параметров основных систем источника синхротронного излучения 4-го поколения.

### ***Оценка стоимости стадии 2 (этап 1): Проработка проекта.***

Стоимость стадии 2 будет определена в результате разработки концепции проекта на стадии 1. Ориентировочная стоимость технической проработки систем и узлов линейного ускорителя, бустера, транспортных каналов, основного кольца, вставных систем, инженерной инфраструктуры, зданий и сооружений, а также фронтэндов каналов и пользовательских станций составляет порядка 10 % от стоимости всего проекта, т.е. около 3,2 млрд. руб. Следует отметить, что указанная сумма включает модернизацию измерительных стендов и создание прототипов элементов магнитных структур и пользовательских станций.

Следует отметить, что в эту стоимость включены затраты на проектные работы, включая вибрационные исследования грунтов. Эти исследования являются ключевыми как для достижения проектных параметров источника СИ (в первую очередь – эмиттанта), так и для принципиальной возможности будущей модернизации.

### ***Оценка стоимости стадии 3 (этап 1): Выполнение проекта.***



Стоимость стадии 3 будет определена в результате проработки проекта на стадии 2. Окончательная смета может быть составлена только после того как будет выбран окончательный дизайн машины, будет определено окончательное место расположения ЦКП «СКИФ» и определены условия экспериментальной работы.

Средние капитальные затраты только на ускорительную часть проекта, используя опыт предыдущих проектов NSLS-II, ALBA, SOLEIL, DIAMOND и MAX IV, составляют примерно 2,1 млн. руб. за метр периметра основного кольца. Для периметра основного кольца в 477 метров это составляет порядка 10 млрд. рублей. В эту стоимость также включены затраты на линейный ускоритель, бустер на полную энергию, транспортные каналы. С учётом разработки специализированных решений для уменьшения эмиттанса источника, создания всего комплекса фронтэндов станций (до 30 каналов) стоимость ускорительного комплекса возрастает до 13 млрд. руб.

Оценка стоимости зданий (основного кольца, лабораторного корпуса, вспомогательных инфраструктурных и офисных помещений, включая работы по проектированию), а также коммуникаций, транспортной и инженерной инфраструктуры, включая дополнительную биозащиту для генераторов жёсткого рентгеновского излучения составляет порядка 12 млрд. руб.

Стоимость экспериментальных станций сильно варьируется в зависимости от решаемых задач и может составлять от 150 млн. руб. до 1,5 млрд. руб. Создание пользовательских станций первой очереди, разработка и создание устройств генерации СИ станций 1-й очереди, разработка проектов станций 2-й очереди и оборудование лабораторного корпуса оценивается в 10 млрд. руб.

#### ***Расходы после запуска.***

Расходы после запуска включают в себя эксплуатационные расходы, заработную плату персонала (из расчёта 300 человек) и составляют 1000 млн. руб. в год (табл. 12.2), а также развитие исследовательской инфраструктуры (2-я очередь проекта) для выведения ЦКП «СКИФ» на проектную мощность - 30 экспериментальных станций, что потребует дополнительно порядка 1000 млн. руб. ежегодно в течении 10 лет. С учётом налоговых отчислений в бюджеты разного уровня в этот период расходы ЦКП «СКИФ» составят 2,7 млрд. руб. в год в течении 10 лет – всего 27 млрд. руб.

В это время планируется принятие ряда мер по привлечению организаций реального сектора экономики для пользования услугами ЦКП и выполнения НИОКР. Объём средств, получаемых ЦКП ежегодно с момента выхода на проектную мощность составит не менее 200 млн. руб. в год.

**Таблица 12.1.** Оценка стоимости проекта по годам до ввода в эксплуатацию, включая трудозатраты и накладные расходы, млн. руб.

Состав работ	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Итого
<b>Разработка детальной технической документации</b>							
Разработка проекта ускорительной части и пользовательских станций	300	800					1100
Разработка проекта зданий и инженерной инфраструктуры	300	600					900
Модернизация испытательных стендов	300	300					600
Создание прототипов критических узлов	100	500					600
<b>Создание ЦКП «СКИФ»</b>							
Строительство зданий, инженерной и транспортной инфраструктуры		300 4 кв.	4100	5100	2500 1-2 кв.		12000
Создание ускорительного комплекса		300 4 кв.	4400	5000	3300 1-3 кв.		13000
Создание станций 1-й очереди и вспомогательной исследовательской инфраструктуры		600 3-4 кв.	2000	2500	2500 1-3 кв.		7600
Создание станций 2-й очереди (начала 2-й очереди реализации проекта)						1000	1000
Эксплуатационные расходы					1000	1700	2700
<b>Итого по годам</b>	<b>1000</b>	<b>3400</b>	<b>10500</b>	<b>12600</b>	<b>9300</b>	<b>2700</b>	<b>39500</b>

**Таблица 12.2.** Годовой эксплуатационный бюджет, без учета создания экспериментальных станций 2-ой очереди.

	млн. руб.
Обслуживание и расходные материалы	340
Заработная плата персонала (из расчёта 300 человек)	360
Коммунальные расходы	300
<b>Итого</b>	<b>1000</b>

Также следует отметить, что на эксплуатационные расходы при запуске ЦКП «СКИФ» в работу в конце 2023 года уже потребуются средства в размере 1 миллиарда рублей. Все цены приведены из расчёта 2017 года.